

2050

타
라

수
리

교육 참고자료집

수
리

리
리



환경부



공공기관 / 환경부 법정법인
환경보전협회

contents



| | |
|-------------------------------------|-----------|
| I. 탄소중립 개념 및 배경 | 12 |
| 1. 탄소순환과 탄소중립 | 13 |
| 1-1. 탄소순환의 원리 | 13 |
| 1-2. 탄소중립의 의미 | 14 |
| 2. 탄소중립 추진 배경 및 동향 | 16 |
| 2-1. 탄소중립 추진 배경 | 16 |
| 2-2. 국제사회의 탄소중립 추진 | 19 |
| 2-3. 우리나라의 탄소중립 추진 | 20 |
| II. 기후변화 원인 및 현황 | 24 |
| 1. 지구시스템과 기후변화 원인 | 25 |
| 1-1. 지구시스템과 기후변화 | 25 |
| 1-2. 기후변화 원인 | 28 |
| 2. 기후변화 현황 및 탐지 | 40 |
| 2-1. 기후변화 현황 | 40 |
| 2-2. 기후변화 탐지 | 48 |
| III. 기후변화 전망 및 영향 | 52 |
| 1. 기후모델과 미래 기후 | 53 |
| 1-1. 기후모델과 지구시스템 모델 | 54 |
| 1-2. 미래 기후변화 시나리오 | 55 |
| 1-3. 다양한 사회경제경로에 따른 미래 기후 | 59 |
| 2. 지구온난화와 기후변화 영향 | 68 |
| 2-1. 지구온난화 정도에 따른 우려 요인 | 69 |
| 2-2. 자연 생태계의 영향 및 위험 | 75 |
| 2-3. 사회경제 시스템의 영향 및 위험 | 79 |
| 3. 우리나라의 기후변화 영향 | 83 |
| 3-1. 분야별 우리나라 기후변화 전망 | 83 |
| IV. 기후저지선과 잔여탄소수지 | 90 |
| 1. 점진적 기후반응과 기후저지선 | 91 |
| 1-1. 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 이해 | 91 |
| 1-2. 1.5도 기후저지선 의미와 중요성 | 92 |



| | |
|-----------------------------------------|----|
| 2. 잔여탄소수지 산정과 탄소중립 | 94 |
| 2-1. 잔여탄소수지 산정 | 94 |
| 3. 국가 자발적 기여방안 정의 및 현황 | 98 |
| 3-1. 국가 자발적 기여방안(INDCs) 정의 및 평가체계 | 98 |
| 3-2. 자발적 기여방안 현황 | 99 |

V. 탄소중립 사회로의 전환..... 104

| | |
|---------------------------------------------|-----|
| 1. 국제사회의 탄소중립 추진 현황과 영향..... | 105 |
| 1-1. 국제사회의 추진경과 | 106 |
| 1-2. 주요 국가의 탄소중립 정책 | 113 |
| 1-3. 탄소중립을 위한 이행감시 시스템 | 116 |
| 1-4. 탄소중립과 경제 | 118 |
| 2. 우리나라의 2050 탄소중립 | 121 |
| 2-1. 2050 탄소중립 정책 | 121 |
| 2-2. 탄소중립기본법(기후위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법) ... | 126 |
| 2-3. 탄소중립 시나리오와 2030 국가 온실가스 감축목표 | 130 |
| 3. 부문별 감축수단 | 137 |
| 3-1. 전환부문 감축수단 | 137 |
| 3-2. 산업부문 감축수단 | 143 |
| 3-3. 건물부문 감축수단 | 147 |
| 3-4. 수송부문 감축수단 | 151 |
| 3-5. 농축수산부문 감축수단 | 158 |
| 3-6. 폐기물부문 감축수단 | 160 |
| 3-7. 수소부문 감축수단 | 163 |
| 3-8. 흡수원부문 | 165 |
| 3-9. CCUS부문 | 168 |
| 4. 탄소중립과 핵심기술 개발 | 170 |
| 4-1. 에너지전환 부문 핵심기술..... | 171 |
| 4-2. 산업분야 핵심기술 | 173 |
| 4-3. 수송 및 건물 부문 핵심기술 | 174 |
| 4-4. 탄소 처리 및 흡수원 핵심기술 | 175 |
| 4-5. 부문 공통 핵심기술 | 175 |
| 5. 탄소중립 사회 실현을 위한 사회적 과제 | 177 |
| 5-1. 제도적 기반 마련 | 177 |
| 5-2. 탄소중립 사회로의 공정하고 정의로운 전환 | 178 |

| | |
|------------------------------------------|-----|
| 5-3. 탄소중립 핵심기술의 개발 및 투자 확대 | 179 |
| 5-4. 모든 사회구성원의 참여를 위한 소통 · 협력 · 교육 | 179 |

VI. 기후변화 적응력 강화를 위한 방안들 182

| | |
|------------------------------------------|-----|
| 1. 기후변화 적응력 강화를 위한 방안 | 183 |
| 1-1. 지속가능한 사회 전환을 위한 기후 탄력적인 적응 방안 | 183 |
| 1-2. 우리나라의 적응 노력 | 186 |

부록 - 교수학습방법 190

| | |
|-------------------------|-----|
| 1. 교수기초 | 190 |
| 2. 교수기술 | 194 |
| 3. 교수설계 | 199 |
| 4. 교수방법 | 205 |
| 5. 수업평가 · 분석 및 개선 | 219 |



2050

개 요

‘2050 탄소중립 교육 참고자료집’ 활용 안내

1. 발간 배경 및 목적

우리나라는 2020년 10월 탄소중립 목표 선언 이후 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 마련(20.12.7.)을 시작으로 대통령 소속의 ‘탄소중립위원회’를 설치하고(21.5.29.), 전세계 14번째로 2050 탄소중립 비전과 이행 체계를 법제화한 ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하 ‘탄소중립기본법’)'을 제정(21.9.24.) 하였다. 아울러, 탄소중립위원회 논의와 이해관계자의 의견수렴을 거쳐 2050 탄소중립 시나리오와 2030년 국가 온실가스 감축목표 상향안을 국무회의에서 심의·확정(21.10.27.)하며 2050년까지 탄소중립 이행을 위한 이정표를 마련하였다.

앞서 다져진 기틀을 발판 삼아 국가 전반에서 탄소중립 사회로의 전환이 이루어질 것이다. 국민의 공감과 참여에 기반하여 탄소중립이 이행되도록 하기 위해서는 탄소중립의 필요성, 목표와 이행계획, 녹색생활 실천 등에 대한 국민의 이해가 필요하며, 이를 위한 교육이 학교와 사회교육 체계에서 이루어져야 할 것이다. 정부에서는 「교육기본법」개정(21.9.24. 공포·시행)과 「탄소중립기본법」제정으로 앞으로 모든 국민이 생태전환교육을 받고, 녹색생활 실천에 관한 교육을 받을 수 있도록 법적 기반을 마련하였다. 2021년 12월에는 관계부처와 시도교육청이 합동으로 ‘학교에서 시작하는 지속가능한 탄소중립 사회’를 목표로 한 ‘학교 기후·환경교육 지원 방안’이 마련되었으며, 이에 따라 미래세대가 ‘환경시민’으로 성장할 수 있는 다양한 정책들이 추진될 것이다.

「2050 탄소중립 교육 참고 자료집」의 발간 목적은 환경교육뿐만 아니라 우리 사회의 다양한 교육 영역에서 탄소중립 인식 제고를 위한 교육과정 및 교육자료 등의 개발에 참고할 수 있도록 하기 위함이다. 아울러, 교수자(강사)가 본 자료집을 활용하여 탄소중립 교육에 필요한 내용 요소를 이해하고, 다양한 수업을 설계 하며, 신뢰성 있는 자료를 토대로 학습자료를 준비할 수 있도록 도움을 주고자 발간되었다.

본 자료집은 탄소중립의 필요성에 공감하고, 탄소중립을 위해 앞으로 어떤 노력이 필요한지, 그 결과로 2050년에 우리는 어떤 사회를 그려낼지를 학습할 수 있는 내용으로 구성되어 있다. 기후변화 문제 해결의 중요성과 시급성, 그 방안으로서 제시된 탄소중립의 과학적 신뢰성, 국제적인 흐름 등에 대한 이해에서 탄소 중립 필요성에 대한 공감이 형성될 수 있다. 산업, 건물, 수송, 폐기물 등 각 부문에서의 온실가스 감축수단을 학습하는 것은 탄소중립 사회로 전환을 위해 어떤 노력을 해야하는지, 그 결과로 2050년에는 어떤 사회가 될 것인지에 대해 이해할 수 있도록 도와줄 것이다.

2. 주요내용 및 형식적 구성

「탄소중립 교육 참고 자료집」은 6개의 대주제로 구성되어 있으며, 16개 소주제, 48개 세부 주제로 구성되어 있으며, 부록으로 교수학습 방법을 1개 대주제, 5개 소주제로 구성하였다. 자료집의 내용은 기후변화 영향, 전망, 대응, 적응 등 각 분야별 전문가가 IPCC 보고서, 한국 기후변화 평가보고서 등 국내외 주요 자료를 토대로 집필하고, 탄소중립 시나리오 등 주요 정책자료 내용을 재구성하여 포함하였다.

| 대주제 | | 주요내용 |
|-----|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| I | 탄소중립 개념 및 배경 | 탄소중립 의미, 추진배경, 국제사회와 우리나라의 추진현황 |
| II | 기후변화 원인 및 현황 | 지구시스템과 기후변화 원인, 기후변화 현황 및 인위적 원인 규명 |
| III | 기후변화 전망 및 영향 | 기후변화 시나리오, 기후변화 영향(전지구적, 우리나라) |
| IV | 기후저지선과 잔여탄소수지 | 1.5℃ 기후저지선과 잔여탄소수지의 의미, 2050 탄소중립 목표 도출 |
| V | 탄소중립 사회로의 전환 | 국제사회 추진현황, 우리나라 추진현황, 부문별 감축수단, 탄소중립과 핵심기술 개발, 탄소중립 사회 실현을 위한 사회적 과제 |
| VI | 기후변화 적응력 강화를 위한 방안들 | 기후 탄력적인 적응 방안과 우리나라의 적응 노력 |
| 부록 | 교수학습 방법 | 교수기초, 교수기술 등 노하우와 교육내용을 구성하는 과정으로 '기획-운영-평가' 절차를 진행할 수 있도록 교수설계, 교수방법, 수업평가 및 분석 등 관련 내용 |

형식적으로는 대분류 수준에서 '교육개요', '교육목표', '교육요소'를 제시하고, 소분류 수준에서 개략적인 내용을 한눈에 파악할 수 있도록 '개요'를 제시하고, '세부내용', '교육주안점', '참고자료'가 함께 구성되어 있다. 세부내용에서 구체적이고 심층적인 내용은 '참고'와 '심화'로 구분되어 있다.

3. 수업 설계 시 내용 구성 안내

본 참고 자료집을 활용하여 수업 설계 시 교육 대상 및 시간을 고려하여 내용 요소를 선택할 수 있다. 짧은 수업일 경우에는 핵심 내용을 위주로 교육과정을 구성하며, 긴 수업일 경우에는 구체적인 내용과 다양한 사례를 포함할 수 있다.

다음은 1차시, 2차시, 4차시로 구성한 사례이며, 이를 참고하여 교육여건에 따라 수업 설계를 조정할 수 있다.

가. 1차시 교육과정

1차시 교육과정은 탄소중립의 개념, 필요성, 국제사회와 우리나라의 추진현황이 주요 내용이며, 탄소중립 추진 배경의 이해를 위해서 기후변화 원인과 현황 개요가 포함되어 있다.

| 대주제 | 교육주제 | 세부주제 |
|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Ⅰ. 탄소중립 개념 및 배경 | 1. 탄소순환과 탄소중립 | 1-1. 탄소순환의 원리 |
| | | 1-2. 탄소중립의 의미 |
| | 2. 탄소중립 추진배경 및 국제적 동향 | 2-1. 탄소중립 추진 배경 |
| | | 2-2. 국제사회의 탄소중립 추진 |
| 2-3. 우리나라의 탄소중립 추진 | | |
| Ⅱ. 기후변화 원인 및 현황 | 1. 지구시스템과 기후변화 원인 | 1-2. 기후변화 원인 |
| | 2. 기후변화 현황 및 탐지 | 2-1. 기후변화 현황 |

※ Ⅰ. 탄소중립 개념 및 배경의 2-2, 2-3은 Ⅴ. 탄소중립 사회로의 전환 1-1, 2-1~3의 개요에 해당

나. 2차시 교육과정

2차시 교육과정은 기후변화의 원인, 영향, 전망에 관한 구체적인 내용과 탄소중립 시나리오에서 제시된 부문별 온실가스 감축수단이 포함되어 있다. 기후변화 문제의 원인과 심각성을 과학적으로 이해하고, 에너지, 산업, 건물, 수송, 폐기물 등 분야에서 어떻게 탄소중립을 이행할 수 있는지에 대한 세부적인 내용을 학습할 수 있는 구성이다.

<1차시>

| 대주제 | 교육주제 | 세부주제 |
|------------------|----------------------|-------------------------------------------|
| Ⅰ. 탄소중립 개념 및 배경 | 1. 탄소중립의 의미 | 1-1. 탄소순환의 원리 |
| | | 1-2. 탄소중립의 의미 |
| Ⅱ. 기후변화 원인 및 현황 | 1. 지구시스템과 기후변화의 기본개념 | 1-1. 지구시스템과 기후변화 |
| | | 1-2. 기후변화 원인 |
| | | 2-1. 기후변화 현황 |
| Ⅲ. 기후변화 전망 및 영향 | 1. 기후모델과 미래 기후 | 1-1. 기후모델과 지구시스템 모델 |
| | | 1-2. 미래 기후변화 시나리오 |
| | | 1-3. 다양한 사회경제경로에 따른 미래 기후 |
| Ⅳ. 기후저지선과 잔여탄소수지 | 1. 점진적 기후반응과 기후저지선 | 1-1. 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 이해 |
| | 2. 잔여탄소수지 산정과 탄소중립 | 1-2. 1.5도 기후저지선 의미와 중요성 2-1. 잔여탄소수지 산정 |

<2차시>

| 대주제 | 교육주제 | 세부주제 |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Ⅴ. 탄소중립 사회로의 전환 | 1. 국제사회의 탄소중립 추진 현황과 그 영향 | 1-1. 국제사회의 추진경과 |
| | | 1-3. 탄소중립을 위한 이행감시 시스템 |
| | 2. 2050 탄소중립 추진전략 | 2-1. 2050 탄소중립 정책 |
| | | 2-2. 탄소중립기본법 |
| | | 2-3. 탄소중립 시나리오와 2030 국가 온실가스 감축 목표 |
| | 3. 부문별 감축수단 | 3-1~7. 각 부문별 개요 및 핵심 감축수단 |
| | | 3-8~9. 각 부문별 개요 및 핵심 흡수수단 |
| | 4. 핵심기술 | 4-1~5. 각 부문별 핵심개념 |
| | 5. 탄소중립 사회 실현을 위한 사회적 과제 | 5-1. 제도적 기반 마련 |
| | | 5-2. 탄소중립 사회로의 공정하고 정의로운 전환 |
| 5-3. 탄소중립 핵심기술의 개발 및 투자 확대 | | |
| 5-4. 모든 사회구성원의 참여를 위한 소통·협력·교육 | | |

다. 4차시 교육과정

4차시 교육과정은 기후변화뿐만 아니라 탄소중립과 관련한 기술, 과제 등 심화적인 내용을 다룰 수 있도록 구성하였다. 아울러, 기후위기 대응의 또 다른 축으로 기후변화 적응의 개요를 포함하였다.

| 대주제 | 교육주제 | |
|------------------------|--------------------------|--------|
| Ⅰ. 탄소중립 개념 및 배경 | 1. 탄소순환과 탄소중립 | (내용전반) |
| | 2. 탄소중립 추진 배경 및 동향 | (내용전반) |
| Ⅱ. 기후변화 원인 및 현황 | 1. 지구시스템과 기후변화 원인 | (내용전반) |
| | 2. 기후변화 현황 및 탐지 | (내용전반) |
| Ⅲ. 기후변화 전망 및 영향 | 1. 기후모델과 미래 기후 | (내용전반) |
| | 2. 지구온난화와 기후변화 영향 | (내용전반) |
| | 3. 우리나라의 기후변화 영향 | (내용전반) |
| Ⅳ. 기후저지선과 잔여탄소수지 | 1. 점진적 기후반응과 기후저지선 | (내용전반) |
| | 2. 잔여탄소수지 산정과 탄소중립 | (내용전반) |
| | 3. 국가 자발적 기여방안 정의 및 현황 | (내용전반) |
| Ⅴ. 탄소중립 사회로의 전환 | 1. 국제사회의 탄소중립 추진 현황과 영향 | (내용전반) |
| | 2. 우리나라의 2050 탄소중립 | (내용전반) |
| | 3. 부문별 감축수단 | (내용전반) |
| | 4. 탄소중립과 핵심기술 개발 | (내용전반) |
| | 5. 탄소중립 사회 실현을 위한 사회적 과제 | (내용전반) |
| Ⅵ. 기후변화 적응력 강화를 위한 방안들 | 1. 기후변화 적응력 강화를 위한 방안 | (내용전반) |

The logo for the year 2050, with the numbers 2, 0, and 5 in blue and the number 0 in green. It is positioned inside a white U-shaped graphic with a double orange border at the top of the page.

2050

A large, light green circle that serves as a background for the section header. It is centered on the page.

I

탄소중립 개념 및 배경



I. 탄소중립 개념 및 배경

교육 개요

- 지구 평균기온이 산업화 이전 대비 1°C 이상 상승
- 이상기후 현상이 더 빈번히 더 강한 강도로 전 세계 곳곳에서 나타나고 있으며, 기후변화의 영향은 이미 다양한 측면에서 나타나고 있음
- 2015년 파리협정에 따라 지구 평균온도 상승을 산업화 이전 대비 2°C보다 훨씬 아래로 유지하고, 나아가 1.5°C 이하로 억제하기 위하여 탄소중립 필요성 대두
- 전 지구 탄소순환, 탄소중립의 개념과 필요성, 국제적 동향을 살펴봄으로써 탄소중립 이해

교육 목표

- 탄소순환의 원리를 통해 탄소중립의 개념 이해
- 탄소중립의 추진 배경 및 필요성에 대해 이해하고, 국내외 추진 동향을 확인

교육 요소

| | | |
|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 탄소순환과 탄소중립 | 탄소순환의 원리 | - 탄소순환 정의 / 지구시스템 내 탄소순환 |
| | 탄소중립의 의미 | |
| 탄소중립 추진 배경 및 동향 | 추진배경 | - 지구 평균기온 상승 억제를 위한 국제적 논의 - 전 지구적 탄소중립 달성을 위한 국제적 흐름 |
| | 국제사회 및 우리나라 탄소중립 추진 | |

1. 탄소순환과 탄소중립

■ 탄소순환 원리

- **(탄소순환)** 지구상 암권(지권), 생물권, 수권, 기권 사이에 존재하는 탄소의 생지화학적 순환으로 정의되며, 인간 활동에 의한 화석연료 연소 및 산림 벌채로 인해 배출된 탄소는 일부 대기 중에 남아 이산화탄소 농도를 증가시키며, 일부는 해양과 생물권에 흡수

인간 활동과 관련한 지구시스템 탄소순환을 표현한 식

인간 활동에 따른 순배출량 = 대기 중 이산화탄소 농도 증가량 + 흡수량
(화석연료 연소, 산림 벌채 등) (해양, 생물권)

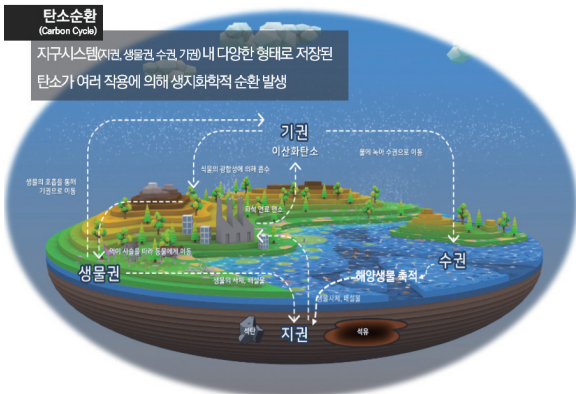
- **(대기 중 이산화탄소 농도 증가)** 산업화 이후 인간 활동에 의한 배출량이 흡수량보다 많아 대기 중 이산화탄소 농도가 크게 증가
 - ※ 'IPCC 6차 제1실무그룹 보고서('21.8)'에 따르면 '19년 12월 기준 대기 중 이산화탄소 농도는 지난 200만 년 기간 중 전례 없이 높은 농도인 410ppm으로 산업화 이전 대비 약 42% 증가

☞ 탄소순환, 탄소배출 및 흡수, 대기 중 탄소량

■ 탄소중립 정의

- **(탄소중립)** 대기 중 온실가스 농도 증가를 막기 위해 인간 활동에 의한 배출량을 감소시키고, 흡수량을 증대하여 순배출량이 '0'이 되는 것으로 '넷제로(Net-Zero)'라고도 부름
 - 배출량 감소 | 화석연료 연소, 수송 등 인간 활동에 의한 인위적 배출량을 0에 가깝게 감소
 - 흡수량 증가 | 숲 복원, 블루카본 기술, 네거티브 배출기술(탄소제거기술) 활용 등으로 흡수
- ※ 탄소중립기본법('21.9.24 제정)에 따른 온실가스는 이산화탄소, 메테인, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황 및 그 밖에 대통령령으로 정하는 물질이 해당됨

☞ 배출량 감소, 흡수량 증가, 순배출량 '0'(넷제로)



▲ 그림1 탄소순환 개념도

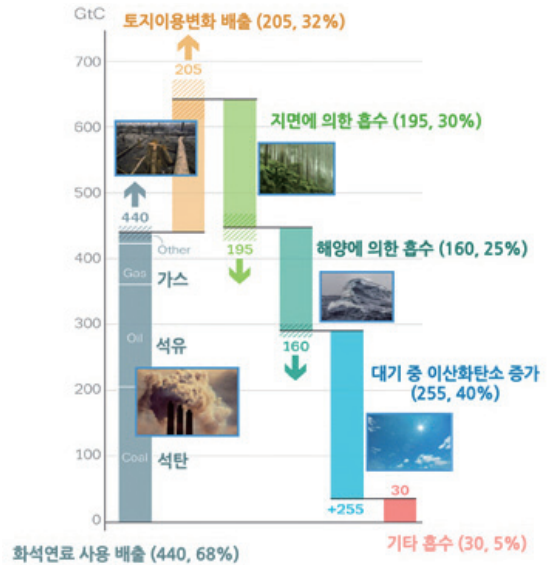
1-1. 탄소순환의 원리

가. 탄소순환 정의

- 지구시스템 내에서는 모든 물질의 양이 보존되기 때문에 존재하는 탄소의 절대량은 변하지 않으며, 한 시스템 내에서 탄소를 배출하면 다른 시스템 내에서 그 탄소를 흡수. 만약 대기 중으로 이동하는 탄소의 양이 대기 중에서 나가는 양보다 많으면 대기 중 이산화탄소 양이 증가하고, 지구 평균 온도가 상승하게 됨

나. 지구시스템 내 탄소순환

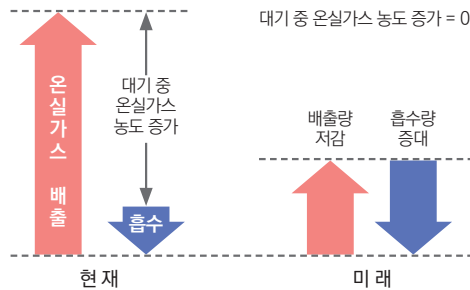
- 1850년부터 2018년까지 인류는 총 645GtC의 탄소를 배출하였으며, 이 중 68%는 에너지 생산, 산업 활동, 교통 등을 위한 화석연료 사용, 32%는 토지 개간, 건축, 벌목 등 토지이용에 의해 배출
- 배출된 이산화탄소 전체 양의 30%는 산림, 토지 등에서 광합성을 통해 식생에 저장하거나, 토양 등 지표에서 흡수되며, 25%는 해양에 의해 유기탄소가 녹는 물리과정과 플랑크톤 광합성으로 흡수하고, 나머지 약 40%가량이 대기 중에 남아 이산화탄소 농도를 높이고 있으며, 지구의 온도 상승에 기여



▲ 그림2 1850~2018년 누적 탄소배출량과 이동량

1-2. 탄소중립의 의미

- 탄소중립은 대기 중 온실가스 농도가 인간 활동에 의해 더 증가되지 않도록 순배출량이 0이 되도록 하는 것으로 '넷제로(Net-Zero)'라고도 부름. 특정 기간에 인간 활동에 의한 온실가스 배출량이 전 지구적 흡수량과 균형을 이룰 때 탄소중립이 달성됨



▲ 그림3 탄소중립 모식도

- 탄소중립은 아래 식과 같이 화석연료 및 산림 벌채 등으로 인한 배출량과 해양 및 생물권에 의한 흡수량 등이 같아져 대기 중 온실가스 농도 증가율이 0이 되는 것을 의미

$$\text{대기 중 온실가스 농도 증가량} = \text{배출량(화석연료, 산림 벌채)} - \text{흡수량(해양, 생물권)}$$

- 탄소중립을 달성하기 위해서는 차량 및 공장의 화석연료 연소 등과 같은 인위적 배출을 가능한 한 0에 가깝게 최대한 줄여야 하며, 나머지 온실가스는 숲 복원 및 산림관리 등 육상생태계 흡수원 개선 및 해양 흡수원 확대를 통해 전체 자연계 흡수량을 증가시키거나 탄소 포집, 활용, 저장과 같은 네거티브 기술(탄소제거 기술)을 활용해 제거



교육주안점

- 탄소중립의 개념을 설명하기 전에 그림과 식을 통해 탄소순환의 원리를 이해할 수 있도록 한다.
- 탄소의 배출, 이동, 흡수가 어떤 과정으로 이루어지는지 그림을 통해 이해하도록 하고, 나의 행동이 이 과정에서 어떤 변화를 일으키는지 살펴보도록 한다.

참고자료

| | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | - Global Carbon Budget 2020(P. Friedlingstein 외, 2020) - IPCC AR6 Report: Climate Change 2021(IPCC, 2021) - 지구온난화 1.5도 특별보고서(IPCC, 2018) |
| 참고 사이트 | - NASA earth observatory;The Carbon Cycle (https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle) - 대한민국 정책브리핑 (https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148881562#L4) |

2. 탄소중립 추진 배경 및 동향

■ 탄소중립 추진 배경

- **(지구기온 상승 억제 논의)** 국제사회는 기후 위기에 대응하기 위해 1990년대 중반부터 지구 평균기온 상승 억제를 위한 논의를 해왔으며, 2℃ 억제 목표에 대해 2010년 칸쿤 합의에서 공식적으로 채택 후 2015년 12월 파리협정에서는 산업혁명 이전(1850~1900년 평균) 대비 2℃보다 훨씬 아래로 유지하고, 나아가 1.5℃ 아래로 억제하기 위해 노력해야 한다는 목표를 설정
- **(2050탄소중립)** IPCC는 1.5℃ 특별보고서를 통해 전 지구적으로 지구 평균온도 상승을 1.5℃ 이내로 억제하기 위해서는 2050년까지 탄소 순배출량이 0이 되는 탄소중립 달성 해야함을 제시
 - ☞ **파리기후변화협약, IPCC, 2050년 탄소중립**

■ 국제사회의 탄소중립 추진

- COP25 이후 2050년 탄소배출 중립 목표를 담은 유럽 그린딜(European Green Deal)을 발표한 유럽연합 외 미국, 일본, 중국 등 주요국에서 탄소중립을 선언
- 공식선언과 별개로 2050탄소중립을 목표로하는 기후목표 상향 연합에 120개국 이 가입
- 탄소중립 선언과 함께 COP26, 국제메테인사약 등 국제사회에서 탄소중립을 위한 다양한 논의 중
 - ☞ **국제사회 탄소중립 선언, COP25, COP26, 국제메테인사약**

■ 우리나라의 탄소중립 추진

- 국내에서 2050 탄소중립 선언('20.10.28.)에 따라 2050탄소중립 추진 전략마련 및 탄소중립 기본법 제정, 탄소중립위원회 설치 등 탄소중립을 이행을 위한 기틀 마련
 - ☞ **2050탄소중립 선언, 2050탄소중립 추진전략, 탄소중립 기본법, 탄소중립녹색성장위원회**

2-1. 탄소중립 추진 배경

가. 지구 평균기온 상승 억제를 위한 국제적 논의

- IPCC 6차 보고서에 따르면 2011년부터 2020년까지 10년간 지구 평균온도는 산업화 이전 대비 1.1℃ 상승하였으며, 1℃ 이상 진행된 지구온난화에 의해 전 세계는 폭염, 가뭄, 폭설, 한파, 태풍 등 이상기후 현상의 강도와 빈도가 심해져 기후위기는 점차 가시화되고 있으며, 이에 따른 인명 및 경제적 피해가 우려되는 수준에 이르게 됨
- 지난 10년간(2009년~2018년) 우리나라에서 기상재해로 20만 명의 이재민이 발생하고 약 12조원 가량의 경제적 손실을 기록한 가운데, 기후변화에 따른 피해는 향후 이보다 더욱 늘어날 것으로 예상됨

참고

빨라지는 기후변화 속도

기후변화에 관한 정부 간 협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)는 2018년 발표한 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」에서 지구 평균온도가 산업화 이전(1850~1900년) 대비 2017년 기준 약 1°C 상승했으며, 2030~2050년에는 산업화 이전 대비 1.5°C 상승할 것으로 분석

그런데, 2021년 발표한 「제6차 평가보고서」의 「제1실무그룹 보고서」에서는 산업화 이전 대비 1.5°C 상승 시점을 이전 분석보다 10년 가량 앞당긴 2021~2040년으로 예측하며, 국제사회에 보다 선제적인 대응을 요구하였음

| 비교요소 | AR6 제1실무그룹 보고서 (2021년 발간) | AR5 제1실무그룹 보고서 (2013년 발간) |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 이산화탄소(CO ₂) 농도 | 410ppm (2019년) | 391ppm (2011년) |
| 전지구 평균 지표면 기온 (산업화 이전 대비) | 1.09°C 상승 (2011~2020년) | 0.78°C 상승 (2003~2012년) |
| 2081~2100년 전지구 평균 지표면 온도 상승 범위 | 1.0~5.7°C (산업화 이전 대비) | 0.3~0.48°C (1986~2005년 대비) |

- 국제사회에서는 1992년 브라질 리우데자네이루에서 기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)이 채택된 이후, 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 어느 수준으로 억제해야 하는지에 대한 논의가 대두되었으며, 1990년대 중반부터 2°C 억제 목표에 대한 공감대가 형성된 후 2009년 코펜하겐 합의에 포함되었고, 2010년 칸쿤 합의에서 공식적으로 채택하게 됨
- 1997년 교토의정서에서 기후변화를 억제하기 위한 국제적인 협력이 있었으나 그 이후 탄소 배출량은 70% 가량 증가하였으며, 기후위기는 더욱 심각해짐
- 2015년 12월 파리협정에서는 전 세계 195개국이 만장일치로 전 지구 평균기온 상승을 산업혁명 이전 (1850~1900년 평균) 대비 2°C보다 훨씬 아래로 유지하고, 나아가 1.5°C 아래로 억제하기 위해 노력해야 한다는 목표를 설정
- 파리협정에 이어 기후변화에 관한 정부간 협의체 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2018년 '지구온난화 1.5°C 특별보고서'를 통해 2°C 상승 억제와 비교해 1.5°C 이하로 상승을 억제했을 때 기후변화로 인한 위험을 크게 줄일 수 있다는 근거를 제시하였으며, 전 지구적으로 지구 평균온도 상승을 1.5°C 이내로 억제하기 위해서는 2050년까지 탄소 순배출량이 0이 되는 탄소중립을 달성하여야 한다고 제시(1.5°C 지구온난화 특별보고서, 2018)

심화

잔여 탄소수지와 2050 탄소중립

- 산업화 이후 현재까지 배출된 이산화탄소의 누적 배출량과 지구 평균온도 상승 간에는 선형에 가까운 상관 관계가 존재함. 이와 같은 선형성은 산업화가 시작된 시점부터 지금까지 유지
- 이산화탄소 누적 배출량과 지구 평균온도 사이의 선형성을 이용해 2100년 지구 평균온도가 특정 온도에 도달케 하는 이산화탄소의 총 누적 배출량을 계산할 수 있으며, 그 값에서 현재까지의 이산화탄소 누적 배출량을 뺀 값을 '잔여탄소수지(Remaining Carbon Budget)'로 정의

*잔여탄소수지 = 지구 평균온도가 특정 온도까지 도달하기 위한 총 누적 배출량 - 현재까지 누적 배출량

- 2100년까지 지구 평균온도 상승폭을 산업화 이전 대비 1.5℃ 상승하는 상황을 상정하고, 이를 위한 잔여탄소수지의 크기와 잔여탄소수지가 2100년까지 어떠한 추세로 배출되어야 하는지가 결정되는 과정에서 이산화탄소 순배출량이 '0'이 되어야 하는 시기 즉, 탄소중립(Net-zero)에 도달해야 하는 시기를 2050년으로 결정

※ 잔여탄소수지는 오버슈트(overshoot)와 고려하는 기체의 종류에 따라 크기가 달라지는데 파리협정에서는 오버슈트* 없이 모든 종류의 온실가스를 고려하여 잔여탄소수지를 도출

* (오버슈트) 지구 평균온도가 일시적으로 최종 목표 온도보다 높아지는 상황

나. 전지구적 탄소중립 달성을 위한 국제적 흐름

- 탄소중립을 위한 노력은 비단 기후변화 피해 최소화에만 국한되지 않으며, 탄소중립을 향한 국제사회의 빠른 변화 속에서 준비가 늦어진다면 국가 경쟁력의 하락이 불가피하며 경제위기로도 연결될 수 있음
- EU에서는 '탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)' 도입 계획을 발표하였으며, 온실가스 다배출 국가의 제품을 수입할 때 별도 배출권을 구입하도록 하여 수입품에 탄소 비용이 포함 되도록 하는 것이 주요 내용임
- 미국 역시 유사한 제도 도입을 검토 중이며, 이 같은 제도가 선진국 중심으로 확산될 경우 국내 기업제품의 수출단가가 인상되거나 수출량이 감소될 것으로 예측¹⁾
- 글로벌 기업들의 탄소중립 선언은 해당 기업에 부품, 원료 등을 납품하는 국내 연관 업계에도 영향을 미치고 있으며, 글로벌 자본시장 역시 탄소중립으로 전환 중으로, 주요 투자자들은 기업에 '기후위기 대응'을 주요 투자조건으로 제시하고 있음
- 우리나라는 무역의존도가 주요국 대비 높아 글로벌 시장경제 질서의 변화에 큰 영향을 받게되기 때문에 국제적 흐름에 신속하게 대응할 필요가 있음

1) 출처 : EU 탄소국경조정제도 주요 내용 및 시사점, 전국경제인연합회(2021.7.21)

2-2. 국제사회의 탄소중립 추진

- 2016년부터 세계 각국은 자발적으로 온실가스 감축 목표를 제출하였고, 기후위기에 대응하기 위하여 2019년 9월 뉴욕에서 '기후행동 정상회의'가 개최되었으며, 2019년 12월 제25차 기후변화당사국 총회(COP25)에서는 핵심 의제로 '행동해야 할 시간(Time for Action)'을 설정한 것처럼 국제사회는 기후변화 문제를 해결하기 위해 모든 역량을 집중
- 2050년 탄소배출 중립 목표를 담은 유럽 그린딜(European Green Deal)을 발표한 유럽연합 외 미국, 일본, 중국 등 주요 국에서 탄소중립을 선언하였으며, 공식 선언과 별개로 2050 탄소중립을 목표로 한 '기후 목표 상향 연합(Climate Ambition Alliance)'에 가입한 국가는 120개국에 달하는 상황임

표1 주요국 탄소중립 선언

| 국 가 | 시 점 | 탄소중립 시기 |
|-------|-------------------|---------|
| 영 국 | '19. 06. | '50년 |
| 프 랑 스 | '19. 11. | '50년 |
| E U | '20. 03. | '50년 |
| 캐 나 다 | '19. 10. | '50년 |
| 중 국 | '20. 09. | '60년 |
| 일 본 | '20. 10. | '50년 |
| 핀 란 드 | '20. 10. | '35년 |
| 남 아 공 | '20. 09. | '50년 |
| 스 웨 덴 | '17. 6., '20. 12. | '45년 |
| 미 국 | '21. 01. | '50년 |
| 한 국 | '20. 12. | '50년 |

※ (장기 저탄소 발전전략, LEDS) 파리협정은 기후변화 대응의 장기적 비전 관점에서 각 당사국에게 장기 저탄소 발전전략을 2020년까지 수립하도록 권고

출처 : 2050 탄소중립 포털(www.gihoo.or.kr/netzero)

- 2021년 11월 영국 글래스고에서 열린 제26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)에서는 탄소저감장치가 없는 석탄발전소의 단계적 감축 및 비효율적인 화석연료 보조금의 단계적 폐지를 촉구하였으며, 특별정상회의('21. 11. 1~2.)에서 120개국 정상들이 모여 지구온도 1.5℃ 이내 상승 억제를 위한 범세계적 기후행동 강화를 약속하였음
- 미국과 유럽연합(EU)의 주도로 2030년까지 전 세계에서 배출되는 메테인 배출량을 2020년 대비 최소 30% 감축한다는 목표 실현을 위한 국제메테인서약(Global Methane Pledge) 출범식이 제26차 기후변화당사국 총회(COP26) 정상회의 기간 중 개최되었고, 우리 정부도 동 서약에 가입하였음

▶ '탄소중립 추진배경 및 국제사회의 탄소중립'에 대한 자세한 내용은 [V-1. 국제사회의 탄소중립 추진 현황(p.105)] 확인

2-3. 우리나라의 탄소중립 추진

가. 2050 탄소중립 선언

- 국제사회 및 세계 각국의 탄소중립 노력 가속화와 함께 세계 11위('17년 기준) 온실가스 다배출국으로서 한국의 책임 부각
- 우리나라는 2021년 예산안 시정연설에서 2050년 탄소중립 목표 선언('20. 10. 28.)

나. 2050 탄소중립 추진전략 마련 및 탄소중립위원회 설치

- 중장기적으로 탄탄한 '2050 탄소중립' 사회로의 이행을 위해서, 정부는 온실가스 감축 중심의 "적응적(Adaptive) 감축"에서 새로운 경제·사회 발전전략 수립을 통해 "능동적(Proactive)대응"을 도모하는 '2050 탄소중립 추진전략' 발표('20. 12. 7.)
- 정부의 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장 추진을 위한 주요 정책 및 계획과 그 시행에 관한 사항을 심의·의결하기 위하여 대통령 소속의 '탄소중립위원회' 설치('21. 5. 29.)

다. 탄소중립기본법 제정 및 2030 국가 온실가스 감축목표 상향

- 기후위기 대응과 2050 탄소중립 달성을 위한 법적 기반으로서 전세계 14번째로 2050탄소중립 비전과 이행 체계를 법제화한 '기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(약칭: 탄소중립기본법)' 제정('21. 9. 24.)
 - 탄소중립을 지향하는 중간단계인 2030년 감축목표를 40%로 설정
 - 모든 주체가 협력하는 협치(거버넌스), 정의로운 전환, 중앙-지역협력 등 실질적 정책수단 마련
- 탄소중립기본법의 취지와 국제사회의 동향, 여러 이해관계자 의견수렴 등을 고려하여 2030 국가 온실가스 감축 목표를 기존 26.3%에서 40%로 상향('21.10.)

▶ '우리나라의 탄소중립'에 대한 자세한 내용은 [V-2. 우리나라의 2050탄소중립 (p.121)] 확인



교육주안점

- 지구 평균기온 상승 억제를 위한 국제적인 논의 과정과 국제협약과 IPCC 지구온난화 1.5°C 특별보고서 주요 내용을 통해 2050년 탄소중립의 추진 배경을 이해하도록 한다.
- 국내외 탄소중립 동향을 통해 국가수준에서 탄소중립을 위한 다양한 노력을 하고 있음을 인식하도록 한다.

참고자료

| | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>참고 문헌</p> | <ul style="list-style-type: none"> - EU의 온실가스 배출 추이(1990~2017)와 2050년 탄소중립 목표 설정 (김성균 · 김민주, 2019) - 지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC, 2018) - 대한민국 2050 탄소중립 전략(대한민국정부, 2020) - Climate, Nature and our 1.5°C Future: A synthesis of IPCC and IPBES reports (Yeo, S., 2019) |
| <p>참고 사이트</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 대한민국 정책브리핑 (https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148881562#L4) - UNFCCC NDC registry(https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Home.aspx) - 탄소중립 2050 포털(https://www.gihoo.or.kr/netzero/intro/intro0101.do) - 기상청기후정보포털(http://www.climate.go.kr/) |



The logo for the year 2050, with the digits '20' in blue and '50' in green, set against a background of orange double-lined curved borders.

2050

A large, bold, orange Roman numeral 'II' centered within a light orange circular background.

II

기후변화 원인 및 현황

Ⅱ. 기후변화 원인 및 현황

교육 개요

- ‘2050 탄소중립 선언’ 등 국내외에서 탄소중립의 중요성이 강조되고, 전 국민의 관심이 증가
- 탄소중립이 도입된 배경에는 기후변화가 있으며, 탄소중립에 대한 이해 증진을 위하여 기후 변화의 원인 및 현황 제시

교육 목표

- 지구시스템과 기후환경 변화의 기본 개념 이해
- 기후변화 요인을 자연적 요인과 인위적 요인으로 나누어 이해
- 기후변화 현황을 지구시스템 구성 요소별로 이해
- 지구온난화의 원인이 되는 인간 활동에 의한 인위적 온실가스 배출 이해

교육 요소

| | | |
|-------------------|-------------|-------------------------------------------------------|
| 지구시스템과 기후변화 원인 | 지구시스템과 기후변화 | - 지구시스템 정의, 날씨와 기후의 차이, 기후변화 정의 |
| | 기후변화 원인 | - 기후변화 요인, 온실효과와 지구온난화, 온실 가스 배출 추세 |
| 기후변화 현황 및 탐지 | 기후변화 현황 | - 전지구적(대기, 수권, 빙권, 지권, 생물권)의 기후변화 현황 - 한반도 기후변화 현황 |
| | 기후변화 탐지 | - 기후변화 탐지와 원인규명, 인위적 원인에 의한 기후변화 규명 |

1. 지구시스템과 기후변화 원인

■ 지구시스템과 기후변화

- 지구시스템은 대기권, 수권, 빙권, 지권, 생물권의 5개 권역으로 구성되며, 권역별로 물질과 에너지가 끊임없이 순환하며, 상호작용을 통해 다양한 날씨와 기후를 만들어 냄
- 자연적 · 인위적 요인에 의해 지구시스템이 변화하며 기후가 장기적으로 변하는 '기후변화' 발생
 - ☞ 지구시스템 정의, 날씨와 기후의 차이, 기후변화의 정의

■ 기후변화의 원인

- 기후변화는 자연적 · 인위적 요인에 의해 발생하고 있으며, 인간활동으로 필요 이상 늘어난 온실가스가 지표에서 방출되는 지구복사에너지의 일부를 가두어 지구평균기온을 높이는 지구온난화를 발생시키고, 지속적인 지구온난화로 기후변화가 빠르게 진행

| | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 자연적 요인 | - (내부변동성) 지구시스템 구성 요소 간 상호작용으로 열의 순환, 태양에너지 반사량 변화, 탄소순환 등을 통해 기후시스템에 영향 - (자연 강제력) 화산분출물에 의한 태양에너지 흡수량 변화 및 태양흑점, 지구 공전궤도 변화로 인한 태양에너지 입사량 변화에 따른 기후영향 |
| 인위적 요인 | - 화석연료 연소에 따른 온실가스 증가 - 산업화로 인한 에어로졸 증가 - 토지 피복 및 산림 파괴로 태양에너지 반사율 변화, 지구시스템 변화 등 |

☞ 온실효과와 지구온난화, 기후변화 요인, 온실가스 배출

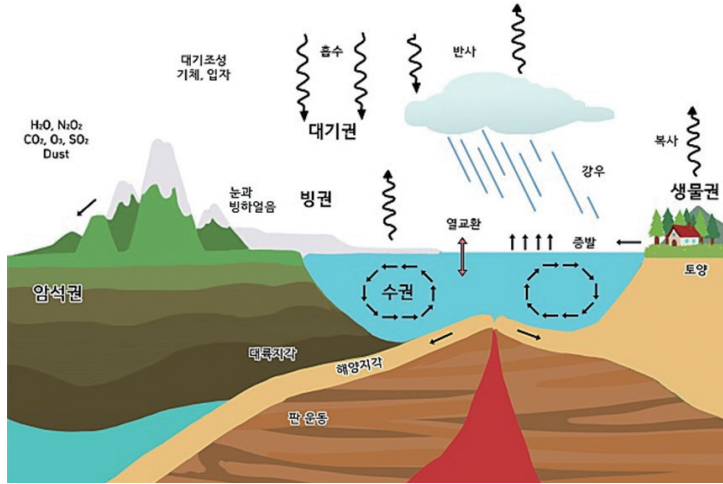
1-1. 지구시스템과 기후변화

가. 지구시스템의 정의

- 지구시스템은 서로 밀접한 관련성을 가지며 지구 환경을 구성하는 5개 권역으로 구성된 집합체로 기후시스템과 동일한 의미로 사용

| | |
|-----|--------------------------------------------------------------|
| 대기권 | 우리가 살고 있는 지구를 에워싸고 있는 공기층 |
| 수 권 | 지구에 있는 모든 물 즉, 바다와 육지에 분포하는 모든 물 |
| 빙 권 | 지구나 해양 표면 위와 아래가 모두 눈, 얼음, 계속 얼어있는 땅으로 구성되어 있는 곳 |
| 지 권 | 기후시스템 중에서 암석과 토양 부분, 암권으로도 지칭 |
| 생물권 | 인간을 포함하여 수백만 종의 작은 생물들을 포함해 아직 분해되지 않은 죽은 생물까지도 포함하는 지구의 생물들 |

- 각 권역 사이의 끊임없는 물질 및 에너지의 상호교환과 피드백 작용으로 지구시스템 유지 및 변화가 이루어지며, 권역 사이의 복잡한 상호작용에 따라 날씨 및 기후가 결정됨
- 19세기 산업혁명 이후 인간 활동에 의한 급격한 대기 중 온실가스의 증가는 지구온난화와 지구시스템 변화에 영향을 줌



▲ 그림4 지구시스템의 상호작용

심화

지구시스템의 5개 권역(출처 : 기상학회)

| | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 대기권 | <ul style="list-style-type: none"> - 중력으로 인해 지구를 둘러싸고 있는 기체들로 구성 - 대기권은 약 78%의 질소, 21%의 산소가 전체의 99%를 구성하며, 나머지 1% 정도는 아르곤, 이산화탄소 등과 같은 미량의 기체들로 구성 - 대기권은 높이에 따른 기온의 증감에 따라 대류권, 성층권, 중간권, 열권으로 구분 <ul style="list-style-type: none"> · (대류권) 지표면에 가장 근접한 층으로 복사열에 의해 지표가 가열되기 때문에 고도가 높아 질수록 온도가 낮아지며, 열역학적으로 불안정하여 구름, 눈, 비, 바람 등의 기상현상 발생 · (성층권) 오존이 태양으로부터 오는 복사에너지 중 자외선을 흡수하여 고도가 올라갈수록 온도가 높아짐. 열역학적으로 안정하여 항공기의 운항 고도로 이용 · (중간권) 고도가 올라갈수록 온도가 낮아지지만 수증기가 적어 기상현상은 미발생 · (열 권) 고도가 올라갈수록 온도가 높아지며, 태양풍에 의한 원자의 전리화로 오로라 발생 |
| 수 권 | <ul style="list-style-type: none"> - 지표 근처의 물로 이루어져 있으며, 지구 전체 표면의 약 70%를 차지 - 약 97% 이상이 해양에 존재하고 약 2%의 물이 북극과 남극의 빙하와 만년설 등 고체 상태로 존재하며, 나머지는 지하수, 강, 호수, 토양 내부 등에 존재 - 다양한 경로의 물 순환으로 다른 권역과 물 교환을 하고, 대기권에서 수증기는 온실가스 역할을 하여 지구복사에너지를 흡수·재방출 함 - 해양 표층에서 태양복사 에너지를 흡수하여 열대지방의 열을 극지방으로 전달 |

| | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 빙 권 | <ul style="list-style-type: none"> - 지구상의 물의 약 2%가 고체의 형태로 존재 - 빙하, 만년설, 눈, 영구동토층 등 고체 형태로 구성되며 지구 전체 표면의 5% 차지 - 얼음은 물의 고체 상태이기 때문에 수권의 한 부분으로 간주됨 - 태양 빛의 반사도가 매우 높아 에너지 관점에서 지구시스템에 미치는 영향이 큼 |
| 지 권 | <ul style="list-style-type: none"> - 암석으로 구성된 지각과 상부 맨틀의 일부를 포함하여 암석과 광물로 구성 - 암석권 표면 풍화작용에 따라 다양한 토양층 존재 - 지구 내부 방사능물질 붕괴에 따라 지열 발생으로 암석권 온도는 깊이에 따라 증가 |
| 생물권 | <ul style="list-style-type: none"> - 지구상 모든 생물과 생태계를 가리키며 동물, 식물, 미생물 등으로 구분 - 자연환경에 따라 적응하거나 진화하고, 자연환경과 에너지를 주고받으며 상호작용 - 생물권 활동으로 지권 풍화, 수권 물순환, 대기권 대기 조성, 기후변화에 따라 서식지 변화 |

나. 날씨와 기후의 차이

- 날씨는 특정 지역에서 시시각각 변하는 기상현상으로 날씨의 구성 요소로는 기온, 습도, 강수량, 풍향, 풍속 등이 있음
- 기후는 일정한 지역에서 보통 30년 이상의 오랜 기간에 걸쳐 나타나는 날씨의 평균적인 상태를 의미

심화

기후변화와 기상의 관계(출처 : 국가기후변화적응센터)

일반적으로 기후는 평균기상(average weather)이라고 정의되고 있으며, 기후변화와 기상은 관련성이 있음. 관측치를 보면 기상에 변화가 있음을 알 수 있는데, 기후변화를 확인해주는 것은 이러한 시간 경과에 따른 기상변화의 통계자료이며, 기상과 기후는 서로 밀접히 관련되어 있지만 중요한 차이점이 존재. 기상과 기후를 흔히 혼동하는 예 중의 하나는 과학자들에게 지금부터 몇 주 후의 기상을 예측할 수 없는데 향후 50년 뒤의 기후를 어떻게 예측할 수 있는지 묻는 경우임. 기상의 경우 며칠 이상은 예측이 불가능하지만, 대기 조성이나 기타 인자들의 변화로 인한 기후변화(즉, 장기적 평균 기상)를 전망하는 것은 다루기 훨씬 쉬움. 또 다른 예로는 지구상의 추운 겨울이나 한파가 발생할 경우 지구온난화가 아니라고 생각하는 것이고, 기후가 변함에 따라 그 빈도와 강도는 변할지라도 극단적인 더위와 추위는 항상 존재하며, 기상데이터를 공간, 시간적으로 평균해보면 지구가 온난화되고 있다는 사실이 명확해짐

기후는 대기, 육지, 해양, 눈, 얼음, 생물체를 포함하여 전체 지구계의 상태를 다루는 것이라고 볼 수도 있음. 이들이 전 지구적 배경 조건으로 작용하면서 기상 패턴을 결정하는 것. 많은 인자들이 계속해서 기후에 영향을 주고 있지만 과학자들은 인간 활동이야말로 지배적인 강제력이었고 지난 50년간 관측된 온난화의 대부분도 인간 활동이 원인이었다고 결론을 내림

기후가 변함에 따라 특정 종류의 기상현상이 일어날 확률도 영향을 받음. 예를 들면 지구 평균기온이 상승하자 어떤 기상현상은 빈도와 세기가 더 강해졌고(예 : 열파와 집중호우), 반면에 어떤 기상현상은 더 드물게 출현하고 더 약해짐(예 : 극단적 한파).

다. 기후변화의 정의

• 일반적인 정의 | Climate Change

화산폭발, 태양활동 변화, 지구궤도 변화 등의 자연적 요인 혹은 화석연료 연소, 토지이용, 산업 활동 등 인간 활동에 의한 요인에 의해 전체 기후시스템이 장기적으로 변동하거나 변화하는 것

• IPCC²⁾ 정의 | Intergovernmental Panel on Climate Change

오랜 기간(수십 년 또는 그 이상) 동안 지속되면서 기후의 평균 상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미 있는 변동으로 '인간 활동에 의한 것'이든 '자연적인 변동'이든 시간 경과에 따른 기후의 변화를 포함함

• UNFCCC³⁾ 정의 | United Nations Framework Convention on Climate Change

전 지구 대기의 조성을 변화시키는 인간의 활동이 직접적 또는 간접적인 요인으로 일어나고, 장기간에 걸쳐 관측된 자연적인 기후변동성에 추가하여 일어나는 기후의 변화로 정의. UNFCCC는 대기 조성을 변화시키는 인간 활동으로 인한 기후변화와 주로 자연적 요인에 의해 일어나는 기후변동성을 구분

1-2. 기후변화 원인

가. 기후변화 요인

• 기후변화가 일어나는 원인은 자연적 요인과 인간의 활동에 의한 인위적 요인으로 구분할 수 있음

자연적 요인



지구시스템 상호작용



화산폭발로 인한 화산재



태양에너지 변화

인위적 요인



화석연료 연소 등 온실가스 증가



에어로졸 발생



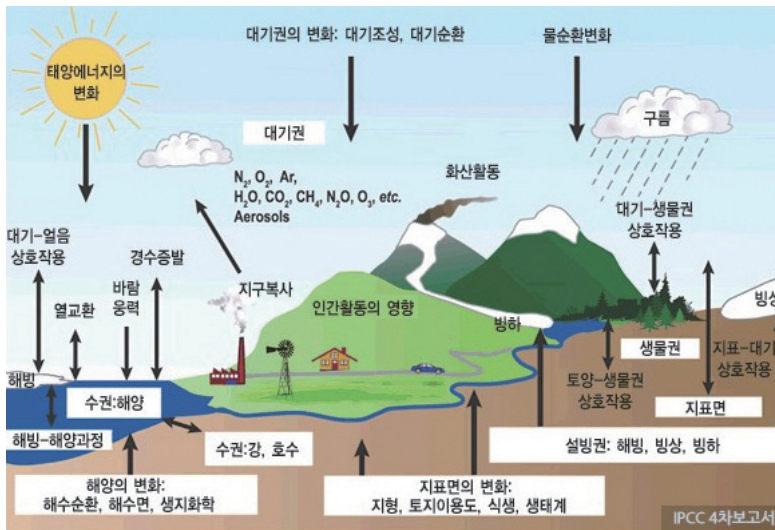
도시화로 인한 숲의 파괴

2) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 기후변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제 협의체. 기후변화 문제의 해결을 위한 노력이 인정되어 2007년 노벨 평화상 수상

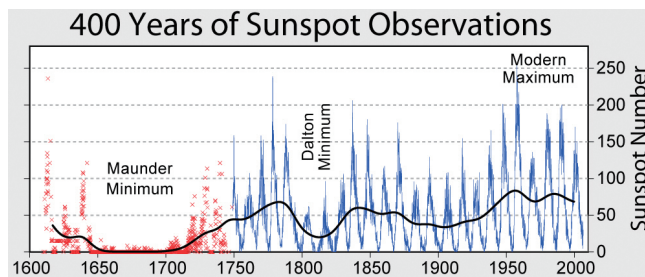
3) UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change) 기후변화에 관한 국제연합기본협약(The United Nations Framework Convention on Climate Change. 약칭 유엔기후변화협약 혹은 기후변화협약 혹은 UNFCCC 혹은 FCCC)은 온실 기체에 의해 벌어지는 지구온난화를 줄이기 위한 국제 협약기후변화협약은 1992년 6월 브라질의 리우데자네이루에서 체결되었고, 아산화탄소를 비롯하여 각종 온실 기체의 방출을 제한하고 지구온난화를 막는 데 주 목적이 있음

1) 자연적 원인

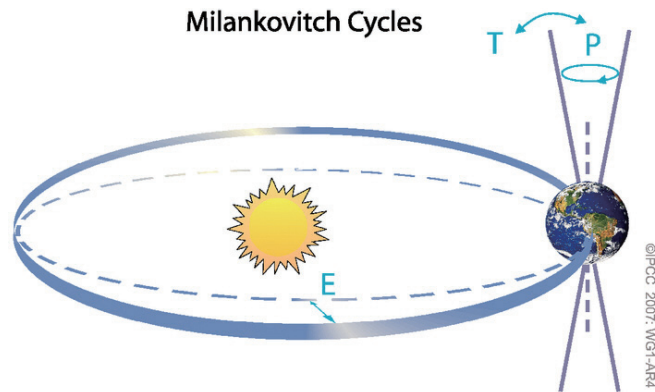
- 지구시스템 구성 요소 간 상호작용 | 대기가 지구시스템의 주요 구성 요소인 대기권, 수권, 빙권, 지권, 생물권의 상호작용을 통해 끊임없이 변화하는 과정에서 기후변화를 유발. 대기권은 기상현상을 통해 물과 열적인 순환에 영향을 주며, 수권은 대기에 열과 수증기를 공급하고, 빙권은 태양에너지의 반사도(Albedo)를 변화시켜 지구 복사량에 영향을 주고, 지권은 식생과 토양을 통해 대기와 에너지를 교환하며, 생물권은 탄소순환 등으로 기후시스템에 영향을 미침
- 화산폭발 | 화산 분출물이 성층권까지 상승하여 수개월에서 수 년동안 머물며 태양빛을 흡수하여 성층권 온도는 상승하나 대류권에 도달하는 태양빛이 감소되어 대류권 온도를 하강시킴
- 태양에너지의 변화 | 태양 흑점 수의 변화 등 태양활동에 의해 태양에너지가 변화하여 기후 변화가 발생함
- 궤도 변화(밀란코비치 주기) | 지구의 공전 궤도는 10만 년을 주기로 형태가 바뀌고, 지구의 자전축 기울기는 4만1000년을 주기로 조금씩 바뀌고, 자전축은 2만6000년을 주기로 세차운동을 하는데, 이와 같은 궤도 변화에 따라 태양에너지를 받는 양이 위도별로 다르게 되므로 천문학적 시간 규모의 기후 변동이 발생함



▲ 그림5 기후계 출처 : 국가기후변화혁신센터



▲ 그림6 1600년 이후 태양 흑점 관측 결과 파란색 그래프가 태양활동 주기 숫자를 매년 구간 출처 : Robert A. Rohde, Global Warming Art Project



▲ 그림7 빙하기 순환을 주도하는 지구궤도의 변화

출처 : IPCC 2007 : WG1-AR4 보고서

2) 인위적 원인

- **온실가스** | 인류 활동으로 발생한 지구 온실가스(GHGs: Green House Gases) 배출량은 산업화 이전 시대부터 서서히 증가했으나, 산업화 이후인 1970년부터 2004년 사이에 70% 증가. 제3차 당사국 총회(1997년 12월)에서는 주요 6대 온실가스로 이산화탄소(CO₂), 메테인(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 지정. 온실가스는 지표에서 나오는 장파복사의 부분적 담요 역할을 하며, 이러한 담요 효과를 자연적 온실효과(natural greenhouse effect)라고 부름. 인간 활동은 온실가스 방출을 통해 이 담요 효과를 강화해 왔으며, 그 예로 대기의 이산화탄소 농도는 2019년 기준 410ppm으로 최근 200만 년간 전례가 없는 농도로 산업화 이전 280ppm보다 40% 이상 급증함. 이 증가분은 인간 활동, 그중에서도 주로 화석연료 연소 등이 원인으로 알려짐. 이러한 온실가스들은 대기 중에서 장기간 또는 단기간 머무르며 지구 대기의 화학적 조성을 변경시키고 기후변화를 유발하고 있음
- **에어로졸의 영향** | 에어로졸이란 대기중에 부유하는 미세입자로 액체나 고체의 입자가 주로 공기와 같은 기체 내에 미세한 형태로 균일하게 분포되어 있는 것을 말함. 크기, 농도, 화학적 조성은 매우 다양한데 직접적으로 대기에 방출되는 에어로졸도 있고 방출된 화합물로부터 생성되는 에어로졸도 있음. 화석연료와 바이오매스 연소로 인해 황화합물, 유기화물, 검댕(black carbon)을 함유하는 에어로졸이 증가했는데 온실가와 마찬가지로 인간의 활동으로 인한 산업화가 대기 중 에어로졸의 양을 특히 변화시켰으며, 이는 기후변화에도 영향을 미치고 있음. 인간 활동으로 인해 발생한 에어로졸의 경우 며칠 동안 대기 중에 남아 있기 때문에 산업 지역과 같은 발원지역 부근에 집중되는 경향성을 보임
- **토지 피복 변화와 산림 파괴 영향** | 과잉 토지 이용이나 장작, 숯 채취 등에 의한 토지이용도의 변화와 도로 건설, 벌목, 농업 확장, 도시화 및 산업화로 인한 산림 파괴는 지표면의 반사율 변화를 유발시켜 결국 기후변화를 야기함. 지난 30년간 목재 등 산림 자원의 채굴과 개발 사업으로 남미 아마존강 유역의 우림 면적이 705만 km²에서 550만 km²로 줄었고, 이와 같은 대규모의 산림 제거는 물 순환에 심각한 영향을 미쳐 산림의 성장이나 농업에 부정적 영향을 끼치고, 또한 산불 등에 의해 대기 중으로 이산화탄소를 배출하여 온실효과에 영향을 미치게 됨

심화

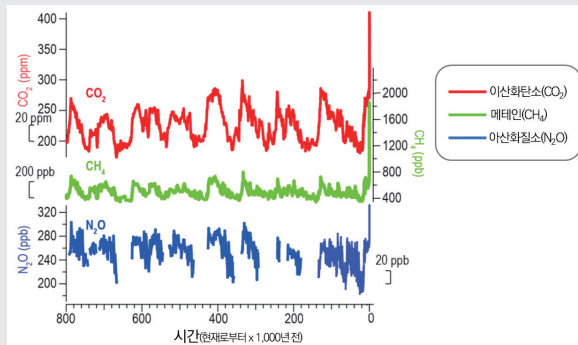
온실가스와 지구온난화

1. 온실가스(출처 : 기후변화개론, KEI)

가. 온실가스 정의

- 태양으로부터 방출되는 짧은 파장의 복사는 통과시키고 지구로부터 방출되는 긴 파장의 일부를 흡수함으로써 지구 대기에 온실효과를 가져오는 기체
- 보통 대칭의 분자구조를 가지고 있는 기체(질소 N₂, 산소 O₂)가 아닌 비대칭 분자구조를 가진 기체(이산화탄소 CO₂, 아산화질소 N₂O)가 해당

나. 과거 대기 조성(출처 : 기후변화개론, KEI)



▲ 그림8 시간 흐름에 따른 과거 대기 조성 출처 : IPCC 6차 평가보고서(2021)

- 그림8은 남극 얼음의 중수소 농도 변화(남극 빙상 면적과 온도 변화를 간접적으로 나타냄)와 대기의 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O의 농도 변화, 남극 온도 변화는 남극 얼음에서 추출한 고기후 대응 자료(일반적으로 프록시[proxy] 자료라고도 부름)를 이용해 복원되었으며, 대기의 온실가스 농도는 빙하코어 내 공기와 최근 대기 측정 자료로부터 분석되었음. 전체 기간은 65만 년이며, 음영으로 표시된 기간은 현재와 과거 간빙시대 온난기를 나타냄
- 과거 65만 년 동안의 주요 온실가스 농도의 변화를 살펴보면 이산화탄소, 메테인, 아산화질소의 농도는 증가와 감소를 거듭하여 왔으나 최근 몇 백 년 사이 급격하게 상승함

다. 온실가스별 특징(출처 : 기상청)

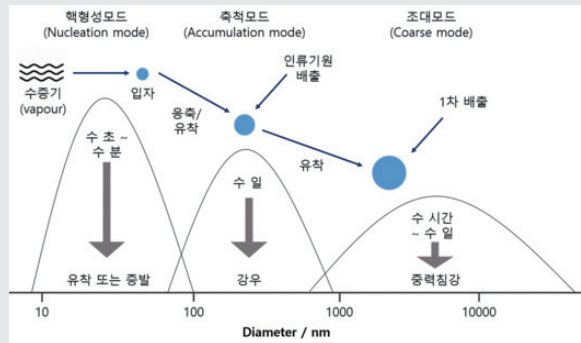
- 이산화탄소는 다른 온실가스에 비해 지구온난화지수가 '1'로 낮지만, 대기 조성비율이 가장 높아 지구온난화 기여도가 가장 높음 ※ GWP : 이산화탄소 1kg과 비교하여 나타낸 해당 가스의 상대적 온난화 효과

| 온실가스 | 화학식 | 체류시간(년) | 발생원 | 지구온난화지수(GWP) |
|--------|------------------|---------|---------------------------|--------------|
| 이산화탄소 | CO ₂ | 5~200 | 산림 벌채, 에너지 사용, 화석연료의 연소 등 | 1 |
| 메테인 | CH ₄ | 12.4 | 가축사육, 습지음식물쓰레기, 쓰레기더미 등 | 28 |
| 아산화질소 | N ₂ O | 121 | 석탄, 폐기물 소각, 화학비료 등 | 265 |
| 염화불화탄소 | CFC-113 | 85 | 냉매체, 발포제, 충전제 | 5,820 |
| 육불화황 | SF ₆ | 3200 | 전기제품 및 변압기 등 절연체 | 23,500 |

대기오염을 야기하는 에어로졸

1. 에어로졸 정의

에어로졸은 공기 중에 부유하고 있는 작은 고체 및 액체 입자들을 지칭. 에어로졸은 배출원으로부터 직접 배출되기도 하며, 기체들이 공기 중에서 입자상 물질로 변환되어 생성되기도 함. 에어로졸의 크기는 직경이 수 나노미터(nm)부터 수십 마이크로미터(μm)이며, 이는 일반적인 성인의 머리카락 직경이 70~90 μm 인 것을 감안할 때 상당히 작음. 주된 배출원으로는 인간의 화석연료 연소, 화산활동, 바다에서의 물보라, 사막먼지 등이 있음. 에어로졸은 공기 중에서 다양한 물리/화학 반응을 통해서 그 크기와 구성성분이 변화. 또한 수증기가 과포화된 지역에서는 에어로졸의 활성화를 통해 안개나 구름 등 작은 물방울을 만드는 씨앗의 역할을 하며, 에어로졸이 공기로부터 제거되는 주된 기작은 강수에 의한 습성침적 현상. 에어로졸의 농도와 구성성분은 지역에 따라 큰 차이가 있음. 에어로졸의 공기 중 질량농도를 나타낼 때는 공기 중 부유하고 있는 에어로졸의 전체 농도의 합을 나타내는 TSP(Total Suspended Particulate matter)와 공기 중 부유하고 있는 직경이 $x \mu\text{m}$ 보다 작은 에어로졸의 농도의 합을 PM x 로 표시



▲ 그림9 대기 에어로졸의 입경 분포

출처 : 한국기상학회

2. 대기권 에어로졸의 화학적 구성성분

대류권 에어로졸은 황산염, 암모늄, 질산염, 나트륨과 같은 이온성분들과 납, 철, 구리, 티타늄 등과 같은 미량 금속물질, 그리고 탄소물질과 물로 구성. 이온성분은 다양한 배출원에서 기원하며, 탄소물질은 유기탄소와 원소탄소로 나누며 원소탄소는 검댕이나 블랙카본으로 부르며, 대부분 연소과정에서 발생되어 대기 중으로 직접 유입

3. 에어로졸 관련 현상 및 영향

에어로졸은 직간접적인 방법으로 지구의 에너지 수지와 상호 작용

- 화산 분출 : 화산 분출을 통하여 다량의 황산, 황화수소 및 염산이 대기로 배출되며, 배출된 에어로졸들은 환경과 인간의 삶에 악영향을 미친 후 산성비를 통해 지구로 되돌아감
- 직접적인 영향 : 에어로졸이 들어오는 태양복사를 산란시키고 흡수하는 것을 의미하며, 이에 따라 표면의 냉각 또는 온난화를 야기하여 지구 기후변화에 영향
- 간접적인 영향 : 에어로졸이 대기권의 구름 입자 크기를 변화시켜 구름이 빛을 반사 및 흡수하는 것을 변화시켜 결과적으로 지구의 에너지 수지를 변화시키는 것을 의미

- 인체에 미치는 영향: 에어로졸이 오염물질을 흡수할 때, 물의 표면뿐만 아니라 지표면에 존재하는 오염물질에 쉽게 침적되며, 이는 환경과 인체 건강에 해를 끼칠 수 있음. 에어로졸 직경이 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 입자들은 기관지에 유입될 수 있지만, 직경이 $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 입자는 폐에서 공기를 교환하는 영역까지 유입될 수 있기 때문에 인체에 해로울 수 있음

4. 에어로졸과 기후변화

에어로졸은 전체적으로 온실가스와는 달리 기후를 냉각시키는 역할을 하며, 에어로졸의 복사강제력은 전지구 평균 $-0.9(-1.0\sim-0.1)\text{W}/\text{m}^2$ (1750~2011년). 에어로졸이 기후변화에 영향을 미치는 3가지 효과는 아래와 같음

- 에어로졸-복사 상호작용 : 태양복사를 산란하거나 흡수해서 복사수지 변화
- 에어로졸-구름 상호작용 : 구름 알베도 변화, 구름 수명 변화
- 눈과 얼음 표면의 검댕으로 인한 지표 알베도 변화

나. 온실효과와 지구온난화

- 지구는 두꺼운 공기층인 대기층으로 둘러싸여 있으며 공기는 질소 78%, 산소 21%, 기타 1%로 구성되어 있는데 이산화탄소(CO_2), 메테인(CH_4), 아산화질소(N_2O) 등으로 이루어진 온실가스는 기타 1%에 포함되어 있음
- 지구에 도달하는 태양에너지를 100%라고 볼 때 대기에서 약 20%가 흡수되며 지표면에서 약 50% 흡수, 나머지 30%는 대기와 지표에서 반사됨. 지표에 흡수된 양 중에서 70%도 자연스럽게 지표에서 우주 밖으로 나가게 되나 대기 중 온실가스는 지구 밖으로 나가는 에너지를 흡수하여 '자연적 온실효과'를 만들고 지구의 온도를 적절하게 유지시키는 담요의 역할을 하고 있음
- 만약 온실가스가 대기 중에서 모두 없어진다면 지구는 표면온도가 영하 18°C 정도로 낮아지게 되므로 지구 온도를 유지하는 온실가스는 반드시 필요함
- 그러나 다양한 자연적·인위적 요인들, 특히 인간 활동으로 인해 온실가스의 양이 필요 이상으로 늘어나게 되고 이로써 지구로 들어왔다 나가는 대기 복사에너지를 더 많이 가두어 지구의 온도가 지나치게 더워지는 현상이 발생하게 되는데 이를 '지구온난화'라고 정의함

심화

지구복사수지와 복사평형(출처 : 네이버기상학백과, 기후변화개론, KEI)

1. 지구복사수지

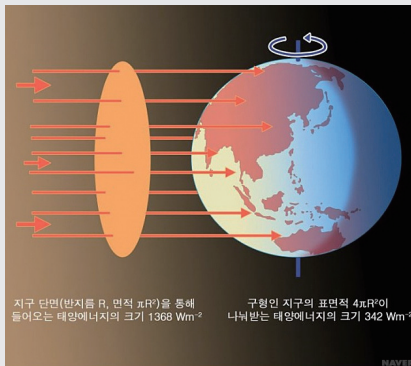
지구복사수지(Earth radiation budget)란 대기권을 포함하여 지구에 입사하는 태양복사에너지와 지구가 방출하는 지구복사에너지 사이의 수지를 의미. 지구복사수지가 양의 값이면 지구가 에너지를 축적하게 되어 온도가 상승하는 것을 의미하며, 지구복사수지가 음의 값이면 지구가 에너지를 빼앗기고 있어 온도가 하강하게 되는 상황을 의미. 복사평형(radiative equilibrium)은 어떤 물체가 다른 물체에서 흡수하는 복사에너지의 양과 방출하는 복사에너지의 양이 같아진 상태를 일컫는 말이며 실제 지구대기는 태양 복사에너지와 지구복사에너지 사이에 복사평형을 이루어 대체로 일정한 온도를 유지

2. 복사평형과 지구 평균온도

복사수지, 즉 태양복사에너지와 지구복사에너지만을 고려했을 때 평형을 이루는 지구의 온도가 몇 도가 될지 간단히 계산해보기 위해 그림 10처럼 지구 단면이 받는 태양복사에너지와 지구표면적 전체에서 방출하는 지구복사에너지의 개념을 나타냄. 지구 반경을 r , 지구 단위면적당 방출하는 에너지를 ϵ 라고 하면 지구의 전 표면적에서 방출되는 복사에너지는 $4\pi r^2 \epsilon$. 여기서 ϵ 는 스테판-볼츠만식에 따라 σT^4 이고, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, T 는 지구 표면의 절대온도

한편 지면의 태양복사 반사도인 알베도를 A 라 하고, 태양상수를 S 라고 하면 태양으로부터 받는 복사에너지는 $\pi r^2(1-S)$. 태양상수 S 를 약 $1360Wm^2$, 알베도 A 를 약 0.3으로 대입하여 복사에너지평형 관계식을 풀면 약 $255K(-15^{\circ}C)$ 인데, 이 온도가 실제 관측되고 있는 지구의 평균 온도 $288K(15^{\circ}C)$ 보다 낮은 것은 지구 대기의 온실효과가 고려되지 않았기 때문. 지구에서 방출되는 장파복사를 지구 대기에 존재하는 온실가스가 흡수하며, 이들 온실가스는 키르히호프의 법칙에 따라 온실가스의 온도와 방출률에 해당하는 복사를 재방출하게 되는데, 하향 복사는 지구 표면에 흡수되어 지구의 평균온도를 $33K$ 높이는 역할로 온실가스가 증가하여 장파복사 흡수량이 증가하게 되면 재방출하는 복사도 증가하게 되고 지구의 평균온도 또한 상승하는 지구온난화가 일어나게 됨

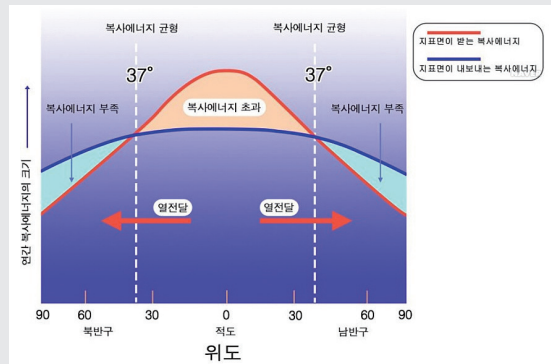
자전하는 지구에서 받는 태양에너지의 크기



▲ 그림10 지구가 받는 태양복사에너지의 양과 지구가 방출하는 복사에너지의 크기

출처 : 한국기상학회

각 위도별 지표면에서 복사에너지 수지의 분포



▲ 그림11 북반구와 남반구의 위도별로 지면이 받는 복사에너지와 지면이 방출하는 복사에너지의 크기 분포와 에너지 불균형에 의한 저위도-고위도 간 열전달 방향

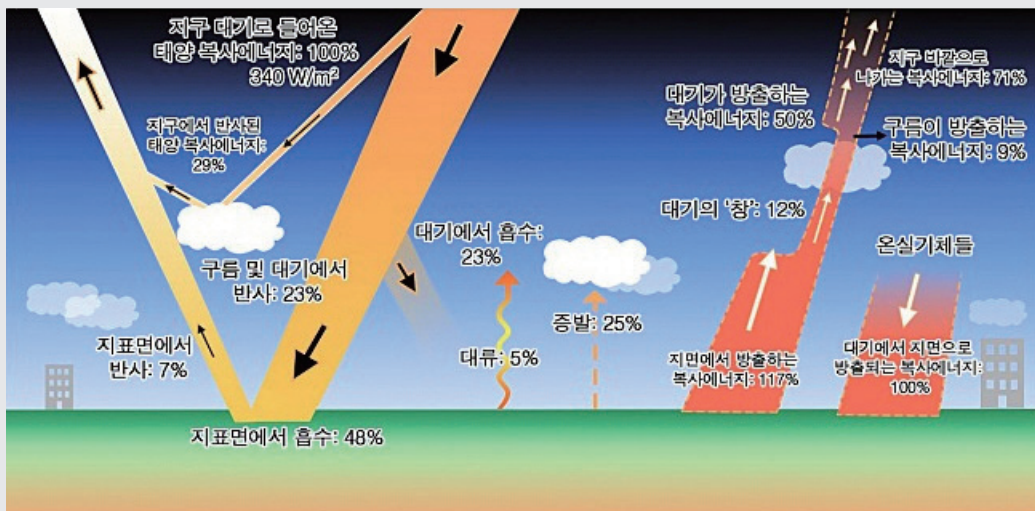
출처 : 한국기상학회

3. 위도별 복사수지

태양의 표면온도는 약 6000K의 고온이므로 태양복사의 파장 범위는 대체로 0.15~4.0 μ m이지만 지구의 표면온도는 약 300K의 저온이므로 3~80 μ m 파장대에서 복사에너지를 방출. 따라서 태양복사를 단파 복사라 하고 지구복사는 장파복사라 함. 특히 대기 중에 존재하는 수증기, 오존, 이산화탄소 등은 지구에서 방출하는 장파복사를 흡수·재방출하여 '온실효과'를 유발

지면에 도달하는 태양복사에너지 양은 위도에 따라 크게 다른데, 그림 11에서 보듯이 적도를 비롯한 저위도 지역에서는 태양 고도각이 높아서 입사하는 태양복사에너지가 방출되는 지구복사에너지 양보다 커서 순가열 효과를 갖음. 고위도 지역에서는 태양 고도각이 낮아 태양복사에너지는 작고 지면에서 방출되는 복사량은 커서 순냉각이 발생하지만 저위도에서 발생된 잉여 복사에너지는 해류 및 대기의 수송에 의해 고위도로 이동하여 위도별 열 평형상태를 유지

그림 12는 지구에 들어오는 태양복사에너지가 어떤 과정을 거쳐 지구의 대기와 지표면으로 분배되고 결국 지구 바깥으로 방출되는지 요소별로 상대적인 크기와 함께 나타낸 것으로, 지구 단면적이 받은 태양복사에너지를 지구 전체 면적(단면적의 4배)을 고려해 단위면적당 $S/4=1360/4=340\text{Wm}^2$ 만큼의 태양복사에너지가 지구 대기권으로 유입. 일단 대기권으로 들어온 태양복사에너지는 구름과 지표면 등에서 반사되어 다시 외부로 나가는 양이 약 30%가 되고 이 때문에 지구 전체의 반사도, 즉 알베도를 0.3으로 볼 수 있음. 반사되지 않은 나머지 약 70%의 태양복사에너지 중 48%는 지표면에 흡수되어 지면을 데우고 약 23%는 대기에 흡수. 태양복사에너지를 흡수해서 데워진 지표면은 대류, 증발, 지구복사의 형태로 에너지를 방출. 또한 대기 역시 하향(지표면 방향) 및 상향(지구 바깥 방향)으로 복사에너지를 방출. 결과적으로 대기권에서 지구 바깥으로 방출되는 에너지는 대기 및 지표면에 흡수되었던 태양복사에너지와 동일하게 되어 복사에너지의 평형을 이룸



▲ 그림12 지구 대기권으로 들어온 태양복사에너지가 분배되어 전달되고 다시 지구로부터 방출되는 과정

출처 : 한국기상학회

다. 온실가스 배출 추세

1) 전 지구적 온실가스 배출 및 농도 현황

- 현재까지 기후변화협약에 의해 규제 대상이 되는 온실가스는 교토의정서(1997)에서 6개, 그리고 교토의정서 개정(2012) 시 삼불화질소(NF₃)가 추가되어 7개임

표2 기후변화협약에 의한 규제 대상 온실가스

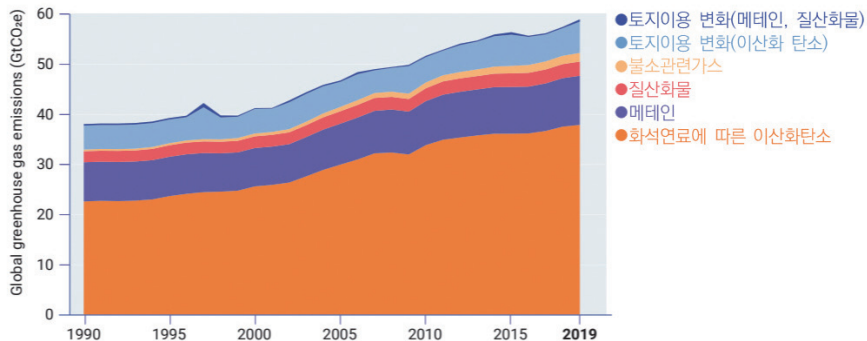
| 교토의정서(1997) | 교토의정서 개정(2012) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 이산화탄소(CO ₂), 메테인(CH ₄), 아산화질소(N ₂ O), 불화탄소(PFC), 수소화불화탄소(HFC), 육불화유황(SF ₆) | 기존 6가지 온실가스 + 삼불화질소(NF ₃) |

※ 우리나라는 '탄소중립 기본법'에 NF₃를 제외한 6개 기체를 온실가스로 규정하고 있음

- 1990년 전 세계적으로 약 33GtCO₂e(LULUCF* 제외)의 온실가스가 배출되었으며, 온실가스(6개 온실가스)는 교토의정서의 2008~2012년 제1차 온실가스 감축 목표가 달성되었음에도 매년 1.1%씩 지속적으로 증가하여 2019년 기준으로 LULUCF를 제외하고 총배출량은 52.4GtCO₂e에 도달함

* LULUCF(토지이용, 토지이용 변화 및 임업, Land Use, Land-Use Change and Forestry)

Figure ES.1. Global GHG emissions from all sources



▲ 그림13 전 세계 온실가스 배출량 추이

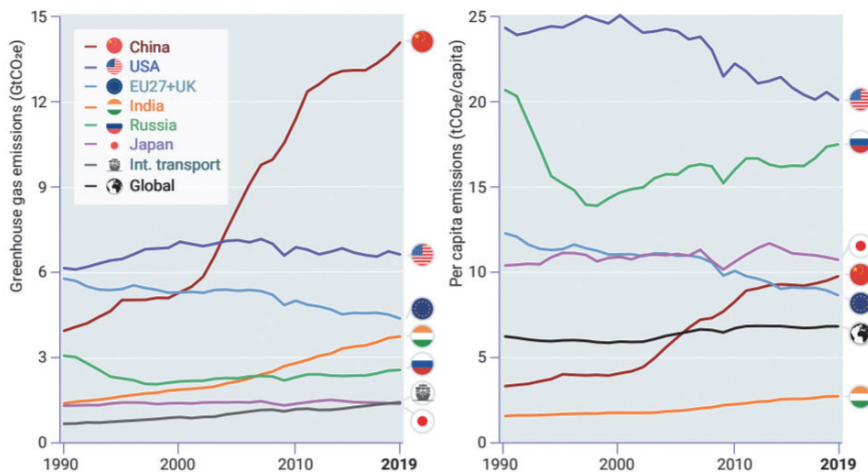
출처 : Emission Gap Report 2020(UNEP)

- 온실가스인 이산화탄소(CO₂), 메테인(CH₄), 아산화질소(N₂O)의 대기 중 농도는 지난 200만 년 중 전례 없는 수준으로 증가하여 2019년 기준 이산화탄소 농도는 410ppm이며 전 지구 지표면 온도 상승은 산업화 이전(1850~1900년) 대비 최근 10년(2011~2020년) 1.09℃ 상승함
 - 인간 활동으로 인한 전지구 지표면 온도 상승은 0.8~1.3℃(최적 추정치 1.07℃), 온실가스로 인해 1.0~2.0℃ 상승하였으나, 다른 인위적 인자(주로 에어로졸)는 0.0~0.8℃ 냉각화를 유발, 이외에 자연적 인자(태양·화산 활동)는 -0.1~0.1℃, 내부 변동성은 -0.2~0.2℃의 변화를 야기함
- 6가지 온실가스 배출량의 구성을 2019년 배출량을 기준으로 살펴보면, 화석연료 연소 시 가장 많이 배출되는 이산화탄소(CO₂) 배출량은 전체 배출량 중 73%를 차지하며, 다음으로 농축산 부문, 그리고 폐기물 부문에서 많이 배출되는 메테인(CH₄)이 약 19%를 차지함
 - 대기 중 온실가스 농도는 1750년 이후로 인간 활동으로 증가, 특히 이산화탄소 농도는 주로 화석연료의 배출과 이차적으로는 순 토지 이용 변화로 인한 배출에서 산업화 이후 40% 증가함

2) 국가별 온실가스 배출 추세

- 2019년 기준으로 전 세계 온실가스 배출량이 가장 많은 국가는 중국 26%, 미국 13%의 순이며, 영국을 포함한 EU 국가의 온실가스 배출량이 차지하는 비중은 9.3%임. 일본의 배출량 비중은 2.8%로 선진국인 미국, EU 28개국, 일본이 배출하는 온실가스 비중은 전 세계 배출량의 약 25%를 차지함
- 1990년 이후 국가별 온실가스 배출량 추이를 비교하면, 영국을 포함한 EU 국가들의 온실가스 배출량은 지속적으로 감소하였으며, 미국은 2000년대 중반까지 지속적으로 배출량이 증가하였으나 이후 감소 추세를 보이고 있음
- 개발도상국인 중국과 인도의 온실가스 배출량 추이를 살펴보면, 1990년 이후 지속적으로 증가 추세를 보이는데 중국은 2000년대 초반 이후 매우 가파른 증가세를 보임. 반면에 인도의 온실가스 배출량은 지속적으로 증가하지만 급격한 증가세를 보이지는 않음
- 온실가스 배출량을 인구수로 나눈 1인당 배출량을 살펴보면, 전 세계 평균 1인당 배출량은 1990년 이후 5톤CO_{2e} 이상의 수준을 유지하며 지속적으로 증가하고 있음

Figure 2.2. Absolute GHG emissions of the top six emitters (excluding LUC emissions) and international transport (left) and per capita emissions of the top six emitters and the global average (right)



Source: Crippa et al. (2020)

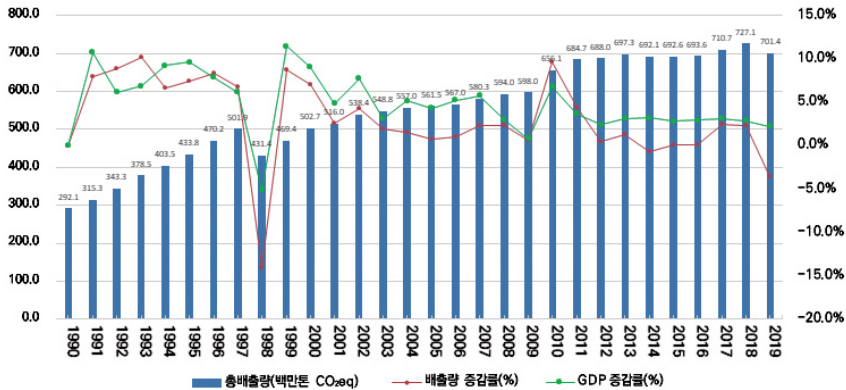
▲ 그림14 주요국의 온실가스 배출량 추이

출처 : Emission Gap Report 2020(UNEP, 2020)

- COVID-19 확산 방지 조치와 관련하여 2020년 에어로졸 배출량이 일시적으로 감소하여 대기오염 수준이 완화되었으나, 에어로졸로 인한 냉각화 효과가 감소하여 소규모로 일시적인 복사강제력이 증가하여 기온이 상승. 관측된 CO₂ 증가율에서 탐지할 수 있는 감소는 없었으며 대기 중 CO₂ 농도는 2020년에 계속 증가함

3) 우리나라의 온실가스 배출 추세

- 우리나라 온실가스 배출량은 1990년부터 2005년까지 OECD 회원국 중 가장 빠른 증가세를 보였으나, 이후 온실가스 배출량 증가율은 급격히 감소함
- 1990년 이후 2019년까지 우리나라 온실가스 배출량과 경제성장의 관계는 1990년 이후 3단계로 나누어 살펴볼 수 있음
 - 첫 번째 단계는 1990년 이후 1997~1998년의 동아시아 금융위기를 경험할 때까지의 기간으로 동기간 우리나라 온실가스 배출량의 전년도 대비 증가율은 7~10%로 동기간 경제성장률 8~10%와 유사한 수준을 보임
 - 두 번째 단계는 2000~2010년까지의 기간으로 동아시아 금융위기 극복 과정에서 우리나라 경제가 중화학 공업 중심에서 점차로 IT산업의 성장과 함께 반도체, 자동차 산업 등이 성장하여 경제성장률은 지속적으로 5~6%대의 높은 성장률을 기록함에도 불구하고 온실가스 배출량 증가율은 2~3%로 낮아져 점차 탈동조화가 시작된 시기로 볼 수 있음
 - 세 번째 단계는 2010년 이후 글로벌 금융위기의 영향으로 우리나라 경제성장률도 3~4%로 낮아지고 온실가스 배출량 증가율은 0~1%의 거의 정체된 수준을 보이기 시작한 시기
- 우리나라도 2010년 이후 선진국처럼 경제는 지속적으로 성장하지만 온실가스 배출량이 정체되거나 감소 추세로 전환할 수 있는 시기에 도달함

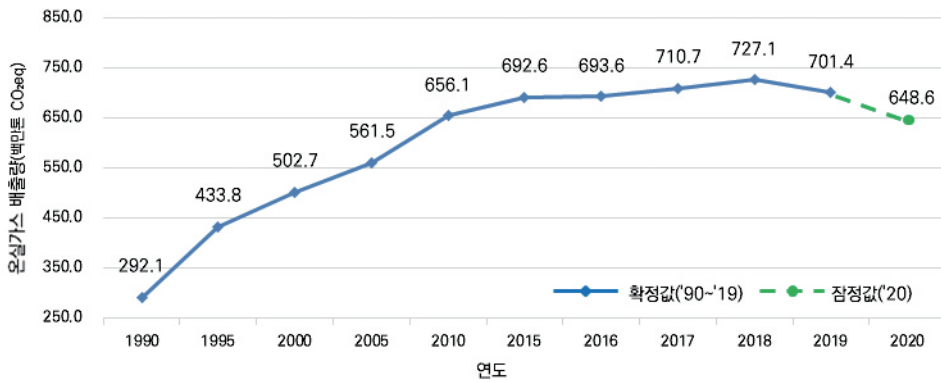


▲ 그림15 국가 온실가스 배출량과 경제성장률

출처 : 2020 국가 온실가스 인벤토리 보고서(온실가스종합정보센터, 2020) 일부 수정

- 대표적 온실가스 중 이산화탄소와 메테인은 지난 10년간(2008~2018년) 대기 중 농도의 증가율이 뚜렷한 것으로 나타났으며, 주요 화학반응 가스들(오존, 일산화탄소, 질소산화물 및 이산화황)의 농도 변화는 서로 다른 경향성을 보임
 - 화석연료 연소와 토지 이용 변화로 인한 이산화탄소 방출의 증가가 대기 중 이산화탄소 농도 증가의 주요 원인
 - 매년 늘어나는 부양/식량 및 농업의 질소비료 의존도 때문에 토양으로부터 방출되는 아산화질소의 농도가 지난 30년 동안 연간 0.73 ± 0.03 ppb의 비율로 증가함
- 2018년을 기준으로 우리나라 온실가스별 구성을 살펴보면 이산화탄소(CO₂) 비중이 90%, 메테인(CH₄) 비중이 4%를 차지하며 불화탄소(PFC), 수소불화탄소(HFC), 육불화유황(SF₆) 등 불화가스의 비중은 5% 내외

- 최근 배출량을 살펴보면 2018년 정점 도달(727.1백만톤CO₂eq) 이후 2년 연속 감소 추세* 예상됨
 * '20년 온실가스 배출량은 648.6백만톤CO₂eq(추정)



▲ 그림16 온실가스 배출량 확정값('90~'18), 잠정값('19) 및 추정값('20)

출처 : 2021년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(온실가스종합정보센터, 2021)

교육주안점

- 지구시스템 정의 및 구성 요소, 특히 다소 생소한 영역인 빙권을 이해하도록 한다.
- 학습자 특성을 고려하여 기후변화의 정의를 일반적인 정의 수준에서 설명할 수 있도록 한다.
- 기후변화의 정의를 생각할 수 있도록 유도하며 학습자의 참여 기회를 제공한다.



참고자료

참고 문헌

- 기후변화개론(KEI, 2015)
- 기후변화와 자연재해(KEI, 2013)
- 기후변화, 이제는 적응입니다(환경부, 2010)
- 2030 국가온실가스감축목표(환경부, 2020)
- 2021년 국가 온실가스인벤토리(온실가스종합정보센터, 2021)
- UNEP(2020), Emission Gap Report 2020, Nairobi

참고 사이트

- 국가기후변화적응모델(kacc.kei.re.kr)
- 기상청기후정보포털(<http://www.climate.go.kr/>)
- 기상청위키피디아(http://www.climate.go.kr/home/10_wiki/index.php/)
- UNEP 온실가스 배출보고서 (<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>)

2. 기후변화 현황 및 탐지

■ 기후변화 현황

- 전 지구적으로 지구온난화는 진행되고 있으며, 각 지구시스템에서 기후변화 영향 발생

| | |
|--------|-----------------------------------------------------|
| 대 기 권 | - 지구 온도 상승, 기상이변 및 대기오염 심화, 일사량 변화, 대기 건조화 등 |
| 수권(해양) | - 전 지구적으로 해양 온도 및 해수면 상승, 해양 산성화 발생 |
| 빙 권 | - 빙상 및 빙하 면적, 질량, 적설량 감소 |
| 토 지 권 | - 지표 기후와 순 토지 이용 변화에 따른 지표 반사도 변화, 토양 탄소 및 식생 변화 발생 |
| 생 물 권 | - 육상, 담수, 해양 생물종의 활동, 서식지, 개체 중수 등 생태계 기능 변화 등 |

- 우리나라에서도 지난 100년간 전 지구적 평균(0.74℃) 대비 1.7℃로 높은 상승률로 기온 상승

☞ 대기권/수권(해양)/빙권/지권/생물권의 기후변화, 한반도 기후변화

■ 기후변화 탐지 및 원인 규명

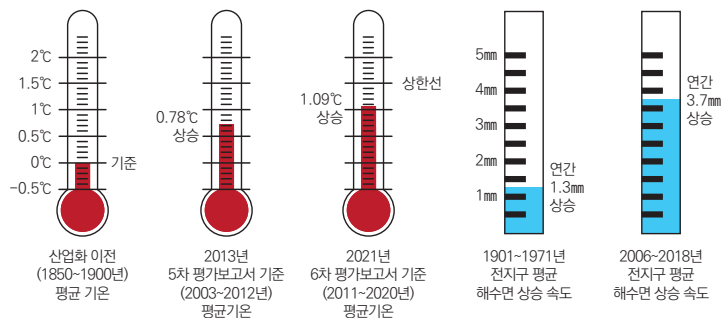
- 기후변화 원인 규명을 통해 기후변화에 기여한 원인을 파악하고, 탐지를 통해 기후 또는 기후 영향의 자연계 또는 인간계 원인 파악 가능
- 인위적 원인이 지표 온도 상승, 해양 빙하 감소, 해양 열용량 증가 등 기후변화에 기여했을 가능성은 높으며, 기후변화는 작물, 육상/담수/해양 생태계와 인간계에 큰 영향을 미친다는 것을 인지 가능

☞ 기후변화 탐지, 원인 규명, 인위적 원인, 관측된 영향

2-1. 기후변화 현황

가. 전 지구적 기후변화 요약

- 대기 중 온실가스 농도가 증가함에 따라 대기와 해양은 따뜻해지고 눈과 빙하의 양은 줄어들고 해수면은 상승하고 해양 산성화가 진행 중으로 지구온난화는 명백하게 진행되고 있음



▲ 그림 17 전 지구 평균기온 상승 및 평균 해수면 상승 속도 변화의 가속화

- 인간 활동에 의한 영향이 대기, 해양, 육지를 온난화하는 것은 명백하며, 기후변화가 대기, 해양, 빙권, 생물권에서 광범위하고 신속하게 발생하고 있음. 전 기후시스템에 걸친 최근 변화의 규모 및 여러 측면은 수백 년에서 수천 년 동안 전례 없는 수준임
- 인간 활동으로 인한 기후변화는 이미 세계의 많은 기상·기후 극한 현상(폭염, 호우, 가뭄, 열대 저기압 등)에 영향을 끼치고 있음. 기후변화에 의해 1950년대 이후 대부분 육지 지역에서 폭염 등 극한 고온의 빈도와 강도가 증가하고 있으며, 육지 지역 호우의 빈도와 강도가 늘어나는 등 복합 극한 현상(폭염과 가뭄 동시 발생 등) 가능성이 커짐

나. 대기권의 기후변화

- 대기 중 온실가스 농도가 증가함에 따라 대기와 해양은 따뜻해지고 눈과 빙하의 양은 줄어들고 해수면은 상승하고 해양 산성화가 진행 중으로 지구온난화는 명백하게 진행되고 있음

| | |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 온도상승 | <ul style="list-style-type: none"> - 전 지구 육지와 해양 표면 온도가 결합된 전 지구 평균 표면온도는 산업화 이전 (1850~1900) 대비 2011~2020년 1.09℃ 상승 * 1950년 이후 나타난 지구온난화는 화석연료 사용 등 인간활동이 원인일 가능성이 매우 높음 - 온난화는 해양보다 육지에서 더 크며, 여러 육지 지역에서 또한 특정 계절에 평균 이상의 온난화가 나타나고 있는데 특히 북극에서는 2~3배 더 크게 나타남 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

다. 수권(해양)의 기후변화

- 1970년 이후로 전 지구 해양이 온난화되었으며, 기후시스템에서 초과된 열의 91% 이상을 해양이 흡수(5%는 육지 온난화, 3%는 얼음 감소, 1% 대기 온난화)하고 있음. 지난 100년 동안 전 지구 해양은 약 1만1000년 전 이후 가장 빠르게 온난화되고 있으며 현재 수심 2000m 아래까지 온난화가 확대되고 있음
- 인간 활동으로 인한 영향이 1970년대 이후 전 지구 해양 상층부(0~700m) 온난화의 주요 인자이며, 이러한 온난화는 수세기에서 수천 년에 걸쳐 되돌릴 수 없음

| | |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 온도상승 | <ul style="list-style-type: none"> - 전 지구 평균 해수면 온도는 20세기 동안 0.88℃ 상승하였으며, 21세기에도 계속 상승하여 해양생태계를 위협 - 20세기에 해양 폭염이 더 자주 발생하였으며, 1980년대 이후 빈도가 2배 증가하고 강도는 강해지며, 지속 기간이 길어졌음 * 2006년 이후에는 대부분 인위적 온난화에 의해 발생 |
| 염분변화 | <ul style="list-style-type: none"> - 1950년대 이후 특히 인간 활동의 영향으로 염도가 높은 지역에서는 증발량이 증가하면서 염도가 더 높아진 반면, 염도가 낮은 지역에서는 강수량이 증가하면서 더욱 담수화되어 해양을 포함하는 전 지구 물 순환의 강화로 귀결 |
| 산성화 | <ul style="list-style-type: none"> - 산업화 시대 이후 해양은 계속해서 이산화탄소를 흡수하여 해양의 산성화가 점진적으로 진행 - 현재 해양 표층수의 pH 값은 지난 2만6000년간 전례 없는 수준이며, pH 감소가 모든 해양 지역에서 나타나고 있음 * 1970년대 이래 관측된 해양 산성화의 주요인은 인간의 활동 영향 |

| | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 해양산소 감소 | <ul style="list-style-type: none"> - 20세기 중반 이후 많은 지역에서 해양에서의 산소 손실이 표면부터 1000m까지 발생하였고 이는 해양 성층의 증가 및 생화학의 변화가 주된 원인으로, 이로 인한 해양생물의 지리적 범위가 지난 20년간 많이 변화 |
| 해수면상승 | <ul style="list-style-type: none"> - 1900년 이후 지난 3000년 중 가장 빠르게 상승하고 있으며, 그린란드 및 남극 빙상의 얼음 손실 속도의 증가와 빙하의 질량 손실 그리고 해양 열팽창 지속으로 인해 최근 수십 년간 가속화 - 1902~2018년의 총 평균해수면 상승은 0.2m이고 2006~2018년의 평균해수면 상승 속도인 연간 3.7mm는 1901~1971년의 연간 1.3mm에 비해 약 2.85배 증가한 속도로 지난 300만 년 중 유례없는 속도임 - 2006년부터 2015년까지 빙상 및 빙하가 녹은 것이 해수면 상승의 지배적인 원인이며 이는 해양의 열팽창 효과를 넘어섬 - 2007~2016년 남극 지방에서 빙상의 질량 손실은 1997~2006년에 비해 3배 늘었고, 그린란드에서 2배로 증가하여 그린란드 및 남극지방에서 빙상의 얼음 손실이 해수면 상승을 가속화함 |
| 수자원영향 | <ul style="list-style-type: none"> - 열대성 저기압 및 강우량 증가가 해수면 상승과 결합되면서 극한 해수면 현상 및 연안 위험 뿐만 아니라 수문 시스템의 변화를 초래하였고 결과적으로 수자원의 양과 질에 영향을 줌 |
| 이상현상 빈도 증가 | <ul style="list-style-type: none"> - 1980년대 이후 이상 고수온 빈도는 대략 2배로 증가 - 강한 열대 저기압의 전 지구적 발생비율 증가 및 열대 저기압 관련 호우 증가 - 해수면 상승, 폭우 증가, 열대 저기압과 연관된 강수 강도 증가에 의한 복합홍수(폭풍해일, 폭우와 하천범람)의 가능성이 높아졌음 |

라. 빙권의 기후변화

- 지난 수십 년 동안 지구온난화로 인해 빙상 및 빙하의 질량이 손실되었으며, 북반구 내 봄철 적설 면적과 극지방의 해빙 면적 및 두께의 감소로 인해 빙권이 광범위하게 줄었고, 표면 온도가 상승하고 적설 면적이 변화함에 따라 영구 동토층의 온도가 1980년대 초 이래로 대다수 지역에서 상승함

| | |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 빙하 질량 감소 | <ul style="list-style-type: none"> - 인간의 영향으로 1992년부터 2020년까지 빙하 질량 감소 · 그린란드 빙상 : 4890±460억 톤(전 세계 해수면 13.5±1.3mm 상승 기여) · 남극 빙상 : 2670±530억 톤(전세계 해수면 7.4±1.5mm 상승 기여) · 산악 빙하 : 6200±1600억 톤(전 세계 해수면 17.1±4.4mm 상승 기여) * 2000년 이후 빙봉 하부 용융에 의해 서남극의 빙상이 흘러나가는 주요 유출 빙하가 급속하게 얇아지는 것이 주요인으로 적설에 의한 질량 증가보다 빠르게 녹고 있음 |
| 해빙 면적과 두께 감소 | <ul style="list-style-type: none"> - 1979년부터 북극 지역의 해빙 면적과 두께가 현저히 감소하였고, 현재 연평균 북극 해빙 면적은 1850년 이후 최저 수준으로 감소. 특히 9월의 해빙 감소량은 1000년 동안 전례가 없었던 수준으로 감소. 북극 해빙의 변화는 중위도 기상에 영향을 줄 수 있음. 반면에 남극 지방의 해빙 면적은 통계적으로 유의미한 경향이 나타나지 않음 |
| 적설량 감소 | <ul style="list-style-type: none"> - 북반구의 6월 적설 면적은 1967년부터 2018년까지 10년마다 13.4±5.4% 감소하여 총 손실은 약 250만 km²에 달하며, 이는 대부분 지표면의 온도가 상승했기 때문으로 특히 대부분의 고산 지역에서 적설의 깊이, 면적 및 지속성은 최근 수십 년간, 특히 고도가 낮은 곳에서 감소됨. 북반구 적설이 빨리 녹기 시작하면서 하천 흐름의 계절적 변화를 야기 |

| | |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>영구동토층 온도 상승</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 전 세계의 극지대 및 고산 지역에 걸쳐 평균적으로 2007년부터 2016년까지 0.29°C±0.12°C 상승 - 북극 및 아한대의 영구 동토층은 대기 중 탄소의 2배에 달하는 1460~1600Gt⁴⁾의 유기탄소를 포함하고 있기 때문에 영구 동토층 해동으로 인한 추가적인 순 메테인 및 이산화탄소 배출 감사가 필요함. 영구 동토층의 해동 및 빙하 후퇴로 고산 지역의 사면 안정성이 감소 |
| <p>반사도 (알베도) 감소</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 여름철 해빙이 감소하고 육지에서는 봄철 적설량이 줄어들면서 온난화가 증폭 - 북극지역 해빙이 온난화에 의해 녹으면서 하얀색 얼음 표면이 어두운 바다색으로 바뀌어 알베도(반사도)가 감소하고, 이 때문에 태양에너지를 우주로 반사하지 못하고 더 많이 흡수하게 되어 온난화가 더 빠르게 진행하게 되는 원리로 발생함 · 북극지방의 지표면 온도는 지난 20년 동안 전 지구 평균의 2배 이상으로 상승 |

마. 지권의 기후변화

- 1850년대 이래로 육지 표면 온도는 전 지구 표면 온도보다 빨리 증가하였으며, 1950년대 이래 고온 현상의 빈도와 강도 및 폭염의 지속 기간이 증가하였으며, 폭우의 빈도 및 강도 또한 대부분 육지에서 증가하였음

| | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>지구시스템 순환변화</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 육지 온난화는 해양 표면 온난화보다 80% 크게 나타남 - 주요 물순환을 변화시켜 강수와 유출수의 평균 및 변동성을 증가시키고, 증발산량의 증가로 가뭄의 빈도와 심각성이 증가함 |
| <p>지표반사도 변화</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 지표 기후와 순 토지이용 변화에 따른 지표 반사도가 변화 - 식생증가 및 지표면 온도 증가로 툰드라지역 지표 반사도 감소 |
| <p>토양변화</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 탄소순환 변화에 따른 토양 탄소 변화, 그리고 물순환과 식생 변화와 연관된 토양 수분의 변화가 지권에서 나타남 |

바. 생물권의 기후변화

| | |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>종 분포 변화</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 육지 종의 분포가 극 방향 및 고산지대로 이동함에 따라 생태계 내에서 종의 회전율이 증가 - 북반구 중위도에서 식물 생육기간이 증가 - 해수 온난화에 따라 차가운 해수가 양극 방향, 그리고 더 깊은 바다로 이동함에 따라 해양생물들의 지리적 범위가 극지방과 깊은 바다로 이동함 - 많은 유기체들의 수명 주기와 연관된 현상학적 지표가 지난 20년간 변화하였으며, 이러한 변화들이 다양한 지역의 다양한 종에서 모두 다르게 관찰되고 있어 주요 해양생태계의 파괴로 이어질 수 있음 - 해양중 및 연안생태계는 해양 온난화, 해빙 변화, 산소 손실과 같은 서식지에 대한 생물 지구 화학적 변화로 인해 지리적 서식 범위 및 계절적 활동이 달라져 적도부터 극지방까지 종 구성, 풍부도 및 생태계의 바이오매스 생산이 변화함. - 종 사이의 달라진 상호작용은 생태계의 구조 및 기능에 영향을 미쳤으며 일부 해양 생태계 종의 경우 어업활동과 기후변화로 인해 영향을 받고 있음 |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

4) Gt: giga 톤 또는 기가 톤을 의미하고, 1Gt은 10억 톤에 해당함

| | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 생물종수 변화 | <ul style="list-style-type: none"> - 육상, 담수 및 해양 생물종 다수의 지리적 범위, 계절 활동, 이주 패턴, 개체 수, 종의 상호작용에 변화를 초래 - 기후변화에 적응하지 못하고 멸종될 생물종은 5700여 종 중 336종(약 6%)이며, 특히 구슬 다슬기, 참재첩 등 서식지 이동이 쉽지 않은 저서 무척추 동물종들의 피해가 많이 발생함 - 나뭇잎 개엽 및 개화, 철새 도래, 조류 번식 시기 등 생물계절, 내륙습지 소멸에 따른 서식지 파괴, 외래 침입종에 따른 생태계 교란 문제가 발생함 - 해양 산성화는 해조류에서 어류에 이르기까지 광범위한 생물종의 성장, 발달, 석회화, 생존과 종의 풍부도에 부정적인 영향을 미침 |
| 생태기능 변화 | <ul style="list-style-type: none"> - 지구온난화로 인한 기후변화가 작물 수확량에 상당히 부정적인 영향 발생 ※ 농림축산식품부에 따르면 2008년부터 2019년까지의 배 재배 면적은 1만8277ha에서 9616ha로 47.4%가 줄어들고, 생산량도 47만743톤에서 20만732톤으로 무려 57.4%가 급감 반면에 참다래, 무화과, 망고 등 아열대 과일의 경우 재배 면적이 50% 증가함 |

사. 한반도의 기후변화 현황

- 100년 이상 관측 자료를 보유한 6개 지점을 대상으로, 우리나라 과거(1912~2020년) 기후변화 추세 분석 결과 109년간 연평균기온은 10년마다 +0.2℃로 꾸준히 상승하였고, 특히 봄과 겨울의 기온 상승 경향이 뚜렷이 나타남

※ 10년당 기온상승률 : 봄 +0.26℃ > 겨울 +0.24℃ > 가을 +0.17℃ > 여름 +0.12℃

표3 1912~2020년 기온변화 추세



출처 : 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청, 2021)

- 거의 모든 지역에서 기온이 상승하며 온난화의 공간 분포 특성은 뚜렷하지 않지만 도시화 효과로 대도시에서의 온난화 경향이 좀 더 크게 나타남

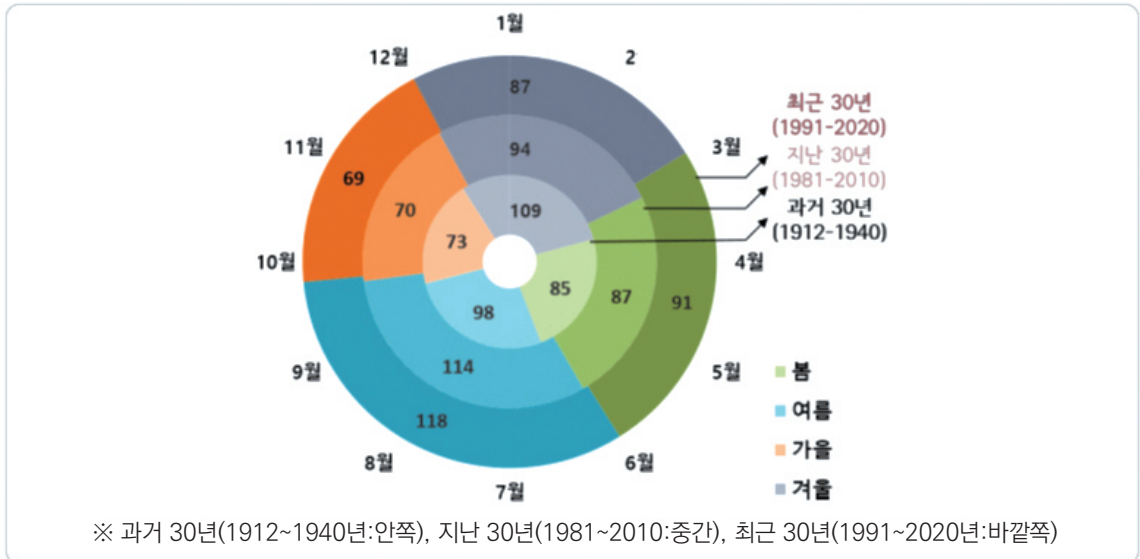
표4 6개 도시별 최근 30년과 과거 30년 평균기온 변화 추세

| 연평균기온(℃) | 서울 | 인천 | 목포 | 대구 | 부산 | 강릉 | 평균 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 과거 30년 | 10.9 | 10.8 | 13.2 | 12.4 | 13.5 | 11.9 | 12.1 |
| 최근 30년 | 12.8 | 12.5 | 14.0 | 14.4 | 15.0 | 13.5 | 13.7 |
| 최근 30년~과거 30년 | +1.9 | +1.7 | +0.8 | +2.0 | +1.5 | +1.6 | +1.6 |

※ 10년당 기온상승률 : 대구 +0.26℃ > 서울 +0.24℃ > 인천·강릉 +0.2℃ > 부산 +0.18℃ > 목포 +0.1℃
 ※ 지난 99년간(1912~2010) 재분석자료와 비교 결과 도시화 영향은 3~11%를 차지함(Park, 2017)

출처 : 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청, 2021)

- 또한 계절 시작일과 계절 길이의 변화도 뚜렷이 나타나서 과거 30년(1912~1940) 대비 최근 30년(1991~2020) 겨울길이는 22일 짧아지고 여름이 20일 길어지고 있어 봄의 출현시기는 빨라지고, 가을은 늦어지고 있음. 서울의 최근 10년간 여름 계절 길이가 127일로 증가
 ※ 최근 30년간 여름은 118일(약 4개월)로 가장 긴 계절이며, 가을은 69일로 가장 짧음



과거 30년과 지난 30년, 최근 30년, 최근 10년의 계절 지속기간 변화

| 기간 | 봄 | 여름 | 가을 | 겨울 |
|--------------------|-----|------|-----|------|
| 과거 30년 (1912~1940) | 85일 | 98일 | 73일 | 109일 |
| 지난 30년 (1981~2010) | 87일 | 114일 | 70일 | 94일 |
| 최근 30년 (1991~2020) | 91일 | 118일 | 69일 | 87일 |
| 최근 10년 (2011~2020) | 87일 | 127일 | 64일 | 87일 |
| 최근 30년 - 과거 30년 | +6일 | +20일 | -4일 | -22일 |
| 최근 30년 - 지난 30년 | +4일 | +4일 | -1일 | -7일 |
| 최근 10년 - 최근 30년 | -4일 | +9일 | -5일 | 0일 |

과거 30년과 지난 30년, 최근 30년, 최근 10년의 계절 시작일 변화

| 기간 | 봄 | 여름 | 가을 | 겨울 |
|--------------------|--------|--------|--------|---------|
| 과거 30년 (1912~1940) | 3월 18일 | 6월 11일 | 9월 17일 | 11월 29일 |
| 지난 30년 (1981~2010) | 3월 7일 | 6월 2일 | 9월 24일 | 12월 3일 |
| 최근 30년 (1991~2020) | 3월 1일 | 5월 31일 | 9월 26일 | 12월 4일 |
| 최근 10년 (2011~2020) | 2월 27일 | 5월 25일 | 9월 29일 | 12월 2일 |
| 최근 30년 - 과거 30년 | -17일 | -11일 | +9일 | +5일 |
| 최근 30년 - 지난 30년 | -6일 | -2일 | +2일 | +1일 |
| 최근 10년 - 최근 30년 | -2일 | -6일 | +3일 | -2일 |

▲ 그림18 우리나라 계절 시작일 및 계절 지속기간 변화

출처 : 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청, 2021)

심화

해수면 상승

1. 해수면 상승 원인

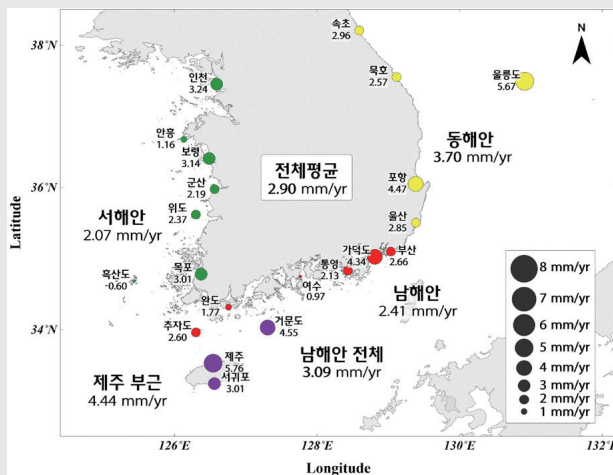
지구온난화에 기인한 해수면 상승은 육지 빙하(빙상 및 산악 빙하)의 용해와 해수 온도 증가에 따른 열팽창이 주요인으로, 마지막 극대 빙하기였던 2만 년 전에 비해 현재는 100m 이상 상승한 것으로 분석. 기온이 높을수록 대륙 위에 얼음 형태로 고정되어 있던 담수가 녹아 바다로 흘러가게 되고, 해수 온도가 높아질수록 부피가 증가하게 되어, 지구온난화는 바닷물의 양과 부피 모두에 영향을 주어 해수면을 상승. 빙하가 녹아서 대륙 빙하의 질량이 작아지고, 이에 따라 중력이 작아지면서 평균 해수면이 상승하는 효과도 있음. 특히 해수면 상승은 대기 온실가스 농도 증가가 멈출지라도 수 세기 동안 지속될 수 있는 장기적인 변화이기 때문에 중요함

2. 전 지구 해수면 상승

지구 평균 해수면은 지난 120년간(1901~2018) 20cm 높아졌으며, 전 지구 평균 해수면의 해수면 상승 평균 속도는 1901~1971년 1.3mm/년, 1971~2006년 1.9mm/년, 2006~2018년 3.7mm/년으로 최근 들어 상승률이 증가하고 있음을 알 수 있다(IPCC 6차 평가보고서, 2021). 이 같은 상승 속도는 대륙 빙하와 빙상이 녹아 발생했을 가능성이 높음. 해수면 상승은 전 지구적으로 균일하게 일어나는 것이 아니라 열팽창, 해양 역학, 그리고 육빙 손실의 상대적 기여도에 따라 지역적으로 약 30%의 편차를 가지고 다른 양상을 보일 수 있다는 특성이 있음

3. 우리나라 해수면 상승

우리나라에서는 1989년부터 2017년까지 최근 29년간 매년 2.9mm 상승률을 보여 지구 평균에 비해 다소 빠른 추세를 보이고 있으며, 지역적으로는 제주 부근(4.44mm)이 가장 높고 동해안(3.70mm), 남해안(2.41mm), 서해안(2.07mm) 순으로 나타남(국립해양조사원, 2018).



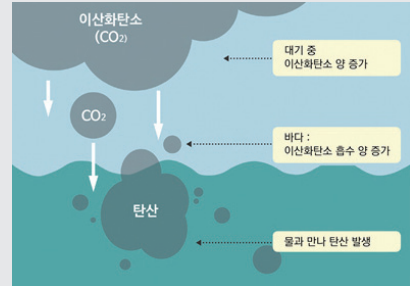
▲ 그림19 우리나라 주변 해역의 1989-2017년 평균해수면 상승률(mm/yr)

출처 : 국립해양조사원 보도자료, 2018

해양산성화

1. 해양산성화의 정의

해양산성화는 해수의 수소이온농도가 증가하는 현상을 의미하며, 대기 중의 이산화탄소 양이 많아지면 바다가 흡수하는 이산화탄소 양 또한 증가하게 됨. 바다로 흡수된 이산화탄소는 물과 만나면 탄산이 발생하게 되며 해양산성화가 진행됨. 2009~2018년의 10년간 해양은 연간 CO₂ 배출량의 약 20~30%를 흡수하여 기후변화의 영향을 완화시키는 데 기여하지만 흡수된 CO₂가 해수와 반응하여 해양 pH를 감소시키고 해양의 산성도를 증가시킴으로써 해양의 화학적 특성을 바꾸어 놓는데, 이 과정을 해양산성화라고 지칭



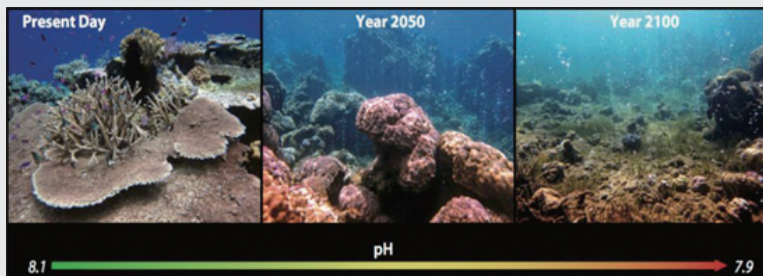
▲ 그림20 해양산성화 진행 과정

출처: 기상청기후정보포털

※ 수소이온농도 | 용액 1L 속에 존재하는 수소이온의 수를 의미. 수소이온농도를 나타내는 지표는 pH로 p는 지수의 power를, H는 수소이온을 나타냄. pH로 산성, 중성, 염기성인 수용액을 간단한 수치로 나타낼 수 있음

2. 해양산성화의 영향

pH 변화는 해양 탄산염의 화학적 특성을 변화시켜 홍합, 갑각류, 산호와 같은 해양생물의 석회형성 능력을 감소시킬 수 있으며, 이러한 복합적인 변화가 해양생물의 성장과 생식 능력을 약화시킴. 지난 20~30년간 관측값에 의하면 1980년대 후반 이래 매 10년간 0.017~0.027pH의 비율로 전 지구 평균 표면 해수 pH는 확연히 감소 경향을 보임. 이러한 변화는 수산업, 수산양식, 관광, 레크리에이션 등, 인간 복지과 관련된 해양서비스산업에 부정적인 영향을 유발



▲ 그림21 파푸아뉴기니의 이산화탄소 분압(pCO₂)과 수소이온농도(pH)의 분포에 따른 해양산성화

출처: Paul et al., Frontiers in Marine Science, 2016

3. 해양의 탄소순환

해양의 탄소순환은 생지화학적 순환(biogeochemical cycle)의 일환으로, 해양에서는 해수면을 통하여 대기 중 탄소가 용해되고, 해수의 증발에 따라 다시 대기 중으로 배출. 심해에서는 용존 무기 탄소의 농도가 표층보다 약 15% 높고, 이러한 용존 무기 탄소는 장시간에 걸쳐 해양 심해로 저장되고 심해와 표층 사이의 탄소순환은 심해 해류의 열염분 순환에 의해 서로 교환 됨. 대기 중에서 해양으로 흡수되는 탄소는 주로 탄산염 형태로 변환되어 용해되고, 탄산염으로 변환된 탄소는 식물성 플랑크톤의 광합성을 통해 유기 탄소가 되고, 식물성 플랑크톤은 동물성 플랑크톤과 해양 생물체의 먹이사슬을 통해 교환. 해양 생물체가 썩어서 탄산칼슘과 같은 형태로 전환되고 심해로 침전되어 탄소 퇴적물을 형성

2-2. 기후변화 탐지

가. 기후변화 탐지와 원인 규명

- 최근 수십 년 동안 기후가 변화함에 따라 전 대륙과 해양에 걸쳐 자연계 및 인간계가 영향을 받아왔으며, IPCC 4차 평가보고서 이후 인간 활동이 기후시스템에 영향을 미치고 있다는 증거가 확산됨
- 원인 규명 | 다수의 원인 인자가 관측된 변화 혹은 현상에 상대적으로 기여한 바를 평가하고, 이에 통계적 신뢰도를 부여하여 탐지된 기후변화의 원인을 찾아내는 과정
 - ※ 주로 외부강제력⁵⁾이 미치는 영향을 정량적으로 찾아내는 과정으로 기후변화의 원인 규명에서는 관측된 기후변화 및 인간 활동과 기타 요인, 자연적 요인 및 기후 요인 사이에 존재하는 연결관계를 정량화함
- 기후변화의 원인을 밝히는 연구 결과에서는 복사강제력 변화에 따른 온난화의 규모를 추정하여 제시하기 때문에 미래 기후변화를 전망하는 데 도움이 됨

포렌식스(범죄의 과학적 수사기법)로서의 탐지와 원인 규명



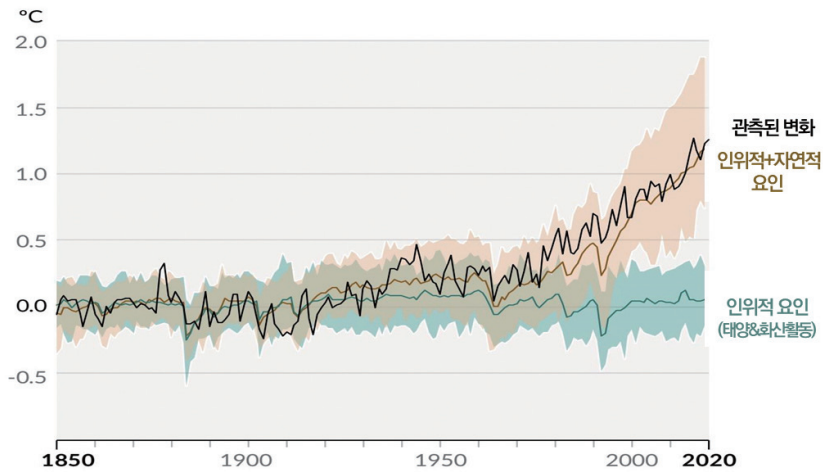
▲ 그림22 기후변화 탐지와 원인 규명 모식도

출처 : 한국기상학회

나. 기후변화 탐지와 원인 규명 방법

- 기후변화 탐지와 원인 규명은 기후변화 요인들(강제력)을 기후모델에 입력하고 그 반응 패턴을 추정한 다음, 이를 관측 패턴과 비교하는 방법으로 이루어짐
- 그림 23은 1850~1900년 전 지구 연평균 온도 변화에 대하여 기후모델 실험 결과와 관측자료를 비교하여 나타낸 것으로 기후모델 실험은 자연 및 인위적 강제력(두 강제력)을 모두 사용한 것과 자연적 강제력만 사용한 것으로 나누어 수행되었는데, 모든 강제력을 사용한 결과에서는 연평균 지표 온도가 증가하였으나 자연적인 강제력만을 사용한 모델 실험에서는 지구온난화를 모의할 수 없으므로 나타나 지구 평균온도 증가는 인위적 강제력에 의해 발생한 것으로 드러남

5) 외부강제력은 기후변화 원인의 또 다른 표현으로 온실가스와 에어로졸과 같은 인위적인 강제력과 태양과 화산활동과 같은 자연적인 강제력으로 나눌 수 있음. 외부강제력 요인들은 지구의 복사평형을 깨뜨려 기후를 변화시키는 역할을 함

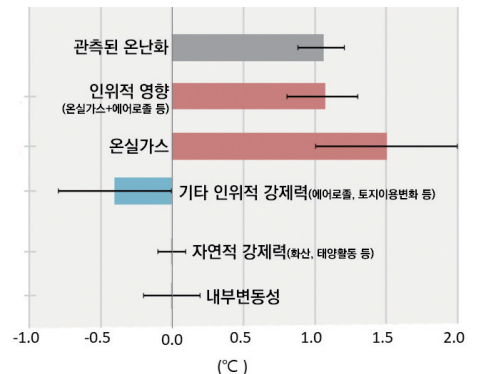


▲ 그림23 인위적·자연적 요인에 따른 기온변화

(검정 실선) 1850~1900년 대비 관측된 연평균 지표 온도
 (갈색 실선) 1850~1900년 대비 인위적·자연적 인자를 모두 고려한 연평균 지표 온도변화
 (녹색 실선) 1850~1900년 대비 자연적 인자(태양, 화산)만을 고려한 연평균 지표 온도변화
 * 실선은 다중 모델의 평균값을 나타내며 음영 영역은 모의 결과 중 신뢰도가 매우 높은 범위

다. 인위적 원인에 의한 기후변화 규명

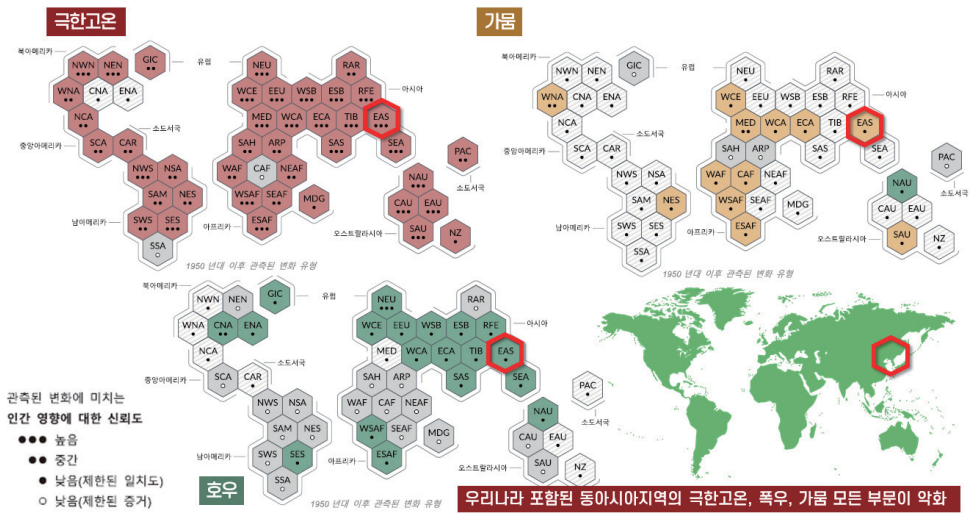
- 1990년대 시작된 기후변화 탐지와 원인 규명 연구는 장기간의 관측 자료가 상대적으로 많은 전 지구 대기와 해양의 온난화를 중심으로 수행되어 왔는데, 인간 활동에 의한 온실가스 증가가 전 지구적 온난화의 주요한 원인임이 밝혀짐
- 관측된 전 지구 평균 표면 온도 상승의 절반 이상은 온실가스 농도와 기타 인위적 강제력의 증가에 의해 나타났을 가능성이 대단히 높음
- 1990년 이후 전 지구 빙하 감소, 1970년 이후 해양상층부(0~700m) 온난화 등을 유발함
- 2000년대 이후로는 대기 중 수분 변화와 전 지구적 강수 패턴의 변화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 또한 전 지구 규모보다 작은 북극지역, 미국 대륙과 같은 특정 공간 규모에 대해서도 폭넓게 연구되고 있음
- 최근에는 인간 및 생태계에 큰 영향을 주는 극한기후에 대한 탐지 및 원인 규명 연구가 활성화되고 있는데 이는 전 지구 및 지역 규모에서 극한기온의 빈도가 증가하기 때문임



▲ 그림24 2010~2019년에 관측된 표면 온도 변화에 대한 기여도

출처 : IPCC 6차 보고서

관찰된 온난화는 인간 활동으로 발생되었으며, 온실가스로 인한 온난화는 에어로졸, 토지 이용 변화 등에 의한 냉각으로 일부 상쇄되어 최종적으로 전지구 지표면 온도 상승은 산업화 이전(1850~1900년) 대비 0.8~1.3°C 상승



▲ 그림25 인간 활동에 의한 지역별 폭염, 폭우, 가뭄의 관측된 변화

출처 : IPCC6차 보고서

교육주안점

- 지구시스템 권역별 대표적인 기후변화 현황 추세를 특히 지구온난화와 연관하여 학습자들이 이해하도록 한다.
- 지구온난화의 원인으로 여러 권역의 기후가 변화하는 과학적 원리를 쉽게 풀어 설명하여 학습자들의 이해를 돕는다.
- 전 지구적 기후변화와 한반도 기후변화의 대표적 현황을 학습자들이 인지하도록 한다.
- 에어로졸 증가와 대기오염(미세먼지) 등 지구온난화에 직접적으로 영향을 받지 않지만 상호작용하는 인위적 변화에 대해 이해하도록 한다.
- 기후변화 원인 규명 및 탐지 방법과 개념을 학습자들이 이해하도록 한다.
- 자연 변동성과 구분되는 인간 활동에 의한 인위적 원인이 초래한 다양한 기후변화 현상들을 학습자들이 인지하도록 한다.

참고자료

참고 문헌

- IPCC 지구온난화 1.5도 특별보고서(IPCC, 2018)
- IPCC 해양 및 빙권 특별보고서(IPCC, 2019)
- 한국 기후변화 평가보고서 2020(기상청, 2020)
- IPCC 6차 평가보고서 (IPCC, 2021)

참고 사이트

- 빙하면적 감소영상(<https://www.youtube.com/watch?v=0b3eecjAXTw>)
- 국가기후변화적응포털(kacc.kei.re.kr)
- 기상청기후정보포털(<http://www.climate.go.kr/>)
- 기상청위키피디아(http://www.climate.go.kr/home/10_wiki/index.php/)



2050



Ⅲ

기후변화 전망 및 영향



Ⅲ. 기후변화 전망 및 영향

교육 개요

- 기후변화를 전망하는 과학적 원리와 다양한 기후변화 모델을 통한 기후변화 예측으로 연계
- IPCC 1.5도 특별보고서 주요 내용을 제시하여 기후변화 영향에 대해 신뢰성 확보
- 탄소배출 시나리오별 달라지는 지구온난화 정도에 따라 자연생태계, 사회경제 등 주요부문에서 기후변화 영향 및 위험성을 통해 탄소중립의 중요성을 강조

교육 목표

- 기후변화 전망의 틀인 기후모델/지구시스템모델 이해
- 탄소배출 시나리오와 미래 기후변화 시나리오 개념 이해
- 기후변화로 인한 전 지구적 그리고 한반도의 다양한 기후영향과 위험 이해
- 우리나라 기후변화와 이상기상 발생 현황과 미래 변화를 인식하여 앞으로 가속화될 수 있는 기후 위험 상황과 그 시급성을 이해

교육 요소

| | | |
|----------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| 기후모델과 미래기후 | 기후모델 및 지구시스템 모델 | - 기후모델 및 지구시스템모델 정의 |
| | 미래 기후변화 시나리오 | - 기후변화 시나리오 정의 및 대표 시나리오 |
| | 다양한 사회경제경로에 따른 미래기후 | - 누적이산화탄소 배출량과 지구온난화 관계 - SSP시나리오에 기반한 전 지구 및 한반도 기후변화 전망 |
| 지구온난화와 기후변화 영향 | 지구온난화 정도에 따른 우려요인 | - 지구온난화와 기후위험, 기후변화 우려 요인 |
| | 자연 생태계의 영향 및 위험 | - 잠재적 영향 / 생물다양성 감소 |
| | 사회경제 시스템의 영향 및 위험 | - 경제적 피해 / 식량문제 / 인권 문제 |
| 우리나라의 기후변화 전망 | 주요부문별 전망 | - 물관리 / 생태계 / 농수산 / 건강 / 산업 및 에너지 분야 영향 |

1. 기후모델과 미래 기후

■ 기후모델과 지구시스템 모델

| 구 분 | 기후모델 | 지구시스템 모델 |
|-------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 목 적 | 장기예보(1개월 또는 3개월 예보) | 기후변화 미래 전망 |
| 개 요 | 기후시스템으로 재현하여 과거 기후 재현 및 미래 기후 예측 | 기후모델+ 인간 활동에 의한 기후변화 반영 |
| 구성 요소 | 대기, 해양, 해빙, 지면과정 | 기후모델 구성 요소(대기, 해양, 지면 등) + 온실가스, 생태계 반응, 대기조성, 에어로졸 등 |
| 예측 범위 | 수일~수년 | 수년~수백 년 |

☞ 기후모델, 지구시스템 모델

■ 미래 기후변화 시나리오

- 인간 활동에 의한 탄소배출에 따른 탄소농도 시나리오를 지구시스템 모델에 적용하여 미래 기후전망에 사용. 대표적으로 대표농도경로(RCP)와 공통사회경제경로(SSP)가 있음

〈대표농도경로(RCP)〉 인간 활동이 대기에 미치는 복사강제력에 따라 총 4종의 RCP시나리오 구분

| 구 분 | 시나리오 설명 | 2100년 기준 CO ₂ 농도(ppm) |
|--------|-----------------------------|----------------------------------|
| RCP8.5 | 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우 | 940 |
| RCP6.0 | 온실가스 감축 정책이 어느 정도 실현되는 경우 | 670 |
| RCP4.5 | 온실가스 감축 정책이 상당히 실현되는 경우 | 540 |
| RCP2.6 | 지금부터 즉시 온실가스 감축 수행 | 420 |

〈공통사회경제경로(SSP)〉

온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응 대책 수행 여부에 따른 미래 사회경제 구조로 총 5종 시나리오로 구분



| 종 류 | 의 미 |
|------|-----------------------------------------------------------------|
| SSP1 | 재생에너지 기술발달로 화석연료 사용이 최소화 되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우 |
| SSP2 | 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우 |
| SSP3 | 기후변화 완화 정책이 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우 |
| SSP4 | 주요 배출지역의 기후변화 완화 능력이 크지만 나머지 지역은 기후변화에 취약하고, 적응능력이 낮음 |
| SSP5 | 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우 |

☞ 기후변화시나리오, 대표농도경로(RCP), 공통사회경제경로(SSP)

■ 다양한 사회경제경로에 따른 미래 기후

- 미래 기후변화 시나리오에 따라 지표 및 해양 온도, 해수면 상승 및 산성화, 강수량 변화 등이 다양한 결과로 예측할 수 있으며, 기후변화는 서식지, 생물다양성 등 자연생태계와 식량 안보, 질병·건강, 경제, 인권 등 인간계의 다양한 영역에서 영향을 끼치고 위험을 가져옴
- 우리나라에서도 기후변화 시나리오에 따라 연강수량 상승, 계절 변화, 고온관련 기상재해 발생일수, 질병 증가 등 다양한 변화 발생

☞ RCP 기후변화 시나리오에 따른 전 지구적, 한반도 기후변화

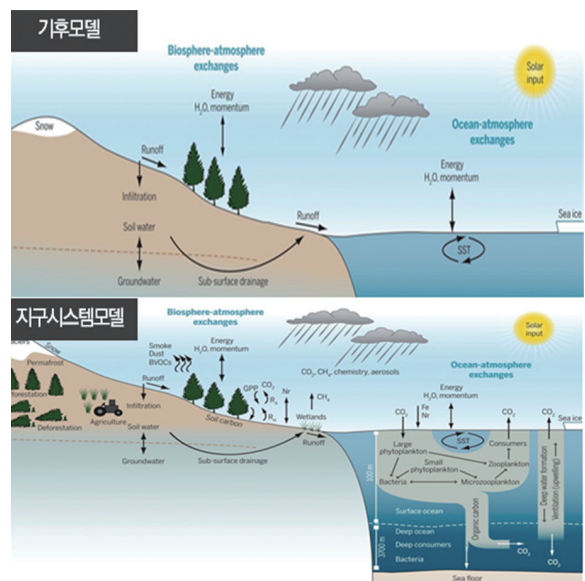
1-1. 기후모델과 지구시스템 모델

가. 기후 모델

- 물리적 기후시스템을 재현하는 수치 모델로 수일~수년 시간규모 기후 예측성의 근원이 되는 대기, 해양, 해빙, 지면 과정이 주요 구성 요소로 대기-해양 접합모델(atmosphere-ocean coupled model)이라고도 함
- 전 지구 대기-해양 접합모델의 물리적 현상에 대한 여러 법칙들과 연관된 수학 방정식을 수치적으로 구현하는 모형의 한 유형으로 전 지구를 3차원 격자로 분할하고 관련된 유체의 물리, 화학 방정식을 적용하여 각 격자점에서 필요한 값을 계산함
- 기후 변동성을 이해하기 위하여 과거 기후를 재현하거나 미래 날씨와 기후변화를 예측하는 데에 널리 사용됨
- 현재에는 대기모델 및 해양모델뿐만 아니라 지면모델, 해빙모델 등과 함께 구성되기도 하며 이외에 화학 모델, 파랑모델, 육빙모델 등 더 다양한 요소들을 포함하는 더욱 복잡한 지구시스템 모델로 확장되어 진화 중

나. 지구시스템 모델

- 수년 ~ 수백 년 시간규모 기후변화를 재현하는 수치모델
- 인간 활동에 의한 기후변화를 반영하기 위하여 대기·해양·지면·해빙 등 물리적 기후시스템을 기반으로 하는 간단한 기후모델에 온실가스(탄소 순환), 생태계 반응, 대기조성(대기화학), 에어로졸, 해양생지화학, 육지빙하, 중간권·열권 고층대기 등 다양한 요인과 과정을 추가한 지구시스템 모델을 고도화하여 더욱 정확한 미래 기후 모습을 예측할 수 있도록 함



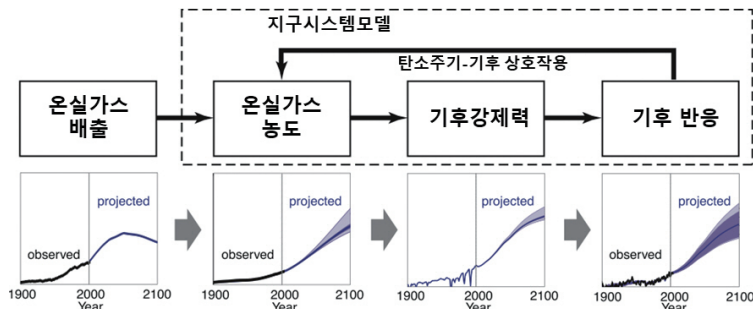
▲ 그림26 기후모델(위)과 지구시스템 모델(아래) 비교 모식도

출처 : Bonan and Doney, 2018, Science

1-2. 미래 기후변화 시나리오

가. 기후변화 시나리오란?

- 온실가스 배출량의 변화, 토지 이용의 변화, 에어로졸 배출량의 변화 등 기후강제력⁶⁾에 따른 미래의 가능한 변화(기온, 강수량 등 기후시스템 변화, 생태계 및 농업 등 인간 사회경제활동과 연계된 변화, 기후변화 대응 기술 및 정책 개발 등 변화)를 산출
- 특히 이산화탄소 누적 배출량은 21세기 후반과 그 이후의 평균 지구 표면 온난화에 상당한 영향을 미치며, 미래 온실가스 배출량은 사회경제적 개발과 기후 정책에 의존해서 매우 다르게 전망됨



온실가스 배출량 → 대기 중 온실가스 농도 → 기후 강제력 → 지구 온난화 → 영향

▲ 그림27 지구시스템 모델을 활용한 미래 기후변화 시나리오 생산과정 모식도

- 기후변화 시나리오의 목표는 단순히 미래를 예측하는 것이 아니라, ‘광범위하게 발생할 수 있는 모든 범위의 미래’를 고려하여 신뢰할 수 있는 의사결정을 위해 불확실성을 이해하는 것으로 미래에 기후변화로 인한 영향을 평가하고 피해를 최소화하는 데 활용할 수 있는 선제적인 정보로 활용

나. 기후변화 시나리오 종류

| 대표농도경로(RCP) | 공동사회경제경로(SSP) |
|---------------------|---------------------|
| IPCC 5차 평가보고서(2014) | IPCC 6차 평가보고서(2021) |

1) 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, 약칭 RCP)

- IPCC 5차 평가보고서(2014)에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사강제력으로 온실가스 농도를 정하였는데 이를 RCP라고 함. 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회·경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 ‘대표(Representative)’라는 표현을 사용하며, 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로(Pathways)’라는 의미를 포함
- RCP 시나리오는 엄격한 완화 시나리오(RCP2.6), 중간 시나리오(RCP4.5 및 RCP6.0) 두 가지와 매우 높은 온실가스 배출량 시나리오(RCP8.5) 총 4종이 있으며, 시나리오의 뒷 부분 숫자는 복사강제력*을 뜻함

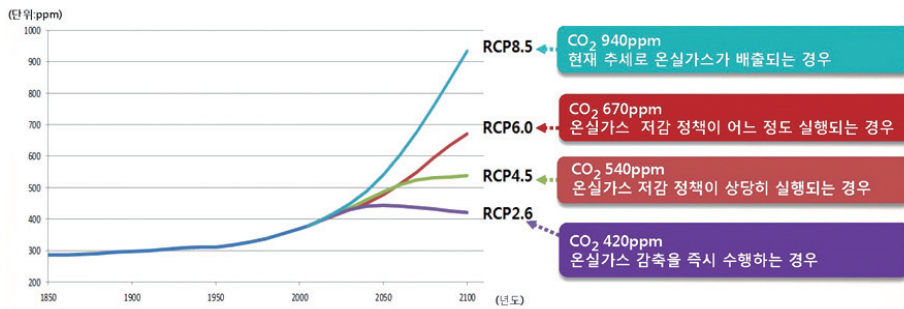
* (복사강제력) 태양에너지나 이산화탄소의 농도 변화와 같이 기후시스템의 외부강제력에서의 변화나 내부변화에 의해 에너지 평형을 변화시키는 척도로 (+)값이 높을수록 지표온도가 상승

6) 기후시스템을 움직이는 모든 요소들

- 4종의 RCP 시나리오에서 온실가스 배출량 감축을 위한 어떠한 노력도 이루어지지 않은 경우의 시나리오인 '베이스라인(baseline) 시나리오' 경로는 RCP6.0과 RCP8.5 사이에 존재하며, RCP2.6은 전 지구온난화 수준이 산업화 시대 이전 기온 대비 2°C 상승 이하로 유지될 가능성을 높이는 것을 목표로 하는 시나리오임

표5 RCP 시나리오별 설명 및 2100년 기준 CO₂ 농도 및 복사강제력

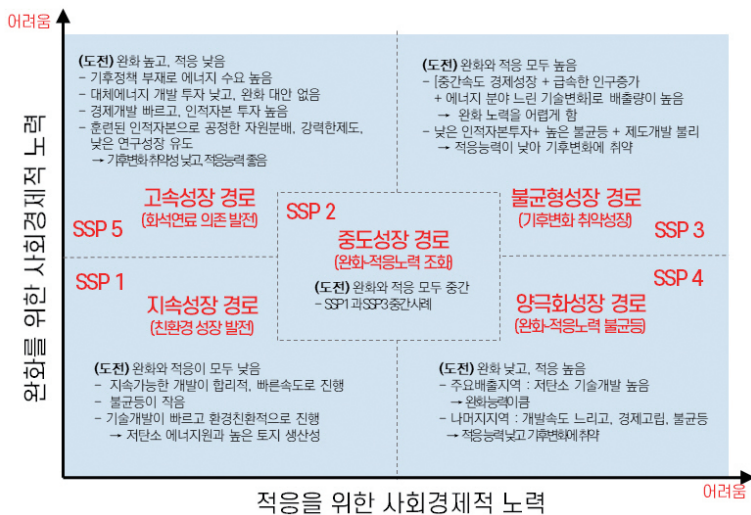
| 종류 | 시나리오 설명 | 2100년 기준 | |
|--------|---------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| | | CO ₂ 농도(ppm ⁷⁾) | 복사강제력(W/m ²) |
| RCP2.6 | 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우 | 420 | 2.6 |
| RCP4.5 | 온실가스 감축 정책이 상당히 실현되는 경우 | 540 | 4.5 |
| RCP6.0 | 온실가스 감축 정책이 어느 정도 실현되는 경우 | 670 | 6.0 |
| RCP8.5 | 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우 | 940 | 8.5 |



▲ 그림28 RCP 시나리오별 과거로부터 2100년까지 온실가스 배출 경로에 따른 이산화탄소 농도

출처 : 기후변화 시나리오를 알면 미래가 보인다(기상청, 2012)

2) 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, 약칭 SSP)



▲ 그림29 SSP 시나리오의 특성

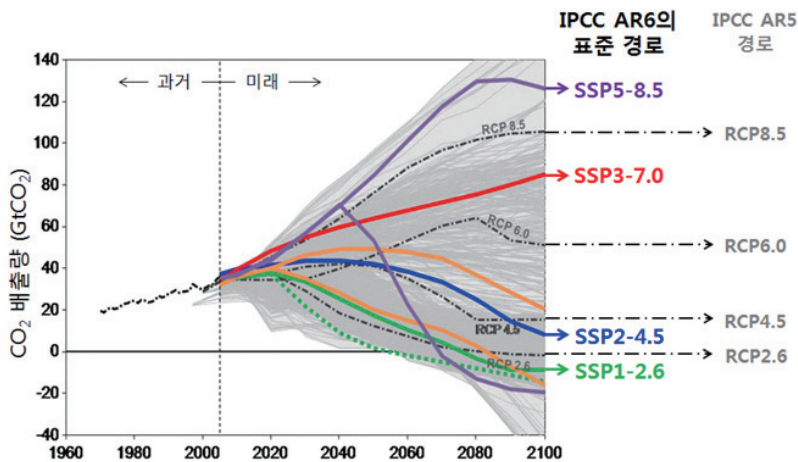
출처 : O'Neill et al.(2014) 재구성

7) ppm: parts per million(1/106), 백만분의 일

- IPCC가 6차 평가보고서 작성을 위해 각국의 기후변화 예측 모델로 온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응대책 수행 여부 등에 따라 미래 사회경제 구조가 어떻게 달라질 것인지를 고려한 SSP 시나리오 사용
- 2100년 기준 복사강제력 강도(기존 RCP 개념)와 함께 미래 사회경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 5개 시나리오로 구별되며, 인구통계, 경제발달, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도, 기술 발달, 사회적 인자, 정책 등 고려
- 사회경제지표를 나타내는 첫 번째 숫자는 사회발전과 온실가스 감축 정도에 따라 구별하는데, SSP1과 SSP5는 사회가 발전되면서 온실가스 감축을 잘하거나(1), 못한(5) 경우, SSP3과 SSP4는 사회발전이 더디나 온실가스 감축을 잘하거나(4), 못한(3) 경우, 그리고 SSP2는 다른 사회경제경로의 중간단계 정도의 발전 및 감축을 이룬 경우임. 2번째 숫자는 RCP 시나리오와 같이 2100년 기준의 복사강제력(2.6, 4.5, 7.0, 8.5W/m²)을 나타내는데, SSP5-8.5는 태양에너지 8.5W/m²(현재 흡수되는 태양에너지 양의 3.6%)가 현재보다 더 흡수됨을 의미함

표6 SSP 시나리오 설명

| 종류 | 의미 |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SSP1-1.9 | 2100년까지 전 지구 지표 온도를 1.5℃ 이하로 유지하기 위해 사회가 발전되며 온실가스 감축을 잘하고 2100년의 복사강제력을 1.9W/m ² 수준으로 제한하는 것을 전제하는 경우 |
| SSP1-2.6 | 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우 |
| SSP2-4.5 | 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우 |
| SSP3-7.0 | 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우 |
| SSP5-8.5 | 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우 |

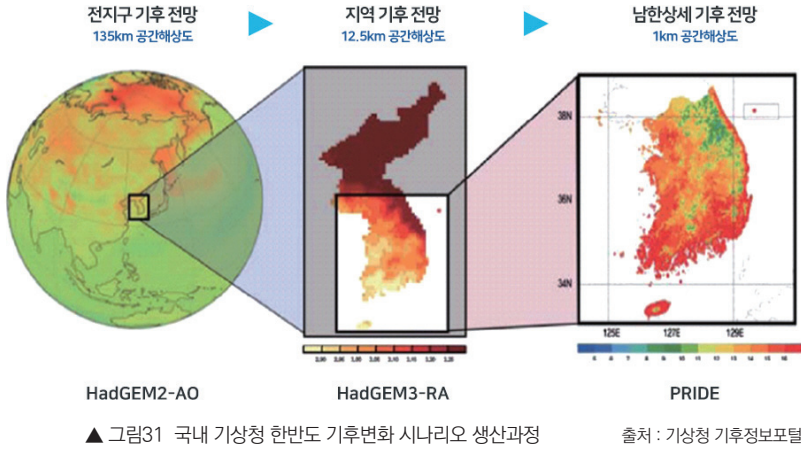


▲ 그림30 SSP 시나리오별 과거(1970 ~ 2014) 및 미래(2015 ~ 2100)의 온실가스 배출 경로에 따른 이산화탄소 배출량
출처 : 기상청 기후정보포털

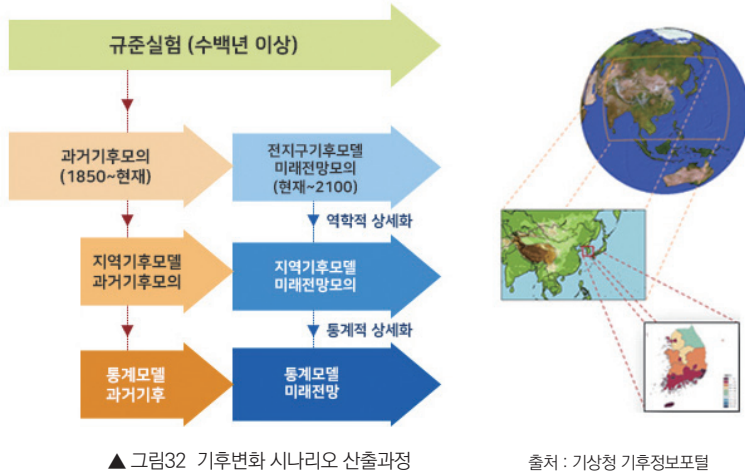
IPCC 6차 평가보고서의 표준 경로는 오른쪽에 표기된 SSP1-2.6(녹색 실선), SSP2-4.5(청색 실선), SSP3-7.0(적색 실선), SSP5-8.5(보라색 실선)의 4종이며, 그 외에 표기되지 않은 선들은 표준 외에 가능한 배출 경로들을 나타내며, 가능한 배출 경로들의 전체 범위를 회색 음영으로 표기

다. 지역 기후변화 전망

- 지역(한반도) 기후변화 전망을 위해 다음 방법을 활용하여 시나리오를 산출



- 전 지구적 시나리오에서 우리나라의 기후변화를 산출하기 위해 역학적 상세화 과정과 통계적 상세화 과정을 거쳐 산출
 - **(역학적 상세화)** 전지구의 저해상도 시나리오를 생산하고, 전지구 시나리오를 입력 자료로 사용하여 동아시아와 한반도의 기후 및 지형특성을 반영하여 역학적으로 상세화하여 고해상도 시나리오 산출
 - **(통계적 상세화)** 동아시아와 한반도 지역기후모델에서 생산된 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 기법을 적용하여 1km수준의 남한의 상세 기후변화 시나리오 생산



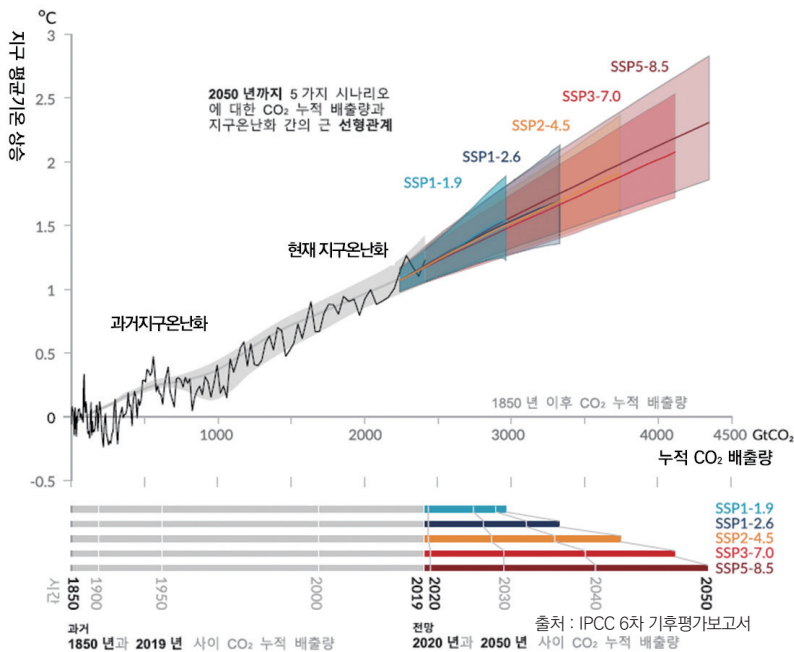
- 하나의 모델에서 산출한 기후변화 시나리오 불확실성을 낮추기 여러 가지 지역기후모델을 이용한 앙상블 시나리오를 생산하여 신뢰수준을 높임

1-3. 다양한 사회경제경로에 따른 미래 기후

가. 누적이산화탄소 배출량과 지구온난화 관계

- 2100년까지의 지구 기온 변화와 인간 활동에 의해 누적된 이산화탄소 배출량 간에는 거의 선형에 가까운 정도로 강력하고 일관적인 상관관계가 존재하므로 지구온난화 안정화를 위해서는 탄소중립 도달이 필수적임
- 온난화 정도는 누적 이산화탄소 배출에 비례하기 때문에 2100년까지 1.5℃~2℃로 온난화를 억제와 연계 되는 누적 이산화탄소 배출량이 정해져 있으므로, 초반 부에 배출량이 많으면 후반부로 갈수록 배출해도 되는 양이 감소하게 됨
- 산업화 이전(1861~1880년) 대비 인위적 요인에 의한 지구 평균 온도 상승을 2℃ 이하로 억제⁸⁾하기 위해서는 모든 인위적 요인에 의한 1870년대 이후의 총 누적 이산화탄소 배출량을 약 2900GtCO₂(비-이산화탄소 요인에 따라 2,550에서 3,150GtCO₂의 범위) 이하로 유지해야 하는데, 1850년부터 2019년까지 약 2390 GtCO₂이 이미 배출되었음

나. SSP 시나리오에 기반한 전 지구 기후변화 전망



▲ 그림33 이산화탄소 배출량과 지구기온 상승 관련성

상단 그림 : 과거 자료(얇은 검정선)는 1850년부터 2019년까지 누적 이산화탄소 GtCO₂ 배출량의 함수로 1850~1900년 이래로 관측된 전 지구 지표면 온도를 보여줌. 중앙선과 함께 있는 회색 영역은 과거 인간에 의한 지표 온난화에 상응하는 추정치를 보여준다(Figure SPM.2에서 확인할 수 있음). 채색된 영역은 전 지구 지표 온도 전망에 대한 매우 높은 신뢰도를 가진 영역으로 두껍게 채색된 중앙선은 다음의 시나리오(SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, 그리고 SSP8.5, 그림 SPM.4에서 확인할 수 있음)에 대해 2020년부터 2050년까지 누적 CO₂ 배출량의 함수로서의 중간 추정치를 보여줌. 전망에는 시나리오별 누적 CO₂ 배출량이 사용되었고, 지구온난화는 모든 인간 활동에 의한 강제력의 기여가 포함

하단 그림 : 각각의 시나리오에 대한 과거 및 전망된 누적 CO₂ 배출량

8) 2℃ 이하 온난화로 제한하는 확률이 66% 이상일 경우를 가정

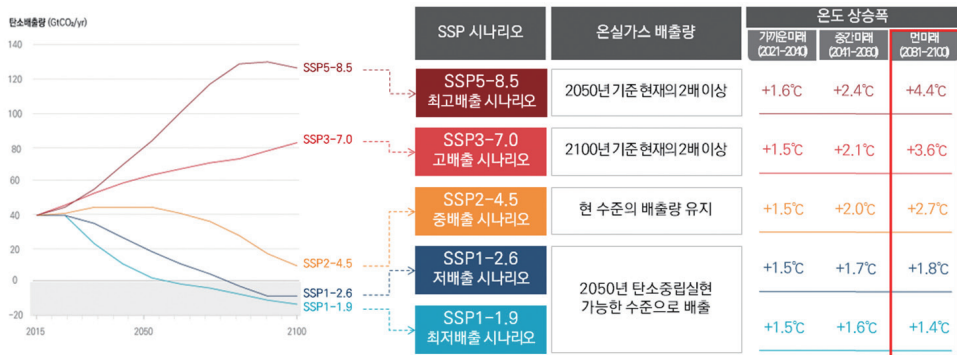
1) 온실가스 배출량과 지구 평균기온 상승 전망

- (온실가스 배출량) 시나리오 간 사회경제적 가정, 기후변화 완화 수준, 에어로졸 및 비메테인 오존 선행물질에 대한 제어에 따라 달라짐

표7 시나리오별 온실가스 배출 전망

| 시나리오 | 가장 많이 배출 (SSP5-8.5) | 많이배출 (SSP3-7.0) | 중간 정도 배출 (SSP2-4.5) | 가장 적게 (SSP1-1.9), 적게(SSP1-2.6) 배출 |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|
| 온실가스 전망 | 2050년 현 수준의 대략 2배 도달 | 2100년 현 수준의 대략 2배 도달 | 이번 세기 중반까지 대략 현 수준의 배출량 유지 | 탄소중립을 2050년 달성 이후 각기 다른 수준으로 CO ₂ 네거티브 배출 |

- (온도 상승) 모든 배출 시나리오에서 최소 21세기 중반까지 전 지구 지표 온도는 계속 상승하며, 다가올 수십 년 동안 CO₂와 다른 온실가스 배출량의 상당한 감축 없이는 21세기 중 1.5°C, 2°C 지구온난화를 넘어설 것으로 전망
 - 1850~1900년(산업화 이전) 대비 2081~2100년 전 지구 지표면 온도는 가장 적게 배출하는 시나리오일 때 1.0~1.8°C, 가장 많이 배출하는 시나리오일 때 3.3~5.7°C 상승



▲ 그림34 인간 영향이 없을 때의 기후를 나타내는 1850~1900년 대비 시나리오별로 예측된 전 지구 평균 온도

표8 SSP시나리오별 시기에 따른 상승 온도 예측(1850~1900년 대비)

| 시나리오 | 근 미래(2021-2040) | 중 미래(2041-2060) | 먼 미래(2081-2100) |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SSP1-1.9 | 1.5°C (1.2~1.7) | 1.6°C (1.2~2.0) | 1.4°C (1.0~1.8) |
| SSP1-2.6 | 1.5°C (1.2~1.7) | 1.7°C (1.3~2.2) | 1.8°C (1.3~2.4) |
| SSP2-4.5 | 1.5°C (1.2~1.8) | 2.0°C (1.6~2.5) | 2.7°C (2.1~3.5) |
| SSP3-7.0 | 1.5°C (1.2~1.8) | 2.1°C (1.7~2.6) | 3.6°C (2.8~4.6) |
| SSP5-8.5 | 1.6°C (1.3~1.9) | 2.4°C (1.9~3.0) | 4.4°C (3.3~5.7) |

표9 SSP시나리오별 시기에 따른 1.5°C, 2.0°C 지구온난화 확률

| 구분 (상승온도/기준시기) | 1.5°C 지구온난화 | | 2°C 지구온난화 | |
|-------------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | 2021~2040 | 2041~2060 | 2041~2060 | ~2100년 |
| SSP5-8.5 | 90~100% | 90~100% | 90~100% | 100% |
| SSP3-7.0 | 66~100% | 66~100% | 66~100% | 95~100% |
| SSP2-4.5 | | 50~100% | 50~100% | 0~33% |
| SSP1-2.6 | 50~100% | 0% | 0% | 0~5% |
| SSP1-1.9 | 50~100% | 0% | 0% | 0% |

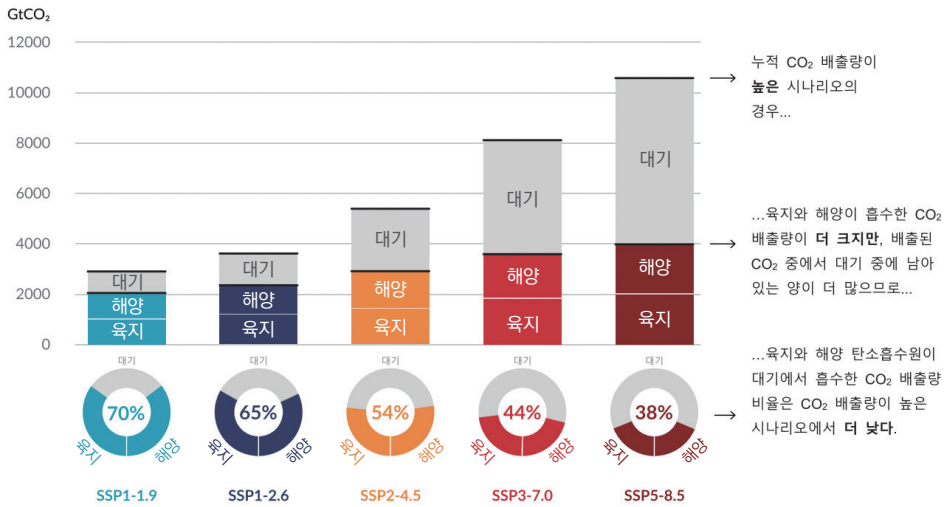
※ 가장 적게 배출하는 시나리오(SSP1-1.9)는 1.5°C 이상 상승하였다가 21세기 말 1.5°C 이하로 다시 돌아올 가능성이 상대적으로 높음(50~100%)

2) 기후시스템 내 변화 전망

- 지구온난화 증가에 따라 전 지구 물 순환(변동성, 전지구 몬순 강수, 습윤·건조 현상 등) 강화, 북극 해빙, 눈 덮임, 영구 동토층 감소뿐만 아니라 극한 고온, 이상 고수온, 호우, 일부 지역 내 농업·생태학적 가뭄의 빈도와 강도, 강력한 열대 저기압의 비율 증가 등 기후시스템 내 변화는 커질 것임
- (CO₂ 흡수) 해양과 육지의 탄소 흡수는 더 적게 배출하는 시나리오에 비해 더 많이 배출하는 시나리오일 때 육지와 해양의 CO₂ 흡수 절대량은 더 많지만, CO₂ 배출량 중 육지와 해양에서 흡수하는 비율은 감소하며, 이 결과 CO₂ 배출량 중 대기 중에 남는 비율이 높아질 것으로 전망
 - 중간 정도로 배출하는 시나리오일 때 육지와 해양의 CO₂ 흡수 속도는 21세기 후반 감소하며, 가장 적게 배출하는 시나리오일 때 육지와 해양은 대기 중 CO₂ 농도 감소에 대한 반응으로 탄소를 덜 흡수하기 시작하고, 2100년까지 약한 배출원이 됨
- (해수면 상승) 장기적으로 심해 온난화와 빙상 녹음이 지속되어 해수면은 수백 년에서 수천 년 동안 상승하고 수천 년 동안 상승된 채 남아 있을 것으로 전망

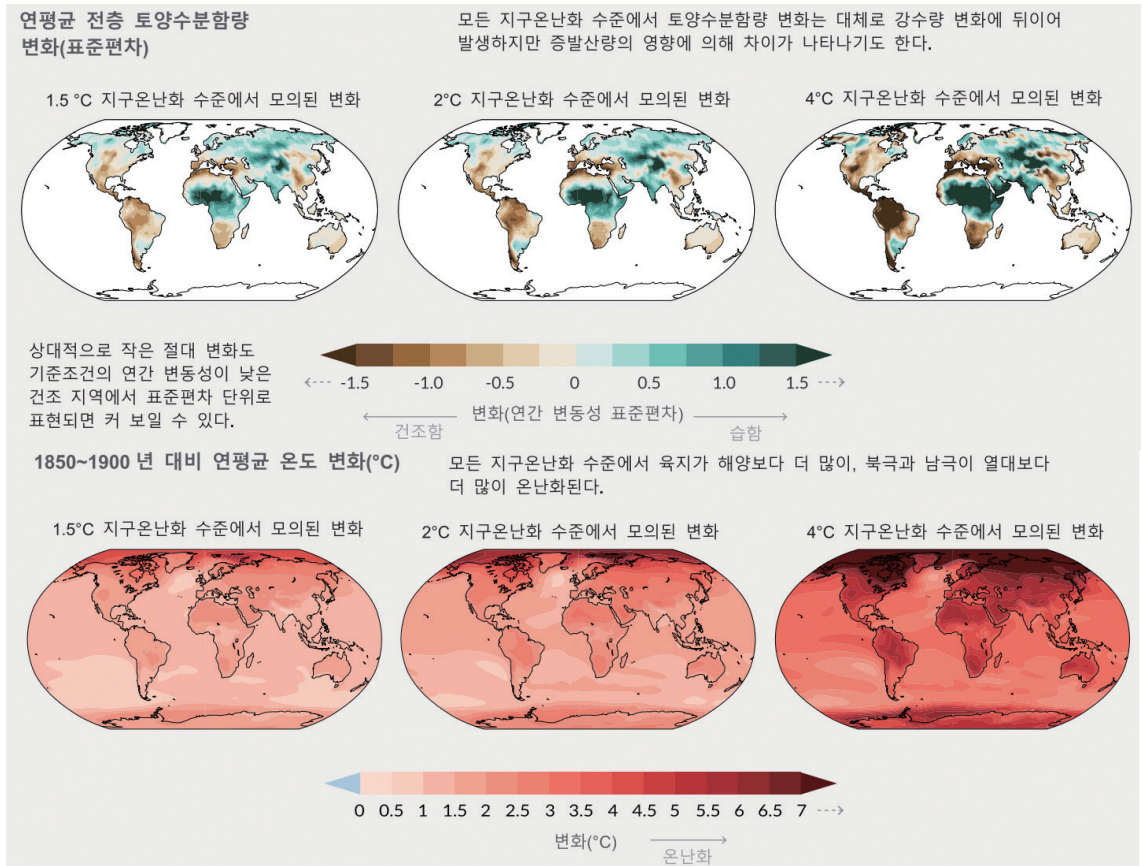
표10 시나리오별 해수면 상승 전망 (1995-2104년 대비)

| 구분 | 2100년 | 2150년 | 비고 |
|----------------------------|------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 가장 적게 배출하는 시나리오 (SSP1-1.9) | 0.28~0.55m | 0.37~0.86m | 빙상 과정에 대한 불확실성을 배제하지 않는다면 가장 많이 배출하는 시나리오일 때 전 지구 평균 해수면은 2100년까지 2m(2150년까지 5m) 상승 |
| 가장 많이 배출하는 시나리오 (SSP5-8.5) | 0.63~1.01m | 0.37~0.86m | |



▲ 그림35 SSP시나리오에서 육지와 해양이 흡수한 총 CO2 누적배출량(색)과 대기중 남은 CO2

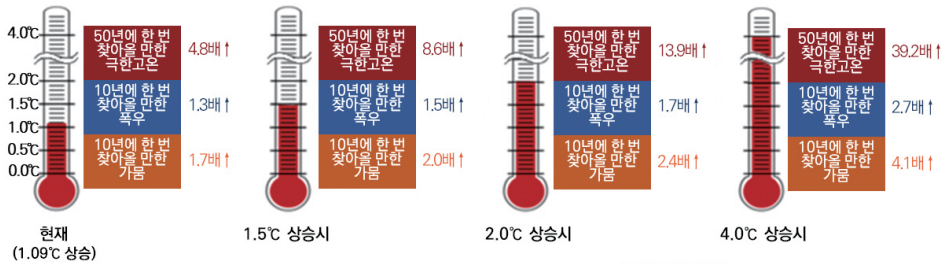
출처 : IPCC 6차 평가보고서(IPCC, 2021)



미래 온실가스 배출이 많아질수록 지역적 기온 상승이 더욱 커지고, 강수량 변화도 더 커지게 됨. 지구온난화가 심화될수록 지역에 따라 강수량이 크게 증가하거나 혹은 크게 감소하게 되어 가뭄·장마 등이 잦아지거나 심화됨

▲ 그림36 인간 활동의 영향이 없을 때의 기후를 나타내는 1850~1900년 대비 지구온난화 1.5°C, 2°C, 4°C 수준일 때의 온도(위) 및 강수(아래) 분포
출처 : IPCC 6차 평가보고서(IPCC, 2021)

산업화 이전(1850~1990년)을 기준(0°C)으로 했을 때, 극한 현상의 빈도 변화



▲ 그림37 인간 활동의 영향이 없을 때의 기후를 나타내는 1850~1900년 대비 지구온난화 1°C, 1.5°C, 2°C, 4°C 수준일 때의 극한 현상 빈도 변화 출처 : IPCC 6차 평가보고서(IPCC, 2021)

다. SSP 시나리오에 기반한 한반도 기후변화 전망

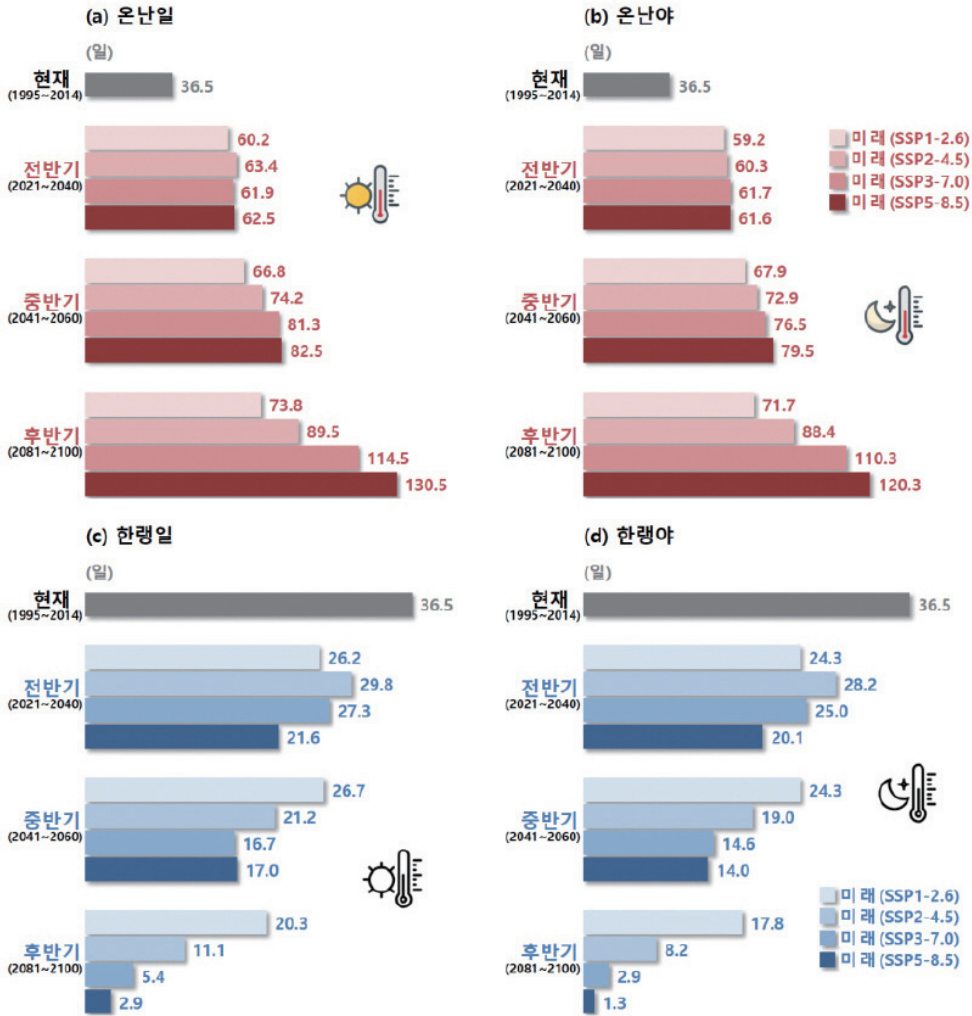
- 한반도의 미래 연평균 기온은 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 2.6~7.0°C 상승

| 구분 | 미래 전반기(2021~2040) | | | | 미래 후반기(2081~2100) | | | |
|-----------|-------------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|
| | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
| 평균 기온 상승폭 | 1.6°C | 1.5°C | 1.5°C | 1.8°C | 2.6°C | 3.9°C | 5.9°C | 7.0°C |

- 연 강수량의 경우 현재(1995~2014) 대비 미래 후반기(2081~2100) 강수량의 변화는 SSP1-2.6 시나리오의 경우 약 2% 증가되며, SSP5-8.5 시나리오에는 약 13% 급증

| 구분 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기(2021~2040) | | | | 미래 후반기(2081~2100) | | | |
|----------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
| 강수일수 (일) | 123.8 | 121.6 (-2.2) | 121.4 (-2.4) | 122.0 (-1.8) | 121.4 (-2.4) | 121.3 (-2.5) | 120.9 (-2.9) | 118.5 (-5.3) | 117.7 (-6.1) |
| 강수량 (mm) | 1195.2 | 1180.8 (-14.4) | 1209.1 (+13.9) | 1220.7 (+25.5) | 1167.4 (-27.8) | 1232.9 (+37.7) | 1351.5 (+156.3) | 1335.4 (+140.2) | 1379.2 (+184.0) |

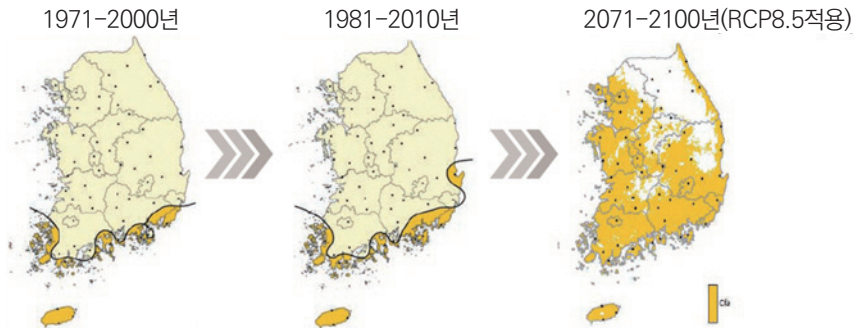
- 한반도의 온난화 전망에 따라 온난일, 온난야와 같은 고온 관련 극한 현상은 증가하고, 한랭일, 한랭야와 같은 저온 관련 현상은 감소할 것으로 전망
 - 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)은 미래전반기 이후 증가폭이 작아지고, 고탄소시나리오(SSP5-8.5)는 증가폭이 점점 증가



▲ 그림38 시나리오별 한반도 온난일, 온난야, 한랭일, 한랭야

출처 : 한반도 기후변화 전망보고서 2020(개정판)

- 트레와다(Trewartha)의 기후 구분 방법⁹⁾에 따라 1971~2000년과 1981~2010년의 평균값을 비교한 결과 한반도에서 아열대기후 지역이 소폭 확장됨



▲ 그림39 트레와다 기준을 적용한 아열대기후 지역의 분포 변화 경향 및 전망

출처 : 전지구기후서비스체제(GFCS) 이행을 위한 국내 기후정보 개발 및 서비스 개선 연구, 기상청(2015)

심화

기후변화와 극한기상 / 이상기후현상

기후변화는 사회와 대기, 해양, 빙권, 생태계 등 자연계에 영향을 미치고 있음. 이러한 영향은 점차 감소되거나 심화되는 방식으로 환경적·사회적 요인들과 상호작용하며, 영향의 유형과 크기는 변화하게 되는데, 우리가 생활 속에서 직접 체감하는 것은 기후변화로 인한 폭염, 호우, 한파 등의 기상현상임

• 기후변화가 극한 기후현상에 미치는 영향

- 극한 기후현상은 통계적으로 상위 또는 하위 5%에 해당하는 기후 요소에서 나타나는 현상을 의미하며, 자연변동성과 지구온난화 모두에서 원인을 찾을 수 있음
- 한반도의 온난화 전망에 따라 폭염 일수, 열대야 일수, 여름 일수와 같은 고온 관련 극한지수는 증가하고, 반면에 한파, 결빙, 서리 일수와 같은 저온 관련 극한지수는 감소할 것으로 전망

• 집중호우

- 짧은 시간 내에 많은 비가 오는 현상으로 일반적으로 한 시간에 30mm 이상이나 하루에 80mm 이상의 비가 내릴 때, 또는 연 강수량의 10%에 상당하는 비가 하루에 내리는 정도를 말하며 지역의 기후에 따라 기준이 달라짐

• 폭염

- 폭염은 매우 심한 더위로 인체에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 기상청은 일최고체감온도 33℃(35℃) 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상되거나 급격한 체감온도 상승 또는 폭염 장기화 등으로 중대한 피해 발생이 예상될 때 폭염주의보(경보)를 발표

9) 아열대기후는 기후 구분 기준에 따라 정의가 달라지나, 열대와 유사한 여름철 기후 특성을 보이며 겨울철이 비교적 온난하고 위도 30°를 중심으로 분포하는 열대와 온대의 중간에 위치하는 기후대로 통칭됨. 아열대기후를 분류하고 있는 대표적인 기후 구분법에는 쾨펜(Köppen), 트레와다(Trewartha), 크루츠버그(Creutzburg) 등이 있으나 그 기준은 크게 다름. 트레와다 기후 구분에서 아열대는 최한월 평균기온이 18℃ 이하이며, 월 평균기온이 10℃ 이상인 때가 8개월 이상인 지역으로 분류되며 전 세계 식생대를 가장 잘 반영한 기후 구분으로 평가됨. 쾨펜 기후 구분에서 아열대는 최한월 평균기온이 -3~18℃이며, 최한월 평균기온이 10℃ 이상인 지역으로 분류되며, 중위도의 많은 지역에서 아열대기후가 나타남. 크루츠버그 기후 구분에서 아열대는 월 평균기온이 6℃ 이하인 달이 없고, 20℃ 이상인 때가 2개월 이상일 때 아열대기후로 분류

• 가뭄

- 어느 지역에서 일정 기간 이상 평균 이하의 강수로 인해 강수량 부족이 장기화되는 현상으로 판단 기준에 의해 기상학적 · 수문학적 · 농업적 · 사회경제학적 가뭄으로 분류
- 기상학적 가뭄 : 일정 기간 평균 강수량보다 적은 강수로 건조한 날이 지속되는 것
- 농업적 가뭄 : 작물의 생육에 필요한 수분 부족이 지속되는 것
- 수문학적 가뭄 : 전반적인 수자원 공급의 부족이 지속되는 것
- 사회경제학적 가뭄 : 사회적으로 물의 수요가 증가하여 공급량을 초과하여 발생하는(사회경제학적 가뭄) 농업 · 공업 · 활용수 등의 부족이 지속되는 것

• 극한기후지수

- 극한기후지수는 극한기후를 정량적으로 파악하기 위해 세계기상기구 기준을 반영한 지수로서 열대야 일수, 폭염 일수, 호우 일수 등이 있음

| 종류 | 극한기후지수별 정의 | |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 기온관련 극한기후 지수 (16종) | 폭염 일수 | 일최고기온 33℃ 이상인 날의 연중 일수 |
| | 한파 일수 | 일최저기온 -12℃ 이하인 날의 연중 일수 |
| | 서리 일수 | 일최저기온이 0℃ 미만인 날의 연중 일수 |
| | 결빙 일수 | 일최고기온이 0℃ 미만인 날의 연중 일수 |
| | 여름 일수 | 일최고기온이 25℃ 이상인 날의 연중 일수 |
| | 열대야 일수 | 일최저기온이 25℃ 이상인 날의 연중 일수 |
| | 식물성장기간 | 일평균기온이 5℃보다 높은 날이 6일 이상 지속된 첫날부터 5℃ 미만인 날이 6일 이상 지속된 첫날까지 사이의 연중 일수 |
| | 일교차 | 일최고기온과 일최저기온 차이 값의 연평균 |
| | 온난일 | 일최고기온이 기준기간 90퍼센타일 초과한 날의 연중 일수 |
| | 온난일계속기간 | 일최고기온이 기준기간의 90퍼센타일 초과한 날이 최소 6일 이상 지속된 날의 연중 일수 |
| | 최대온난일계속기간 | 일최고기온이 기준기간의 90퍼센타일을 초과한 날의 연중 최대지속일수 |
| | 온난야 | 일최저기온이 기준기간 90퍼센타일 초과한 날의 연중 일수 |
| | 한랭일 | 일최고기온이 기준기간 10퍼센타일 미만인 날의 연중 일수 |
| | 한랭야 | 일최저기온이 기준기간의 10퍼센타일 미만인 날이 최소 6일 이상 지속된 날의 연중 일수 |
| | 한랭야계속기간 | 일최고기온과 일최저기온 차이 값의 연평균 |
| 최대한랭야계속기간 | 일최저기온이 기준기간의 10퍼센타일 미만인 날의 연중 최대지속일수 | |
| 강수 관련 극한기후 지수 (4종) | 호우 일수 | 일강수량이 80mm 이상인 날의 연중 일수 |
| | 강수 강도 | 연중 습윤 일수(일강수량이 1.0mm 이상인 날)로 나누어진 연 총 강수량 |
| | 5일 최다강수량 | 연중 5일 연속으로 내린 강수량 중 최댓값 |
| | 최대무강수지속기간 | 연중 일강수량이 1mm 미만인 날의 최대 지속 일수 |



교육주안점

- 기후모델과 지구시스템 모델의 차이를 구성 요소와 예측 범위 등을 예로 비교하여 설명하도록 한다.
- 온실가스 배출 시나리오인 RCP와 SSP의 차이를 설명하고, IPCC 5차 평가서에서 RCP를 사용하고 있으며, IPCC 6차 평가보고서에서 제시한 SSP 시나리오를 적용함을 이해하도록 한다.
- 온실가스 배출 시나리오에서 제시하는 기준을 설명하고, 우리의 행동과 관련하여 어떠한 미래 경로로 가게 될지, 우리가 가야 할 기후변화 경로와 연계하여 설명하도록 한다.
- 다양한 사회경제 경로 선택에 기반하여 사례를 통해 온실가스 배출 시나리오 개념을 이해하도록 한다.
- 온실가스 배출 시나리오에 따라 달라지는 미래 기후변화 전망 결과를 이해하도록 한다.

참고자료

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | <ul style="list-style-type: none"> - IPCC 5차 평가보고서(IPCC, 2014) - IPCC 6차 평가보고서 제1실무그룹 보고서(IPCC, 2021) - IPCC 지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC, 2018) - IPCC 해양 및 빙권 특별보고서(IPCC, 2019) - 한반도 기후변화 전망보고서 2020 개정판(기상청, 2021) - 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서(기상청, 2020) |
| 참고 사이트 | <ul style="list-style-type: none"> - 국가기후변화적응포털(kaccc.kei.re.kr) - 기상청기후정보포털(http://www.climate.go.kr/) - 기상청위키피디아(http://www.climate.go.kr/home/10_wiki/index.php/) |

2. 지구온난화와 기후변화 영향

■ IPCC에서 제시하는 지구온난화 정도에 따른 우려 요인

- 지구 평균기온이 1.5°C 상승보다 2.0°C 상승 시 더 많은 위험 요소로 작용하며, 지역별 기후 특성에 따라 복합적인 기후 위험에 처할 수 있음
- 지구 평균기온이 2.0°C 상승 시 인간 활동, 경제 및 생태계에 미치는 주요 영향과 위험을 판단하는 5가지 우려 요인을 제시

| 구 분 | 지구시스템 모델 |
|-----------------|-------------------------------------------|
| 위험받는고유시스템(RFC1) | 기후조건에 의존하고, 제한된 지리 분포 범위를 갖는 생태계 및 인간계 |
| 극한 기상 현상(RFC2) | 폭염, 호우, 가뭄 등 극한 기상현상으로 건강, 생계, 재산, 생태계 위험 |
| 영향의 분포(RFC3) | 기후변화 재해 노출, 취약성의 불균등 분포로 특정 집단이 더 받는 영향 |
| 전지구 총 영향(RFC4) | 전지구적 재정 피해, 전지구 규모 생태계 및 생물다양성 황폐화, 감소 |
| 대규모 특이현상(RFC5) | 상대적으로 거대하고, 갑작스럽고, 비가역적인 시스템 변화 |

☞ 지구온난화와 기후 위험, 지구온난화 우려 요인

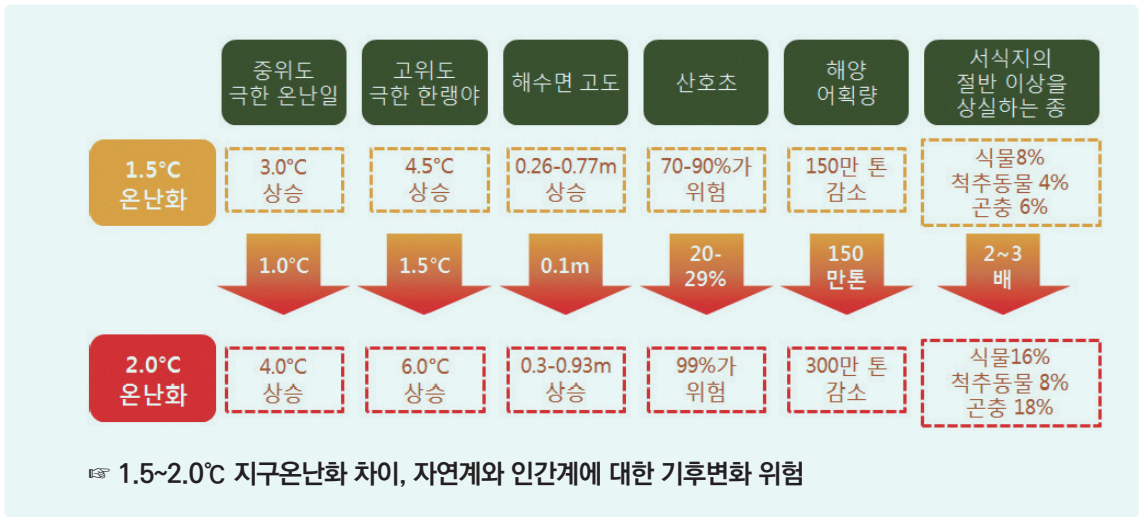
■ 전 지구적 영향과 위험

- 자연 생태계의 영향 및 위험
 - 생물다양성은 식량, 섬유, 에너지 등 인간의 삶의 질과 문화적 온전성에 기여하고 있으나 산업혁명 이후 인간 활동에 따른 기후변화로 산림, 초지, 습지 등 생태계 파괴 및 생물다양성 감소
 - 기후변화는 생물종에게 직접적으로 생리적 스트레스, 서식지역 상실, 생물종 간 상호작용(번식, 출업 등) 교란 등으로 다양한 영향을 미칠 수 있음
 - 지구 평균기온이 2.0°C 상승 시 1.5°C 상승보다 더 큰 피해가 발생하며, 심한 경우 종 사멸까지 가능
- 사회경제 시스템의 영향 및 위험
 - 기후변화로 홍수, 가뭄, 폭염 등 재해가 지난 20년(1980~1999)에 비해 1.8배 증가하였으며, 이로 인한 생태계 파괴, 작물 수확량 감소, 인프라 손상 등으로 경제적 피해를 유발
 - 기후변화에 취약한 지역에서는 기후변화 난민이 발생하며, UN에서는 2050년까지 최대 10억 명에 도달할 것으로 예상

☞ 전 지구적 기후변화 영향 및 위험, 생물다양성 감소, 서식지 파괴, 사회경제적 피해

■ 1.5°C 특별보고서 주요 내용

- 2018년 10월 인천에서 파리협약 이행전략에 필요한 과학적 정보 산출 및 지속가능발전과 빈곤퇴치를 목표로 전 지구적 기후변화에 적극적으로 대응하기 위한 '지구온난화 1.5°C 특별보고서' 승인
- 1.5°C~2.0°C 지구온난화 사이에 통계적으로 확실한 차이가 발생



2-1. 지구온난화 정도에 따른 우려 요인

가. 지구온난화와 기후 위험

- 지구 평균기온은 산업화(1850~1900년) 이전에 비해 1.1°C 가량 상승했으며, 일반적으로 해양보다 육상에서, 중위도보다 고위도와 북극에서 온도 상승이 더 크며, 이로 인한 육상과 해양 생태계 변화와 인간에 미치는 영향이 이미 관측됨
 - 기후변화가 계속해서 나타남에 따라 육상, 담수, 해양 종의 지리적 범위, 계절 활동, 이주 패턴, 개체 수, 종의 상호작용에도 변화가 일어남
- 생태계와 인간 시스템에 미치는 기후 위험¹⁰⁾은 온난화의 속도와 규모, 지리적 위치, 경제발전 정도와 취약성¹¹⁾ 수준에 따라 달라지므로 온난화를 제한하기 위한 다양한 부문의 감축¹²⁾ 전략 확대와 함께 점진적이고 전환적인 적응¹³⁾ 노력이 요구됨

10) 위험(Risk)

기후 관련 위해(hazard) 요소에 의해 생명, 건강, 생태계, 경제, 사회, 문화적 자산, 기반시설 등에 발생할 수 있는 잠재적인 부정적 영향을 말하며, 위험은 위해에 대한 노출 가능성과 그 영향의 규모를 통합한 것. 또한 기후변화 적응이나 감축으로 인한 부정적 효과가 발생할 가능성으로도 표현 가능

11) 취약성(Vulnerability)

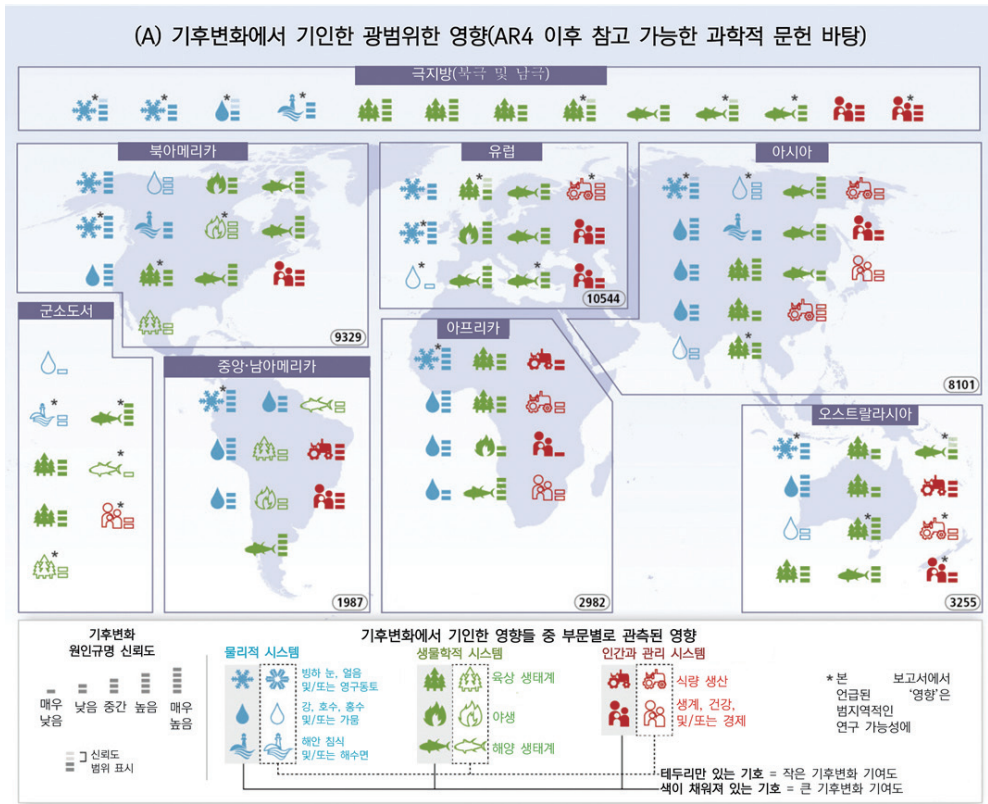
부정적인 영향을 받는 경향과 성향이 있으면 위험에 대한 민감도가 높고, 대처와 적응 능력이 부족할 경우 취약성이 높다고 할 수 있음

12) 감축(Mitigation)

산림과 같은 온실가스 흡수원은 확대하고 온실가스 배출원은 줄이는 인간 활동을 통해 대기 중의 온실가스 농도를 낮추는 것

13) 적응(Adaptation)

위해나 위험을 가하는 것을 조정하고 방지할 방법을 찾는 것으로, 새로운(변화한) 기후와 그 영향에 적응하여 살아가는 것으로, 해수면 상승에 적응하여 해안 근처의 주거지역을 내륙으로 이동시키거나 방파제를 높이는 것



▲ 그림40 변화하고 있는 세계에서 식별된 광범위한 영향

출처 : IPCC 5차 종합보고서

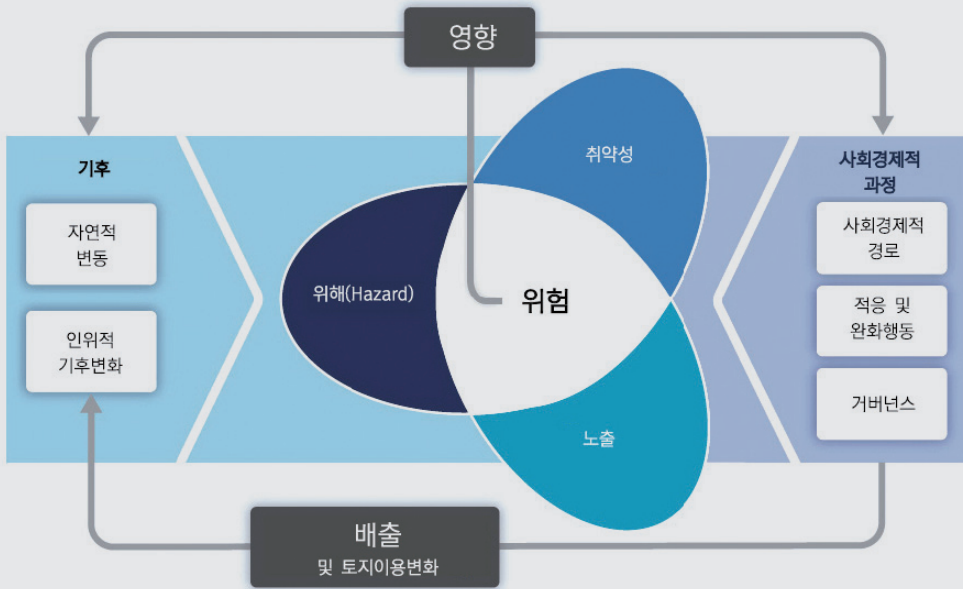
- 미래 기후변화 위험은 온난화가 심화됨(예, RCP8.5)에 따라 더욱 심각하고 광범위하게 나타날 수 있으므로 지구온난화의 속도, 최대 상승 온도, 지속 기간을 제한(예, RCP2.6)하여 기후변화 영향으로 인한 전반적인 위험을 줄이고, 적응의 규모도 줄일 수 있으나 부정적 영향으로 인한 일부 위험은 존재함
- 온난화가 심화될수록 에너지, 식량, 수자원 부문의 위험은 시공간적으로 중첩되어 나타날 수 있으며, 여러 위험이 동시에 발생할 경우 기존 위험의 위해, 노출과 취약성이 가중됨에 따라 더 많은 인구와 지역에 영향을 미칠 수 있는 새로운 위험에 직면할 수 있음

심화

기후변화와 위험 평가 및 관리 체계(출처 : 환경부)

인간 활동은 기후시스템을 변화시키며, 이렇게 변화된 기후시스템은 다시 자연계과 인간계에 위험을 유발. IPCC 제5차 평가보고서의 제2 실무그룹은 기후변화에 의한 영향 및 이에 대한 취약성과 적응을 평가하였으며, 기후변화가 초래한 위험과 이와 관련된 잠재적인 편익의 변화 양상을 알아보고, 적절한 대응 및 감축 행동을 통해 기후 관련 영향과 위험의 저감 방안을 모색하며, 적응과 관련된 요구, 옵션, 기회, 제약, 회복력, 한계 그리고 기타 요인을 평가

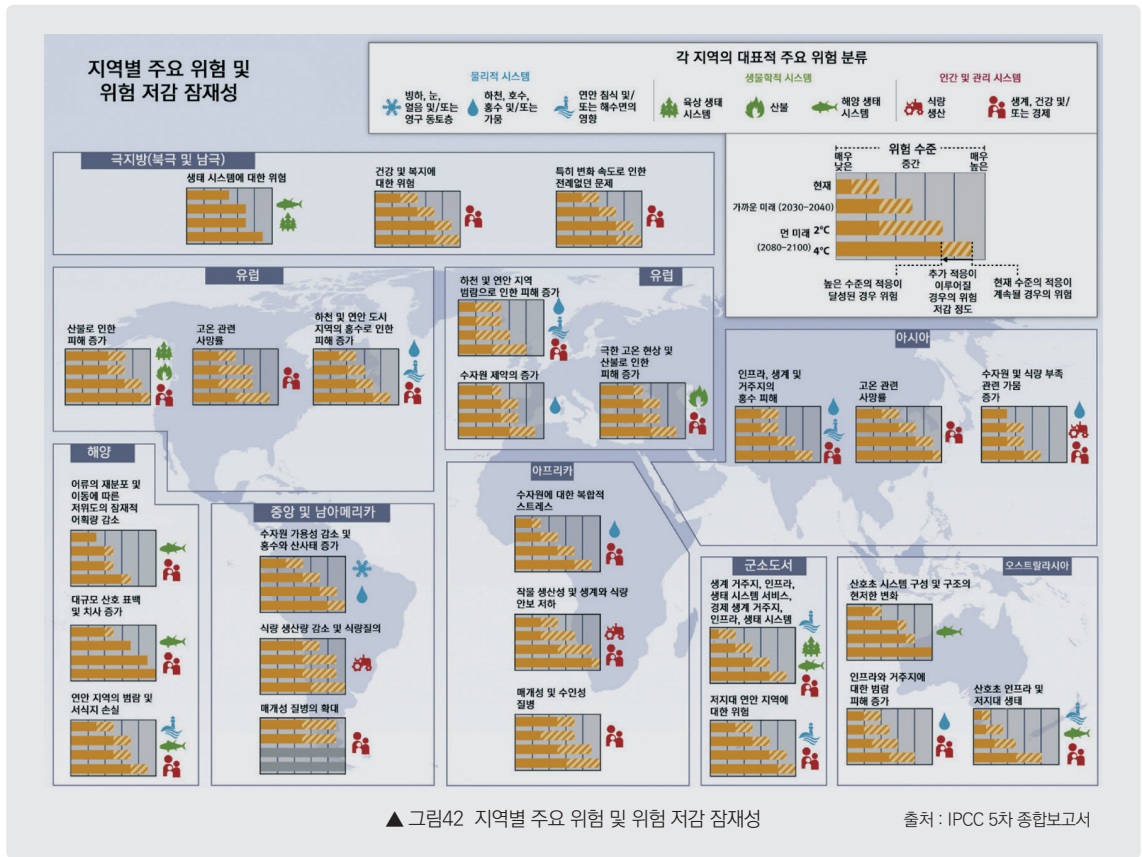
기후 관련 위해, 노출, 및 취약성은 서로 상호작용하여 위험을 생성하고 기후시스템(좌측)과 적응·감축을 포함한 개발과정(우측)에 있어서의 변화는 위해, 노출 및 취약성의 원인이 됨



▲ 그림41 기후시스템에 영향을 미치는 위해, 노출, 취약성 요소 출처 : IPCC AR5 WG2 보고서

지역별 주요 위험 및 위험 저감 잠재성(출처 : IPCC 5차 종합보고서)

적응과 완화를 통한 위험 저감의 잠재성 및 적응 한계를 포함한 지역별 대표 주요 위험 분류. 각 주요 위험들의 특징은 매우 낮은, 낮은, 중간, 높은, 매우 높은 위험들로 분류. 위험 수준은 현재, 가까운 미래(여기서는 2030~2040년), 먼 미래(여기서는 2080~2100년) 등 3가지 시간 프레임으로 분류. 가까운 미래에 예상되는 지구 평균기온 상승 수준은 배출 시나리오 간 큰 차이가 없음. 먼 미래의 위험 수준은 산업화 이전 기준 대비 2℃ 및 4℃ 기온 상승을 가정하여 제시되었으며, 각 시간 프레임의 위험 수준은 ‘현재 수준의 적응이 지속’될 경우와 ‘현재 혹은 미래 높은 수준의 적응이 달성될 것으로 가정한 경우’의 두 가지로 분류. 위험 수준 간 비교가 반드시 필요한 것은 아니며 특히 지역 간 위험 수준의 비교는 무의미



나. 지구온난화의 우려 요인

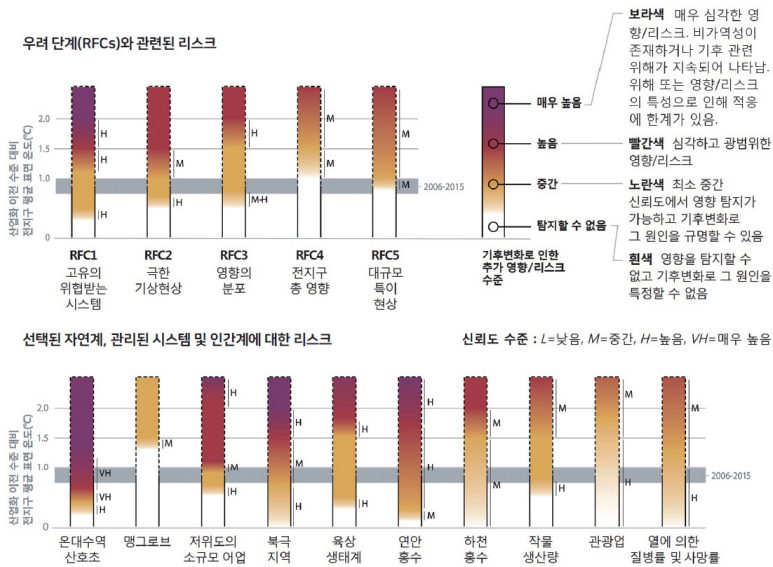
- 현재의 기후와 기후모델에서 산출한 온난화 전망을 비교한 결과, 1.5°C와 2.0°C 온난화는 지역별 기후 특성에서 차이가 클 것으로 예상되며, 대부분의 육지와 해양에서 평균 온도가 상승하고 많은 지역에서 극한 고온 현상이 증가하며 일부 지역의 호우 또는 가뭄 증가가 예상됨
- 1.5°C보다 2.0°C 온난화에서 해수면은 더 많이 상승하고, 육지와 해양 생태계에 대한 위험과 다양한 부문의 기후 관련 잠재적 위험 또한 커지므로 적응 필요성은 대부분 1.5°C 온난화보다 2.0°C 온난화에서 더 높음
- 1.5°C보다 2.0°C 온난화에서 생태계, 식량, 보건 시스템에 대한 적응이 더 어려울 것으로 예상되며, 일부 취약 지역은 1.5°C 온난화에서도 복합적인 기후 위험에 처하게 될 것으로 전망됨
- IPCC 제3차 평가보고서에서 처음 언급된 5가지 우려 요인(Reasons for Concern, RFCs)은 여러 부문과 지역에 걸쳐 인간, 경제 및 생태계에 미치는 주요 영향과 위험¹⁴⁾을 통합적으로 판단하는 기준임. IPCC 제5차 평가보고서(AR5) 이후 대다수 연구들은 2.0°C 온난화에 따른 위험 변화가 5가지 우려 요인 중 4가지 요인이 기존 AR5 보고서 때보다 높아진다고 전망하고 있음

14) 주요 위험(Key risks)

영향의 규모, 발생 확률 및 비가역성, 영향 발생 시기, 위험 수준을 높이는 취약성 및 노출의 지속성, 적응이나 감축 잠재력의 한계성과 같은 구체적인 기준을 바탕으로 전문가 판단에 근거하여 주요(key) 위험을 분류함

표11 지구온난화의 우려 요인(RFCs) 5가지

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 위협받는 고유 시스템 (RFC1) ¹⁵⁾ | 높은 수준의 위험에서 매우 높은 수준의 위험으로 이동은 AR5에서의 2.6℃ 지구 온난화에서 발생했던 것과 달리 산호초, 북극해, 생물다양성 위험 변화에 대한 여러 새로운 증거로 인해 현재 1.5에서 2℃ 온난화 사이에 위치(높은 신뢰도) |
| 극한 기상 현상 (RFC2) ¹⁶⁾ | 중간 수준에서 높은 수준의 위험으로 이동은 현재 1.0~1.5℃ 온난화 사이에 위치하며 이는 AR5 평가와 매우 유사하지만 신뢰도는 더 높을 것으로 전망(중간 신뢰도) |
| 영향의 분포 (RFC3) ¹⁷⁾ | 중간 수준에서 높은 수준 위험으로 이동은 식량 안보, 수자원, 가뭄, 폭염노출, 연안침수의 따른 지역적 위험 차이에 대한 새로운 증거로 인해 AR5에서의 1.6~2.6℃ 지구 온난화와 비교해 1.5℃에서 2℃ 온난화 사이에 위치(높은 신뢰도) |
| 전 지구 총 영향 (RFC4) ¹⁸⁾ | 중간 수준에서 높은 수준 위험으로 이동은 지구의 총 경제적 영향 및 지구의 생물다양성과 관련된 새로운 증거로 인해 현재 AR5에서의 3.6℃ 온난화가 아니라 1.5℃에서 2.5℃ 지구온난화 사이에 위치(중간 신뢰도) |
| 대규모 특이현상 (RFC5) ¹⁹⁾ | 중간 수준에서 높은 수준의 위험으로 이동은 AR5에서의 1.9~4℃ 지구 온난화에서 나타났던 것과 달리 서남극해 빙상에 대한 새로운 관측 및 모델 결과에 의해 현재 1℃와 2.5℃에 위치(중간 신뢰도) |



▲ 그림43 지구온난화 우려 요인과 관련된 위험 수준

출처 : 지구온난화 1.5도 특별보고서, 기상청

15) RFC1(위협받는 고유 시스템)

기후 조건에 의존적이며 제한된 지리적 분포 범위를 갖고 특유의 풍토성 또는 다른 고유성을 지니는 생태계와 인간계. 예로는 산호초, 북극과 북극의 토착민, 산악 빙하와 생물다양성의 위험 지역이 포함됨

16) RFC2(극한 기상현상)

폭염, 호우, 가뭄, 산불과 연안 홍수와 같은 극한 기상현상으로 인한 건강, 생계, 재산, 생태계에 대한 위험이나 영향

17) RFC3(영향의 분포)

물리적인 기후변화의 재해(hazard), 노출, 취약성의 불균등한 분포로 인해 특정 집단에 더 많은 영향을 미치는 위험이나 영향

18) RFC4(전지구 총 영향)

전 지구적 재정 피해, 전지구 규모 생태계와 생물다양성의 황폐화와 감소

19) RFC5(대규모 특이현상)

온난화로 인한 상대적으로 거대하고, 갑작스럽고, 때때로 비가역적인 시스템의 변화. 예) 그린란드와 남극 빙상의 붕괴가 있음

심화

지구온난화 1.5도 특별보고서(18.10)에 따른 1.5°C와 2°C 영향 차이

표12 1.5°C 및 2.0°C 지구온도 상승에 따른 주요부문의 영향

| 분 야 | 지구온난화 1.5°C | | 지구온난화 2°C | | 비고 |
|------------------|-----------------------------------------------------|----|------------------|-----|-----------------------------|
| 지구시스템 및 인간계 | 높은 위험 | | 매우 높은 위험 | | |
| 중위도 폭염일 온도 | 3°C 상승 | | 4°C 상승 | | |
| 고위도 극한일 온도 | 4.5°C 상승 | | 6°C 상승 | | |
| 산호초 백화현상 | 산호초 70~90% 소실 | | 산호초 99% 소실 | | |
| 기후영향 빈곤 취약 인구 | 2°C 온난화에서 2050년까지 최대 수 억 명 증가 | | | | |
| 물 부족 인구 | 2°C 대비 1.5°C에서 최대 50% 감소 | | | | |
| 그 외 | 평균온도 상승(대부분 지역), 극한 고온(거주지역 대부분), 호우 및 가뭄 증가(일부 지역) | | | | |
| 육상생태계 | 중간위험 | | 높은 위험 | | |
| 서식지 절반 이상 감소 비율 | 곤충 | 6% | 곤충 | 18% | |
| | 식물 | 8% | 식물 | 16% | |
| | 척추동물 | 4% | 척추동물 | 8% | |
| 다른 유형 생태계로 전환 면적 | 6.5% | | 13.0% | | |
| 대규모 특이현상 | 중간위험 | | 중간-높은위험 | | |
| 해수면 상승 | 0.26~0.77m | | 0.3~0.93m | | 약 0.1m 차이, 인구 천만명이 영향 |
| 북극 해빙 완전 소멸빈도 | 100년에 한번 (복원 가능) | | 10년에 한번 (복원 어려움) | | 1.5°C 초과시 남극 해빙, 그린란드 빙상 손실 |

심화

신뢰도와 발생 가능성의 의미(출처 : 지구온난화 1.5°C 특별보고서 해설서, 기상청)

2018년 5월 15일에 발행된 “지구온난화 1.5°C 특별보고서”에서 제시된 주요 결과의 신뢰도와 발생 가능성의 의미는 IPCC에서 전문가들이 연구 결과를 평가하고 정량화하여 결정한 것으로 다소 복잡. ‘신뢰도 수준’은 ‘매우 낮음’, ‘낮음’, ‘중간’, ‘높음’, ‘매우 높음’의 5단계로 구분하며, ‘발생 가능성’은 표와 같이 사용. 예를 들어 연구가 충분히 이루어지고 결과가 일관성이 있을 때 그 결과는 ‘사실상 확실’ 또는 ‘높은 신뢰도’를 사용

| 용 어 | | 발생가능성 범위 |
|------------------|------------------------|----------|
| 사실상 확실함 | virtually certain | 99~100% |
| 대단히 가능성 높음 | extremely likely | 95~100% |
| 매우 가능성 높음 | very likely | 90~100% |
| 가능성 높음 | likely | 66~100% |
| 발생 가능성이 상대적으로 높음 | more likely than not | 50~100% |
| 가능성 있음 | as likely as not | 33~66% |
| 발생 가능성이 상대적으로 낮음 | more unlikely than not | 0~50% |
| 가능성 낮음 | unlikely | 0~33% |
| 매우 가능성 낮음 | very unlikely | 0~10% |
| 대단히 가능성 낮음 | extremely unlikely | 0~5% |
| 가능성이 매우 희박함 | exceptionally unlikely | 0~1% |

2-2. 자연 생태계의 영향 및 위험

가. 잠재적인 자연 생태계의 영향과 위험

- 기후변화는 기존의 위험을 증폭시킬 뿐만 아니라 자연과 인간계에 새로운 위험을 가져올 것이며, 위험은 균일하게 분포하지 않으며, 개발 수준을 막론하고 모든 국가에서 취약한 계층 및 지역사회에서 상대적으로 더 큰 위험에 노출될 것임
- 기후 관련 영향의 위험은 기후-관련 위해 요소(위해한 사건 및 경향 포함)와 인간 및 자연계의 노출, 취약성 및 적응 수준과의 상호작용에 따라 발생. 온난화의 속도와 규모가 증가하고 해양 산성화가 심화되며 기후 시스템에서 여러 변화가 나타남에 따라 위험의 강도 및 범위가 커지고 있으며, 비가역적이고 치명적인 영향이 발생하는 경우도 있음. 특정 지역에서만 제한적으로 나타나는 위험과 전 세계적으로 나타나는 위험도 있음

- 기후변화가 진행됨에 따라 21세기 중후반에 걸쳐 많은 종들이 멸종 위기에 처할 것이며, 특히 기타 스트레스 요인들과 기후변화 간 상호작용이 일어날 경우 종 멸종의 위험은 더욱 증가. 대다수 식물 종들이 현재 혹은 앞으로 전망되는 빠른 기후변화 속도에 맞추어 자연적으로 자신의 지리적 범위를 옮기기에는 역부족일 것임
- RCP4.5 이상 시나리오에서 편평한 경관 지역의 소형 포유류 및 담수성 연체동물 대다수 또한 21세기 중 예상되는 기후변화의 속도에 맞추어 적응할 수 없을 것임. 과거 수백만 년 동안 자연적 지구 기후변화는 현재의 인위적 기후변화보다 훨씬 느리게 진행되었음에도 종의 멸종을 포함하여 상당한 수준의 생태계 변화를 가져온 것이 관측된 바 있으므로 미래의 위험 수준은 높을 것으로 전망됨
- 해양생물은 점차 용존산소 감소, 해양 산성화 속도 및 크기 증가와 함께 해양 극한 수온의 심화에 따른 위험에 처할 것임. 특히 산호초 및 북극 생태계의 취약성이 높음. 해수면 상승은 연안 시스템에 및 저지대 지역에 대한 위험 요소로 작용하는데, 지구 평균기온이 안정화된다고 할지라도 해수면 상승은 수세기 동안 지속될 것임

나. 생물다양성에 미치는 기후변화의 위험

- 생물다양성은 식량, 섬유, 물, 에너지, 의약품, 유전물질 등을 제공하는 핵심적인 역할을 하며, 기후, 수질, 수분 작용, 홍수 및 폭풍 해일을 조절하는 데 필수적임. 또한 인간의 건강과 삶의 질 및 문화적 온전성(cultural integrity)을 중심으로 비물질적 측면에도 기여함

참고

생물자원 구체적 사례

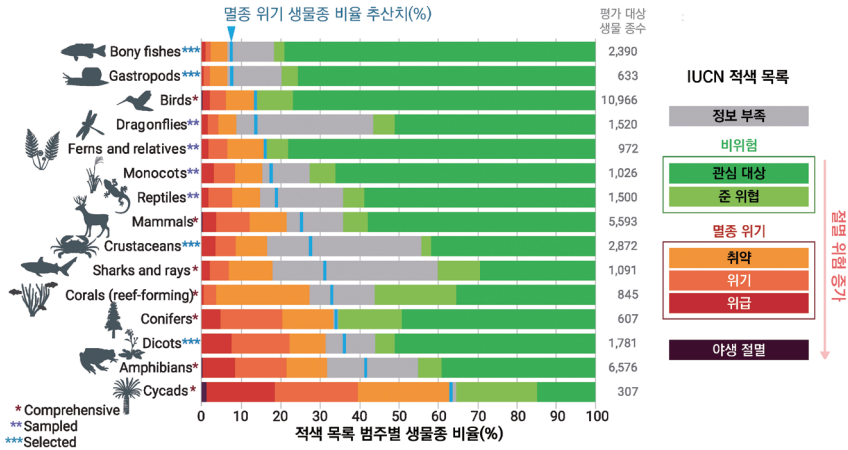
| 역 할 | 주요생물자원 |
|-------|----------------------------------------------|
| 식 량 | 쌀, 육류, 과일 등 |
| 섬 유 | 솜, 린넨, 모피, 울 등 |
| 에 너 지 | 식용유, 먹이사슬 등 |
| 의 약 품 | 일일초, 주목나무 등 약재 |
| 생태기술 | 상어지느러미, 도마뱀 발판 등 |
| 유전물질 | 식물, 동물, 미생물의 특유 유전자를 이용한 제약, 화장품, 건강기능 식품 제조 |
| 오염정화 | 연꽃(연못 수질정화) |
| 방풍 등 | 바닷가 방풍림 |
| 산사태 | 나무의 말뚝효과, 그물효과, 우산효과 적용 |

- 산업혁명 이래로 인간 활동에 의해 산림, 초지, 습지 및 기타 중요한 생태계가 심각하게 파괴되고 황폐화 되면서 인류의 삶의 질이 위협받고 있음. 육지의 75%가 이미 심각한 변화를 겪었고, 대부분의 해양이 오염 되었으며, 습지 지역의 생태서식지 85% 이상이 사라졌음
- 2019년 발간된 유엔 생물다양성과학기구(IPBES) 보고서는 지구상 800만 종의 동식물 가운데 100만 종이 멸종 위기에 처했으며, 양서류의 40%, 침엽수의 34%, 포유류의 25%가 멸종 위기로 나타나며, 전 세계 바다의 산호초는 150년 전과 비교해 분포 면적이 절반 수준으로 줄었음을 보고함
- 기후변화 영향으로 북극 및 툰드라 지역 등에 서식하는 생물종이 심각한 영향에 직면해 있음. 기후변화는 직접 적인 생리적 스트레스, 서식 지역의 상실, 꽃가루 수분이나 먹이사슬 등 중간 상호작용의 방해와 함께 회유, 번식, 출엽 등 다양한 방법으로 생물종에 영향을 미칠 수 있음
- 지구 평균기온 상승으로 식물 만개 시기가 빨라져 생산 품질 저하를 유발하며, 꿀벌 등 다양한 동식물이 제공하는 생태서비스(꽃가루 수분, 생태기능 등) 감소로 식량 생산량 감소, 먹이사슬 붕괴, 의약품, 기후완충조절 능력이 상실되어 인간사회에 큰 피해를 유발할 수 있음
- 기후변화로 금세기에 야생종의 5분의 1 정도가 멸종될 위기에 처해 있으며, 생물다양성 ‘핫스팟’ 지역에서 가장 높은 비율로 사멸이 예상됨. 또한 상대적으로 눈에 잘 띄지 않는 생물종들이 보이지 않는 피해를 볼 수 있다고 경고함
- 육상 및 습지, 해양 생태계의 위험은 1.5°C 온난화가 2.0°C 온난화보다 낮으며, 각 온도에 따른 영향은 다음과 같음

표13 산업화이전 대비 지구평균기온 1.5°C, 2.0°C 상승 시 생태계 영향

| 분야 | 지구온난화 1.5°C | | 지구온난화 2°C | |
|------------------|---------------|----|------------|-----|
| 산호초 백화현상 | 산호초 70~90% 소실 | | 산호초 99% 소실 | |
| 서식지 절반 이상 감소 비율 | 곤충 | 6% | 곤충 | 18% |
| | 식물 | 8% | 식물 | 16% |
| | 척추동물 | 4% | 척추동물 | 8% |
| 다른 유형 생태계로 전환 면적 | 6.5% | | 13.0% | |

- 기후변화와 함께 산림이 파괴되고 자연환경이 사라지면서 폭풍, 해일 등의 재난에 그대로 노출되어 심각한 자연재해가 예상되는 지역은 아프리카, 남미, 남아시아 등의 외곽 연안 지역들로 나타남. 내륙지역 역시 향후 30년간 생물다양성의 파괴 정도가 지역에 따라 3~10배 차이가 발생할 것으로 전망함
- 전 세계 인구에 식량을 공급하면서도 생물다양성 감소 추세를 회복하는 것은 기술적·경제적으로 가능하지만, 이를 위해서는 인간의 식량 생산과 소비 방식 및 자연의 지속가능한 관리와 보전에 있어서 혁신적인 변화가 필요함



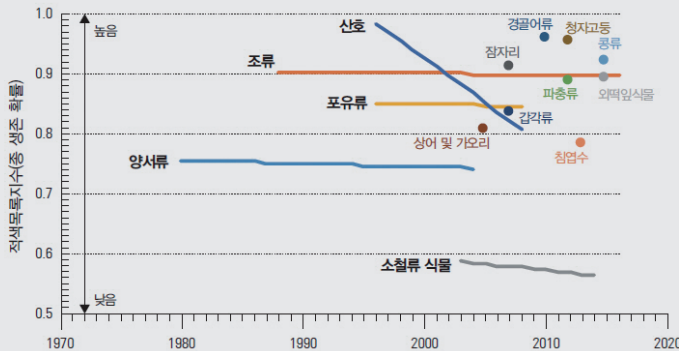
▲ 그림44 생물종 분류군별 누적 멸종 위기

출처 : IPBES 보고서(2019)

심화

생물종 중 생존확률

- 국제자연보전연맹(IUCN)의 멸종위기종 적색목록(Red List of Threatened Species)상의 적색목록지수(Red List Index, RLI)는 생존확률(시간에 따른 멸종 위험을 역산(逆算)한 것)의 추이이며, 적색목록지수(RLI) 값이 1.0이면 집단 내 모든 종이 '관심대상(Low Concern)' 범주에 속함. 다시 말해 가까운 미래에 '멸종(Extinct)' 상태가 되지 않을 것으로 예상된다는 의미. 시간이 흘러도 적색목록지수(RLI) 값이 일정한 상수로 나타나면 해당 집단의 전반적인 멸종 위험이 변화하지 않았음을 의미. 생물다양성 손실률이 감소하면 적색목록지수(RLI)는 상향 추이를 보지만 적색목록지수(RLI)가 감소하면 해당 생물의 종이 빠르게 멸종 상태가 되고 있다는 것을 의미
- 식물의 멸종 위험은 포유류의 멸종 위험과 유사한 정도이고 조류의 멸종 위험보다는 크고 문서로 기록되어 있는 식물의 멸종 사례는 포유류, 조류 및 양서류의 사례를 합친 것보다도 많음. 아울러 전 세계 식물다양성의 분류학적 범위와 지리적 범위를 대표하는 수천 종의 식물종 표본에 대한 평가를 실시한 결과, 전체의 5분의1 정도(22%)가 멸종위기 상태이며, 그중 대부분이 열대지역에 서식



▲ 그림45 연도별 적색목록지수(RLI)

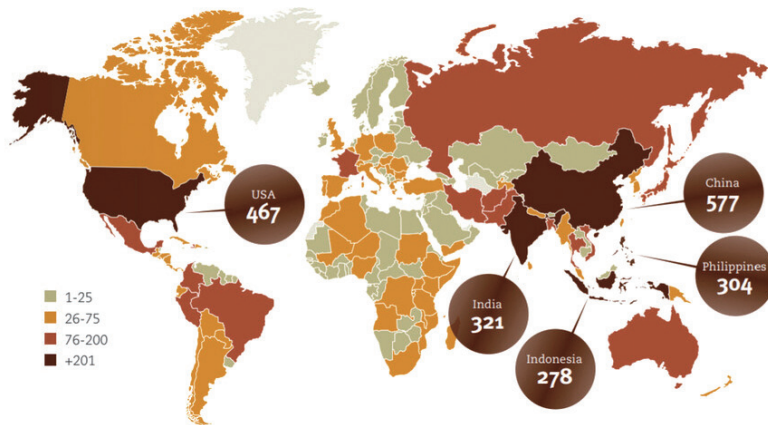
출처 : 지구생명보고서(WWF, 2020)



2-3. 사회경제 시스템의 영향 및 위험

가. 기후재난에 따른 경제적 피해

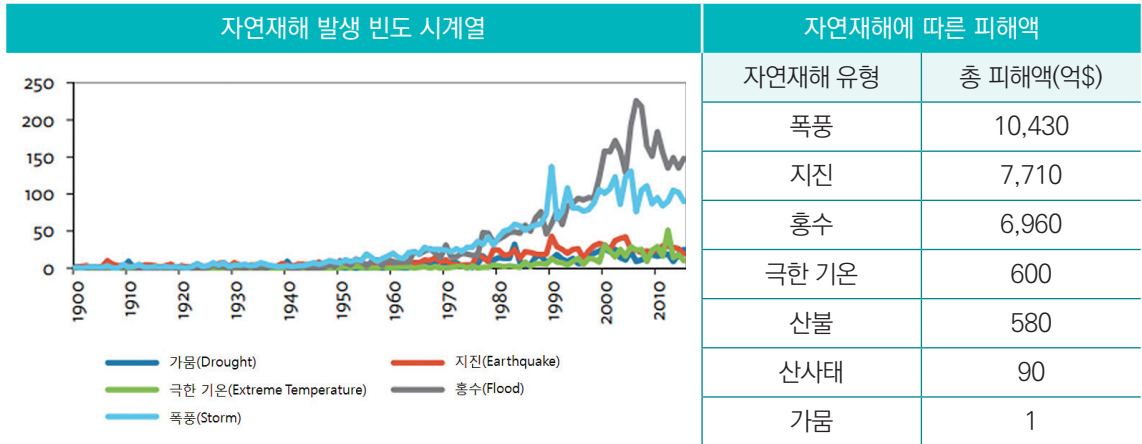
- 국제재해경감기구(UNDRR)의 '세계 재해보고서'에서 지난 20년(2000~2019) 동안 전 세계에서 7,348건의 자연재해가 발생하여 40억 명이 피해를 봤고, 매년 재해 사망자가 6만 명에 달한다고 보고
- 국가별로는 중국이 577건으로 가장 많았으며, 미국(467건), 인도(321건), 필리핀(304건), 인도네시아(278건) 등으로 상위 10개국에서 아시아 국가가 8개국으로 나타났으며, 인명 피해가 저소득 국가에 집중되어 선진국 사망자 수의 4배에 달함



▲ 그림46 20년간 국가별 재해 발생 건수 (2000~2019년, UNDRR) 출처 : 국제재해경감기구(2020)

- 이전 20년(1980~1999) 대비 20년(2000~2019)의 재해를 비교한 결과 발생 건수는 4212건에서 7,348건으로 1.7배 증가하고, 사망자 수는 119만 명에서 123만 명으로 비슷하게 나타남
- 전체 재해 가운데 90%(6671건)가 기후변화와 관련이 있었으며 앞선 20년(1980~1999)에 비해 최근 20년(2000~2019)이 1.8배(3,656건) 증가함. 발생이 가장 많은 재해 유형은 전체의 44%인 홍수(3,254건)로 앞 시기보다 2.3배(1,389건) 늘어났으며, 태풍도 이전 1,457건에서 2,034건으로 1.4배로 증가함. 인류가 영향을 많이 받는 재해는 홍수(41%)와 가뭄(35%), 태풍(18%) 순임
- 특히 최근 빈번하게 발생하는 홍수로 인해 아시아 지역에 경제적 피해가 몰릴 것으로 예상되며, 중국과 인도가 세계 제조업 공급망에서 차지하는 비중을 감안할 때 이 지역에 기후변화로 인한 재해 발생 빈도가 늘어날 수록 세계 경제에 미치는 타격도 클 것으로 전망됨

표14 자연재해 발생 빈도 및 피해액



출처 : 제3차 국가 기후변화 적응대책(부처합동, 2020)

심화

주요 피해 사례

- (2019년 호주 산불) 유럽과 동아시아 지역의 기록적 폭염 발생(2017년 여름 스페인 · 포르투갈 최고기온 40℃ 기록) 및 건조화에 따라 2019년 호주와 아마존에 대규모 산불 발생. 특히 호주 산불은 우리나라 면적 크기의 숲을 태운 초대형 산불로 도시의 이상고온(시드니 48.9℃ 기록), 생태계 서식지 파괴, 연무 등의 국경을 뛰어넘는 복합 재난 상황 발생
- (2020년 동아시아 지역 장마) 기록적 폭우로 9월까지 양쯔강 등 836개 하천에 평균보다 80% 많은 홍수가 발생하였으며, 이로 인해 피해를 본 상공인 수만 7,00만 명에 달하며 농업, 양식업, 상업 등 직접적인 손실이 2,000억 위안(37조 원)으로 보고됨
- (2021년 2월 미국의 폭설, 한파) 북극권에서 발생한 강력한 고기압으로 인한 폭설과 한파로 미국 전역에서 60여 명의 사망자가 발생했고, 전기, 수도 등 기간시설의 가동 중단으로 인한 엄청난 경제적 피해 발생. 피해는 텍사스, 앨라배마주 등을 포함하는 미국 남부의 선벨트(Sun Belt · 일조량이 많아 붙여진 별칭) 지역에 집중되었으며, 이 지역은 평소 겨울 기온이 5~10℃로 대부분 가구가 난방 설비나 월동 준비가 되어 있지 않아 영하 20도의 기온 저하에 더 큰 피해가 발생

심화

주요기관의 향후 전망

| 전망기관 | 전망내용 |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 세계자원연구소 | 기후변화로 인한 홍수, 가뭄 등 각종 자연재해로 10년 내 전 세계에 17조 달러 (1경8436조 원) 규모의 위험 비용이 예상되며, 약 절반인 8조5000억 달러 (9218조 원)의 비용이 아시아 지역에 몰릴 것으로 예측 특히 중국과 인도 등 배수 인프라가 상대적으로 미비한 지역이 기후변화에 따른 재난에 취약한 것으로 분석 |
| 미국 상품선물거래위원회 (CFTC, 2020년) | 기후변화가 미국 금융시스템과 장기적인 경제성장에 중대한 문제를 일으킬 수 있다고 경고하고 기후변화가 미국 금융시스템과 경제에 미치는 영향을 조사 |
| 미국 중앙은행 연방준비제도 (2021년 3월) | 폭풍우와 홍수, 대형 산불 같은 자연재해가 금융·부동산 자산 가치에 영향을 미칠 수 있고 누적된 기후변화가 금융시스템에 줄 수 있는 예측 불가능한 충격에 대비하기 위해 '금융안정기후위원회(FSCC)' 출범 계획을 발표함 |

나. 식량문제 및 기후난민 발생

1) 식량문제

- 세계식량계획(WFP)은 4,000억 마리 정도로 추산되는 동아프리카 지역의 메뚜기에 의해 1,100만여 명이 직접적인 식량 위기 상황에 놓였으며, 메뚜기 떼들이 거대한 세력을 형성해 이제는 중국과 인도, 파키스탄에까지 물려들고 있음. 온난화로 고온·다습해지면 메뚜기들이 활동하기 더 좋은 환경이 만들어지며 유엔식량농업기구 (FAO)는 메뚜기 떼가 이대로 더욱 창궐하면 전 세계 인구의 10분의 1이 식량위기에 처할 수 있다고 경고
- 21세기 중후반 전 지구적으로 해양종의 재분포와 해양 생물다양성 감소로 인한 어업 생산성 및 기타 생태계 서비스가 지속되기 어려울 것으로 전망
- 적응 행동이 부재한 상황에서 산업화 이전 대비 지구 기온이 2°C 수준 이상으로 상승한다면, 열대 및 온대 지역에서 밀, 쌀 및 옥수수의 수확량은 감소할 것으로 전망되지만, 반대로 이들 작물의 수확량이 증가하여 혜택을 보는 지역이 있을 수도 있음. 하지만 지구 기온이 4°C 이상으로 상승하는 경우 식량 수요 증가 문제와 맞물려 전 세계 및 지역의 식량 안보에 막대한 타격 예상

2) 빈곤과 기후난민 발생

- 기후변화는 전 세계 빈곤 수준에도 영향을 주는데 기후변화의 영향은 경제성장과 빈곤퇴치를 더디게 하고, 식량 안보가 무너지면서 새로운 빈곤의 덫을 놓게 되는데, 후자는 특히 도시 지역과 심각한 기아 문제를 보이는 신흥 지역에서 주로 발생

- 기후변화는 폭염 스트레스, 폭우, 내륙과 연안 지역의 범람, 산사태, 대기오염, 가뭄과 물 부족, 해수면 상승 및 폭풍 해일 등을 통해 도시 지역의 주민, 자산, 경제 및 생태계에 위험을 초래함. 필수적 사회 기반시설과 공공서비스가 갖추어지지 않았거나 기후변화에 대한 노출 정도가 높은 도시의 경우 이러한 위험은 더욱 심각하게 나타날 것임
- 기후변화로 인해 인구 이동이 증가할 것으로 예상되며, 이주에 필요한 자원 부족으로 이주하지 못하는 인구는 극단적 기상현상에 높은 수준으로 노출되며, 특히 개발도상국의 저소득 계층은 이에 취약하게 반응할 것임. 기후변화는 빈곤 및 경제적 갈등의 원인을 악화시킴으로써 폭력적 갈등이 초래하는 위험을 간접적으로 증가시킬 수 있음
- 세계은행은 2050년에는 기후변화에 따른 난민 수가 현재 시리아 난민의 100배 규모인 약 1억4000만 명에 이를 것으로 추산하였으며, UN은 “2050년까지 기후난민 수가 최대 10억 명을 돌파할 것”이라는 전망을 내놓음. 2100년까지 기온이 섭씨 4도 이상 증가하면, 아프리카, 호주, 미국, 남아메리카, 아시아 일부 지역이 고온과 사막화, 홍수로 사람이 거주할 수 없는 곳으로 바뀔 것으로 예상



교육주안점

- 지구온난화로 인한 우려 요인 및 주요 위험에 대해 전 세계와 동아시아에서 증가하고 있는 재해 경향을 사례로 제시하도록 한다.
- 기후변화의 영향과 위험은 준비하기 어렵고, 사회경제에 미치는 영향을 제시하며 1.5°C 목표의 탄소중립의 중요성을 인식하도록 한다.
- 기후변화로 인한 생물다양성 감소는 우리가 받을 수 있는 생태계서비스가 줄어드는 것을 예시로 직 · 간접적으로 연관이 있음을 제시하여 경각심을 갖도록 유도
- 기후변화가 사회경제 시스템에 미치는 다양한 영향을 제시하고, 이로 인하여 인간의 삶에 변화가 올 수 있음을 제시

참고자료

| | |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | <ul style="list-style-type: none"> - 지구온난화 1.5도 특별보고서 정책결정자를 위한 요약본(SPM), 기술요약서(기상청,2018) - “IPCC 제5차 평가보고서” 제2실무그룹 정책결정자를 위한 요약본(SPM)(환경부, 2014) - 지구생명보고서 2020 요약본(세계자연기금, 2015) - 지구 생물다양성과 생태계 서비스에 관한 평가보고서(IPBES, 2018) - 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025)(관계부처합동, 2020) |
| 참고 사이트 | <ul style="list-style-type: none"> - 기후와 환경의 변화: 3가지 경로, 어느 길로 갈 것인가? 기후변화행동연구소 (http://climateaction.re.kr/index.php?mid=news01&document_srl=178477) - 신기후체제를 위한 파리협약 소개 영상 (https://www.youtube.com/watch?v=jA3hh3dwJkE) |

3. 우리나라의 기후변화 영향

■ 분야별 우리나라 기후변화 영향

| | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 물관리 | - 연 강수량 및 호우 일수 증가, 수온 상승 및 가뭄에 따른 조류 증식으로 하천과 호수의 수질과 수생태계 악화 |
| 생태계 | - 온도 상승으로 습지, 수생태계에 아열대, 열대지방 외래종 유입으로 생태계 교란 - 나뭇잎 개엽, 철새 도래, 조류 번식 시기 등 생물계절이 전반적으로 변화하고, 생물종 다양성이 감소 - 식생대 변화 및 내륙습지 소멸 예상 |
| 국토연안 | - 기후변화로 인하여 댐, 하천시설, 상하수도, 절토사면 등 주요 시설물들의 노후화가 빠르게 진행 - 해수면 상승에 따라 연안습지 면적 감소로 연안의 재난재해 완충기능 약화 |
| 농수산 | - 기후변화에 따른 온난화로 작물재배지(사과, 배추 등) 북상, 해충 발생 증가, 잡초 분포 변화 발생 - 수온 상승으로 삼치, 방어 등 북상, 남방한계가 포항연안(1980년대)→강원도 북부해역(2000년 이후)으로 북상 |
| 건강 | - 기후변화로 인한 폭염으로 열사병, 탈수합병증, 호흡기 질환 등을 유발 |
| 산업 및 에너지 | - 기상이변에 따른 폭염, 열대야 등 극한 기후현상으로 냉난방 전력 소비 증가, 자연재해로 제조생산설비 피해, 물류시스템 차질 등으로 인한 생산성 감소 |

☞ 우리나라 기후변화 현황 및 전망

3-1. 분야별 우리나라 기후변화 전망

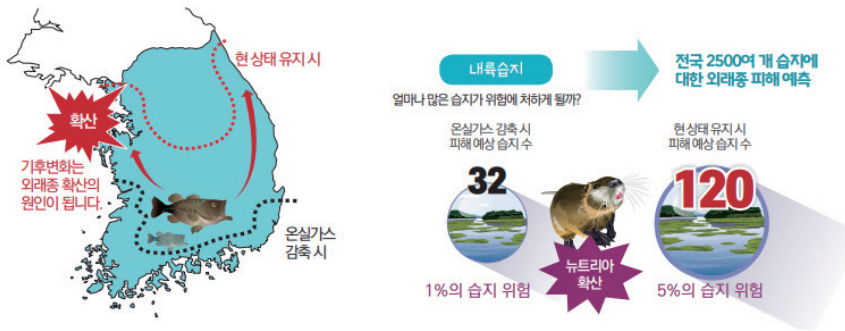
가. 물관리

- 현재 심한 가뭄은 대략 30~50년에 한 번 발생하며, 지역별 편차는 있으나 지난 1988년, 1994년, 2014년이 가뭄이 심했음. 현재 추세대로 온실가스가 배출되면 중부지방은 유량 증가로 가뭄이 완화되며 남부지방은 점차 심화될 것으로 전망
- 호우 일수, 5일 최다 강우량, 강수 강도가 현재에 비해 다소 증가하여 홍수 발생 빈도와 피해 증가가 예상됨. 또한 21세기 후반으로 갈수록 수온 상승 및 가뭄에 따른 조류 증식 가능성이 증가하고, 하천과 호수의 수질과 수생태계 건전성 악화 전망

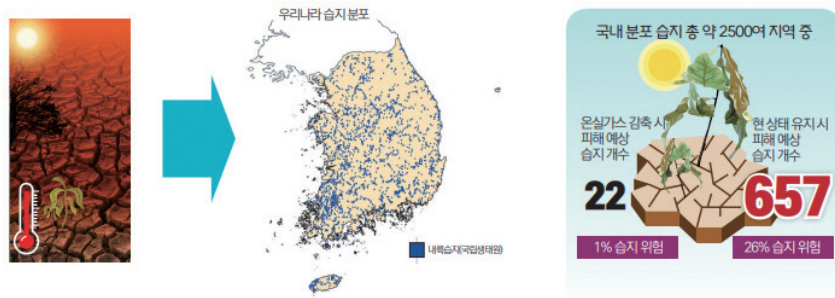
나. 생태계

- 온실가스 감축 없이 현재 추세대로 배출될 경우 급격한 기온 상승에 적응하지 못하고 멸종될 수 있는 생물종은 국내 조사 자료가 확보된 전체 5,700여 종 중 336종(약 6%)에 달함. 이는 적극 감축의 경우에 비해 5배나 더 많은 수치로 서식지 이동이 쉽지 않은 구슬다슬기, 참재첩 등 담수생태계에 서식하는 저서무척추동물종이 큰 피해를 볼 것으로 예측
- 기후변화는 주로 습지나 수생태계에서 아열대·열대 지방에서 유래된 뉴트리아, 큰입배스 등외래종에 의한 생태계 교란 문제를 일으킬 것으로 예측
- 기후변화는 극한의 가뭄현상 발생 건수도 증가시켜 내륙습지 소멸의 원인 특히 소멸 위험이 큰 습지는 무제치늪, 대암산 용늪 등과 같이 대부분 높은 지대에 위치하여 물 공급이 제한적인 산지 습지들임

〈 기후변화로 인한 외래종 확산 및 피해(내륙습지 지역) 예측 결과 〉



〈 기후변화로 인한 내륙습지 소멸 예측 결과 〉



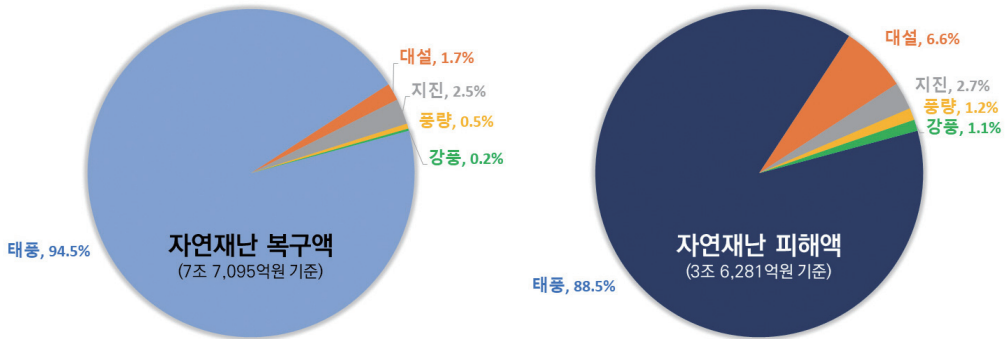
▲ 그림47 기후변화에 의한 생태계 피해 예측

출처 : 국립생태원

- 온난화로 나뭇잎 개엽, 철새 도래, 조류 번식 시기가 빨라지고, 매미나방 등 나비목, 꽃매미 등 매미목, 하늘소 등 딱정벌레목을 중심으로 곤충이 대량출현하는 등 서식지 분포 및 개체군 풍부도와 종 다양성 변화 발생 전망
- 기온 상승으로 저온에 적응된 고산지역 침엽수림이 고사 위기에 처하고 소나무숲이 2080년대는 현재보다 15%(RCP8.5) 줄어들며, 이상기상에 의한 고온건조 및 강풍으로 산불 발생 위험도가 증가할 것으로 예측됨
- 해수온 및 해수면 상승으로 성층이 강화되고, 영양염이 감소하여 생물생체량과 종 다양성이 감소되는 한편 열대·아열대 유해생물 대량 출현 예상

다. 국토 연안

- 행정안전부가 발간한 「재해연보」에 따르면 지난 2004년부터 2018년까지 15년 동안 연평균 자연재난 피해액은 약 5430억 원이며, 복구액은 1조320억 원에 달하는 것으로 조사됨
- 최근 10년(2009~2018년)을 기준으로 자연재난별 피해 및 복구 금액에서 차지하는 비중은 다음과 같이 조사됨

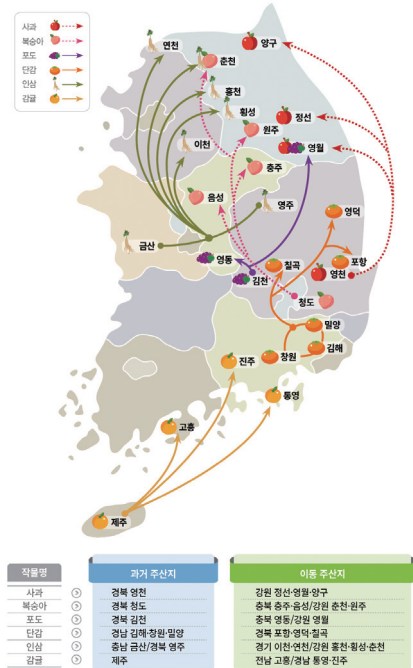


- 2020~2060년에 발생 가능한 연간 자연재난 피해액은 2002년에 발생한 최대 피해액의 1.4배인 11조 4794억 원으로 추정함
- 기후변화로 시설물의 노후화 및 성능 저하가 빠르게 진행되어 붕괴 또는 기능 상실시 상당한 인명·재산 피해 발생이 우려되는 댐, 하천 관리시설, 상·하수도, 절토사면 등 주요 시설물들의 노후화가 빠르게 진행되고 있음
- 집중호우 및 태풍 증가로 도시 홍수 피해가 빈번하게 발생하고, 규모도 점차 대형화되며, 산지 토사 재해 피해 규모가 급증하는 등 이상기후에 따른 자연재해 대형화 및 발생 시기 증가가 전망. 해수면 상승과 연안 습지 면적 감소를 초래하여 연안의 재난재해 완충기능을 약화시키고, 해수욕장, 주요 항만, 산업단지 등 연안지역의 침수 피해 초래 예상

라. 농수산

- 농업은 기후변화 피해를 가장 많이 받는 부문으로 뚜렷한 4계절의 한반도 기후가 아열대성 기후로 변하고 있어 곡물 및 과일 등의 재배 지역도 과거와는 판이한 현상을 보여주고 있음
- 농림축산식품부에 따르면 2008년부터 2019년까지의 배 재배 면적은 1만8277ha에서 9616ha로 47.4%가 줄어들고 생산량도 47만743톤에서 20만732톤으로 57.4%가 급감한 것으로 나타남. 특히 국산 배의 주산지인 전남에서조차 생산량이 12만7188톤에서 5만582톤으로 60.2% 줄어든 것은 기후변화 영향을 극명하게 보여주는 수치임
- 참다래와 무화과, 망고 및 백향과 등 아열대 과일의 경우는 관련 통계가 작성된 2017년부터 지난해까지 3년간 매년 증가 추세로 전체 재배 면적은 50% 증가, 재배 농가 수도 45.9% 급증했는데 그중 망고의 재배 면적이 가장 많이 증가함
- 농촌진흥청은 '신농업 기후변화 기획보고서'를 통해 현재 기온보다 1.5℃ 상승하게 되면 2040년대의 한반도 기후에서는 고품질 배의 재배 적지가 급감하게 되고, 고령지 배추 역시 90% 이상 재배지가 감소할 것으로 전망함

- 기후변화평가보고서에서는 현재 온난화로 작물재배지 북상, 해충 발생 증가, 잡초 분포 변화 등이 관측되며, 21세기 말(RCP8.5)에는 강원도 산간을 제외한 남한 대부분의 아열대화로 주요 농작물 재배 가능지가 북상할 것으로 예상됨
- 21세기 말 우리나라의 벼 생산성이 25% 이상 감소하는 등 콩, 옥수수, 감자, 고추, 배추 등 대부분 작물의 생산성이 감소하나 양파는 예외적으로 수량 증가 예상됨. 사과 재배 적지는 사라지고, 감귤은 강원도 지역에서 재배가 가능할 것으로 전망됨
- 지난 40년간 수온 상승으로 대형 어종인 삼치, 방어 등이 북상하고, 참가리비의 양식 남방한계가 포항연안(1980년대)에서 강원도 북부해역(2000년대 이후)으로 북상함



▲ 그림48 주요 농작물 주산지 이동 지도(1970~2015년)
출처 : 통계청

마. 건강

- 지구온난화로 인해 자주 발생하는 폭염은 열사병뿐 아니라 탈수 관련 합병증 등 광범위한 질병을 초래하고 만성 폐질환과 함께 심장이나 신장에 문제가 있는 환자들에게 악영향을 미치는 것으로 알려져 있음
- 2020년 6월의 일 최고기온은 28.0℃이고, 일 평균기온은 22.8℃인 것으로 나타나 지난 1973년 이래 최고 기록을 달성하였으며, 폭염 일수도 2.0일로 평년의 6월 평균 폭염 일수보다 1.4일이나 늘어난 것으로 나타남
- 질병관리본부의 통계에 따르면 지난 2018년 한국에서 폭염과 관련한 발병자는 4,526명이었고, 사망자는 48명에 이르는 것으로 조사되었음. 그러나 폭염으로 인한 간접적인 건강 영향이 반영되지 않은 점을 고려하면 실제 사망자는 훨씬 더 많을 것으로 추정됨
- 폭염으로 인한 온열 질환자, 심뇌혈관 질환자 및 호흡기 질환자 수가 증가하고 있으며, 연평균기온 1℃ 상승 시 사망자가 4% 증가하고 매개체 감염병, 인수공통 감염병 및 수인성 감염병도 증가하는 것으로 나타남
- 고령화, 소득양극화로 사회·경제적 취약계층(저소득가구, 홀몸어르신, 장애인 등)의 폭염 위험을 더욱 증가시킬 것으로 예상됨
- 기후변화는 오존과 미세먼지 농도를 증가시켜 건강에 영향을 줄 수 있음. 개화 시기가 빨라지고 개화 기간도 길어져서 이로 인한 꽃가루 알레르기 유발 물질 농도가 증가하는 것으로 나타남
- 수인성 및 식품 매개 감염병은 평균기온과 상관성이 높게 나타나며 기온 상승, 폭우 및 홍수에 의해서 비브리오팀 감염증이 늘어남. 기온이 1℃ 상승할 경우 감염병의 평균 발생량이 증가
- 기후변화로 인한 생태계 교란은 곤충 및 설치류 매개 감염병의 발생 양상에 영향을 주는 것으로 예측됨. 기온이 상승하면 열대지방에서 서식하는 이집트 숲모기의 서식 조건이 형성되고 흰줄 숲모기 성충이 겨울철에도 생존하는 조건이 갖춰져 국내에서도 바이러스가 유입 후 전파될 가능성이 있음

심화

2018년 폭염 개요(출처 : 폭염대응가이드, 환경부)

1973년 통계 작성 이래, 전국 평균 폭염 일수 31.5일(평년 10.1일), 열대야 일수 17.7일(평년 5.3일)로 역대 최고치 기록. 폭염은 광주에서 36일간(7월 12일~8월 16일), 제주는 28일간(7월 19일~8월 15일)간 지속됨. 지자체별 일 최고기온은 홍천에서 41.0℃('18.8.1.)를 기록하여 과거 전국 역대 1위인 대구 40.0℃('42.8.1.)를 경신하고, 일 최저기온은 서울이 0.3℃('18.8.2.)를 기록하여 기상관측 이래 가장 높은 최저기온으로 나타남

이로 인한 온열질환 감시체계(2011년~) 이후 가장 많은 인명 피해(온열질환 4,526명, 사망 48명)와 농업 피해(가축 908만 마리, 어류 709만 마리, 농작물 2만2509ha)가 발생하였고, 「재난 및 안전관리 기본법」상 자연재난에 폭염을 포함('18.9.18.)

[전국 평균 폭염 및 열대야 일수 순위 현황(1973년 이후)]

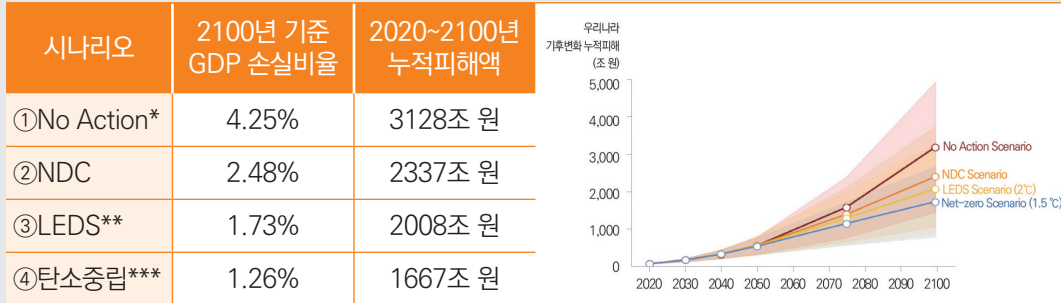
| 순 위 | 폭염 일수 | | 열대야 일수 | |
|-----|-------|------|--------|------|
| 1위 | 2018년 | 31.5 | 2018년 | 17.7 |
| 2위 | 1994년 | 29.7 | 1994년 | 17.4 |
| 3위 | 2016년 | 22.4 | 2013년 | 15.8 |
| 4위 | 2013년 | 18.2 | 2010년 | 12 |
| 5위 | 1990년 | 17 | 2016년 | 10.8 |

바. 산업 및 에너지

- 폭염 및 열대야로 7~8월 건물 부문 전력 소비량 증가로 아파트 정전 횟수가 증가했으며, 1~2월에는 겨울철 한파로 인한 에너지 소비량이 늘어난 것으로 나타남
- 지구온난화로 여름철 냉방 전력 소비는 늘어나는 반면에 겨울철 난방 전력 소비는 감소하는 등 계절적 대비가 뚜렷하게 발생하고 있음. 2018년 7월 24일 폭염으로 인해 여름철 역대 최대전력수요(9만2478MW)가 발생 하였으며, 2020년대 중반 무렵부터는 여름철 냉방에 의한 전력 소비가 겨울철 난방에 의한 소비를 넘어설 것으로 추정됨
- 원자력과 석탄 및 가스 발전, 그리고 수력 및 일부 태양열 발전의 경우 기후변화로 인한 잦은 가뭄으로 냉각수 부족현상을 초래해 전력 생산 차질이 우려되고 있음. 또한 고온 현상으로 냉각수 온도가 높아지게 되면서 전력 생산의 효율성도 떨어질 것으로 예상됨
- 기상이변에 따른 자연재해로 제조업 피해 및 물류시스템 차질로 인한 생산성과 수요가 동시에 줄어들어 매출액 감소가 우려되며, 극한기상은 건설업에 영향을 미치고, 야외근로자들의 건강을 위협하는 등 기후 변화 취약산업에 부정적 영향을 증대시킴

심화

기후변화 피해비용 분석(출처 : KEI포커스, KEI)



* 저감 활동 없이 현재 추세대로 온실가스를 배출하는 경우

** 2°C 이하로 억제하는 수준으로 2020년까지 제출해야 하는 각국의 2050년 배출 목표

*** 1.5°C 이하로 억제하는 수준에서 2050년에 온실가스 순배출 zero를 달성하는 경우

교육주안점



- 우리나라 기후변화 경향의 주요 패턴을 설명하고, 기후변화로 인해 발생한 생태계와 인간계의 피해를 인식 하도록 한다.
- 온난화를 방지할 경우 발생 가능한 영향과 위험을 인식하고 지구온난화 1.5°C 목표의 탄소중립 필요성을 인식하도록 한다.

참고자료

| | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | - 한반도 기후변화 전망분석서(기상청, 2018) |
| | - 우리나라 109년 기후변화 분석보고서(기상청, 2021) |
| | - 주요 농작물 주산지 이동현황(통계청 보도자료, 2018. 4. 10) |
| | - 기후변화 적응을 위한 폭염 대응 가이드(환경부, 2019) |
| | - 한국 기후변화 평가보고서 2020(환경부, 2020) |
| | - 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025) (관계부처합동, 2020) |
| 참고 사이트 | - 온실가스 배출 경로에 따른 기후변화 피해비용 분석(KEI, 2020) |
| | - 기후변화에 의한 생태계 피해 예측 자료집 발간(국립생태원 보도자료, 2021. 3. 10) |
| | - 기후변화, 지구는 어디로 가고 있을까? 통계청 통계의 창 (http://sti.kostat.go.kr/window/2020b/main/2020_win_06.html) |
| | - 기상청위키백과(http://www.climate.go.kr/home/10_wiki/index.php/) |

2050

IV

기후저지선과 잔여탄소수지

IV. 기후저지선과 잔여탄소수지

교육 개요

- 지구 평균온도는 누적 탄소배출량과 상관관계가 있으며, 기존 배출된 탄소량에 의한 점진적인 기후반응(누적 탄소배출량에 점진적으로 반응하는 정도를 정량화한 것) 발생
- 기후변화가 급격하게 변하는 것을 최소화하기 위한 기후저지선의 의미와 중요성
- 기후저지선과 이에 따른 잔여탄소수지, 앞으로 배출 경로 결정 과정에서 탄소중립 도달 시기가 2050년으로 결정

교육 목표

- 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 개념을 이해
- 기후저지선에 대한 개념과 1.5°C 기후저지선이 갖는 의미와 중요성 이해
- 잔여탄소수지 개념과 산정 방법, 탄소중립 시기를 2050년으로 산정한 과정 이해
- 잔여탄소수지를 국가 간 할당 시 고려해야 할 요인에 대한 이해

교육 요소

| | | |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 점진적 기후반응과 기후저지선 | 누적탄소배출량 | - 누적탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 |
| | 1.5°C 기후저지선 | - 1.5°C 기후저지선의 의미와 중요성 |
| 잔여탄소수지 산정과 탄소중립 | 잔여탄소수지 | - 잔여탄소수지 정의, 파리협정과 잔여탄소수지 - 잔여탄소수지와 2050탄소중립 목표 도출 |
| | 현재 정책 및 자발적 기여방안에 따른 미래 기후 | - 온실가스 감축국가 자발적 기여방안 현황 - 자발적 기여방안 경로에 기반한 미래 기후 전망 - 우리나라의 자발적 기여방안 및 이행 노력 |

1. 점진적 기후반응과 기후저지선

■ 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 이해

- 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응(TCRE)은 기후시스템이 누적 탄소배출량에 점진적으로 반응하는 정도를 정량화한 것
- 21세기 후반과 그 이후 전 지구 평균 지표 온난화는 누적 탄소배출량에 의해 결정
- 대기 중 이산화탄소를 제거할 방법이 없는 한 이산화탄소 배출에 의한 온난화는 돌이킬 수 없음

☞ **누적탄소배출량, 점진적 기후반응**

■ 기후저지선의 의미와 중요성

- 기후변화가 급격하게 발생해 인류 생존 및 생태계에 심각한 영향을 주는 상황을 막기 위해 설정한 지구 평균온도 상승 한계선으로 기후저지선을 설정
- 지구 평균온도 상승이 1.5°C 이상 증가하는 경우 극한기상 · 이상기후 증가, 지구시스템, 생태계, 인류의 생존에 영향 또는 위기를 초래할 것이므로, 국제적으로 온실가스 배출 로드맵 및 전략 수립 시 1.5°C를 기준선으로 설정

☞ **기후저지선 의미, 기후저지선 중요성**

1-1. 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 이해

가. 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응

- 외부 강제력에 대한 기후시스템의 반응을 파악하기 위해 사용되는 지수 중 이산화탄소 배출을 온도와 직접적으로 연관시키는 지수가 기후변화 미래 전망에 활용되는 데 유용하며, 누적 이산화탄소 총배출량과 전 지구 평균 지표 온도의 변화의 선형적 관계를 적용
- 21세기 후반과 그 이후의 전 지구 평균 지표 온난화는 주로 이산화탄소 누적배출량에 의해서 결정되며, 온실가스의 배출이 중단되어도 기후변화의 양상은 대부분 수백 년 동안 지속될 것임(수세기 동안 발생된 주요 기후변화가 과거, 현재, 미래의 이산화탄소 배출량에 의해 지속됨을 의미함)
- 점진적 기후반응(Transient Climate Response, TCR)
10년에서 100년 시간 규모로 증가하는 복사강제력에 대한 기후시스템의 반응을 정량화한 것으로 TCR은 농도가 연간 1%씩 증가하는 탄소배출 시나리오에서 대기 중 이산화탄소 농도를 2배로 했을 때 전 지구 평균 지표 온도의 변화로 정의

- 누적 탄소배출량에 대한 점진적 기후반응(Transient Climate Response to cumulative carbon Emission, TCRE)
기후시스템이 누적 탄소배출량에 점진적으로 반응하는 정도를 정량화한 것으로 TCRE는 대기 중에 배출된 1000GtC당 전 지구 평균 지표 온도 변화로 정의
※ TCRE는 1000GtC 당 0.27~0.63℃ 범위에 들 가능성이 높으며, 배출된 총 이산화탄소 중에서 대기 중에 잔류하는 이산화탄소의 비율 및 점진적 기후반응에 대한 정보를 모두 합친 것으로 모델마다 다르게 나타나는 모델 의존적인 값임
- 1850~2019년 배출된 이산화탄소량은 2390(±240)GtCO₂이며 지구 평균온도는 1.07℃ 상승하였으며, TCRE를 바탕으로 인위적인 이산화탄소 배출로 발생한 온난화를 1850~1900년 이후 목표 온도로 억제하는 확률에 따라 배출되는 추가 이산화탄소량은 아래와 같음

표15 목표 온도 도달 확률에 따른 잔여탄소수지*

| 산업화 이전 (1850~1900년) 대비 제한할 온도 | 목표 온도까지 남은 온도 | 목표 온도로 제한할 확률에 따른 잔여탄소수지(2020년 기준) | | | | |
|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|------|------|------|-----|
| | | 17% | 33% | 50% | 67% | 80% |
| 1.5℃ | 0.43℃ | 900 | 650 | 500 | 400 | 300 |
| 1.7℃ | 0.63℃ | 1450 | 1050 | 850 | 700 | 550 |
| 2.0℃ | 0.93℃ | 2300 | 1700 | 1350 | 1150 | 900 |

* 잔여탄소수지 : 세부내용은 p. 94 참고

1-2. 1.5도 기후저지선 의미와 중요성

가. 기후저지선의 의미

- 산업화 이후 현재까지 기후변화가 지속되었음에도 그 영향이 급격하게 나타나지 않았던 것은 지구시스템을 구성하는 다양한 요소가 상호작용하는 과정에서 기후변화 영향이 완충되었기 때문임. 하지만 기후변화로 기존 지구시스템의 상호작용 방식이 급변하여 기후변화 속도와 강도가 통제 불가능할 정도로 커질 수 있음
- 기후저지선은 기후변화가 급격하게 변하는 상황을 막기 위해 설정된 지구 평균온도 상승의 한계선을 의미함. 즉 기후저지선은 인류 생존 및 생태계 보전을 담보하기 위해 넘지 말아야 할 최후의 한계선을 뜻함
- 온실가스 배출이 현재 추세로 계속된다면 매우 높은 확률로 지구 평균온도가 기후저지선 이상으로 상승할 것임. 따라서 파리협정에서 온도 상승 제한 목표가 기후저지선과 동일하게 설정되는 등 기후저지선을 넘지 않기 위한 국제적 노력이 가속화되고 있음

나. 기후저지선 설정

- 지구시스템 모델이 개선되면서 지구시스템을 구성하는 여러 하위 요소 중 하나의 영향이 다른 요소에까지 연쇄적으로 이어져 결국 지구시스템 전체가 급변할 수 있음이 밝혀짐. 예를 들어 기후변화로 인한 북극 빙하 · 빙산 용해가 회복할 수 있는 수준을 넘어선다면 급속한 해수면 상승, 열 순환 변동 등이 뒤따라 발생하기 때문에 궁극적으로 지구시스템 전체에 영향을 미칠 수 있음

- 최근 발간된 IPCC 보고서에서는 기후변화로 인한 지구 평균온도 상승이 적은 시점에도 지구시스템에 영향을 미칠 수 있음이 보고되면서 기후저지선은 더욱 엄격한 수준으로 조정됨
- 2009년 코펜하겐 당사국총회 당시 일부 과학자와 기후변화 피해가 집중되는 군소도서 국가를 중심으로 2°C 보다 더 낮은 수준의 기후저지선 설정이 필요하다는 주장이 제기되었으나 최종적으로 2°C 기후저지선이 채택됨. 이후 지구 평균기온 상승이 2°C 이내로 제한되어도 ‘돌이킬 수 없는’ 기후변화가 나타날 수 있다는 사실이 받아들여져 2015년 체결된 파리협정에서는 모든 당사국이 “지구 평균온도 상승폭을 산업화 이전 대비 2°C보다 훨씬 작게 유지하며 나아가 1.5°C까지 제한하기 위해 노력”할 것을 명시함
- IPCC는 2018년 특별보고서에서 1.5°C 기온 상승에서도 지구시스템, 생태계, 인류 사회에 영향을 크게 미칠 수 있는 우려 요인의 존재를 알려 1.5°C 기후저지선에 대한 과학적 근거를 제시함
- 1.5°C 기후저지선은 기후변화 완화를 목적으로 체결되는 각종 국제협약의 기준이며, 국가별 온실가스 배출 로드맵 및 전략을 수립할 때도 산업화 이전 대비 1.5°C가 기준선이 됨

교육주안점



- 기후변화 미래 전망에서 활용되는 누적 탄소배출량에 대한 점진적 기후반응 개념을 이해하도록 한다.
- 1.5°C, 2°C 지구온난화 상황에 따라 예상되는 기후 위험을 비교하여 1.5°C 기후저지선의 중요성을 인지하도록 한다.

참고자료

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | <ul style="list-style-type: none"> - IPCC 종합보고서(IPCC, 2014) - IPCC 지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC, 2018) - Climate tipping points-too risky to bet against(Lenton et al., 2020) - Climate, Nature and our 1.5°C Future: A synthesis of IPCC and IPBES reports (Yeo, S., 2019) |
| 참고 사이트 | <ul style="list-style-type: none"> - 기상청기후정보포털(http://www.climate.go.kr/) - 기후변화행동연구소(http://climateaction.re.kr/) |

2. 잔여탄소수지 산정과 탄소중립

■ 잔여탄소수지 산정

- 온실가스 총 누적 배출량은 지구 평균온도와 선형에 가까운 상관관계가 존재하며, 이를 토대로 지구 평균온도가 특정 온도까지 도달하기 위한 총 누적 배출량에서 현재까지 누적된 배출량을 제외한 값을 잔여탄소수지로 정의

$$\text{잔여탄소수지} = \frac{2100\text{년 지구 평균온도가 특정 온도까지 도달하게 하는 총 이산화탄소 누적 배출량}}{\text{현재 총 이산화탄소 누적 배출량}}$$

- 파리협정에서는 잔여탄소수지를 계산하기 위해 모든 종류의 온실가스를 고려하여 오버슈트 없이 2100년 이내에 지구 평균온도가 산업화 이전 대비 1.5°C 상승하는 상황으로 잔여탄소수지를 산정
- 2100년까지 온도 상승폭을 1.5°C 이내로 제한하기 위한 잔여탄소수지와 배출 경로 결정 과정에서 탄소중립 도달 시기를 2050년으로 결정

☞ 잔여탄소수지, 파리협정과 잔여탄소수지 산정, 2050탄소중립 목표 도출

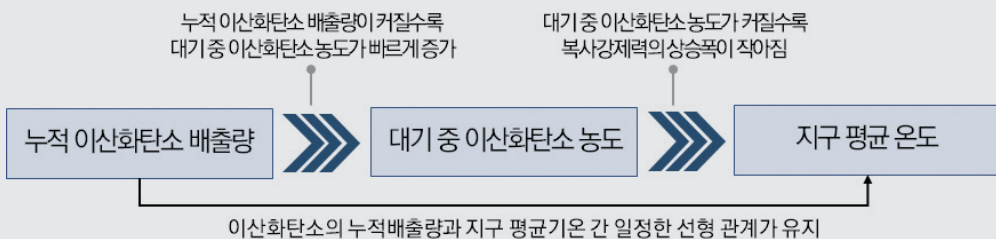
2-1. 잔여탄소수지 산정

가. 잔여탄소수지의 정의

- 산업화 이후 현재까지 배출된 이산화탄소의 누적 배출량과 지구 평균온도 간의 선형에 가까운 상관관계를 활용하여 2100년 지구 평균온도가 특정 온도에 도달케 하는 이산화탄소의 총 누적 배출량을 계산할 수 있음
- 그 값에서 현재까지의 이산화탄소 누적 배출량을 뺀 값을 '잔여탄소수지 (Remaining Carbon Budget)'로 정의

심화

이산화탄소 배출량과 지구 평균온도 간 선형 관계가 유지된 이유



▲ 그림49 누적 이산화탄소 배출량과 지구 평균온도 간 선형관계 모식도

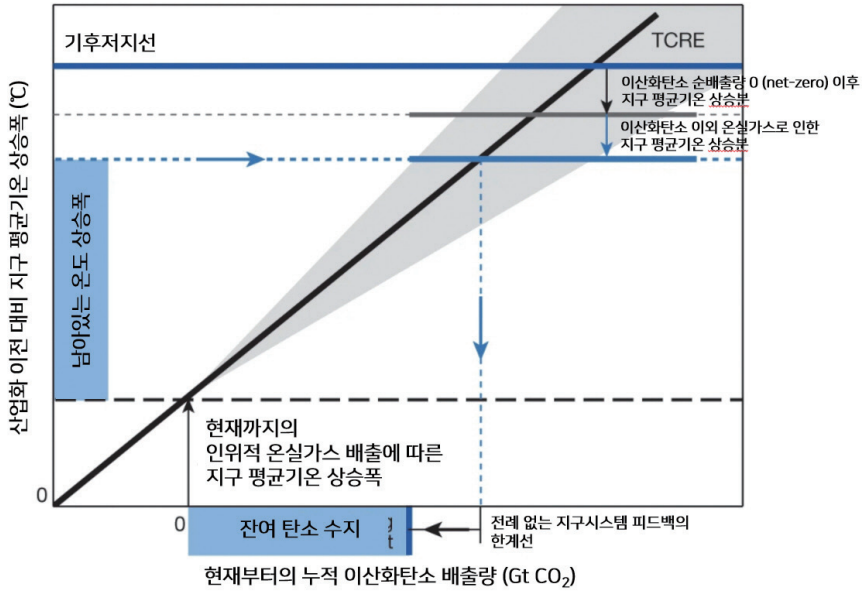
- **누적 이산화탄소 배출량과 대기 중 이산화탄소 농도 간 비선형적 관계** | 전체 이산화탄소 배출량의 약 22%는 해양을 통해 흡수됨. 하지만 해수에 용해되는 이산화탄소의 양이 증가하여 해양산성화가 진행되면 해양의 탄소 흡수능력이 감소하고 누적 이산화탄소 배출량이 증가함에 따라 대기 중 이산화탄소 농도 상승은 더욱 빠른 속도로 나타남
- **대기 중 이산화탄소 농도와 지구 평균온도 간 비선형적 관계** | 대기 중 이산화탄소 농도는 복사강제력 변화를 초래하는 직접적인 요인 중 하나로 이산화탄소 농도가 높아질수록 복사강제력의 상승폭이 작아져 지구 평균온도가 더 느리게 상승
- 위의 두 상반된 효과가 서로 상쇄되어 산업화가 시작된 이래 이산화탄소 농도와 지구 평균온도 간 일정한 선형 관계가 유지 중

나. 파리협정과 잔여탄소수지

- 잔여탄소수지의 크기와 잔여탄소수지가 2100년까지 어떠한 추세로 배출되어야 하는지 결정되는 과정에서 이산화탄소 순배출량이 0이 되어야 하는 시기 즉, 탄소중립에 도달해야 하는 시기가 결정되며, 이는 3가지 요인으로 결정됨

| | |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2100년 최종 도달하게 될 지구 평균온도</p> | <p>2100년 지구평균기온이 산업화 이전 수준 대비 몇 °C 상승할 것인지 여부 고려 * 파리협정에서 기후저지선을 2°C에서 1.5°C로 더욱 엄격하게 설정함에 따라 잔여탄소수지의 크기 또한 대폭 감소</p> |
| <p>오버슈트의 허용 여부</p> | <p>오버슈트는 지구 평균온도가 일시적으로 최종 목표 온도보다 높아지는 상황을 의미하며, 오버슈트를 허용하지 않는 시나리오에서는 지구의 평균온도가 2100년까지 상승을 계속 하여 최종 목표 온도에 도달하는 반면에 오버슈트를 허용하는 시나리오에서는 지구 평균 온도가 최고점에 도달한 이후 서서히 하락하여 최종 목표 온도에 도달함 * 일반적으로 오버슈트를 허용하는 시나리오 하에서 산정된 잔여탄소수지의 크기가 더 큼</p> |
| <p>고려하는 기체의 종류</p> | <p>지구온난화 기여도가 가장 큰 온실가스는 이산화탄소이지만 메테인, 아산화질소, 에어로졸 등 또한 지구 평균온도 상승을 유발함 이산화탄소 이외의 기체를 함께 고려할 경우 해당 기체의 배출량은 그에 상응하는 이산화탄소 배출량으로 전환되어 계산에 포함되므로 이산화탄소만을 고려하는 경우보다 잔여탄소수지의 크기가 감소</p> |

- 파리협정에서는 잔여탄소수지를 계산하기 위해 오버슈트 없이 2100년 이내에 지구 평균온도가 산업화 이전 대비 1.5°C 상승하는 상황을 상정하며 모든 종류의 온실가스를 고려함



▲ 그림50 누적 이산화탄소 배출량에 따른 지구 평균기온 상승 선형관계

출처 : Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets (Rogelj et al., 2020)

※ 대기 중에 누적된 이산화탄소는 수백~수천 년간 잔류하며 온도를 상승시키므로 이산화탄소 배출 감축이 즉각적인 기온 하락으로 이어지지 않음. 즉 이산화탄소 순배출량이 0에 도달하는 시점 이후에도 추가적인 평균온도 상승이 발생함



교육주안점

- 1.5°C, 2°C 지구온난화 상황에 따라 예상되는 기후 위험을 비교하여 1.5°C 기후저지선의 중요성을 인지 하도록 한다.
- 지구 평균온도가 탄소 누적 배출량과 선형관계가 있음을 제시하고, 이를 통해 잔여탄소수지를 도출하는 내용을 연계하여 제시한다.
- 잔여탄소수지 산정 시 고려해야 하는 요인과 파리협정에서 각 요인을 어떠한 방식으로 설정하였는지 설명하도록 한다.
- 잔여탄소수지 산정과 탄소 배출 경로를 결정하는 과정에서 탄소중립 목표 시기가 2050년으로 도출 되었 음을 이해하도록 한다.

참고자료

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>참고 문헌</p> | <ul style="list-style-type: none"> - IPCC 종합보고서(IPCC, 2014) - Climate tipping points-too risky to bet against(Lenton et al., 2020) - Climate, Nature and our 1.5°C Future: A synthesis of IPCC and IPBES reports (Yeo, S., 2019) |
| <p>참고 사이트</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 기상청기후정보포털(http://www.climate.go.kr/) - 기후변화행동연구소(http://climateaction.re.kr/) |

3. 국가 자발적 기여방안 정의 및 현황

■ 국가 자발적 기여방안(INDCs) 정의 및 평가체계

- 파리협정에 의거하여 참여국은 자국의 상황과 역량을 감안하여 자체적으로 감축 목표량을 설정한 국가 자발적 기여방안(INDCs)을 제출하도록 하고 있으며, 2020년부터 5년 주기로 수정 및 보완된 INDCs를 제출
- 유엔기후변화협약사무국에 제출된 국가자발적 기여방안(INDCs)이 승인되면 파리협정에 가입한 것으로 되며, 국가기여방안(NDC)으로 전환. 또한, 제출된 기여방안은 평가를 통해 파리협정의 목표를 달성할 수 있는지를 기준으로 6가지 범주로 분류

☞ 국가자발적 기여방안(INDCs), 국가기여방안(NDCs)

■ 국가기여방안(NDC)현황

- 2021년 11월 기준으로 131개국에서 국가기여방안을 제출

☞ 전 세계 국가기여방안(NDC) 제출 현황

3-1. 국가 자발적 기여방안(INDCs) 정의 및 평가체계

가. 파리협정과 국가 자발적 기여방안

- 2015년 제21차 기후변화협약 당사국총회(COP21)는 신기후체제 합의문인 ‘파리협정(Paris Agreement)’을 채택하였으며, 기존 체제와 달리 참여국가 스스로 감축 목표량을 설정할 수 있도록 정함
 - ※ 당사국들에게 2020년부터 5년 주기로 수정 및 보완된 국가기여방안을 제출하도록 장려
- 국가 자발적 기여방안(Intended Nationally Determined Contributions, INDCs)은 각 당사국이 자국의 상황과 역량을 감안하여 자체적으로 정한 감축 및 적응에 대한 목표, 절차, 방법론 등을 포함하는 온실가스 감축 목표
- INDCs는 기여 목표 설정 방식(절대량, BaU, 원단위 등), 대상 온실가스²⁰⁾, 기준연도²¹⁾, 이행 기간, 기여 수준, 공정과 의욕성²²⁾, 적응 방안, 온실가스 배출 현황, 통계자료의 출처, 기여 분석 방법, 목표 이행 방안 등을 명확히 기술함으로써 온실가스 배출량 감축, 적응, 자원, 기술, 역량 배양, 투명성의 6개 분야를 포괄하여야 함
- 국가별 INDCs를 유엔기후변화협약사무국에 제출하여 승인되면 공식적으로 파리협정에 가입한 것이 되며, 국가기여방안으로 전환됨

20) 기후변화협약에서 정한 국가 온실가스 인벤토리는 IPCC Guideline 1996에 따라 작성해야 함. 그러나 교토체제 선진국들은 2015년 인벤토리부터 IPCC Guideline 2006을 의무적으로 사용하기로 정한 바 있음(일부 항목 제외), 따라서 미국은 GL 2006의 온실가스 범위에 따라 NF3를 대상 가스에 포함함

21) EU, 스위스, 노르웨이는 1990년, 미국은 2010년임

22) 감축 목표의 적극성과 글로벌 감축에 기여하는 정도를 말함

나. 자발적 기여방안 평가

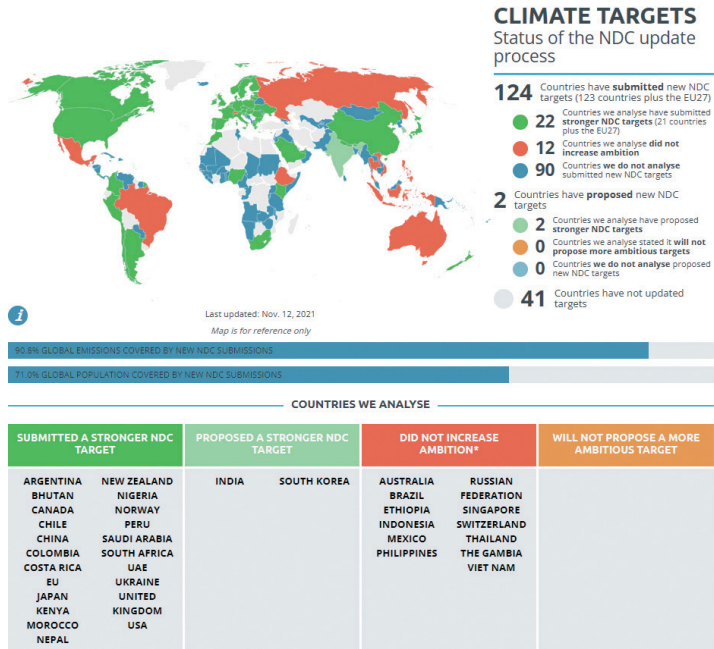
- 기후분석(Climate Analytics)과 신기후연구소(New Climate Institute) 2개 연구기관에서 만든 ‘기후변화 대응 행동 분석기관(Climate Action Tracker, CAT²³)’을 통해 각 당사국이 제출한 INDC를 바탕으로 자발적 기여방안 수준 및 이를 기반으로 하는 온실가스 배출 및 미래 지구온난화 전망을 과학적으로 평가하여 제공
- 대상 국가의 기후변화대응정책이 파리협정의 목표를 달성할 수 있는지를 기준으로 5가지 범주 제시



3-2. 자발적 기여방안 현황

가. 각 국가의 자발적 기여방안 제출

- 각국은 2015년 12월 파리협정 채택 이전 국가 온실가스 감축 목표를 유엔기후변화협약에 제출했으며, 2021년 파리협정의 본격적 이행을 앞두고 2020년 말까지 이를 갱신하기로 합의
- 2021년 11월까지 131개 국가가 국가기여방안을 제출, 이를 기반으로 기후변화 대응 행동 분석기관에서 2030년 까지 온실가스 배출 및 지구온난화 시나리오를 홈페이지에 게시 중



▲ 그림51 2021년 11월까지 등록된 국가기여방안 기반으로 각 국가의 대응을 기후변화 대응 행동 분석기관에서 평가한 결과 분포도

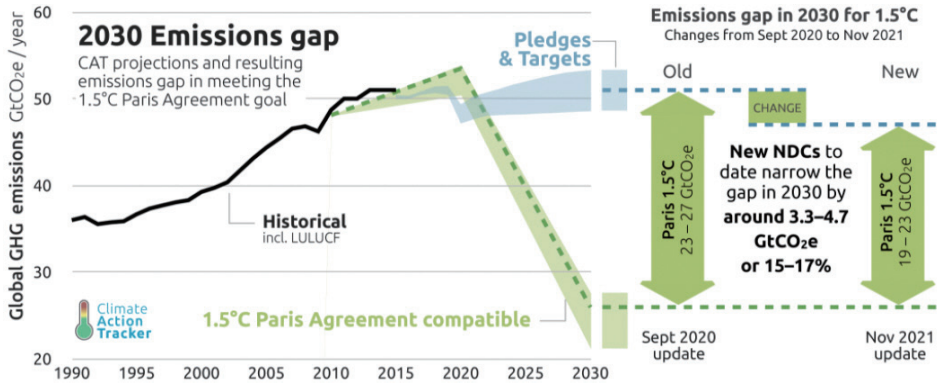
출처 : 기후변화대응행동분석기관(CAT)

23) 홈페이지 <https://climateactiontracker.org/>에 결과 게시

나. 자발적 기여방안 경로에 기반한 미래 기후 전망

1) 2030년까지 온실가스 배출 경로

- 국가별 기여방안을 토대로 2030년까지 탄소배출 시나리오를 구성하여 2100년까지 2°C 지구온난화 및 1.5°C 지구온난화를 달성하기 위한 배출 경로와 비교한 결과, 파리협정 목표인 1.5°C 지구온난화 달성을 위해서는 2030년까지 19~23GtCO₂e를 추가적으로 감축해야 함



▲ 그림52 2030년까지 온실가스 배출 시나리오

출처 : 기후변화대응행동분석기관(CAT)

- 유엔기후변화협약(UNFCCC) 사무국은 '20년 말 기준 신규·갱신 제출된 75개국(EU27 포함)의 48개* NDC 분석보고서를 발간(21.2.28)하였으며, 파리협정 1.5°C/2°C 목표 달성을 위한 감축 수준**에 크게 못 미친다
 *** 분석(fall far short of what is required)
 * 협정 당사국의 40%, '17년 전지구 배출량의 30%에 해당
 ** IPCC 1.5°C 특별보고서('18)에 따라 CO₂ 배출량을 '30년까지 '10년 대비 25%(2°C) 또는 45%(1.5°C) 감축, '50년 (1.5°C) 또는 '70년(2°C)까지 순배출 제로 달성 권고
 *** '30년까지 '10년 대비 2.1% 감축(기준 NDC 대비 0.3~2.8% 추가 감축된 수준)



교육주안점

- 전 세계의 자발적 기여방안은 현재 파리협정 1.5℃/2℃ 목표 달성을 위한 감축 수준을 충족시키기 어려우며, 더 강화된 감축목표가 필요함을 강조

참고자료

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | - UNEP(2020), Emission Gap Report 2020, Nairobi |
| 참고 사이트 | - 기후변화 대응 행동 분석기관(https://climateactiontracker.org/) - IPCC 홈페이지(https://www.ipcc.ch/) - UNEP 온실가스 배출보고서 (https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020) |



2050

V

탄소중립 사회로의 전환

V. 탄소중립 사회로의 전환

교육 개요

- 2018년 IPCC 1.5°C 특별보고서 발간 이후 2050 탄소중립을 위한 국제사회의 노력이 가속화되고 있으며 우리나라도 2050 탄소중립을 선언
- 2050 탄소중립 실현을 위한 우리나라의 다양한 정책

교육 목표

- 기후변화 대응 및 탄소중립을 위한 국제사회와 우리나라의 노력 이해
- 탄소중립에 따른 사회적 · 경제적 영향 이해
- 2050 탄소중립 추진 전략에 따른 주요 과제 이해

교육 요소

| | | |
|---------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 국제사회의 탄소중립 추진현황과 영향 | 국제사회의 추진경과 | - 유엔기후변화협약과 당사국총회/제26차 당사국총회('21) - 파리협정과 지구온난화 1.5°C 특별보고서 - 국제메테인서약(Global Methane Pledge) |
| | 주요국의 탄소중립 정책 | - 유럽연합, 미국, 중국, 일본 등 |
| | 탄소중립 이행감시 시스템 | - 탄소중립 도달을 위한 이행감시 체계/ 관측기반 온실가스 배출량 검증 시스템, 우리나라 현황 |
| | 탄소중립과 경제 | - 탄소중립의 경제적 영향 |
| 우리나라의 2050 탄소중립 | 2050탄소중립 정책 | - 2050탄소중립 선언, 추진전략 및 탄소중립 위원회 |
| | 탄소중립기본법 | - 탄소중립기본법 제정 목적/ 의의/ 기본원칙 및 체계/ 주요시책 |
| | 탄소중립 시나리오 및 2030국가온실가스 감축목표 | - 탄소중립 시나리오 개요 및 주요내용 - 2030 감축목표 상향/ NDC 부문별 감축량 및 감축 방향 |
| 부문별 감축수단 | 에너지, 산업, 건물, 폐기물, 수소, 흡수원, CCUS 부문별 개요 및 감축수단 | |
| 탄소중립 핵심기술 개발 | 에너지, 산업, 수송 및 건물, 탄소처리 및 흡수원, 부문 공통 핵심기술 | |
| 탄소중립 실현을 위한 사회적 과제 | 제도적 기반 마련 | |
| | 탄소중립 사회로 정의로운 전환 | |
| | 탄소중립 핵심기술 개발 및 투자 확대 | |
| | 모든 사회구성원의 참여를 위한 소통 · 협력 · 교육 | |

1. 국제사회의 탄소중립 추진 현황과 영향

■ 국제사회의 추진 경과

| | |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1980's | 인간이 배출한 온실가스에 따른 지구온난화 인식 확산 |
| 1988 | UN환경계획 및 기후변화정부간협의체(IPCC) 설립 |
| 1992 | 브라질 리우, UN기후변화기본협약(UNFCCC) 체결 |
| 1995~ | 매년 협약 당사국총회(COP) 개최, 기후변화 완화 및 적응 등 국제 논의 주도 |
| 1997 | 교토의정서 채택(2005 발효), 주요 선진국 대상 온실가스 감축 목표 부과, 하향식 감축 목표 설정 |
| 2015 | 파리협정 채택(2021 발효), 지구 온도를 2°C 상승 이하로 억제하고, 1.5°C 상승 이내로 유지 하도록 노력, 당사국 대상 상향식 감축 목표 설정 |
| 2018 | 'IPCC 1.5°C 특별보고서' 채택 |
| 2020 | 우리나라 포함, 2050 탄소중립 선언 국가 증가 |
| 2021 | IPCC 6차 실무그룹I 보고서 채택(* 실무그룹 II, III 보고서와 종합보고서는 2022년 승인 예정) 글로벌 메테인서약 추진 및 기후변화당사국 총회(COP26) 개최 |

☞ 유엔기후변화협약과 당사국총회, 파리협정, IPCC 1.5°C 특별보고서, 국제메테인서약, 제26차 당사국 총회

■ 주요국가의 탄소중립 정책

| | |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EU | <ul style="list-style-type: none"> - 기후환경비상사태 선언(2019) 및 유럽연합회원국 대상 2050 탄소중립 촉구 결의안 채택 - 2050 탄소배출 중립을 목표로 '유럽 그린딜' 발표 및 기후변화 대응전략으로 채택 - 탄소중립 달성 목표를 위한 기후법안을 유럽의회에 제출(2020) - 에너지, 산업, 수송 등 다양한 분야에서 탄소중립 실현 방안 제시 |
| 미국 | <ul style="list-style-type: none"> - 2050 탄소중립 목표 제시 - 2035년 발전 부문 탄소배출 제로, 건설 부문 탄소배출 저감 목표 설정 - 기후변화 대책 마련을 위한 민간 및 지방정부 투자 유도 - 에너지효율, 청정에너지 등 대규모 투자하고 태양광 패널과 풍력터빈 대규모 설치 |
| 중국 | <ul style="list-style-type: none"> - 2060년 탄소중립 목표 제시 - 녹색전환계획 수립(2020), 저탄소 녹색성장, 녹색기술, 기후 부문별 정책계획 제시 |
| 일본 | <ul style="list-style-type: none"> - 2050 탄소중립 목표 선언 - 2050 탄소중립 실현을 위한 녹색성장 전략 수립 |

☞ 주요국의 탄소중립 정책(유럽연합, 미국, 중국, 일본 등)

■ 탄소중립을 위한 이행감시 시스템

- UNFCCC에서는 당사국이 협정 의무를 준수하도록 장려하기 위해 각국이 이행 노력을 보고하여 검토 받는 '투명성 체계'를 도입하여 신뢰성 확보
- 파리협정에서는 전 지구적 공동 목표인 지구 평균온도 1.5°C 상승 제한 노력의 주기적인 점검(NDC)을 위하여 전 지구적 이행점검 조항을 새롭게 포함
- 각국이 제출한 온실가스 통계 신뢰도 평가하기 위한 수단으로 관측 기반 온실가스 배출량 검증시스템을 적용
 - 유럽, 미국, 일본에 독자적인 관측망이 있으나, 우리나라에서는 시스템이 구축되어 있지 않아 국내 연구기관에서 국외 온실가스 배출량 검증시스템을 국내 조건에 맞춰 수정 중

☞ 탄소중립 도달을 위한 이행감시 체계, 관측 기반 온실가스 배출량 검증시스템

■ 탄소중립과 경제

- 국제사회의 탄소중립 추진은 고탄소산업에서 저탄소산업으로의 전환으로 생산과 소비 형태의 큰 변화로 산업적 측면, 기업 및 국가경제 측면에서 영향을 유발
 - 탄소세, 탄소배출권거래제, 탄소국경조정세 등의 탄소가격 부과정책으로 고탄소산업은 위축되고, 저탄소산업은 발전하는 등 거시적 경제에 영향을 미칠 예정
- ☞ 산업구조 변화(고탄소산업, 저탄소산업), 탄소가격부과정책(탄소세, 탄소배출권거래제, 탄소국경조정세)

1-1. 국제사회의 추진경과

가. 유엔기후변화협약과 당사국총회

- 1980년대 인간이 배출한 온실가스로 인해 지구온난화가 진행되고 있다는 인식이 국제 학계에서 확산됨에 따라 이에 대한 공동의 대응책을 논의하고 마련하기 위해 1988년 UN환경계획과 세계기상기구의 주도로 기후변화정부간협약체(IPCC)²⁴를 설립
- 1992년 브라질 리우에서 열린 'UN환경과개발회의'에서 UN기후변화기본협약(UNFCCC, UN Framework Convention on Climate Change)을 체결
- 1995년 이후 매년 이 협약의 당사국이 참여하는 당사국²⁵총회(COP, Conference of the Parties to the Convention)가 열려 기후변화 완화 및 적응에 대한 국제 논의를 주도

²⁴ IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) : 독자적인 연구를 수행하는 조직은 아니나 인간이 유발한 기후변화의 위험, 잠재적 영향, 감축 및 적응 옵션을 이해하는 데 도움이 되는 과학적, 기술적, 사회경제적 정보를 종합적이고, 객관적이며, 공개적이고 투명하게 평가하는 역할을 수행. 정부간 협의회이므로 평가 결과는 전문가의 검토뿐만 아니라 각국 정부의 검토를 거침

²⁵ 당사국(Party) : 모든 UN 회원국을 포함한 197개국과 유럽연합 등 협약가입단체

- 1997년 일본 도쿄에서 열린 제3차 당사국총회에서는 주요 선진국들에게 법적으로 구속력 있는 온실가스 감축 목표를 부과하는 교토의정서 채택
- 하지만 세계 최대 온실가스 배출국인 미국이 2000년대 초반 교토의정서에서 탈퇴하고, 중국, 인도 등 개도국들이 고도성장 과정에서 선진국들이 감축하는 이상으로 온실가스 배출을 증가시킴에 따라 2012년 만료 되는 교토의정서를 대체하고, 개도국도 포괄하는 새로운 온실가스 감축 체계 마련 시도

심화

기후변화협약 및 당사국총회 주요 진행 경과

표16 기후변화협약 당사국총회 주요 진행 경과

| 기후변화협약 당사국총회 주요 진행 경과 | | |
|-----------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| '92.06 | 기후변화협약 채택(리우환경회의) | |
| '94.03 | 기후변화협약 발효 | 우리나라 가입('93.12) |
| '95.03 | 제1차 당사국총회(COP 1) | 2000년 이후 감축 논의 시작 |
| '97.12 | 제3차 당사국총회(COP 3) | 교토의정서(선진국 감축 의무) 채택 |
| '01.03 | 제7차 당사국총회(COP 7) | 교토의정서 이행 방안(마라케시 합의문) 채택 ※ 교토의정서 거부 시사('01.3) |
| '04.12 | 제10차 당사국총회(COP 10) | 교토의정서 이후에 대한 논의 준비 ※ 교토의정서 발효('05.2) |
| '05.11 | 제 11차 당사국총회(COP 11) | 교토체제 이후에 대한 논의 |
| '06.11 | 제12차 당사국총회(COP 12) | 2012년 이후의 기후변화 대응체제 본격적 논의 |
| '07.12 | 제13차 당사국총회(COP 13) | 발리 로드맵(post-2012 협상 framework) 채택으로 선진국 및 개도국을 광범위하게 참여시키는 계기 마련 |
| '08.12 | 제14차 당사국총회(COP 14) | post-2012 협상문 초안 마련 |
| '09.12 | 제15차 당사국총회(COP 15) | 코펜하겐 합의문 도출 |
| '10.12 | 제16차 당사국총회(COP 16) | 칸쿰 합의문 채택 |
| '11.11 | 제17차 당사국총회(COP 17) | 교토의정서 2차 공약 설정으로 기후 체제 지속 2012년부터 2020년 이후 모든 당사국이 참여하는 의무감축체제 관련 협상 개시 |
| '12.12 | 제18차 당사국총회(COP 18) | 2013년부터 2020년까지 교토의정서 2차 공약기간 개시를 위한 의정서 개정 우리나라의 녹색기후기금 유치 인준 |
| '13.11 | 제19차 당사국총회(COP 19) | 신기후체제, 기후재정, 손실 및 피해 등 핵심 의제에서 진전을 보이며, 불확실성을 상당 부분 해소 |
| '14.12 | 제20차 당사국총회(COP 20) | 기후행동에 관한 결정문(Lima call for climate change) 채택, post-2020 감축 목표 등 각국의 기여(INDC)를 담은 결정문 채택, 2020년 이후 신기후체제를 규정하는 협정문 작성 |

| | | |
|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| '15.12 | 제21차 당사국총회(COP 21) | 신기후체제(파리협정, Paris Agreement) 도출 |
| '16.11 | 제22차 당사국총회(COP 22) | 기후 및 지속가능개발을 위한 마라케시 행동 선언문 채택 |
| '17.11 | 제23차 당사국총회(COP 23) | 파리협정 이행을 위한 피지 모멘텀 채택 |
| '18.12 | 제24차 당사국총회(COP 24) | 정상선언문에 “저탄소 사회로의 전환 과정에서 발생할 수 있는 실직 인구 등 기후 취약계층을 사회적으로 포용해야 한다는 개념인 공정한 전환” 반영 |
| '19.12 | 제25차 당사국총회(COP 25) | 국제탄소시장(파리협정 제6조) 운영 지침(COP24 미타결 사항) 등 논의 |
| '21.11 | 제26차 당사국총회(COP 26) | 선진국은 2025년까지 기후변화 적응기금 2배 확대, 2030까지 메테인 등 non-GHG 감축 검토 요구, 청정발전 확대, 탄소저감 장치가 없는 석탄발전소의 단계적 감축 및 비효율적인 화석연료 보조금의 단계적 폐지 촉구 등 |

출처 : 기후정보포털

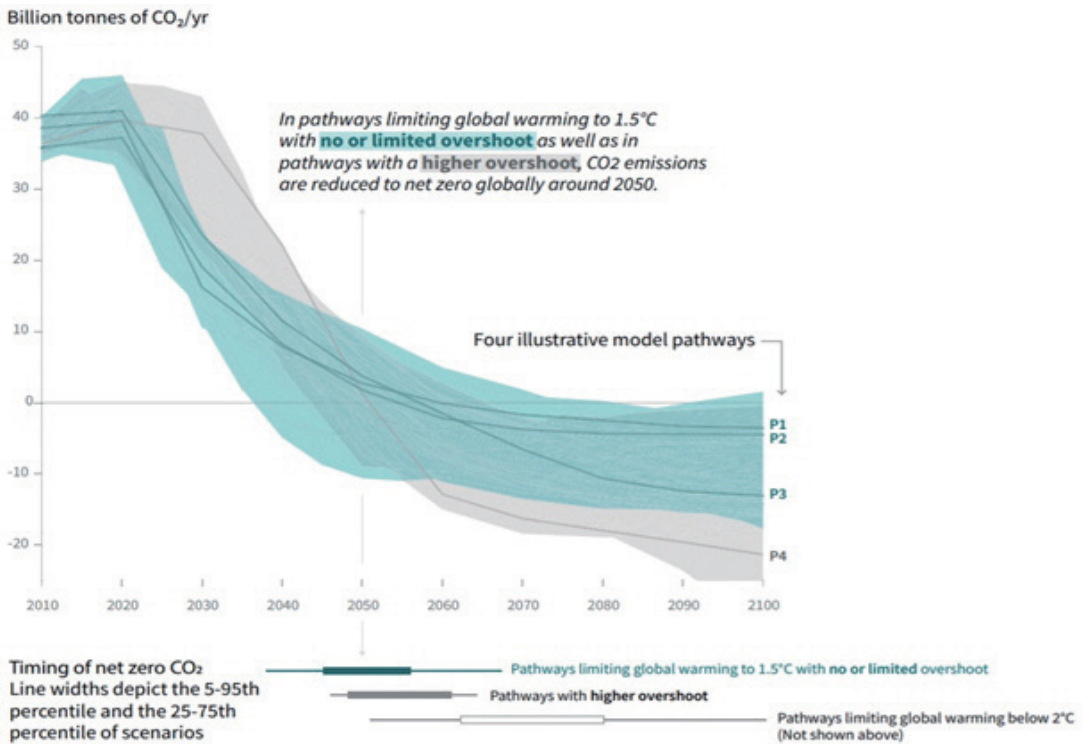
나. 파리협정과 지구온난화 1.5°C 특별보고서

- '11년 제17차 당사국총회(더반)에서 '20년 이후 적용될 신체제 설립 합의, '12~'15년까지 15차례에 걸친 협상 끝에 2015년 12월 9일 프랑스 파리에서 개최된 제21차 기후변화협약 당사국총회에서 파리협정(Paris Agreement) 채택
- 파리협정은 2020년 만료 예정인 선진국 중심의 교토의정서(1997) 체제를 넘어 지구촌 모든 국가가 참여하는 보편적 기후변화 체제를 마련하였으며, 지구의 평균 온도 상승을 2°C 이하로 유지하고 1.5°C 이하로 제한하기 위해 노력해야 함을 처음으로 명시한 의의가 있음

표17 파리협정 주요 내용

| 구분 | 내용 |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 장기목표 | 국제사회 공동의 장기 목표로 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 2°C보다 상당히 낮은 수준으로 유지하는 것으로 하고, 온도 상승을 1.5°C 이하로 제한하기 위한 노력을 촉구 |
| 온실가스감축 | 국가별 기여방안(NDC)은 스스로 정하는 방식을 채택하여, 5년마다 상향된 목표를 제출하되 공통의 차별화된 책임 및 국가별 여건을 감안할 수 있도록 하였음 모든 국가가 차기 감축 목표 제출 시 이전 수준보다 진전된 목표를 제시하고, 최고 의욕 수준을 반영해야 한다는 진전 원칙 규정 |
| 탄소시장 | UN 기후변화협약 중심의 시장 이외에도 당사국 간의 자발적인 협력도 인정하는 등 다양한 형태의 국제 탄소시장 매커니즘 설립에 합의 |
| 이행점검 | 2023년부터 5년 단위로 파리협정 이행 및 장기 목표 달성 가능성을 평가하기 위해 국제사회 공동 차원의 종합적인 전 지구적 이행점검(Global Stocktake)을 실시 |
| 적응 | 온실가스 감축뿐 아니라 기후변화에 대한 적응의 중요성에 주목하고, 기후변화의 역효과로 인한 '손실과 피해' 문제를 별도 조항으로 규정 |
| 재원 | 개도국의 이행지원을 위한 기후재원과 관련하여 선진국의 재원 공급 의무 및 기술, 역량배양 지원을 규정하고, 선진국 이외 국가들의 자발적 기여 장려 |

- 2015년 파리협정을 채택한 제21차 UN기후변화당사국 총회(COP21)에서 1.5°C 목표의 과학적 근거를 명확하게 하기 위해 IPCC에 2°C와 1.5°C 목표의 차이에 대한 보고서 작성을 요청하여, 지속가능발전과 전 지구적 기후변화에 적극적으로 대응하기 위하여 특별보고서가 작성되었으며, 2018년 10월 인천에서 개최된 제48차 IPCC 총회에서 발표됨
- ‘지구온난화 1.5°C 특별보고서’는 2°C 상승 억제와 비교해 1.5°C 이하로 상승을 억제했을 때 기후변화로 인한 위험을 크게 줄일 수 있다는 근거를 제시하였으며, 전 지구적으로 지구 평균온도 상승을 1.5°C 이내로 억제하기 위해서는 2050년까지 탄소 순배출량이 0이 되는 탄소중립을 달성하여야 한다고 제시



▲ 그림53 1.5°C 달성을 위한 배출 경로

출처 : IPCC 1.5°C 특별보고서

심화

신기후체제와 교토의정서 비교

| 구 분 | 교토의정서 | 신기후체제 |
|---------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 목표 | 온실가스 배출량 감축 (1차 : 5.2%, 2차 : 18%) | 2°C 목표 1.5°C 목표 달성 노력 |
| 범위 | 온실가스 감축에 초점 | 감축을 포함한 포괄적 대응 (적응, 재원, 기술이전, 역량배양, 투명성 등 포괄) |
| 감축대상국가 | 주로 선진국(38개국) | 모든 당사국(195개국) |
| 감축 목표설정 방식 | 하향식(top-down) | 상향식(bottom-up) |
| 목표 불이행시 징벌 여부 | 징벌적 | 비징벌적 |
| 지속가능성 | 공약기간에 종료 시점 있어 지속가능성에 대한 의문 | 종료 시점 규정하지 않아 지속가능한 대응 가능 |
| 적용 시기 | 1차 공약기간: 2008~2012년 2차 공약기간: 2013~2020년 | 2021년~(2016년 11월 4일부터 포괄적으로 적용되는 국제법으로서 효력이 발효) |

파리협정 이행규칙

- 파리협정의 실질적 이행에 반드시 필요한 17개 규칙으로 '18년 당사국총회에서 16개 타결, '21년 COP26에서 1개(시장지침) 타결

| 파리협정 관련 조항 | 이행규칙 명칭 |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| NDC(감축) (제4조) | NDC 감축 부분 추가 지침 (1) NDC의 명확성 · 투명성 · 이해도 제고를 위한 정보 지침, (2) NDC 산정 지침 |
| | NDC 공공등록부의 운영과 사용 방식 및 절차 |
| | NDC 공통의 이행기간 |
| | 대응조치 영향에 관한 포럼의 방식 · 작업프로그램 · 기능 |
| 국제탄소시장 (제6조) | 6.2조 협력적 접근법에 관한 지침 |
| | 6.4조 메커니즘 규칙, 방식 및 절차 |
| | 6.8조 비시장 접근법 프레임워크 하 작업프로그램 |
| 적응(제7조) | 적응 보고 추가 지침 |
| | 적응 공공등록부의 운영과 사용 방식 및 절차 |
| | 파리총회 결정문 제41, 42, 45항(적응위원회, 최빈개도국 전문가그룹) 관련 사항 |
| 기후재원(제9조) | 당사국에 의해 제공될 기후 재원의 사전 정보 |
| | 적응기금 관련 사항 |
| | 기후재원에 대한 새로운 정량적 공동 목표 설정 |

| | |
|----------------------|-----------------------------------------------------|
| 기술 개발 및 이전 (제10조) | 기술프레임워크 관련 사항 |
| | 기술메커니즘 주기적 평가의 범위 및 방식 |
| 기후행동 강화(제12조) | 파리협정 하 행동 강화를 위한 교육·훈련·대중 인식·대중참여 및 정보 접근성 이행 강화 방안 |
| 투명성 체계(제13조) | 행동과 지원에 관한 투명성 체계의 방식·절차·지침 |
| 전지구적 이행점검 (제14조) | 파리협정 제14조와 파리총회 결정문 제99-101항(전 지구적 이행점검) 관련 사항 |
| 이행준수 위원회 (제15조) | 이행준수 위원회의 효과적 운영을 위한 방식 및 절차 |

다. 제26차 당사국총회(21)

- 영국 글래스고에서 열린 제26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)는 지난 6년간 치열한 협상을 진행했던 국제탄소시장 지침을 타결하여 2015년 채택된 파리협정의 세부이행규칙(Paris Rulebook)을 완성한 의미 있음
 - * 제24차 당사국총회(2018, 폴란드)에서 탄소시장 지침을 제외한 8개 분야 16개 지침 채택을 채택, 제25차 총회(2019)에서도 제6조 지침 미타결
- 또, 2015년 당사국총회 이후 6년 만에 개최된 특별정상회의(11.1~2)에서 120개국 정상들이 모여 지구온도 1.5℃ 이내 상승 억제를 위한 범세계적 기후행동 강화를 약속

심화

글래스고 기후합의(Glasgow Climate Pact) 주요내용

제26차 당사국 총회에서는 글래스고 기후합의(Glasgow Climate Pact)를 대표 결정문으로 선언하고, 적응 자원, 감축, 협력 등 분야에서 각국의 행동을 촉구함

(적응자원) △선진국들의 적응자원·역량배양·기술이전 대폭 확충 촉구, △선진국의 적응자원 2025년까지 2019년 대비 최소 2배 확대 공약 환영, △다자개발은행, 금융기구 및 민간의 기후자원 동원 촉구 등

(감축) △2030까지 메테인 등 non-GHG 감축 검토 요구, △청정발전 확대, 탄소저감장치가 없는 석탄 발전소의 단계적 감축 및 비효율적인 화석연료 보조금의 단계적 폐지 촉구 등

특히, 협력 분야에서는 당사국 총회 개최국에게「청년기후포럼」을 연례 개최토록 요청하는 것으로 합의

* 우리나라에서 적극 제안하여 결정문에 포함(11.1. 문재인 대통령은 COP26 기조연설에서 청년기후서밋 연례 개최 제안)

라. 국제메테인서약(Global Methane Pledge)

- 2030년까지 전 세계에서 배출되는 메테인 배출량을 2020년 대비 최소 30% 감축한다는 목표 실현을 위한 국제연대로서, 특정 온실가스 감축 공약을 구체적인 행동으로 전환하는 선도적 구상
- '21년 9월 미국과 유럽연합(EU)의 '글로벌 메테인 서약' 추진계획 공동 발표 후 제26차 기후변화당사국총회(COP26) 정상회의 기간 중 서약 출범식을 개최하고, 우리 정부도 동 서약에 가입하였음

심화

메테인 발생 및 감축 필요성

메테인(methane, CH₄)은 교토의정서에서 정의한 6대 온실가스 중 하나로 지구온난화에 미치는 영향을 수치로 표현한 지구온난화지수(GWP)가 21(이산화탄소 21배의 영향을 미침)에 해당되며, 천연가스 채굴이나 농업 같은 인간의 활동으로 인해 발생

대기 중 메테인 농도*는 이산화탄소에 비해 이백분의 일(1/200) 이상 낮으나, 2021년 8월에 승인된 '기후 변화에 관한 정부간 협의체(IPCC**)' 제6차 평가보고서 제1실무그룹 보고서에 따르면, 메테인은 전체 지구온난화의 약 30%, 즉 기온 0.5°C 상승의 원인물질로 알려짐

* 대기 중 농도 : CO₂ 410ppm(백만분의 1단위), CH₄ 1,866ppb(10억분의 1단위)

메테인은 대기 중 체류기간이 약 10년으로 이산화탄소(최대 200년)에 비해 현저히 짧아 그 발생을 의욕적으로 줄일 경우 지구 평균온도 상승을 1.5°C 이내로 낮추자는 파리협정의 목표 달성에 크게 기여할 수 있음
우리나라의 메테인 배출량은 2018년 기준 2,800만톤(CO₂ 환산량)으로 국내 전체 온실가스 배출량의 3.8%이며, 농축수산(1,220만톤, 43.6%), 폐기물(860만톤, 30.8%), 에너지(630만톤, 22.5%) 부문에서 주로 배출됨

| | |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|
| 농축수산 부문 | 이행규칙 명칭벼 재배 과정, 가축의 소화기관 내 발효, 가축분뇨 처리 등에서 배출 |
| 폐기물 부문 | 폐기물의 매립, 하·폐수처리 과정에서 주로 발생(유기성 폐기물, 하수와 폐수에 포함된 유기물이 혐기적으로 처리되는 과정에서 발생) |
| 에너지 부문 | 석탄·석유·천연가스 등의 연료연소 과정과 화석 연·원료의 채광·생산·공정·운송·저장 등의 과정에서 비의도적(탈루)으로 배출 |

정부는 2030 국가 온실가스 감축목표 상향(안)에 메테인 배출량을 2018년 2,800만톤에서 2030년 1,970만톤으로 감축(30% 감축)할 계획이 포함되어 있으며, 부문별로는 농축수산 250만톤, 폐기물 400만톤, 에너지 180만톤을 감축함

1-2. 주요 국가의 탄소중립 정책²⁶⁾

가. 유럽연합(EU)

- 유럽연합은 2019년 12월에 기후·환경 비상사태를 선언하고 2050년까지 유럽연합 회원국들에게 탄소 중립을 약속할 것을 촉구하는 결의안을 채택하고, 2050년 탄소배출 중립 목표를 담은 유럽 그린딜(European Green Deal)을 발표함. 유럽연합은 유럽 그린딜을 유럽연합의 제1국정 어젠다로 선정하고, 기후변화에 대한 대응전략으로 채택
- 2020년 1월에 그린딜 투자 계획을 발표하여 향후 10년간 약 1295조 원을 탄소중립 달성을 위해 투자할 예정임

표18 EU의 2050 탄소중립 정책 목표 및 주요 사업

| 구 분 | 정책 목표 | 주요 사업 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 영국 | 2050년 온실가스 순배출 제로 | - 2035년 내연기관차 완전 퇴출 - 재생에너지 발전 확대 - 가스난방 확대 - 청정 숲지대 확산 |
| 덴마크 | 2050년 기후중립사회 달성 (Together for a Greener future(2018)) | - 2030년까지 내연기관차 판매 중단 - 모든 시내버스 친환경화 - 내연기관 택시 퇴출 |
| 핀란드 | 2035년까지 탄소배출 중립 달성 (Climate Change Act(2015)이 정한 2045년 탄소배출 중립 달성을 10년 앞당김) | - 풍력 및 태양광 확대 - 난방 및 수송 부문의 전력화 - 바이오에너지 현행 대비 10% 확대 |
| 프랑스 | 2050년 탄소배출 중립 달성 | - 에너지·기후법(Loi-Energie-Climat) - 2022년 모든 광역시 내 석탄발전 중지 - 저탄소 전략 5년 주기 점검 - 2030년 발전믹스(mix)의 40% 탈탄소화 |
| 독일 | 2050년 온실가스 1990년 대비 95% 감축 | - 기후보호프로그램 2030 발표(2019) - 에너지 효율 및 재생에너지 확대, R&D 강조 - 생태세제 개혁, 교육 및 정보 공유 확대 |
| 아일랜드 | 2050년 탄소배출 중립 (국가기후계획, 2019. 06) | - 2030년 내연기관차 판매금지 - 건물 분야 온실가스 감축 계획 마련 및 실천 |
| 포르투갈 | 2050년 탄소배출 중립 달성 로드맵 (2018. 12) | - 바이오연료 및 전기차 도입으로 수송 부문 탈탄소화 - 농업 및 임업, 폐기물 처리 분야 감축 |
| 스위스 | 2050년 Net-Zero emission 달성 (2019. 08) | - 탄소세 강화(항공료 탄소세 부과, 수입 연료 관세 인상) - 2020년부터 난방 개보수 건물에 대해 면적당 - 온실가스 최대 배출기준(20kgCO ₂ e/m ²) 적용 |

- EU 집행위는 '21년 7월 2030년 온실가스 배출 55% 감축을 위한 전략 패키지 '핏 포 55 패키지(Fit for 55 Package)'를 발표하여 화석연료 퇴출 등 EU의 기후변화 대응 의지를 표명함

26) 이창훈 외, 2021, '한국형 그린뉴딜 전략 개발 연구'의 내용을 일부 전재함

표19 EU의 Fit for 55 Package 주요내용

| | |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 내연기관 | 2030년 전체 내연기관 자동차 CO ₂ 배출 감축 55% 달성, 2035년 내연기관 자동차 완전퇴출, 및 대체연료 관련 별도 입법으로 회원국에 전기 및 수소연료충전소 설치 독려 |
| 온실가스 배출권거래제도 | EU ETS 전체 배출권 상한축소, 해상운송의 기존 EU ETS 편입, 항공운송 배출규제강화 및 육상 운송 및 건축섹터 별도 ETS 시스템 도입 |
| 사회적 기금조성 | 운송 및 건축섹터의 ETS 편입에 따른 가계 부담 완화를 위해, 기후사회기금(Climates Social Fund) 설치, ETS 수익의 25%를 지원하고, 온실가스 무배출 차량 구매 및 주택단열 등에 EU 예산을 지원 예정 |
| 탄소국경조정 메커니즘, CBAM | 수입 철강, 시멘트, 알루미늄, 비료 및 전기에 대해 EU 역내 기업이 지불하는 탄소가격과 유사한 수준의 사실상의 관세를 부과할 예정 또한, 기후변화 대응 노력의 글로벌 확산을 위해, EU와 유사한 수준의 탄소가격 또는 규제를 보유한 국가에 대해서는 CBAM 적용을 면제할 예정 2023~2025년 시범운영 후 2026년 본격 시행, 단계적 적용을 확대할 방침이며, 철강 등 일부 중공업섹터의 무료 배출권 할당도 단계적 축소, 2035년 완전 폐지할 예정 |
| 회원국간 온실가스 감축분담 | 2030년 55% 온실가스 삭감 목표달성을 위해 각 회원국의 육상운송, 건축, 농업, 공업 및 폐기물 등 non-ETS 섹터 온실가스 감축비율을 11%p 상향조정 |
| 신재생에너지 | 현행 '신재생에너지지침(RED)' 규정의 2030년 신재생에너지 비중 32% 목표를 40%로 상향 조정, 전체 건축물 에너지소비 49%를 신재생에너지로 확대 현재 20% 수준인 EU 신재생에너지 비중을 약 10년간 40%로 두 배 가량 확대해야 하며, 이를 위해 해상 풍력발전의 중요성과 회원국간 신재생에너지 협력을 확대 |
| 건축물 | EU 에너지소비 약 40%에 해당하는 건축물 에너지의 50%를 신재생에너지로 대체하고, 건축물 냉난방 에너지 가운데 신재생에너지 비중을 연간 1.1%씩 확대 각 회원국에 매년 3% 비율로 공공건축물 리노베이션 확대를 의무화하고, 공공건축물 리노베이션 의무를 공공주택으로 확대 |
| 에너지 세제 | 현재 용량별 부과되는 에너지 세제를 에너지 종류별 세제로 전환, 최고 세율로 과세하고, 18년 경과한 최소에너지세의 상향조정 및 각종 세제감면제도 폐지 |
| 해상 및 항공운송 | 항공운송 온실가스 배출감축을 위해 항공유에 대한 과세를 도입하고, 2025년부터 소규모 공항을 제외한 대부분 공항에 청정항공유 급유를 의무화 EU 역내 해상운송과 약 절반 가량의 국제해운을 ETS 제도에 편입하고, 선박유에 대한 감세제도 폐지 및 지속가능한 선박유 확대 등을 계획 |
| 산림 및 토지 | 집행위는 2030년까지 3억1천만톤의 CO ₂ 를 역내 삼림 및 이탄(泥炭)지대가 흡수할 것을 기대, '토지이용, 토지이용변화 및 삼림규정(LULUCF)'을 개정, 2026~2030년간 각 회원국의 연간 CO ₂ 제거 의무를 부여 또한, 2030년까지 토지분야 기후중립목표를 설정하고 30억 그루의 나무를 식재하며, EU 공동 농업정책(CAP)을 개정, 농가의 탄소포집 노력에 대한 인센티브를 지원 |

나. 미국

- 바이든 미국 대통령은 “기후위기를 미국과 전 세계가 직면한 가장 큰 도전”이라며 그린 뉴딜은 이에 대응하는 결정적인 프레임워크라는 인식에서 기후에너지 공약을 제시하고 추진 중
- 주요 목표
 - 2050년 이전 100% 청정에너지경제 및 탄소중립
 - 2035년까지 발전 부문 탄소 무배출
 - 2035년까지 건물 부문 탄소배출량 50% 감축
 - 2030년까지 전기차 충전소 50만 개 신설
- 발전 분야 공약
 - 2035년까지 발전 부문 탄소배출 제로 달성 목표
 - 에너지효율, 청정에너지, 전력망, 저장장치에 대규모로 투자하고 태양광 패널과 풍력터빈을 대규모로 설치
 - 전기사업자 및 망 운영자를 대상으로 에너지효율 및 청정 전력기준 설정 제시
 - 원자력, 수력 등 탄소 무배출 에너지원의 이용을 지지하고 노동자들에 대한 안전과 환경정의의 기준을 엄격히 적용

다. 중국

- 시진핑 중국 국가주석은 2020년 유엔(UN)총회 정상연설에서 2030년 이전에 온실가스 배출량 정점을 찍은 뒤에 2060년 전에 탄소중립을 달성할 것을 발표
- 2020년 10월 ‘14차 5개년 계획(2021~2025년)’에 녹색전환에 대한 계획을 포함
 - 경제의 지속가능한 발전과 신성장동력 창출의 원동력으로 녹색전환을 강조하며 2060년 탄소중립 목표를 달성하기 위한 정책 계획 제시
 - (저탄소 녹색성장) 탄소배출 감축 방안을 수립·시행하고 과학기술, 산업, 인프라 건설을 비롯한 핵심 분야의 녹색전환을 추진하며, 전국 규모의 탄소배출권 거래시장을 구축
 - (녹색기술) 주요 분야에 대한 친환경화, 녹색전환 시범도시 확대 및 전력, 에너지, 재료 분야의 녹색기술 발전을 독려하고 2035년까지 신규 차량의 절반은 전기차로, 또 다른 절반은 하이브리드차로 규제
 - (기후) ‘국가기후대응계획 2014~2020’ 종료 이후의 ‘기후변화대응전략 2035’ 마련 예정

라. 일본

- 2020년 10월, 일본 정부는 2050년 탄소중립 목표를 선언
- 경제산업성은 경제와 환경의 선순환을 도모하기 위한 산업정책으로 ‘2050년 탄소중립 실현을 위한 녹색 성장전략’을 수립
 - 2050년 탄소중립을 달성하기 위해서 전력 부문의 탈탄소화와 산업·수송·가정 부문의 전력화, ESS 도입 확대에 따라 2050년 전력 수요가 현재보다 30~50% 증가할 것으로 추산함
 - 연료전지, 리튬이온전지, 해상풍력발전 설비 등 탈탄소화 효과가 높은 제품의 생산설비를 도입한 기업을 대상으로 최대 10%의 세액을 공제하고 50%의 특별상각을 조치하며 수소, 해상풍력, 전기차, ESS와 같이 실증단계를 거친 탈탄소화 기술에 대한 수요 창출을 위해 규제 개혁과 국제표준화를 추진

1-3. 탄소중립을 위한 이행감시 시스템

가. 탄소중립 도달을 위한 이행감시 체계

- UNFCCC에서는 당사국이 협정 의무를 준수하도록 장려하기 위해 ‘투명성 체계’를 도입하였음. 각국이 이행 노력을 보고하여 이를 검토 받도록 하는 것이 투명성 체계의 요지로, 이를 통해 모든 당사국이 각자의 의무를 성실히 이행할 것이라는 신뢰가 형성됨. 파리협정에서는 UNFCCC, 교토의정서에서 운용된 투명성 체계를 발전시킨 ‘강화된 투명성 체계’를 채택
- 파리협정에는 전 지구적 이행점검 조항이 새롭게 포함되었음. 파리협정의 개별 당사국은 온실가스 감축 목표를 자발적으로 설정하므로 이들 당사국의 개별적 노력이 합쳐져 전 지구적인 공동 목표 즉, “지구 평균 기온 상승을 산업화 이전 수준 대비 2°C 이내로 유지하며 나아가 1.5°C 이내로까지 제한하기 위한 노력”에 얼마나 합치하는지 주기적으로 점검 필요

1) UNFCCC 체제 하에서의 이행감시 체계

표20 교토의정서 및 파리협정 기후체제에서 이행감시 체계

| 구 분 | 교토의정서 | 파리협정 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 전세계 공통 | 부속서 1국가(선진국)와 비부속서 1국가(개발도상국)에 대하여 상이한 투명성 체계 요소를 적용 | 모든 당사국이 동일한 투명성 체계 적용 |
| | <ul style="list-style-type: none"> • 부속서 1국가(선진국) <ul style="list-style-type: none"> - 국가보고서 제출(매 4년) - 격년보고서 제출(매 2년) - 국가인벤토리보고서 제출(매년) - 온실가스 배출량 산정 의무화(2006 IPCC지침) • 비부속서 1국가(개발도상국) <ul style="list-style-type: none"> - 국가보고서 제출(매 4년) - 격년보고서 제출(매 2년) - 온실가스 배출량 산정 권고(1996/2006 IPCC지침) | <ul style="list-style-type: none"> • 국가보고서 제출(매 4년) • 격년보고서 제출(매 2년) • 국가인벤토리보고서 제출* <ul style="list-style-type: none"> * 선진국 매년, 개발도상국 매 2년 • 온실가스 배출량 산정(2006 IPCC지침) <ul style="list-style-type: none"> * 최빈국과 도서개발국은 특수한 사정을 인식하여 재량에 따라 보고서를 제출, 개발도상국은 역량을 고려하여 보고 정보에 유연성을 둠 • 2020년부터 5년 단위로 감축, 적응, 자원, 기술, 역량배양, 투명성의 6개 분야에 대한 NDC(국가 결정기여)를 제출 |
| 우리나라 이행현황 | <ul style="list-style-type: none"> • 온실가스 종합정보센터에서 1996 IPCC 지침에 따라 에너지, 산업공정, 농업, 지면 사용 변화, 폐기물 분야별 온실가스 배출 및 흡수량을 통계적으로 산정 • 해당 내용은 2014년(1차), 2017년(2차), 2019년(3차) 제출된 격년갱신보고서에 포함 | <ul style="list-style-type: none"> • 파리협정에 따라 제1차 격년투명성보고서 및 국가 온실가스인벤토리 제출 기한인 2024년부터 작성 예정(2006 IPCC 지침기반) |
| 활용방안 | 부속서 1국가 자료는 평가에 활용하나, 비부속서 1국가의 자료는 평가에 활용되지 않음 | 투명성 보고 의무에 따라 제출되는 각종 보고서 및 문서를 토대로 2023년부터 5년마다 전 지구적 이행 점검이 실시 |

- 전 지구적 이행 점검은 개별 당사국이 제출한 NDC를 종합하여 공동의 진전을 평가·검토하는 절차임. 이 과정에서 개별 당사국의 온실가스 감축 노력이 전 지구적 차원의 온실가스 감축을 위한 장기 목표에 얼마나 기여하였는지에 대한 과학적인 검토가 이루어짐
- 주요 국가들은 목표 연도(2025년 혹은 2030년)까지 기준 연도 배출량의 25~65%를 감축하겠다는 목표를 수립
- UNFCCC는 각국의 온실가스 감축 목표 이행을 평가하기 위한 UN기후변화협약 당사국총회(COP26)를 앞두고 2021년 2월 26일, 2020년까지 각국에서 제출한 NDC를 분석한 결과 유럽연합을 포함한 일부 국가는 2015년보다 크게 상향한 감축 목표를 제출하였으나 대부분 국가는 기존과 같은 감축 목표를 그대로 제출함. 이에 UNFCCC는 말이 아닌 행동으로써 기후변화 대응을 위한 노력을 촉구하며 감축 목표를 상향하여 다시 NDC를 제출할 것을 권고하였으며, 우리나라는 탄소중립기본법과 함께 2018년 배출량 대비 40% 감축안을 제시

나. 관측 기반 온실가스 배출량 검증시스템

- UNFCCC는 각국에서 제출한 온실가스 인벤토리 자료의 신뢰도를 평가하기 위한 수단으로 관측 기반의 온실가스 배출량 검증시스템을 요구하고 있음
- 2019 IPCC 가이드라인(국가온실가스인벤토리 지침 개정판)에서는 인벤토리 배출량의 통계적 검증뿐만 아니라 과학적 근거를 제시해줄 수 있는 “대기 측정값 및 모델링”을 기반으로 한 온실가스 배출량 검증과정을 새롭게 추가함
- 대기 관측 자료는 온실가스 배출량을 산정할 때 쓰이는 부문별 활동자료 및 배출 계수 등과 독립적이기 때문에 관측 기반의 온실가스 배출량 검증은 신뢰도가 높음. 또한 이 방법은 실시간으로 관측되는 정보를 토대로 배출량을 추정하기에 실시간으로 실제 온실가스 배출량이 어디서 어떻게 변화하고 있는지 파악할 수 있음
- 관측 기반 배출량 검증시스템은 기존의 통계적 산정법인 지상 관측소, 항공기, 위성에서 관측한 대기 온실가스 농도 정보와 모델링 기법을 활용하여 국가 혹은 도시 규모에서 배출(흡수)되는 온실가스 양을 정량적으로 추정하는 시스템을 의미함
- 관측 기반 배출량 검증시스템의 정확도를 높이기 위해서는 넓은 공간 범위와 장기간으로 측정이 가능한 관측망이 필요함. 유럽, 미국, 일본 등 선진국에서는 자국의 지상 및 위성 관측 자료를 활용하여 독자적인 배출량 검증시스템을 개발하고 있음

다. 우리나라 현황

- 우리나라는 현재 국제적 기준에 부합하는 독자적인 관측 기반 온실가스 검증시스템을 보유하고 있지 않으며, 미국 등 선진국의 온실가스 배출량 검증시스템을 도입하여 지면의 온실가스 배출량을 추정하고 있음. 대기 온실가스 관측의 중요성이 강조되며 지상 온실가스 관측망이 꾸준히 증가하고 있지만 도입한 국외 배출량 검증시스템에 국내의 최신 관측 자료가 실시간으로 반영되지 않아 해당 시스템의 실효성이 낮은 것으로 평가됨
- 최근 대학·연구기관에서 국외 온실가스 배출량 검증시스템을 국내 기후 및 지상 관측망 조건에 맞도록 수정하여 해당 시스템의 배출량 예측 불확실성을 낮추기 위한 연구를 수행 중임. 또한 국외 선진연구기관과의 기술·연구 교류를 통해 서울 수도권 지역 혹은 동아시아를 대상으로 한 독자적인 배출량 검증시스템을 개발하고 있으나 아직 시작 단계임

1-4. 탄소중립과 경제

가. 탄소중립과 경제적 영향

- 국제사회의 탄소중립 추진은 성장, 고용, 물가 등 세계 경제에 상당한 영향을 미치게 됨. 탄소중립은 화석연료 사용의 종식을 의미하는 동시에 생산공정의 변화, 생산 제품에 대한 수요 변화, 그리고 경제 주체들의 소비 행태의 변화를 가져옴
- 탄소중립 이행을 위한 국제적인 정책 수단으로 배출되는 탄소에 가격을 부과하는 정책(탄소세, 탄소배출권 거래제), 특정 연료 또는 내연기관차의 판매 금지와 같은 기기의 사용을 금지하는 정책, 그리고 제품과 서비스의 생산과 제공 단계에서 배출된 온실가스에 따라 제품과 서비스의 국가 간 이동 시 국경세를 부과하는 정책 대안 등이 있음

■ 탄소세

- 온실가스의 배출 감축을 목표로 온실가스 배출 단위당(이산화탄소 환산톤(=tCO₂e 기준) 세금을 부과하는 제도로 기업의 온실가스 배출량 감축을 위한 동기를 부여하고 세수 확보, 적용 용이성 등의 장점이 있어 국제기구와 학계에서 선호하는 방식이나 조세저항, 자국 기업 대외경쟁력 약화 우려 등으로 도입이 활발하지는 않음
- '21.4월 기준 25개국에서 실시 중으로 전 세계 온실가스 배출량에서 탄소세가 적용되는 비중('20년 기준)은 5.3%에 불과하며, 국가별 탄소세율은 이산화탄소 톤당 최저 0.1달러(폴란드)에서 최고 133.3달러(스웨덴)에 이르는 등 국가 간 격차가 매우 큼

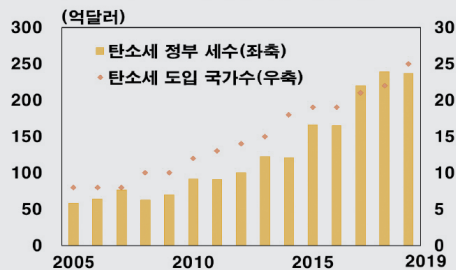
* 도입국 평균 탄소세율은 29달러/tCO₂e으로 IMF 권고수준(75달러/tCO₂e)을 하회

주요국 탄소세율 및 온실가스 적용비중¹⁾
(달러/tCO₂e, %)

| 국가 | 도입시기 | 탄소세율 | 비 중 |
|------|------|--------------------|------|
| 스웨덴 | 1991 | 133.3 | 0.08 |
| 노르웨이 | 1990 | 57.1 | 0.09 |
| 스위스 | 2008 | 104.7 | 0.03 |
| 영국 | 2013 | 23.2 | 0.25 |
| 프랑스 | 2014 | 7.0 | 0.32 |
| 전체 | - | 29.0 ²⁾ | 5.30 |

주: 1) 총온실가스대비 비중 2) 25개국 평균
자료: World Bank

탄소세 도입국가수 및 세수 규모



자료: World Bank

■ 탄소배출권거래제

- 이산화탄소 등 온실가스의 배출 감축을 목적으로 온실가스를 배출할 수 있는 권리를 시장을 통해 매매하는 제도로 총 온실가스 배출량이 고정되어 있어 배출권거래제 하에서 각 기업은 보유한 탄소배출권 및 배출량에 따라 배출권을 거래함. 기업은 소요 비용과 배출권 가격을 비교하여 더 낮은 비용이 지출되는 방안을 선택하는 것임

- 전 세계 온실가스 배출량 중 탄소배출권 시장의 적용을 받는 비중이 2005년 4.9%에서 2021년 17.9%로 3배 이상 증가 예상

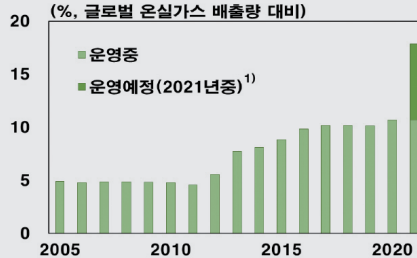
탄소배출권 거래 현황

(1억톤CO2e, 십억유로)

| | 거래량 | | | 금액 | | |
|----|---------|---------|------|---------|---------|------|
| | 2018(A) | 2020(B) | B/A | 2018(A) | 2020(B) | B/A |
| EU | 77.5 | 81.0 | 1.04 | 129.7 | 201.4 | 1.55 |
| 북미 | 11.3 | 20.1 | 1.79 | 12.9 | 26.0 | 2.02 |
| 중국 | 1.0 | 1.3 | 1.30 | 0.2 | 0.3 | 1.32 |
| 기타 | 0.8 | 0.9 | 1.13 | 1.0 | 1.4 | 1.40 |
| 합계 | 90.6 | 103.3 | 1.14 | 143.8 | 229.1 | 1.59 |

자료: Refinitiv

전세계 탄소배출권거래 시장 커버리지



주: 1) 중국 및 독일 ETS
자료: World Bank

탄소국경조정세

- EU와 미국을 중심으로 역외 수입국에 탄소세 명목의 세금을 부여하는 국경조정세 도입 논의가 대두되었으며, 고강도의 환경규제를 하는 국가의 배출량 감축에도 불구하고 그렇지 않은 국가로의 생산기지 이전 등으로 배출량 감축 효과가 축소되는 것을 막기 위해 도입 필요성이 제기됨

- 탄소국경조정세는 EU에서 2023년 도입 예정이며, 최근 미국도 바이든 행정부에서 적극적으로 검토 중이나, 이에 대해 환경규제 수준이 낮고 탄소배출량이 많은 중국, 러시아 등 주요 신흥국에서 강하게 반발

* EU는 유럽 그린딜 일환으로 국경조정세 관련 세부 법안을 2021년 6월까지 확정 후 의회의 동의를 거쳐 2023년부터 도입할 계획

* 미국 무역대표부(USTR)는 2021년 3월 1일 글로벌 탄소배출량 감축 등에 대응하기 위해 국경조정세 도입을 검토 중이라고 발표(로이터, '21.3.2)

출처 : 한국은행, 「해외경제 포커스」, 제2021-16호, 2021.4.30.

나. 거시경제적 관점에서 국가 경제에 미치는 영향

- 국제사회의 탄소중립 추진이 경제성장, 고용, 물가와 같은 거시경제에 영향을 미치고, 탄소중립의 이행으로 전 세계적으로 공공투자가 확대되고 저탄소산업의 발전이 기대되는 반면에 고탄소산업은 위축될 수 있음
- 저탄소산업 경제로의 이행을 위해서는 전력망, 철도 등대규모 사회간접자본에 대한 정부투자가 증가하여 높은 경제성장을 견인할 수 있음. 다만 IMF는 주요국에서 정부지출 증가에 따른 재정 수지의 악화가 가능할 것으로 예상
- 탄소중립정책 이행에 따라 고탄소산업의 생산비용 증가로 해당 산업은 위축되고, 잔존가치가 있음에도 불구하고 조기 폐기되는 부문(좌초자산)이 발생하여 경제성장을 낮추는 영향을 줌
 - 탄소중립정책의 일종인 탄소세 부과 시 발전, 철강, 정유, 석유화학 산업의 경우 생산비용의 상승이 높을 것으로 예상됨

- 탄소중립 이행에 따른 국가별 차등화된 영향을 살펴보면 재생에너지 보급에 적극적인 유럽, 일본 등은 GDP가 증가하는 효과를 나타내며, 석유 수출에 의존적인 OPEC, 러시아 등은 GDP가 큰 폭으로 감소함
- 탄소중립 이행이 고용에 미치는 영향을 살펴본 결과 저탄소산업의 고용 유발 효과가 고탄소산업에 비하여 높은 것으로 나타나 경제 전체적으로 고용이 증가할 것으로 전망함
 - 태양광, 풍력 등 재생에너지 발전의 고용 유발 효과는 화석연료 발전 부문의 고용유발 효과보다 높음
- 탄소중립 이행이 탄소세의 부과와 같은 정책으로 인하여 화석연료와 관련 제품 가격의 상승을 초래하여 경제 전체의 물가를 상승시키는 효과가 있음

교육주안점



- 국제사회 탄소중립 추진경과를 전체적인 측면에서 주요 흐름으로 제시
- 탄소중립 이행과정에서 발생하는 산업적 · 경제적 영향에 대해 학습자가 쉽게 이해하도록 사례를 포함하여 제시한다.

참고자료

참고 문헌

- IPCC 1.5°C 특별보고서
- EU의 온실가스 배출 추이(1990~2017)와 2050년 탄소중립 목표 설정 (김성균 · 김민주, 2019)
- 해외경제 포커스 제2021-16호(한국은행, 2021)

참고 사이트

- 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)

2. 우리나라의 2050 탄소중립

■ 2050 탄소중립 정책

- 국제사회 및 세계 각국의 탄소중립 추진에 따라 우리나라에서도 2050 탄소중립 추진전략 발표('20.12.7.)
- 경제구조 저탄소화, 신유망 저탄소 산업생태계 조성, 탄소중립 사회로 공정 전환, 탄소중립 제도적 기반 강화를 기본 방향으로 10대 중점과제를 설정하여 정책 추진
- 정부의 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장 추진을 위한 주요 정책 및 계획과 그 시행에 관한 사항을 심의·의결하기 위하여 대통령 소속의 2050 탄소중립위원회 발족('21.5.29)
- 기후위기 대응과 2050 탄소중립 달성을 위한 법적 기반으로서 '기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(약칭: 탄소중립기본법)' 제정('21.9.24)
- 2050 탄소중립을 위한 정책과제는 단계적으로[탄소중립 시나리오(안) 마련(~'21.6) ▶ 핵심정책 추진 전략 수립('21) ▶ 국가계획 반영('22~'23)] 순서로 준비하고 2030 국가온실가스 감축 목표(NDC) 상향 및 탄소중립 시나리오 확정('21.10.)

☞ 탄소중립 목표 선언, 탄소중립추진전략, 탄소중립기본법, 2030 NDC상향안, 2050탄소중립 시나리오

2-1. 2050 탄소중립 정책

가. 2050 탄소중립 선언

- 국제사회 및 세계 각국의 탄소중립 노력 가속화와 함께 세계 11위('17년 기준) 온실가스 다배출국으로서 한국의 책임 부각
- 세계 주요 기업들이 탄소중립 및 재생에너지 100% 사용을 선언하거나 이미 시행 중이며, 자사의 공급망도 탈탄소화 추진
- 탄소중립은 우리 경제에 부담으로 작용할 수 있지만 세계 주요 국가들의 탈탄소화 추진으로 재생에너지, 배터리 등 탈탄소기술 시장이 대폭 확대되고 새로운 성장의 기회도 제공
- 우리나라는 2021년 예산안 시정연설(10.28)에서 2050년 탄소중립 목표를 선언하고 탈석탄 및 재생에너지 확대 등 에너지전환 가속화 천명
- '21년 5월에는 전국 모든 지자체(17개 광역, 226개 기초)가 '2050 탄소중립 달성'을 다짐하는 선언식을 개최하여, 탄소중립 실천에 대한 국내 지방 정부들의 의지를 확고히 함
- 한국전력 등 국내 발전 및 금융기업 등은 신규 '해외 석탄 화력 발전' 사업의 투자 중단을 선언하고 있고, 한국은행 및 민간 은행들은 ESG 참여 기업의 투자 규모를 확대하겠다고 발표
- 이외에도 '탄소중립 산업전환 위원회', '고탄소 업종별 탄소중립 협의회' 구성 등 탄소중립을 위한 산업계의 자발적인 온실가스 감축 노력이 이어지고 있음

나. 2050 탄소중립 추진전략 마련 및 탄소중립위원회

- 중장기적으로 탄탄한 ‘2050 탄소중립’ 사회로의 이행을 위해서, 정부는 3대(+1) 전략 및 10대 중점과제 중심으로 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 발표(‘20.12.7)
- 비전 : 온실가스 감축 중심의 “적응적(Adaptive) 감축”에서 새로운 경제·사회 발전전략 수립을 통해 “능동적(Proactive) 대응” 도모
 - 탄소중립 사회로의 전환에도 불구하고 지속 가능한 경제성장과 삶의 질 향상이 가능한 新 경제·사회구조 시스템 구축
- 실행 전략
 - (경제구조 모든 영역에서 저탄소화 추진) 주요 온실가스 배출원인 발전·산업·건물·수송 분야에 대한 기술 개발 지원, 제도 개선 등을 통해 온실가스 조기 감축 유도
 - (新유망 저탄소산업 생태계 육성) 탄소중립 패러다임에 맞게 기존 혁신 생태계를 점검·보완하고 저탄소 산업을 새로운 성장 동력으로 인식·육성하는 체계 구축
 - (공정(公正)전환을 통해 전 국민 참여 유도) 전환 과정에서 소외되는 계층·산업이 없도록 하고, 전 국민적 공감대를 토대로 지역·민간 등이 주도하는 상향적 방식 추진
 - (탄소중립 인프라 강화) 재정제도 개선 및 녹색금융 활성화, 기술개발 확충, 국제협력 등을 통해 탄소가격 시그널 강화 및 효과적인 탄소 감축 이행 지원

- 3대(+1) 전략, 10대 중점과제(에너지, 산업, 수송, 건물 등)

| 01 적응 | 02 기회 | 03 공정 | +1 기반 |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 경제 구조 저탄소화 | 新 저탄소산업 생태계 조성 | 탄소중립 사회로의 전환 | 탄소중립 제도적기반강화 |
| 1. 에너지 전환 가속화 2. 고탄소 산업구조 혁신 3. 미래모빌리티 전환 4. 도시·국토 저탄소화 | 5. 新유망산업 육성 6. 혁신생태계 기반구축 7. 순환경제 활성화 | 8. 취약 산업·계층 보호 9. 지역 중심 탄소중립 실현 10. 국민인식 제고 | ■ 재정제도 개선 ■ 녹색금융 활성화 ■ 기술개발 확충 ■ 국제협력 |

▲ 그림54 2050 탄소중립 추진전략 및 중점과제

- 탄소중립위원회 설치
 - 정부 부처 및 사회 전 부문을 이끌어 갈 대통령 직속 민·관 합동 심의기구인 ‘탄소중립위원회’가 ‘21.5.29 일에 발족되었으며, ‘탄소중립기본법’ 제정(‘21.9.24)에 따라 위원회의 설치·운영 및 기능에 대한 법적 근거 마련



▲ 그림55 탄소중립위원회 조직도

심화

2050 추진전략 주요 과제 추진 일정

| 기본 방향 | 10대 중점과제 | 정책 | 일정 | 주관 부처 |
|------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------|-------|
| 경제구조의 저탄소화 | 에너지전환 | ▶ 「에너지 탄소중립 혁신전략」 마련 | '21.4분기 | 산업부 |
| | 고탄소 산업 | ▶ 「탄소중립 산업 대전환 추진전략(제조업 르네상스 2.0)」 마련 | '21.4분기 | 산업부 |
| | | ▶ 「전통 중소기업 저탄소경영 지원방안」 마련 | '21.4분기 | 중기부 |
| | 미래 모빌리티 | ▶ 「수송부문 미래차 전환전략」 마련 | '21.4분기 | 산업부 등 |
| | 도시·국토 | ▶ 「건물부문 2050 탄소중립 로드맵」 수립 | '21.4분기 | 국토부 |
| | | ▶ 「자연·생태기반 온실가스 감축·적응전략」 마련 | '21.4분기 | 환경부 등 |
| | | ▶ 「2050 탄소중립을 위한 농식품 분야 기후변화 대응 기본계획」 수립 | '21.1분기 | 농식품부 |
| | | ▶ 「해양수산 분야 2050 탄소중립 로드맵」 수립 | '21.4분기 | 해수부 |
| | ▶ 「2050 탄소중립 산림부문 전략」 마련 | '21.3분기 | 산림청 | |
| 신유망 저탄소 산업생태계 조성 | 신유망산업 | ▶ 「수소경제이행 기본계획(수소경제로드맵 2.0)」 수립 | '21.2분기 | 산업부 |
| | 혁신생태계 | ▶ 「그린 분야 혁신 벤처·창업 생태계 조성 방안」 마련 | '21.2분기 | 중기부 등 |
| | | ▶ 「녹색 유망기술 상용화 로드맵」 수립 | '21.3분기 | 환경부 |
| | 순환경제 | ▶ 「K-순환경제 혁신 로드맵」 수립 | '21.4분기 | 환경부 |

| 기본 방향 | 10대 중점과제 | 정책 | 일정 | 주관 부처 |
|----------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|
| 탄소중립 사회로의 공정전환 | 신산업 체계로 편입 | ▶ 「지역에너지산업 전환」 연구 | ’21.3분기 | 산업부 |
| | | ▶ 「중소벤처기업 신사업 개척 및 재도약 촉진 방안」 마련 | ’21.2분기 | 중기부 |
| | 지역중심 | ▶ 「지역사회 탄소중립 이행 및 지원 방안」 마련 | ’21.3분기 | 환경부 |
| | 국민인식 | ▶ 「탄소중립 등 학교 환경교육 지원 방안」 마련 | ’21.4분기 | 교육부 등 |
| | | ▶ 「탄소중립 사회에 대한 국민 인식 제고 전략」 마련 - 「가정·기업·학교 등 분야별 기후행동 매뉴얼」 마련 | ’21.3분기 ’21.2분기 | 환경부 환경부 |
| 탄소중립 제도적 기반 강화 | 배출권 거래제 | ▶ 「배출권거래제 기술혁신·이행 로드맵」 수립 | ’21.4분기 | 환경부 |
| | 녹색금융 | ▶ 「기후리스크 관리·감독 추진계획」 수립 | ’21.1분기 | 금융위 |
| | | ▶ 「금융권 녹색투자 가이드라인」 마련 | ’21.1분기 | 금융위 |
| | | ▶ 「기후환경 정보공시 확대 방안」 마련 | ’21.2분기 | 금융위 |
| | | ▶ 「녹색금융 분류체계」 수립 | ’21.2분기 | 환경부 |
| | | ▶ 「스튜어드십코드」 시행성과 평가 및 개정 검토 | ’21.4분기 | 금융위 |
| | 연구개발 | ▶ 「탄소중립 R&D 전략」 마련 | ’21.1분기 | 과기부 |
| | | - 「CCU 로드맵」 수립 | ’21.2분기 | 과기부 |
| | | - 「탄소중립 R&D 투자전략」 수립 | ’21.1분기 | 과기부 |
| | | - 「(가칭) 2050 탄소중립 10대 R&D 프로젝트」 기획 | ’21.2분기 | 과기부 |
| 국제협력 | ▶ P4G 정상회의 개최 및 녹색 의제 주도 | ’21.2분기 | 외교부 | |
| | ▶ 그린뉴딜 ODA 비중 확대 로드맵 수립 | ’21.1분기 | 외교부 | |

출처 : 관계부처합동, 2050 탄소중립 추진전략

2050 장기저탄소발전전략(LEDs*) 수립과 탄소중립

* LEDS: Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies

- 우리나라는 국제사회의 기후변화 노력에 동참하기 위해 LEDS 수립을 결정하였으며, 수립단계부터 학계, 산업계, 시민사회 등 다양한 분야의 전문가가 참여하는 ‘2050 저탄소 사회 비전 포럼’을 구성하고 다양한 2050년 국가 온실가스 감축 목표와 비전을 검토함
- 2020년 15개 부처가 참여하는 범정부협의체에서 사회적 논의를 통해 산업계, 시민사회 및 미래세대 등 다양한 계층의 의견을 종합하여 ‘2050년 탄소중립을 목표로 나아가겠다’는 비전 아래 5대 기본방향과 부문별 추진 전략이 포함된 ‘대한민국 2050 탄소중립 전략’을 마련함

출처 : 대한민국 2050 탄소중립 전략(’20.12)

그린뉴딜

- 정부는 코로나19가 불러온 경제위기를 극복하고 더 나아가 대한민국의 새로운 미래를 설계하기 위하여 2020년 7월 ‘한국판 뉴딜 종합계획’을 발표함
 - 한국판 뉴딜은 경제 전반의 디지털 혁신과 역동성을 확산하기 위한 ‘디지털 뉴딜’과 친환경 경제로 전환하기 위한 ‘그린뉴딜’을 두 축으로 하고, 취약계층을 두텁게 보호하기 위한 ‘안전망 강화’로 이를 뒷받침하는 전략으로 2025년까지 국비 114.1조 원을 포함한 총사업비 160조 원을 투자하여 일자리 190만 개를 창출할 계획임
 - ‘그린뉴딜’은 탄소의존형 경제를 친환경 저탄소 등 그린 경제로 전환하는 전략으로 기후위기에 선제적으로 대응하고 인간과 자연이 공존하는 미래사회를 구현하기 위해 탄소중립을 향한 경제, 사회 녹색전환을 추진하는 것임
- 3개 분야 8개 과제로 구성하고, 대표과제 선정을 통해 변화와 파급의 초기 구심점으로 활용

| 분야 | 과제 | 투자/효과 |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 도시·공간·생활 인프라 녹색 전환 | 국민생활과 밀접한 공공시설 제로에너지화 | 사업비 : 30.1조 원 국 비 : 12.1조 원 일자리 : 38.7만 개 (‘25년까지 합계) |
| | 국토·해양·도시의 녹색 생태계 회복 | |
| | 깨끗하고 안전한 물 관리체계 구축 | |
| 저탄소·분산형 에너지 확산 | 에너지관리 효율화 지능형 스마트 그리드 구축 1.1 | 사업비 : 35.8조 원 국 비 : 24.3조 원 일자리 : 20.9만 개 (‘25년까지 합계) |
| | 신재생에너지 확산기반 구축 및 공정한 전환 지원 | |
| | 전기차·수소차 등 그린 모빌리티 보급 확대 | |
| 녹색산업혁신 생태계 구축 | 녹색 선도 유망기업 육성 및 저탄소·녹색산단 조성 | 사업비 : 7.6조 원 국 비 : 6.3조 원 일자리 : 6.3만 개 (‘25년까지 합계) |
| | R&D·금융 등 녹색혁신 기반 조성 | |

출처 : 대한민국 정부, 한국판 뉴딜 종합계획(2020.7.14.)

2-2. 탄소중립기본법(기후위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법)

가. 탄소중립기본법 제정 목적

- 기후위기의 심각한 영향을 예방하기 위하여 온실가스 감축 및 기후위기 적응대책을 강화하고 탄소중립 사회로의 이행과정에서 발생할 수 있는 경제적·환경적·사회적 불평등을 해소하며 녹색기술과 녹색산업의 육성·촉진·활성화를 통하여 경제와 환경의 조화로운 발전을 도모함으로써, 현재 세대와 미래 세대의 삶의 질을 높이고 생태계와 기후체계를 보호하며 국제사회의 지속가능한 발전에 이바지하는 것을 목적으로 함
 - ※ 2010년에 제정된 「저탄소 녹색성장 기본법」의 '저탄소' 기초는 사실상 상당한 온실가스 배출을 전제로 하되 그 배출량을 줄여보자는 수준에 머문 것이기 때문에 '탄소중립'과는 맞지 않는 부분이 많았기 때문에 녹색성장법을 전면 개정하여 법을 제정
- 2021년 8월 31일 국회본회의 통과 후 탄소중립기본법이 9월 24일 제정되었으며, 2022년 3월 25일부터 첫 시행됨

나. 탄소중립기본법 제정 의의

1) 전 세계 14번째로 2050 탄소중립 비전과 이행 체계를 법제화

- 2050년 탄소중립을 국가 비전으로 명시하고, 이를 달성하기 위한 국가전략, 중장기 온실가스 감축목표, 기본 계획 수립 및 이행 점검 등의 법정 절차를 체계화

2) 2050년 탄소중립을 실질적으로 지향하는 중간단계 목표를 설정

- 2030년 온실가스 감축목표는 기존(2018년 대비 26.3%)보다 9%p 상향한 35% 이상 범위에서 사회적 논의를 시작하도록 법률에 명시
- 2018년부터 2050년까지 선형으로 감축한다는 가정 하에 2030년 목표가 37.5%가 된다는 점을 감안할 때, '35% 이상'이라는 범위는 2050 탄소중립을 실질적으로 지향한다는 의미를 부여

3) 미래세대, 노동자, 지역주민 등이 참여하는 협치(거버넌스)를 법제화

- 탄소중립기본법 제정에 따라 지난 5월 발족하여 운영 중인 2050 탄소중립위원회를 법률에 따른 위원회로 재정립
- 특히 기존에는 전문가와 산업계 위주로만 참여해왔던 협치(거버넌스)의 범위를 미래세대와 노동자 등으로 확대

4) 탄소중립을 이행하기 위한 실질적인 정책수단을 마련

- 국가 주요 계획과 개발사업 추진 시 기후변화 영향을 평가하는 기후변화영향평가제도, 국가 예산 계획 수립 시 온실가스 감축목표를 설정·점검하는 온실가스감축인지 예산제도 도입
- 산업구조 전환과 산업공정 개선 등을 지원하기 위한 기후대응기금을 신설

5) 탄소중립 과정에 취약지역·계층을 보호하는 정의로운 전환을 구체화

- 기존 석탄기반 산업, 내연기관 산업 등 탄소중립 사회로의 전환과정에서 피해를 볼 수 있는 지역과 계층을 보호하기 위하여 특별지구 지정, 지원센터 설립 등 정의로운 전환의 정책적 수단을 마련

6) 중앙 일변도의 대응체계를 중앙과 지역이 협력하는 체계로 전환

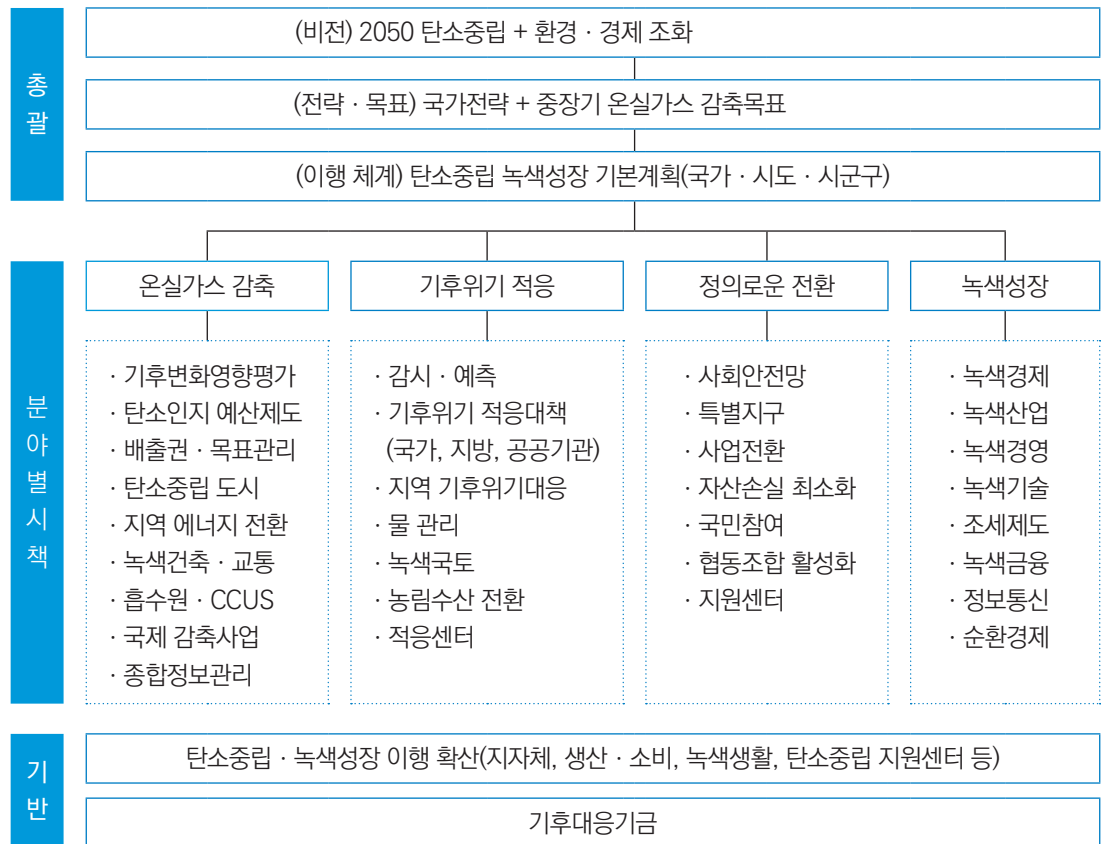
- 지방 기본계획, 지방 위원회 등 지역 이행체계를 마련하고, 중앙과 공유·환류(피드백)하는 협력체계를 마련
- 또한 지역 온실가스 통계 지원, 탄소중립지원센터 등 지원기반을 확충하고, 탄소중립 지방정부 실천연대 등을 통한 지역 상호간 협력체계도 마련

다. 탄소중립기본법 기본원칙 및 체계

1) 기본원칙

- 세대 간 형평성, 지속가능한 발전, 기후정의 추구 및 정의로운 전환, 오염자 부담원칙, 민주적 참여 등 강조

2) 탄소중립기본법안 체계



- 탄소중립기본법은 ‘2050 탄소중립+환경과 경제의 조화로운 발전’을 국가비전으로 감축목표를 법률상에 다음과 같이 명시
 - ‘2050년까지 탄소중립을 달성’
 - ‘2030년까지 2018년 대비 35% 이상 온실가스 배출을 감축’
 - 부문별·연도별 온실가스 감축목표를 설정하고 5년마다 검토
- ‘2050 탄소중립녹색성장위원회(이하 “탄소중립위원회”)’는 이러한 목표들의 이행 현황을 매년 점검해 결과 보고서를 작성·공개

라. 탄소중립기본법 분야별 주요 시책

1) 국가탄소중립녹색성장전략 및 기본계획 수립

- 정부는 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위한 중요 정책목표, 추진전략, 중점과제 등 사항을 담은 ‘국가탄소중립녹색성장전략’을 수립하고, 이를 5년 단위로 재검토하여 필요시 보완하고, 국가 비전과 NDC 달성을 위하여 5년 단위로 20년 기간의 ‘국가 탄소중립 녹색성장 기본계획’을 수립

〈기본계획 포함 내용〉
 온실가스 배출 등 현황, 목표 달성을 위한 대책, 기후변화 적응대책, 정의로운 전환대책, 녹색산업 등 육성시책, 국제협력 및 지방자치단체와의 협력에 관한 사항, 필요 재원 및 조달 방안 등 탄소중립 정책 추진의 기본적 사항

2) 시도 및 시군구 탄소중립녹색성장기본계획

- 중앙정부와 마찬가지로 광역 및 기초 지자체는 5년 단위로 10년 기간의 탄소중립녹색성장기본계획 수립을 통해 적극적인 탄소중립 정책 추진
 - 기후위기 적응의 문제는 지역별 특성에 따른 특화된 정책 추진의 필요성을 더 요구하기 때문에 지자체의 더 많은 역할 필요

3) 2050 탄소중립녹색성장위원회

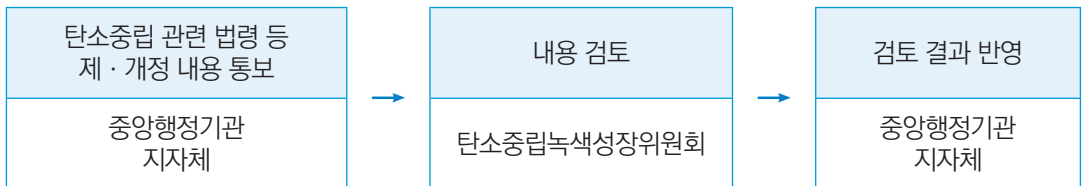
- 대통령 소속의 ‘탄소중립녹색성장위원회’를 설치하여 위원장은 국무총리와 민간위원 중 대통령이 지명하는 사람 2인
- 간사위원으로 국무조정실장을 포함한 50~100명 이내의 전문가 및 이해관계자를 위원으로 위촉
- 분과위원회, 특별위원회, 전문위원회 등을 설치하여 탄소중립 관련 정책, 목표 수립 및 이행점검 등 심의·의결

〈심의·의결사항〉
 △ 정책 기본방향 △ 비전·목표 설정 △ 국가전략 수립 △ 이행점검·피드백 △ 탄소중립녹색성장기본계획 수립·변경 △ 기후위기 적응대책 수립·점검 △기타 법·제도, 재원 배분, 연구개발, 홍보·소통, 국제협력 등

- 지역에서는 광역 및 기초 지자체 단위로 지방탄소중립녹색성장위원회를 설치

4) 법령 등 제·개정 통보

- 탄소중립과 관련된 법령, 조례의 제·개정 및 폐지, 중장기 행정계획의 수립·변경 추진 시 다음과 같은 절차와 통보 대상을 구체적으로 법으로 명시하여 구속력 강화



5) 기후변화영향평가

- ‘기후변화영향평가’를 사실상 전략환경영향평가 또는 환경영향평가의 요소로 편입하여 전략환경영향평가 또는 환경영향평가 대상 계획과 개발사업 중 온실가스를 다량으로 배출하는 사업 등은 기후변화에 영향을 미치거나 기후변화로 받을 수 있는 영향을 분석, 평가하도록 하여 환경적 영향 외 기후변화영향에 대한 고려도 필수적으로 반영함

6) 온실가스감축인지 예산제도

- 향후 국가 및 지자체 예산편성에 있어서 온실가스 감축 관련성이 있는 예산이 우선 반영하도록 하여 국가 및 지자체가 사업계획 수립 시 기후위기 대응정책과의 연계성을 고려할 수밖에 없도록 유도

7) 온실가스 목표관리제 및 배출권거래제

- 기존 녹색성장법은 에너지 및 온실가스 목표관리를 규정하였으나, 탄소중립기본법에서는 온실가스에 대한 목표관리만을 규정
- 또한 탄소중립기본법은 대상 업체별 온실가스 배출량이나 목표 달성 여부 등을 공개할 수 있도록 명시적으로 규정하고 있기 때문에, 특히 업체별 목표 달성 여부의 공개는 간접적으로 목표 달성을 강제하는 효과를 기대

8) 탄소중립 도시

- 기존 녹색성장법도 에너지·자원 자립형 탄소중립도시 조성에 관한 규정을 두고는 있었으나, 탄소중립기본법은 이를 더욱 구체적으로 규정하여 실질적으로 ‘탄소중립도시’ 조성사업이 추진될 수 있는 기반을 마련. 특히 탄소중립도시 조성사업에 참여하는 지자체에는 예산지원이 가능하도록 하였으므로 다수 지자체가 탄소중립도시 지정을 위해 노력하도록 유도

〈탄소중립 도시〉

탄소중립 관련 계획 및 기술 등을 적극 활용하여 탄소중립을 공간적으로 구현하는 도시로 다음 사업을 추진

- 도시의 온실가스 감축 및 에너지 자립률 향상을 위한 사업
- 탄소흡수원 등을 조성·확충 및 개선하는 사업
- 도시 내 생태축 보전 및 생태계 복원
- 기후위기 대응을 위한 자원순환형 도시 조성
- 기타 기후위기 대응 및 탄소중립 사회로의 이행, 환경의 질 개선을 위하여 필요한 사업

9) 탄소포집·이용·저장기술 육성

- 탄소중립 목표 달성을 위해 탄소포집·이용·저장기술의 개발이 중요하므로 탄소중립기본법은 이를 지원하기 위한 시책을 마련하고, 특히 이러한 기술의 실증을 위해 규제특례를 적용할 것을 규정

〈탄소 포집 및 이용·저장 기술(CCU, Carbon Capture, Utilization and Storage)〉

대기 중이나 배출가스에 포함된 이산화탄소를 모은 뒤 이를 산업적으로 활용하거나 안전하게 장기간 저장하는 기술

10) 국가 기후위기 적응대책 및 국가 기후위기 적응센터

- 정부는 5년마다 '기후위기적응대책'을, 각 지자체는 '지방기후위기적응대책'을 수립·시행하도록 규정하고, 각 부처는 '적응대책세부시행계획'을 수립하도록 하여 매년 추진상황을 점검하여 보고서를 작성·공개
- 그 밖에 기후위기에 취약한 시설을 관리하는 공공기관 등은 5년마다 '공공기관기후위기적응대책'을 수립하고 매년 그 이행실적을 작성·제출하고 기후위기 취약지역은 정부의 예산지원을 받아 지역 기후위기 대응사업 시행이 가능

11) 정의로운 전환 정책

- 탄소중립 이행과정에서 산업구조 등의 변화로 급격한 일자리 감소, 지역경제 침체 등이 발생하는 지역은 '정의로운 전환 특별지구'로 지정하여 지원
- 산업구조 변화 등의 영향이 큰 업종에 속하는 중소기업에 대해 사업전환에 필요한 지원, 온실가스 다배출 기업 중 자산손실 위험이 큰 기업에 대한 지원, 탄소중립 관련 협동조합 등에 대한 지원 등을 규정
- 그 밖에 기업이 기후위기로 인한 자산손실 위험 등을 공시하는 제도를 마련할 것을 규정
- 탄소중립 사회로의 전환과정에서 시장에서 발생할 수 있는 혼란 또는 부작용을 최소화하기 위한 장치를 마련 요구

12) 기후대응기금

- 정부 등 출연금 및 기부금과 배출권거래제에서의 배출권 유상할당 수입, 교통·에너지·환경세의 일부(7%) 등을 주재원으로 하여 '기후대응기금'을 설치하고, 온실가스 감축기술 등 개발, 정의로운 전환정책 지원 등의 용도로 사용하도록 규정

13) 기타

- 기존 녹색성장법의 녹색건축물·교통·국토·경제·산업·기술·경영·생활 등 분야별 녹색성장정책 추진과 관련한 규정은 탄소중립기본법도 큰 변화 없이 대부분 수용

2-3. 탄소중립 시나리오와 2030 국가 온실가스 감축목표

가. 2050 탄소중립을 위한 이정표 마련

- 정부는 2020년 10월 탄소중립 선언 이후 관계부처 합동으로 2050 탄소중립 시나리오, 2030 국가 온실가스 감축목표 상향 안에 대한 검토를 진행했으며, 탄소중립위원회 논의와 이해관계자 의견수렴을 거쳐 2021년 10월 18일 탄소중립위원회 전체회의에서 탄소중립 시나리오와 감축목표가 의결되었으며, 2021년 10월 27일 국무회의에서 심의·확정되었음

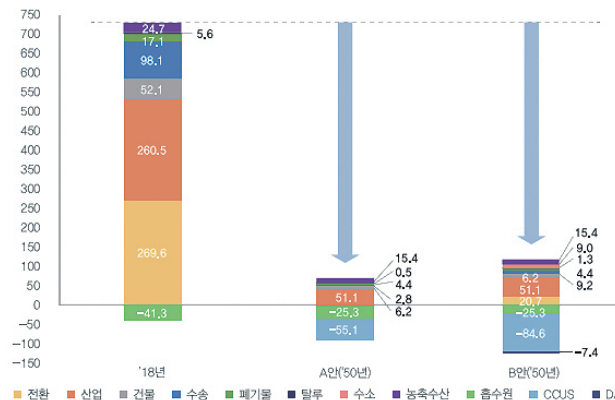
나. 탄소중립 시나리오 개요

- (의미) 2050 탄소중립 사회가 실현되었을 때 우리나라의 미래상과 부문별 전환 내용 전망, 부문별 정책 방향과 전환속도를 제시
- (고려사항) 탄소중립을 위한 기술 혁신 및 상용화, 국민인식과 생활양식 변화를 전제로 하여 경제적 부담과 편익, 식량·에너지 안보, 국제사회에서의 역사적 책임 등 종합적으로 고려

| 비전 | “기후위기로부터 안전하고 지속가능한 탄소중립 사회” | | | | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 원칙 | (책임성) 사회구성원 전체가 지구촌의 책임 있는 일원으로 참여 (포용성) 미래세대와 인류 외 다른 생물종까지 배려 (공정성) 취약 집단을 보호하고 소외된 자 없이 모두의 참여를 보장 (합리성) 객관적인 자료에 바탕을 둔 실현가능성 높은 미래상 도출 (혁신성) 과학기술과 제도의 혁신을 통한 미래성장동력 발굴 | | | | |
| 구성 | 2개 시나리오(A, B안)로 A안 · B안 모두 2050년 온실가스 순배출량은 '0'으로 제시 <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <th style="width: 50%;">A안</th> <th style="width: 50%;">B안</th> </tr> <tr> <td>화력발전 전면 중단 등 배출 자체를 최대한 줄이는 안</td> <td>액화천연가스(LNG) 발전이 잔존하지만 탄소포집 · 이용 · 저장기술(CCUS) 등 온실가스 제거기술을 적극 활용하는 안</td> </tr> </table> <p>※ 배출부문에서 전환, 수송, 수소, 탈루, 흡수 및 제거부문에서 이산화탄소 포집 및 활용 저장에서 A안, B안에 차이가 있음</p> | A안 | B안 | 화력발전 전면 중단 등 배출 자체를 최대한 줄이는 안 | 액화천연가스(LNG) 발전이 잔존하지만 탄소포집 · 이용 · 저장기술(CCUS) 등 온실가스 제거기술을 적극 활용하는 안 |
| A안 | B안 | | | | |
| 화력발전 전면 중단 등 배출 자체를 최대한 줄이는 안 | 액화천연가스(LNG) 발전이 잔존하지만 탄소포집 · 이용 · 저장기술(CCUS) 등 온실가스 제거기술을 적극 활용하는 안 | | | | |

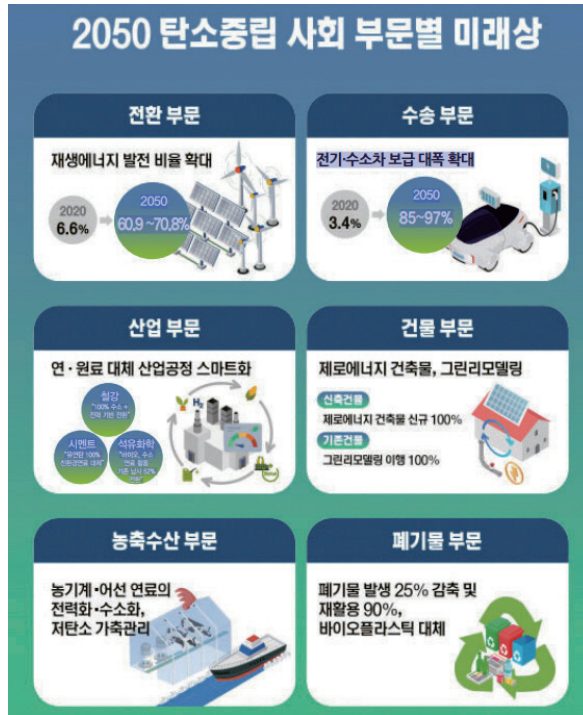
- (전제) 2050년의 에너지 수요량 및 온실가스 배출량 등을 예측하기 위해서 아래와 같은 주요변수의 전망치를 차용

| 변수 | 내용 |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 인구추이 | 통계청의 「장래인구추계 : 2015~2065」 등에 따라 2031년까지 점차 늘다가 정점을 기록하고 (5,296만명), 이후 서서히 감소하여 2050년에는 4,943만명이 될 것으로 예측 |
| GDP 성장률 추이 | 한국개발연구원(KDI) 추정치에 근거하여 2018년부터 2040년까지 GDP는 연평균 1.9%, 2040년부터 2050년까지 연평균 1.0% 성장하고, 2050년의 GDP 성장률은 0.9%일 것으로 예측 |
| 국제유가 전망 | 제3차 에너지기본계획(2019)의 전제조건이 2050년까지 유지된다는 가정 하에 2050년 전망치를 도출(2050년 국제유가는 배럴당 136달러) |
| 산업구조 전망 | 산업연구원의 전망치(2019)에 근거하여, 2050년 국내 산업구조에서 서비스업의 비중이 높아지는 가운데(2018년 65.9% → 2050년 69.6%), 제조업 비중은 다소 하락하나(2018년 32.0% → 2050년 29.2%), 생산액은 증가세를 유지(2018년 511조원 → 786조원)할 것으로 예측 |



▲ 그림56 2050탄소중립 부문별 온실가스 배출량

출처 : 2050탄소중립시나리오(탄소중립위원회, 2021)



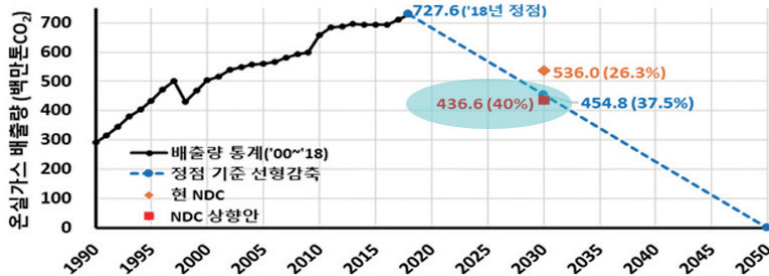
▲ 그림57 2050탄소중립 사회부문별 미래상

출처 : 2050탄소중립시나리오(탄소중립위원회, 2021)

다. 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향

- 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)는 기후변화 파리협정에 따라 당사국이 스스로 발표하는 것이며, 2030 NDC는 탄소중립의 중간 목표로서, 세계 주요국은 탄소중립 선언 후 NDC를 상향하고 있음
- 우리나라도 기후위기의 심각성, 국제사회 구성원으로서 역할 등을 종합적으로 고려하여 2030 국가 온실가스 감축목표를 상향

’18년 배출량(727.6백만톤) 대비 △40%*(291백만톤) 감축(’30년 배출량 : 436.6백만톤)



▲ 그림58 대한민국 NDC상향 수준

출처 : 탄소중립위원회 누리집

* NDC 상향안(△40%)은 (’18년 총배출량 - ’30년 순배출량) 적용 시 감축률이며, (’18년 순배출량 - ’30년 순배출량) 적용 시 NDC 상향안의 감축률은 △36.4%

- 제조업 비중이 높은 우리나라의 산업구조*, 낮은 배출정점 등을 고려할 때 쉽지 않은 목표이며, 정부의 강력한 정책의지를 반영한 상향안으로 볼 수 있음
 - * 국내총생산(GDP) 대비 제조업 비중('20년 기준, %): (한) 26.1, (일) 19.5, (유럽연합) 14, (미) 10.6
- NDC 상향안의 연평균 감축률(기준연도 → 목표연도)은 4.17%/년, 주요국 대비 도전적인 목표
 - * 주요국 연평균 감축률(%/년, 기준연도 → 목표연도) : (EU) 1.98, (美) 2.81, (英) 2.81, (日) 3.56

〈2030 국가 온실가스 감축목표 상향 경과〉

- ① NDC 상향안 마련을 위한 기술작업반 운영 및 관계부처 검토(~'21.8)
 - 탄소중립 시나리오와 NDC 상향안과의 연계를 위해 시나리오 수립을 위해 구성된 기술작업반*을 활용, 목표 설정을 위한 관계부처 협의 진행
 - * 45개 국책연구기관, 10개 분과(전환, 산업, 건물, 농축수산, 폐기물, 흡수원 등), 72인으로 구성
- ② 「탄소중립기본법」에서 NDC 최소 기준('18년 比 35% 이상) 설정('21.8)
- ③ 「탄소중립기본법」 입법 취지, 국제 동향 등을 고려해 NDC 상향안 마련('21.9~10)

심화

주요국의 NDC 상향

- 세계 주요국의 NDC상향 사례

표21 주요국 2030 NDC 상향 및 감축경로 비교

| 국가 | 2030 NDC 상향(탄소중립 선언 후) | 2050년까지 매년 균등감축시 2030년의 감축수준 |
|-----|------------------------|------------------------------|
| EU | '90년 比 최소 55% 감축 | △66.7% |
| 영국 | '90년 比 68% 감축 | △66.7% |
| 미국 | '05년 比 50~52% 감축 | △55.6% |
| 캐나다 | '05년 比 40~45% 감축 | △55.6% |
| 일본 | '13년 比 46% 감축 | △45.9% |

* 기준연도는 국가별로 자체 결정(결정 사유는 미공개)하나, 대부분 배출정점(EU, 日) 이나 인접 연도(美 : 정점-'07년/ 기준-'05년, 英 : 정점-'91년/기준-'90년)를 기준연도로 설정

표22 주요국 기준연도 배출량 및 연평균 감축률

| 연도 국가 | 기준연도 및 연도별 배출량(백만톤CO ₂) | | | | | 기준연도에서 2030년까지 연평균 감축률(%) |
|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|-----------------|---------------------------------|
| | 1990 | 2005 | 2013 | 2018 | 2030 (NDC목표) | |
| EU | 5,648.00 | 5,240.00 | 4,477.10 | 4,224.40 | 2,541.60 | 1.98 |
| 영국 | 797.8 | 695.4 | 570.2 | 465.9 | 255.3 | 2.81 |
| 미국 | 6,437.00 | 7,391.80 | 6,769.60 | 6,676.60 | 3,622.00 | 2.81 |
| 캐나다 | 603.2 | 729.7 | 720.9 | 729.3 | 419.6 | 2.19 |
| 일본 | 1,270.00 | 1,378.80 | 1,407.80 | 1,238.30 | 760.2 | 3.56 |

■ : NDC 기준연도 배출량

우리나라 2030 국가 온실가스 감축목표 수립 및 변경 경과

① 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 최초 수립('15.6)

- '30년 BAU*(851백만톤) 대비 온실가스 배출을 37% 감축하는 목표 수립('15.6)
 - * BAU(Business As Usual, 배출 전망) : 추가적인 감축 노력을 하지 않고 현재 추세로 진행할 때 예측되는 미래의 온실가스 배출 전망치
- NDC 이행 구체화를 위해 「2030 NDC 달성을 위한 기본 로드맵」 마련('16.12)

② 「2030 NDC 달성을 위한 기본 로드맵」 수정('18.7)

- 국내 감축 규모를 확대하고* 해외감축량을 축소 조정, 실질적인 감축 강화
 - * 국가 감축목표 BAU 대비 37% 중 국내 감축 확대 (25.7%p → 32.5%p)

③ 2030 NDC 수정('19.12) 및 UN 제출('20.12)

- 감축목표 표기법 변경(임의 변동 가능성이 있는 BAU방식 → 고정불변하는 절대치 방식)* 등 온실가스 감축 의지 명확화('19.12) → UN 제출('20.12)
 - * (당초) '30년 BAU 대비 37% 감축 → (변경) '17년 대비 24.4% 감축('18년 대비 26.3%)

라. 시나리오 및 NDC 부문별 감축량 및 감축 방향

- 배출 8개 부문, 흡수 및 제거 3개 부문의 감축량 반영시 2030 NDC 기준으로 순배출량 436.6백만톤CO₂eq, 2050 탄소중립 시나리오는 “0”로 제시
- 탄소중립 시나리오의 경우 A안, B안 차이가 있는 부문은 전환, 수송, 수소, 기타, CCUS가 해당됨

표23 탄소중립 시나리오 및 2030 NDC 부문별 온실가스 배출량

(단위 : 백만톤CO₂eq)

| 구분 | 부문 | 기준연도 ('18) | 2030 NDC 상향안 ('18년 비 감축률) | 2050 탄소중립 시나리오 | |
|---------------|----------|----------------|-------------------------------|----------------|-------|
| | | | | A안 | B안 |
| 배출량* | | 727.6 | 436.6 (△291.0, △40.0%) | 0 | |
| 배출 | 전환 | 269.6 | 149.9 (△44.4%) | 0 | 20.7 |
| | 산업 | 260.5 | 222.6 (△14.5%) | 51.1 | |
| | 건물 | 52.1 | 35.0 (△32.8%) | 6.2 | |
| | 수송 | 98.1 | 61.0 (△37.8%) | 2.8 | 9.2 |
| | 농축수산 | 24.7 | 18.0 (△27.1%) | 15.4 | |
| | 폐기물 | 17.1 | 9.1 (△46.8%) | 4.4 | |
| | 수소 | - | 7.6 | 0 | 9 |
| | 기타(탈루 등) | 5.6 | 3.9 | 0.5 | 1.3 |
| 흡수 및 제거 | 흡수원 | -41.3 | -26.7 | -25.3 | |
| | CCUS | - | -10.3 | -55.1 | -84.6 |
| | 국외 감축** | - | -33.5 | - | -7.4 |

* 기준연도('18) 배출량은 총배출량, '30년 배출량은 순배출량(총배출량 - 흡수 · 제거량)

** 국내 추가감축 수단을 발굴하기 위해 최대한 노력하되, 목표 달성을 위해 보충적인 수단으로 국외 감축 활용

표24 탄소중립 시나리오 및 2030 NDC 부문별 온실가스 배출량

| 부문 | 주요 감축방향 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 전환 | (2030 NDC) 석탄발전 축소(발전비중 ('18년)41.9%→21.8%), 신재생에너지 확대(('18년)6.2%→30.2%) 등으로 44.4% 감축 (2050 시나리오) A·B안 모두 석탄발전 중단(A안은 LNG 발전도 중단), 재생에너지 대폭 확대(100%(A안), 92.3%(B안) 감축 |
| 산업 | (2030 NDC) 철강 공정 전환(전기로 등), 석유화학 원료 전환(바이오 납사 등), 시멘트 연·원료 전환(유연탄→폐합성수지) 등으로 14.5% 감축 (2050 시나리오) 철강 공정의 수소환원제철 도입, 시멘트·석유·화학·정유 과정에 투입되는 화석 연·원료를 재생 연·원료로 전환으로 80.4% 감축 |
| 건물 | (2030 NDC) 제로에너지 건축 활성화, 에너지 고효율 기기 보급, 스마트에너지 관리 등을 통해 32.8% 감축 (2050 시나리오) 건축물의 에너지효율 향상(제로에너지 건축물, 그린리모델링), 냉·난방 및 급탕 시 저탄소·청정에너지(태양광, 지열, 수열 등) 보급으로 88.1% 감축 |
| 수송 | (2030 NDC) 대중교통 중심 교통체계(자동차 주행거리 감축), 무공해차 보급 확대(450만대), 바이오 디젤 혼합률 상향(3%→8%) 등으로 37.8% 감축 (2050 시나리오) 무공해차 보급 확대(A안 97% 이상, B안 85% 이상), 대중교통 및 개인 모빌리티 이용 확대(97.1%(A안), 90.6%(B안) 감축 |
| 농축수산 | (2030 NDC) 논물 관리방식 개선, 비료사용 저감, 저메테인 사료 공급 확대, 가축분뇨 질소저감 등으로 27.1% 감축 (2050 시나리오) 저탄소 영농법 확대(논물 관리방식 개선, 질소질 비료 저감), 가축분뇨 자원순환 확대 및 저탄소 가축관리시스템 구축으로 37.7% 감축 |
| 폐기물 | 폐기물 감량('30년 기준 대비 17%)-재활용 확대, 바이오 플라스틱 보급, 매립지 등 메테인가스 회수 (2030 NDC) 46.8% 감축, (2050 시나리오) 74.3% 감축 |
| 수소 | (2030 NDC) 수전해 수소 기술개발·상용화 지원, 부생/해외수입 수소 공급 확대(공급비율 : 수전해 12.9%, 추출 39.7%, 부생/수입 47.4%) (2050 시나리오) 수소 수요 27.4~27.9백만톤 예상, 국내 생산수소를 100% 그린 수소(A안), 일부 추출 수소 또는 부생 수소 공급(B안) |
| 흡수원 | 산림 생태복원, 도시숲 등 신규조림 확대, 연안 및 내륙습지 신규 조성 등 흡수원 확보 (2030 NDC) 26.7백만톤 흡수 (2050 시나리오) 25.3백만톤 흡수 |
| CCUS | 상용화 R&D, 다양한 제도적 지원 등을 통한 CCU 확대, 다부처 공동사업을 통한 대용량 저장소 확보 추진 (2030 NDC) 10.3백만톤 처리 (2050 시나리오) A안 55.1백만톤 처리, B안 84.6백만톤 처리(부문별 배출량 차이에 따라 CCUS 처리량 차이) |

3. 부문별 감축수단

3-1. 전환부문 감축수단

전환부문 배출량

(단위 : 백만톤CO₂eq)

| | | | | | | | | | | |
|--------------|------|---------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---|----------|------|------|-----------|
| 기준배출량(2018년) | | 2030NDC(2030년) | | 탄소중립 시나리오(2050년) | | | | | | |
| 269.6 | → | 149.9 (44.4% 감축) | → | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">[A안]</td> <td style="width: 15%;">0</td> <td style="width: 70%;">(100%감축)</td> </tr> <tr> <td>[B안]</td> <td>20.7</td> <td>(92.3%감축)</td> </tr> </table> | [A안] | 0 | (100%감축) | [B안] | 20.7 | (92.3%감축) |
| [A안] | 0 | (100%감축) | | | | | | | | |
| [B안] | 20.7 | (92.3%감축) | | | | | | | | |

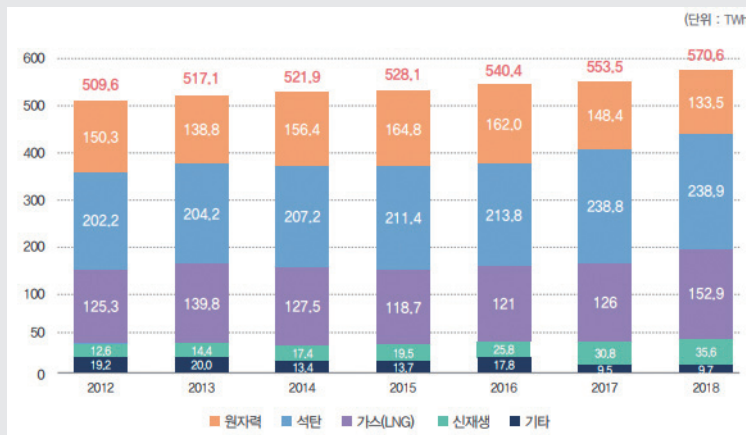
가. 개요

- 탄소중립 시대의 주력 에너지원은 온실가스를 배출하지 않는 재생에너지이며, 특히 전기를 생산하는 태양광과 풍력이 중심이 되어 산업, 수송, 냉난방을 위해 사용하는 에너지도 가능한 한 전기로 대체되어야 함
- ※ 2050년 전력수요는 2018년 전력소비량에 대비하면 221.7% ~ 230.7%로 크게 증가한, 1,166.5~1,213.7TWh로 추정

참고

국내 에너지원별 발전량 추이

2018년 기준 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것은 석탄발전으로 약 40%이며, 원자력 발전과 가스(LNG)는 각각 20%대이며 태양광 등 신재생에너지는 그간 비중이 꾸준히 상승하였으나 6.2%로 아직 미약한 수준



- 또한 지금은 상용화 되지 않았으나 전력망에 유연성을 제공할 수 있는 수소터빈과 연료전지와 같은 수소기반 발전이 발전량의 상당부분을 차지할 것임

나. 감축수단

1) 석탄발전 중단

- 탄소중립 시나리오는 A, B안 모두 2050년 이전에 모든 석탄발전소의 가동이 중단되는 것을 가정하였으며, 폐쇄되는 석탄발전소는 가급적 재생에너지로 대체하나(A안), 재생에너지를 충분히 확보하기 어려운 과도기에는 향후 수전해 수소(그린 수소)를 연료로 사용할 수 있는 LNG 발전기로 대체(B안)
- 이 과정에서 환경급전, 배출권거래제 등 시장 메커니즘을 활용한 전환도 병행하며, 2050년 이전 석탄발전 중단은 일부 석탄발전소의 조기 폐쇄를 의미하므로, 이를 위한 법적 근거와 적절한 보상방안을 마련을 전제함

참고

환경급전

발전소별 발전량을 결정하는 것을 ‘급전계획’이라 하며, 전력수요만큼 전력을 생산하기 위해서, 어느 발전소부터 전력을 생산하게 할 것인지 결정해야 하는데, 기존에는 원가가 낮은 연료(석탄 등)를 사용하는 발전소들을 우선적으로 가동(경제급전)

그러나 최근 미세먼지·온실가스 감축의 중요성이 커지면서, 급전계획 시 원가(경제성)와 동시에 환경에 미치는 영향(환경성)까지 동시에 고려하도록 하였는데, 이를 ‘환경급전’이라 함

2) 재생에너지 확대

- 탄기술포발과 제도개선을 통해 발전기들의 효율을 대폭 개선하고, 보급은 더욱 확대되어야 함
- 건물옥상, 건물 벽면이나 도로·철도, 국공유지 등의 유휴 부지를 우선적으로 활용하면서 영농형 태양광, 해상풍력 확대 등을 통해 지속가능한 방향으로 재생에너지를 늘려나감

참고

재생에너지와 계통

전력이 생산되어 소비자에게 전달되기 위해서는 발전설비를 송·배전망과 연결해야 하는데, 이를 계통 연계라 함

탄소중립 시나리오에 따라 향후 재생에너지 발전의 대폭적인 증가가 예상됨에 따라, 재생에너지 발전 설비를 계통에 원활히 연계하기 위한 방안 마련이 필요함

예컨대 계통 접속용량 확대, 배전선로 신설 및 보강, 변전소 조기 건설 등 제도 개선과 정책적 지원이 이루어져야 함

참고

재생에너지 간헐성 문제 극복

재생에너지의 가장 큰 약점은 사용 시기와 사용량을 인위적으로 결정하지 못하고 자연에 의해 결정된다는 것으로 이러한 '간헐성' 문제의 극복방안 마련이 필요

재생에너지 예측 및 실시간 통합관리시스템 구축을 통해 유연성 확보 필요

* 하드웨어(태양광, 풍력발전기 원격제어장치 등) 및 소프트웨어(통합최적화 모형)뿐만 아니라 비용정산 등 시장제도도 함께 마련

양수발전, 수소, 전력저장장치(ESS) 등 쓰고 남을 때 저장하고 필요할 때 저장된 에너지를 활용하는 기기 개발 및 보급 확대 필요

3) 원자력 발전

- 수명이 종료되는 순으로 점진적으로 축소될 예정으로서, 2050년에도 전력공급에 일정 부분 역할을 하게 됨. A안과 B안의 차이는 원전의 이용률 차이이며, A안은 지난 10년간 세계 원전 평균 이용률인 77%, B안은 안전조치의 강화를 전제로 87% 적용

4) 수소기반 발전

- 무탄소 가스터빈은 수소나 암모니아를 연료로 하는 터빈 발전으로 아직 상용화되어 있지 않지만, 국내 · 외 다수의 기업들이 관련 기술을 개발하고 있어서 10년 뒤에는 상용화될 것으로 전망
- 수소에 기반한 또 다른 발전방식인 연료전지는 대안에 따라 비중이 상이한데, 이는 연료전지의 미래에 대한 전문가들의 상이한 시각을 반영함

참고

연료전지에 대한 시각

연료전지가 수소터빈발전예 비해 가격경쟁력을 가질 수 있도록 비용절감이 가능할지, 연료전지의 단점인 '경직성'을 보완하는 기술개발이 가능할지에 대한 의견이 갈리고 있으며, 실제 미래 전원구성에서 연료전지와 수소터빈의 비중은 시장에서 경쟁을 통해 결정될 것으로 보임

심화

에너지 수요의 전기화

- 탄소중립 시대의 주력 에너지원은 온실가스를 배출하지 않는 재생에너지이며, 이들 에너지원은 에너지 이용 형태 중 열이나 엔진연료보다는 전기의 형태로 이용되므로, 탈탄소 에너지전환은 산업, 수송, 냉난방을 위해 사용하는 에너지도 가능한 전기로 대체되어야 함

(예) 온실가스가 배출되는 도시가스로 난방을 재생에너지로 생산된 전기로 전환, 휘발유를 사용하는 내연기관차를 재생에너지로 생산된 전기를 활용하는 전기차로 전환

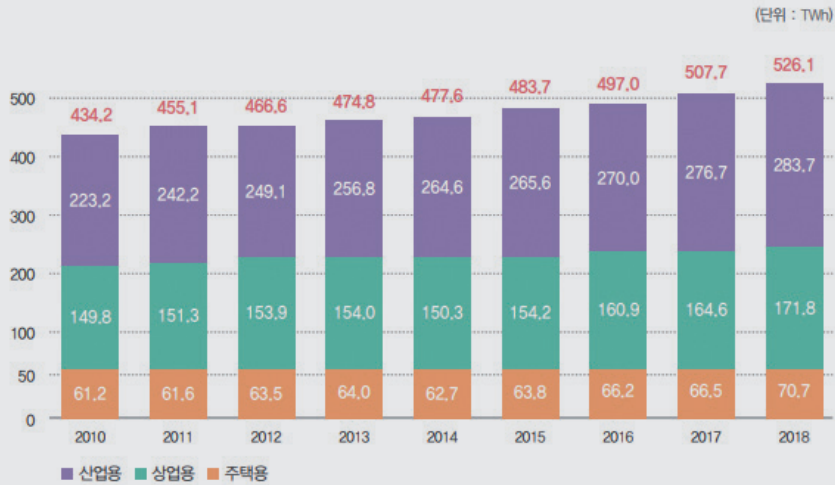
- 2050년 전력수요는 2018년 전력소비량에 대비하면 221.7% ~ 230.7%로 크게 증가한, 1,166.5~1,213.7TWh로 추정되며, 발전소 내에서 소비되는 전력과 송전과 배전 과정에서 발생하는 손실(3.5%) 등을 고려한다면, 2050년 전력 발전량은 총 1,208.8TWh에서 1,257.7TWh가 필요할 것으로 전망됨

(단위 : TWh)

| 구 분 | A안 | B안 |
|--------------|---------|---------|
| 총 전력공급량(가+나) | 1257.7 | 1208.8 |
| 부문별 전력수요(가) | 1,213.7 | 1,166.5 |
| - 산업 | 503.6 | 503.6 |
| - 수송 | 71.3 | 70.2 |
| - 건물 | 277.1 | 277.1 |
| - 농축수산 | 25.1 | 25.1 |
| - 수소 생산 | 235.3 | 129.0 |
| - CCUS 등 | 101.3 | 161.5 |
| 손실분(나) | 44.0 | 42.3 |

에너지 수요관리 정책

- 탄소중립을 위해서는 일상생활에서 전기소비를 절약하도록 생활방식이 근본적으로 바뀌어야 하며 특히, 전력수요 최대 시간대에 모든 분야(가정·상업 등 건물, 수송, 산업)가 전력수요를 감축·분산하는 것이 중요하여 이를 위해 기업과 소비자들에게 에너지 소비를 줄이는 것이 이익이 되도록 하는 에너지 소비저감 정책인 수요관리 정책도 중요
- 우리나라의 전체 전력소비량은 꾸준히 증가하고 있으며, 용도별로 살펴보면 전체 전력소비량 중 산업용이 50%대 비중을 차지하고 있으며, 그다음으로 상업용, 주택용이 각각 30%대, 10%대를 차지하고 있음



▲ 그림59 국내 용도별 전력소비량 추이

출처 : 제9차 전력수급계획(2020)

- 에너지 사용량은 '에너지이용단위×이용효율'로 계산되며, 자동차 이용에 따른 에너지 사용량은 '주행거리×연비'로 계산하므로, 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 에너지 이용단위를 줄이거나 연비를 개선하여야 함

* 주행거리를 줄여서 에너지 소비를 줄이는 것은 주로 에너지 절약으로, 연비를 개선하여 소비를 줄이는 것은 효율 개선으로 구분

- 에너지 가격이 높을수록 소비량을 줄이는 것이 이익이 되므로, 통상적으로 가격정책이 가장 효과적인 수요 관리 정책으로 평가되고 있음

- 에너지 가격정책은 소비자가 직접적으로 에너지 소비단위를 줄이도록 할 뿐 아니라, 에너지 효율이 높은 기기를 더 선호하게끔 함으로써 에너지 효율 개선도 간접적으로 촉진함

- 에너지 효율이 높지만 기기가 비싸면 소비자가 외면할 수 있으므로, 가격정책과 함께 에너지 이용기기의 효율 규제도 필요

탄소가격 부과(Carbon Pricing)

- 탄소가격 부과는 에너지 이용 시 발생하는 온실가스가 야기하는 사회적 피해 비용을 에너지 가격에 포함시키는 정책으로 대표적인 정책으로는 배출권거래제와 탄소세가 있음

탄소세

- 온실가스의 배출 감축을 목표로 온실가스 배출 단위당(이산화탄소 환산톤(=tCO₂e 기준) 세금을 부과하는 제도로 기업의 온실가스 배출량 감축을 위한 동기를 부여하고 세수 확보, 적용 용이성 등의 장점이 있어 국제기구와 학계에서 선호하는 방식이나 조세저항, 자국 기업 대외경쟁력 약화 우려 등으로 도입이 활발하지는 않음

- '21.4월 기준 25개국에서 실시 중으로 전 세계 온실가스 배출량에서 탄소세가 적용되는 비중('20년 기준)은 5.3%에 불과하며, 국가별 탄소세율은 이산화탄소 톤당 최저 0.1달러(폴란드)에서 최고 133.3달러(스웨덴)에 이르는 등 국가 간 격차가 매우 큼

* 도입국 평균 탄소세율은 29달러/tCO₂e으로 IMF 권고수준(75달러/tCO₂e)을 하회

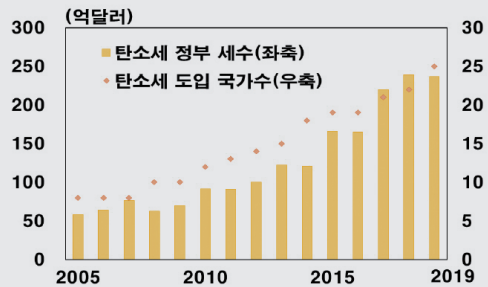
주요국 탄소세율 및 온실가스 적용비중¹⁾

(달러/tCO₂e, %)

| 국가 | 도입시기 | 탄소세율 | 비 중 |
|------|------|--------------------|------|
| 스웨덴 | 1991 | 133.3 | 0.08 |
| 노르웨이 | 1990 | 57.1 | 0.09 |
| 스위스 | 2008 | 104.7 | 0.03 |
| 영국 | 2013 | 23.2 | 0.25 |
| 프랑스 | 2014 | 7.0 | 0.32 |
| 전체 | - | 29.0 ²⁾ | 5.30 |

주: 1) 총온실가스대비 비중 2) 25개국 평균
자료: World Bank

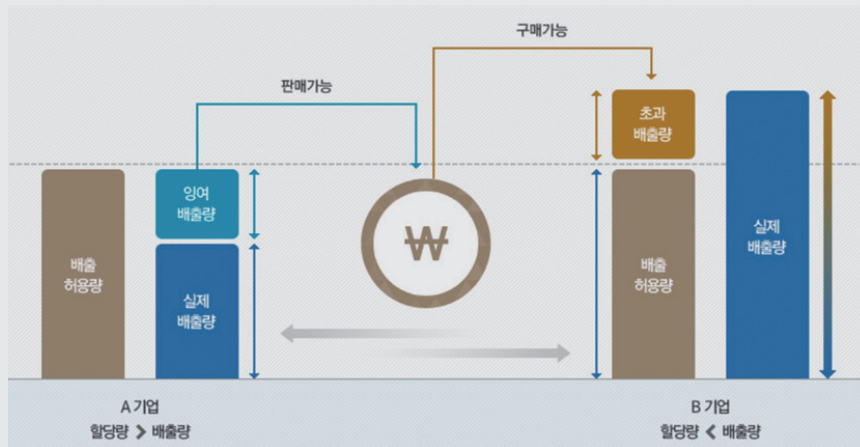
탄소세 도입국가수 및 세수 규모



자료: World Bank

탄소배출권거래제

- 이산화탄소 등 온실가스의 배출 감축을 목적으로 온실가스를 배출할 수 있는 권리를 시장을 통해 매매하는 제도로 총 온실가스 배출량이 고정되어 있어 배출권거래제 하에서 각 기업은 보유한 탄소배출권 및 배출량에 따라 배출권을 거래함. 기업은 소요 비용과 배출권 가격을 비교하여 더 낮은 비용이 지출되는 방안을 선택하는 것임



- 전 세계 온실가스 배출량 중 탄소배출권 시장의 적용을 받는 비중이 2005년 4.9%에서 2021년 17.9%로 3배 이상 증가 예상

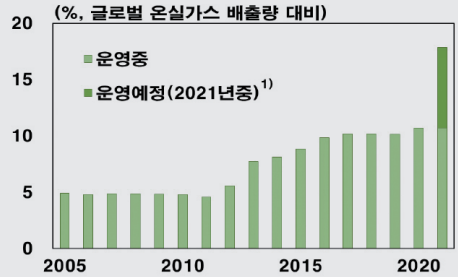
탄소배출권 거래 현황

(1억톤CO₂e, 십억유로)

| | 거래량 | | | 금액 | | |
|----|---------|---------|------|---------|---------|------|
| | 2018(A) | 2020(B) | B/A | 2018(A) | 2020(B) | B/A |
| EU | 77.5 | 81.0 | 1.04 | 129.7 | 201.4 | 1.55 |
| 북미 | 11.3 | 20.1 | 1.79 | 12.9 | 26.0 | 2.02 |
| 중국 | 1.0 | 1.3 | 1.30 | 0.2 | 0.3 | 1.32 |
| 기타 | 0.8 | 0.9 | 1.13 | 1.0 | 1.4 | 1.40 |
| 합계 | 90.6 | 103.3 | 1.14 | 143.8 | 229.1 | 1.59 |

자료: Refinitiv

전세계 탄소배출권거래 시장 커버리지



주: 1) 중국 및 독일 ETS

자료: World Bank

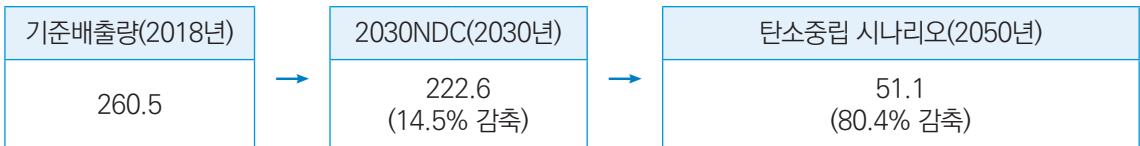
※ 우리나라에서도 '총량제한 배출권거래제'로 2015년부터 온실가스 배출권거래제를 시행하고 있음

- 총량 제한 : 배출권거래제 대상 업체에 일정 기간에 배출할 수 있는 총량을 정하고, 이를 배출권으로 할당하며, 이 배출권 할당량을 지속적으로 감소시킴으로써 온실가스 감축에 기여

3-2. 산업부문 감축수단

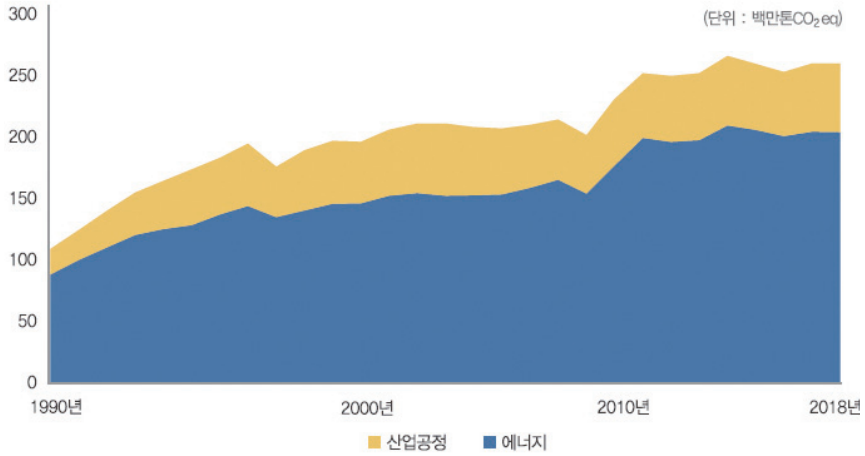
전환부문 배출량

(단위 : 백만톤CO₂e)



가. 개요

- 2018년 기준, 산업부문은 우리나라 온실가스 총배출량의 약 35.8%(간접 배출량 포함시 54%)를 차지하여, 전환 부문과 함께 배출량 비중이 높은 부문에 속함
- 산업 부문 배출은 크게 석탄, 석유, 가스 등의 연료·원료 사용으로 인한 배출(에너지 배출)과 공정 과정에서 투입 원료의 화학적 또는 물리적 구조 변환에 의한 산업공정 배출, 두 가지로 구분하며, 이 중 에너지 소비로 인한 배출이 78.4%로 높은 비중을 차지하고 있음
 - ※ 업종별 온실가스 배출량은 철강(101.2백만톤, 38.8%), 석유화학·정유(62.8백만톤, 24.1%), 시멘트(34.1백만톤, 13.1%) 순

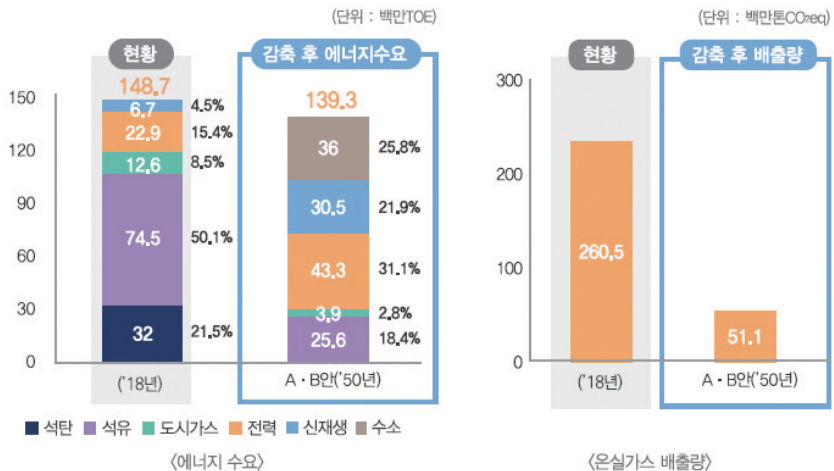


▲ 그림60 산업부문 유형별 온실가스 배출량 추이(1990-2018) 출처 : 2050탄소중립 시나리오(2021)

- 탄소중립 이행과정에서 산업부문의 에너지원인 석유·석탄·도시가스의 상당 부분을 전력으로 대체하고, 철강, 화학산업 등의 최종 소비과정에서의 화석연료 비중을 줄여 온실가스 감축

표25 산업부문 유형별 온실가스 배출량 변화

| 구 분 | 2018년 | 2050년 |
|------|-------|-------|
| 합 계 | 260.5 | 51.1 |
| 직접배출 | 204.2 | 25.6 |
| 공정배출 | 56.3 | 25.5 |



▲ 그림61 산업 부문 에너지수요 및 온실가스 배출량 전망

출처 : 2050 탄소중립 시나리오

나. 감축수단

1) 철강업종

- (배출) 우리나라 철강 생산량의 약 70%는 철광석을 원료로 하는 고로방식, 30%는 고철을 원료로 하는 전기로 방식을 활용하여 생산
 - ※ 현재의 기술수준에서 코크스는 고로방식에서 철광석의 산소를 제거(환원)하기 위해 꼭 필요한 원료이지만, 이산화탄소를 많이 배출한다는 한계가 있음
- (감축수단)

| 연료 전환(전기로) | 원료 전환(고로) |
|-------------------------|----------------------------------------------------------|
| 재생에너지 발전을 전제로 재생에너지를 사용 | 이산화탄소를 많이 배출하는 기존 코크스(석탄유래) 원료방식에서 수소를 사용하는 '수소환원제철법' 적용 |

- (전망) 2050년 철강 업종의 온실가스 배출량은 101.2백만톤(2018년)에서 약 95% 감축한 4.6백만톤으로 전망

참고

수소환원제철법

철광석의 산소를 제거하는 환원제로 수소(H)를 투입한다면 이산화탄소 대신 물(H₂O)이 배출되는 공법으로 세계적으로 기술개발 초기 단계에 있어서 향후 많은 연구와 투자 필요



▲ 그림62 기존공법 및 수소환원제철공법

출처 : 2050탄소중립추진전략

2) 석유화학 · 정유 업종

- (배출) 국내 석유화학산업은 정유산업에서 정제한 납사(나프타)를 주원료로 하여 합성수지, 합성섬유, 합성 고무 및 다양한 화학제품을 제조하며, 연료사용 및 주원료인 납사 분해과정에서 온실가스가 다량 배출
- (감축수단)

| 연료 전환(전기로) | 원료 전환(고로) |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 전기가열로 또는 바이오매스 보일러 교체로 기존 연료의 57%를 전환 | 바이오매스를 활용한 바이오나프타, 탄소와 수소를 직접결합한 화합물질을 활용하여 기존 납사를 52% 전환페플라스티크를 열분해하여 원료로 활용 |

※ 연료 전환 중 전기분해로와 원료 전환 기술들은 아직 개발 초기 단계에 있어 지속적인 연구 필요

- (전망) 2050년 석유화학, 정유 업종의 온실가스 배출량은 62.8백만톤(2018년)에서 약 73% 감축한 16.9백만톤으로 전망

3) 시멘트 업종

- (배출) 연료인 유연탄 연소과정과 시멘트 원료인 석회석의 가공과정에서 석회석에 붙어 있는 탄소와 산소가 분리·결합하는 과정에서 이산화탄소 배출
 - 시멘트의 중간제품인 클링커 소성공정에서 시멘트산업 배출량의 88%가 배출되며, 이중 공정배출은 63%, 연료사용에 따른 직접배출이 33%를 차지

$$63\%(\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2) + 33\%(\text{화학원료} \rightarrow \text{CO}_2)$$

- (감축수단)

| 연료 전환 | 원료 전환 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 유연탄의 대신 폐합성수지와 수소열원으로 연료를 대체 ※ 1997년부터 페타이어를 시작으로 폐고무, 폐합성수지 등을 사용해오고 있으며, 이를 지속적으로 확대 | 석회석 대신 CaO를 함유한 산업부산물을 활용하거나, 클링커 일부를 혼합재로 대체하거나, 철강 공정의 부산물인 고로 슬래그 또는 발전 부산물인 플라이 애쉬(flyash)를 활용 |

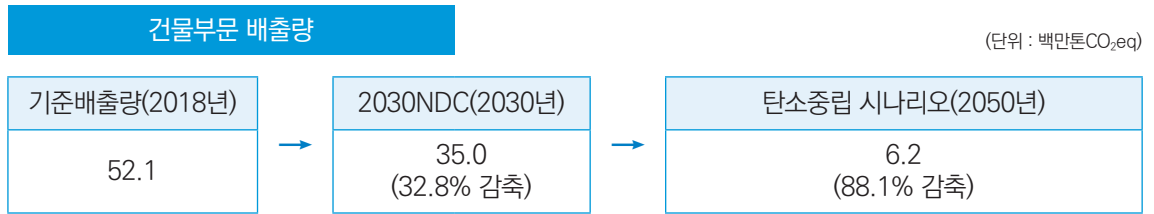
- (전망) 2050년 시멘트 업종의 온실가스 배출량은 34.1백만톤(2018년)에서 약 53% 감축한 16.1백만톤으로 전망

4) 기타업종

- (감축수단) 반도체·디스플레이, 전기·전자 등 전력 다소비 업종의 에너지 효율화, 친환경연·원료 전환, 공정개선 등의 방법을 통해 온실가스를 감축
 - (에너지효율화) 설비 경량화, 열손실 감소기술 적용, 노후설비 교체 등을 통해 10~20%의 효율개선
 - (연/원료 전환) 열병합 발전설비에서 사용하는 석탄, 석유를 LNG또는 바이오매스로 대체
 - (공정개선) 불소계 온실가스(F-gas)를 대체가스·친환경냉매로 전환하고, 반도체·디스플레이 업종의 F-gas 저감설비 설치

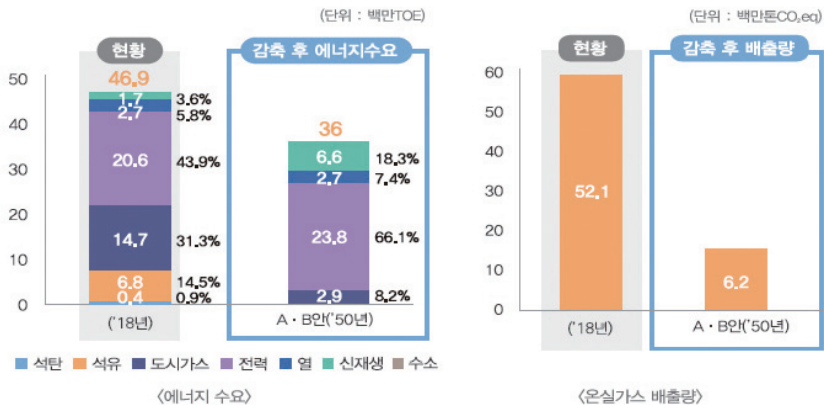
- (전망) 2050년 기타 업종의 온실가스 배출량은 62.4백만톤(2018년)에서 약 78.4% 감축한 13.5백만톤으로 전망

3-3. 건물부문 감축수단



가. 개요

- 건물 부문은 우리나라 온실가스 총배출량의 7%(2018년 기준, 간접 배출량 포함시 24.6%)를 차지하며, 전력 및 지역난방 사용에 따른 간접 배출량을 포함할 경우 179.2백만톤으로 산업 분야 다음으로 많은 온실 가스를 배출하고 있음
 - ※ 건물 용도별 배출량은 2018년 배출량 기준으로 주거용 건물이 65.0%로 가장 많은 비중을 차지하고 있으나, 연도별 추이는 상업·공업용 건물의 배출 비중이 점차 증가
- 건물 부문의 온실가스 감축은 건축물 에너지 효율 향상, 고효율기기 보급 등을 통해 에너지 수요를 감소시키고, 에너지원에서 화석연료(연탄, 등유·경유, 도시가스 등) 사용량을 줄이고, 전력과 신재생에너지 및 지역난방 등 열에너지 사용량을 확대하여 추진
 - 에너지 소비량은 2018년 46.9백만TOE에서 2050년 36.0백만TOE 으로 약 23% 감소
 - 에너지별 비중은 화석연료(연탄, 등유·경유, 도시가스 등) 사용량은 2018년 47%에서 2050년 8%로 감소시키고, 전력과 신재생 및 지역난방 등 열에너지 사용량은 92%로 확대



▲ 그림63 건물 부문 에너지수요 및 온실가스 배출량 전망

출처 : 2050 탄소중립 시나리오

나. 감축수단

1) 에너지효율 향상

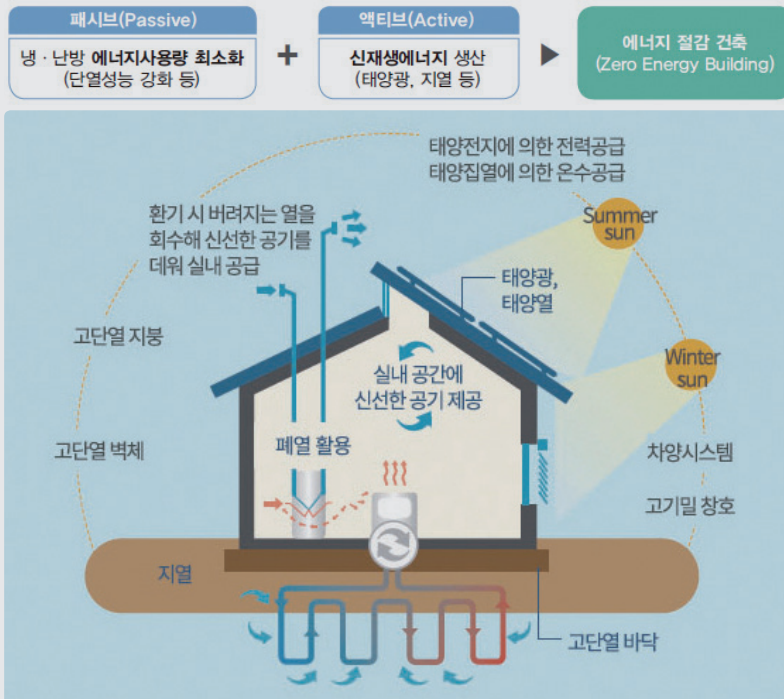
- 신축건물은 제로에너지건축물의 단계적 의무화, 기존 건물은 그린리모델링을 통해 건물 에너지 효율 개선 추진

| | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 신규 건축물 | 제로에너지 건축물(ZEB) 1등급 100% |
| 기존 건축물 | 그린리모델링 에너지효율등급을 가정분야는 1++' / 상업분야는 1+' 등급 100% 이행으로 2018년 대비 냉·난방에너지 사용 원단위 30% 이상 개선 |

심화

제로에너지건축물

건축물에 필요한 에너지부하를 최소화(패시브)하고 고효율설비와 신·재생에너지를 활용(액티브)하여 에너지 소요량을 최소화하는 녹색 건축물을 말하며, 에너지자립률이 100% 이상일 경우 1등급에 해당



▲ 그림64 제로에너지 건축물

출처 : 제로에너지빌딩 2020 인증 안내서(2020)

그린리모델링

노후된 건축물의 단열, 설비 등 성능을 개선하여 에너지효율을 향상시킴으로써 온실가스 배출을 줄일 수 있도록 건축물을 개량하는 사업

2) 고효율기기 보급

- 에너지 효율이 높은 가전기기, 사무기기, 조명기기의 보급 확대는 건물 내 에너지 사용과 온실가스 배출을 동시에 줄일 수 있는 중요한 감축 수단으로 주요 설비 및 기기의 에너지 소비효율 강화하고, 에너지 소비효율 등급 표시제도 확대 등으로 에너지를 30~32% 절감 전망

3) 스마트에너지 관리

- 에너지 이용 최적 제어 통합관리시스템(HEMS·BEMS)을 통해 건물 내 에너지 사용의 최적화를 유도 - 주거(HEMS), 비주거(BEMS) 100% 보급을 통해 주거는 2%, 비주거는 5% 가량의 에너지를 절감



▲ 그림65 건물에너지이용 최적제어 통합관리시스템(BEMS) 개념도

출처 : (사)한국EMS협회

27) Home/Building Energy Management System : 설비(조명, 냉난방 등)에 센서와 계측장비를 설치하고 통신망으로 연계하여 상세 에너지사용량을 실시간 모니터링하고 자동제어하는 통합관리시스템

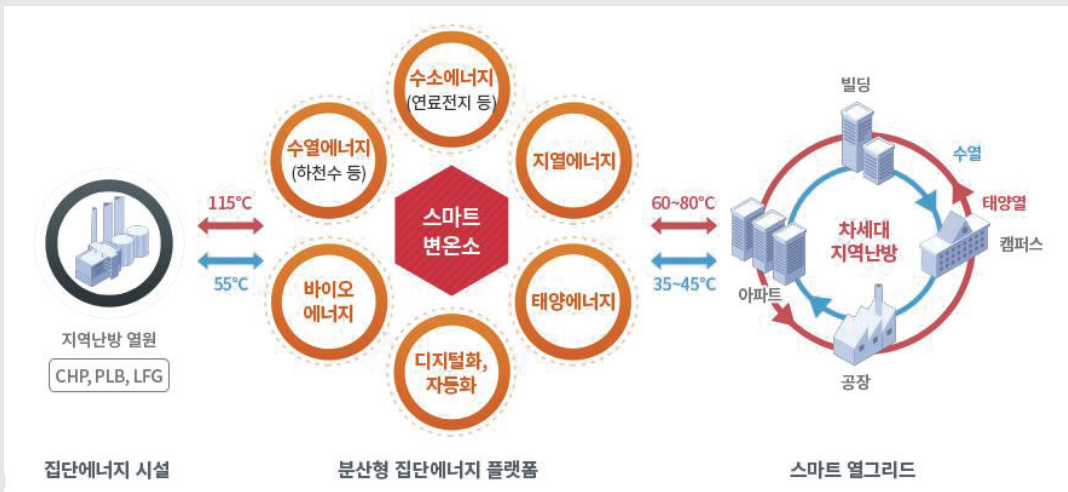
4) 저탄소 · 청정 에너지 보급

- 냉 · 난방 및 급탕 시 화석연료 대신 신재생에너지(태양광, 지열, 수열 등) 사용 비중을 늘리고, 저온 지역난방 확대로 온실가스 감축

참고

저온 지역난방

기존 100℃ 이상의 고온수 및 스팀 공급과 함께 사용처의 수요에 따라 지역난방 회수열, 신재생에너지 발생열 등을 이용하여 100℃ 미만의 저온수를 공급하여 미활용 열의 활용을 극대화하는 방식으로 스마트 변온소, 신재생에너지와 함께 차세대 지역난방의 주요 모델로 확대 전망



▲ 그림66 저온 지역난방 체계도

출처 : 2050 탄소중립 시나리오

5) 행태개선

- 배출권거래제 확대 · 강화, 에너지 요금제 개선 등 다양한 형태의 기후환경비용 반영을 통한 에너지 소비 감소 유도과 국민의 자발적 동참 등을 통한 에너지 사용량 절감

3-4. 수송부문 감축수단

수송부문 배출량

(단위 : 백만톤CO₂eq)

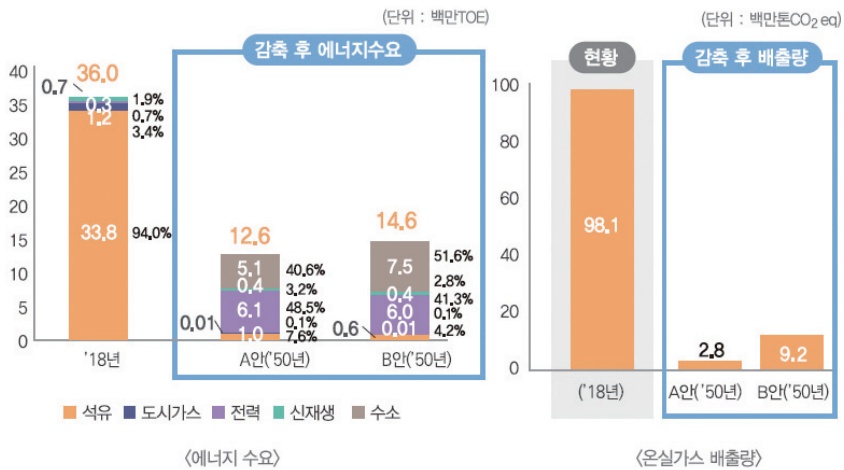
| | | | | | |
|--------------|---|--------------------|---|------------------|---------------|
| 기준배출량(2018년) | → | 2030NDC(2030년) | → | 탄소중립 시나리오(2050년) | |
| 98.1 | | 61.0 (37.8% 감축) | | [A안] | 2.8 (97.1%감축) |
| | | | | [B안] | 9.2 (90.6%감축) |

가. 개요

- 수송 부문은 도로, 철도, 해운, 항공으로 구분되며, 이 중 도로 부문이 수송 부문 전체 에너지 사용의 대부분 (2018년 94.8%)을 차지
 - ※ 수송 부문의 운송수단들은 화석연료를 주로 사용하며, 철도를 제외하고는 특히 석유 의존도가 높음
- 화석연료 기반의 내연기관차를 전기·수소차 등 온실가스를 배출하지 않는 무공해차로 전환

표26 수송부문 시나리오(안)

| | |
|----|-----------------------------------------------------------------------|
| A안 | 전체차량의 97%를 전기·수소차 등 온실가스를 배출하지 않는 무공해차로 전환하고, 차량 수명이 남은 최소한 내연기관차만 운행 |
| B안 | 전체차량의 85%를 전기·수소차 등 무공해차로 전환하되 잔여내연차는 e-fuel 등 대체 연료를 사용 |



*E-fuel 등 대체연료 생산에 필요한 전력·수소량 반영

▲ 그림67 건물 부문 에너지수요 및 온실가스 배출량 전망수송부문 에너지 수요 및 온실가스 배출량 전망
출처 : 2050탄소중립 시나리오

참고

대체연료 e-fuel(Electricity-based fuel)



출처 : 2020 vienna, Bosch

(정의) 전기분해로 얻은 수소에 탄소 등을 합성하여 생성한 합성연료

(저감 원리) 대기 중의 저농도 CO₂를 직접 분리·회수하는 기술인 DAC(Direct Air Capture, 직접 대기 포집)를 통해 확보한 탄소와 그린수소를 합성하여 E-fuel을 제조하고 이를 다시 연료로 사용한다면, 탄소재순환을 통한 탄소배출 제로화가 이론적으로 가능

나. 감축수단

1) 수요관리 강화

- 대중교통 및 자전거·킵보드 등 개인 모빌리티의 이용 확대, 화물 운송수단의 전환(도로 → 철도·해운), 공유 차량 이용 확대 등으로 2050년 승용차 통행량을 2018년 대비 15% 감소 전망

| 수송부문 주요 수요관리 수단 | |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분 | 주요내용 |
| 신속·편리한 에너지 절감형 대중교통체계 구축 | 대도시권 광역급행철도(GTX-X), 간선급행버스체계(S-BRT, BTX), BTX 등 친환경 대중교통 수단 체계 완료 |
| 대중·공공교통 이용 활성화 | 대중교통 수단 간 연계교통 강화, 버스정보시스템(BIS) 확대를 통한 버스 이용 활성화, 수요응답형(DRT)·공유교통(카셰어링) 활성화, 알뜰교통카드 이용 활성화 등 |
| 비동력 무탄소 교통 강화 | 단거리(10km 이내) 승용차 통행을 비동력 무탄소 교통수단인 보행 및 자전거, 퍼스널모빌리티로 적극적 전환 |
| 내연기관차 이용 억제 | 부제 시행, 주차요금 인상, 통행료 인상 등을 도입하여 내연차 운행에 부담 가중하여 무공해차로 전환 촉진 |

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 비대면사회 재택근무 확대 및 첨단교통체계를 통한 에너지 효율성 강화 | 월 1회 이상 재택근무 확대, 지능형교통체계(ITS) 구축 및 자율주행차 등으로 차량 이용 및 에너지 효율성 향상 |
| 화물운송 수요 전환 | 도로화물의 철도 및 연안해운으로 수단 전환 확대 |
| 화물배송 시스템 효율화 | 권역별 화물 허브, 도시 내 생활배송 시스템 연계 등 |

2) 무공해차 보급 확대

- 내연기관차를 운행단계에서 온실가스를 배출하지 않는 전기·수소차 등 무공해차로 전환
 - 무공해차의 빠른 보급을 위해 관련 기술개발 및 적재적소의 전기·수소충전소 설치 필요
- ※ 친환경차(전기·수소·하이브리드)는 2019년에 2015년 대비 3배 증가(18만 → 60만 대)하는 등 빠르게 늘어나고 있으나 비중은 2.5%로 아직 낮은 수준임



참고

친환경차의 온실가스 배출

- 친환경차는 내연기관차보다, 운행과정이나 연료생산을 포함한 전과정(LCA, life cycle assessment)에서 미세먼지, 온실가스를 적게 배출함
 - (운행과정) 전기차와 수소차는 전기를 동력원으로 사용하여 운행과정에서 오염물질이 배출되지 않는 무공해(무배출) 차량
 - (전과정) 연료생산까지 고려하는 전과정 평가에서도 친환경차는 내연기관차보다 미세먼지, 온실가스를 적게 배출
 - * 전기차는 경유차 대비 미세먼지 28%, 온실가스 49%를 적게 배출(2017년, 에너지경제연구원)
 - * 향후 재생에너지 확대 등을 고려하면 전기·수소차의 온실가스 및 미세먼지 저감효과는 더욱 증가 전망

참고

자동차 선호도 조사

- 한국교통연구원에서 2020년에 발간한 ‘미래차 기반 교통체계지원사업 2019년 성과분석’ 자료에 따르면 최근 친환경차 구매 선호도가 증가하고 있으나 여전히 휘발유 차량을 가장 선호

※ 차종별 선호도

| 구 분 | 휘발유 | 하이브리드 | 전기 | 경유 | LPG | 수소 |
|--------|------|-------|------|-----|-----|-----|
| 선호도(%) | 28.4 | 28.2 | 24.2 | 8.5 | 5.6 | 4.5 |

- 친환경차 중 전기차의 경우 확산 저해 요인으로 높은 차량가격, 충전 소요시간, 충전 인프라, 제한적인 차종, 짧은 주행거리 순으로 조사됨

3) 친환경 철도·해운·항공 전환

- (철도) 전력 기반 시스템으로의 전환 중이며, 전시 등 비상상황에 대비한 최소한 경유 차량을 제외한 모든 차량이 무탄소 동력을 이용하는 전기·수소 열차로 100% 전환
- (해운) 2050년까지 바이오연료 및 LNG 연료를 전체 해운 에너지 소비량의 30%까지 확대, 전기·수소선박 비중을 40%까지 확대, 선박에너지효율과 운항효율 개선
- (항공) 2050년까지 바이오항공유를 국내 항공유 소비량의 30%까지 확대, 전기·수소항공기 도입으로 기존 연료(항공유) 대체

참고

우리나라 친환경차 보급 정책 및 내연기관차 규제

• 친환경차 보급 정책

- 한국판 뉴딜 종합계획('20.7)에 따라 '25년까지 전기차 113만 대 보급, 수소차 20만 대 보급을 계획으로 보조금 지급, 충전인프라 구축, 세금 혜택 등 지원

표27 친환경차 구매 지원제도

(단위 : 만원, 2020년 기준)

| 구분 | | 전기차 | 하이브리드차 | 플러그인 하이브리드차 | 수소차 |
|-----------|-----------|----------------------------|--------|-------------|-------------|
| 구매 보조금 | 국비 | 605~820 | - | 500 | 2,250 |
| | 지방비 | 400~1,000 | - | - | 1,000~2,000 |
| 세금 감경 | 소계 | 최대 569 | 최대 233 | 최대 233 | 최대 712 |
| | 개별소비세·교육세 | 최대 429 | 최대 143 | 최대 143 | 최대 572 |
| | 취득세 | 최대 140 | 최대 90 | 최대 90 | 최대 140 |
| 기타 | 공영주차장 | 20~50% 할인 | | | |
| | 고속도로통행료 | 50% 할인('17.9.18~'20.12.31) | | | |

• 자동차 평균 온실가스 관리제도 시행(환경부)

- 제작(수입)사별 연간 판매차량의 평균 온실가스 배출량을 기준 이하로 유도(초과 시 과징금)

(단위: g/km)

| 분류 | '21 | '22 | '23 | '24 | '25 | '26 | '27 | '28 | '29 | '30 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10인 이하 승용·승합 | 97 | 97 | 95 | 92 | 89 | 86 | 83 | 80 | 75 | 70 |
| 승합(11~15인)·소형화물 | 166 | 166 | 164 | 161 | 158 | 158 | 155 | 152 | 149 | 146 |

• 자동차 평균 연비 관리제도 시행(산업부)

- 제작(수입)사별 연간 판매차량의 평균 연비를 기준 이상으로 유도(미달 시 과징금)

(단위: km/L)

| 분류 | '21 | '22 | '23 | '24 | '25 | '26 | '27 | '28 | '29 | '30 |
|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10인 이하 승용·승합 | 24.3 | 97 | 95 | 92 | 89 | 86 | 83 | 80 | 75 | 70 |
| 승합(11~15인)·소형화물 | 15.2 | 166 | 164 | 161 | 158 | 158 | 155 | 152 | 149 | 146 |

참고

해외 주요 내연기관차 규제 및 친환경차 보급 정책

| 주요 정책 | | 적용 국가 |
|----------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 내연기관차 규제 | 내연기관차 판매 중단 등 | <ul style="list-style-type: none"> • (EU) 노르웨이('25), 덴마크 · 네덜란드 · 스웨덴('30), 독일 · 영국('35), 스페인 · 프랑스('40) • (그 외) 인도('30), 중국('35), 대만('40), 일본('50년, 100% 전동화) |
| | 노후 경유차 운행 제한(LEZ) | <ul style="list-style-type: none"> • (EU) 노후 경유차 도심 진입 제한(런던, 파리 등) • (중국) 베이징 주변 순환도로는 Euro3 이하 노후 차량 운행 제한 |
| | 배출가스 허용기준 강화 | <ul style="list-style-type: none"> • (미국) 경유차와 휘발유차에 동일한 배출가스 기준을 적용 • (일본) 7년 이상 경유차 배출가스 기준 미충족시 운행 금지, 위반시 벌금 • (EU) 실도로 배출기준 도입, 실내인증방식 강화, 차기규제(Euro7) 도입 검토 |
| 친환경차 보급 | 친환경차 의무판매제 | <ul style="list-style-type: none"> • (미국) 캘리포니아 등 13개 주 무공해차 의무판매제 도입('05~) • (일본) 사업자 대상 '저공해 · 고연비차' 제도 시행('11~) • (그 외) 캐나다('18), 중국('19) |
| | 친환경차 협력금제 | <ul style="list-style-type: none"> • (EU) 프랑스('08~), 벨기에('08~), 스웨덴('18~) • (그 외) 싱가포르('13~) |

심화

미래 모빌리티 변화와 전망

- 현재 자동차 기술의 진화는 자동화, 연결화, 그리고 전기화로 대변되며, 모빌리티 서비스는 자동화 · 연결화 · 전기화되는 자동차 기술과 더불어 통합 모빌리티 서비스*로 진화하고 있음

* 통합모빌리티 서비스(Mobility as a Service)

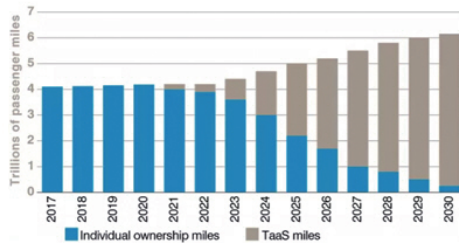
버스, 택시, 철도, 공유 자동차 등 이동 수단에 대한 정보를 통합하여 이용자에게 출발지점에서 도착지점까지 최적 경로를 제공하는 서비스 개념

| | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 자동화 | <ul style="list-style-type: none"> - 자동차 기술의 발전으로 운전자의 운전 기술에 의지하던 자동차 제어 기능이 하나둘씩 기계화 되면서, 궁극적으로는 자동차 운행의 모든 과정이 운전자의 개입 없이 이루어질 수 있는 완전자율주행으로 진화하고 있음 - 이러한 완전자율주행 자동차 기술을 가능하게 하는 기술은 자동차에 직접 설치되는 각종 센서 하드웨어와 통신기술로, 통신기술은 자율주행 자동차와 외부의 도로교통 환경, 이용자 정보를 차량과 연결하여 안전한 운행이 이루어질 수 있도록 지원하는 기술임 |
| 전기화 | <ul style="list-style-type: none"> - 모빌리티의 동력을 친환경적인 동력원으로 사용함으로써 대기환경 개선에 기여할 수 있게 함. 그러나 모빌리티의 전기화는 모빌리티 서비스 제공에 있어 동력원의 제공에 편의성을 제공하고 있음. 예를 들면 운전자가 없는 완전자율주행 자동차의 동력원 공급은 액체인 휘발유를 공급하는 방법보다는 무선 충전으로 배터리를 충전하는 방식이 효율적이기 때문임 |

- 고령인구 및 1~2인 가구 증가 등 인구구조 변화, 청년 소득 감소 등으로 자동차 이용 변화 초래함. 청년 층의 소득 감소는 자동차 판매 시장이 축소되는 반면에 자동차 공유시장은 확대할 것으로 전망

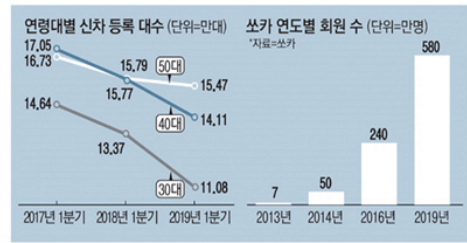
✓ **(차량공유 시장 확대 영향)** 소비자의 개인 차량 소유에서 차량 공유서비스를 선택하면 자동차 시장은 축소되고 차량 공유 시장은 지속적으로 증가 전망

- 미국의 자동차시장: '20년 2억 5천만 달러 → '30년 4,400만 달러 추정 (ACA Research)
- 미국의 차량 공유서비스 누적거리: '20년 약 4조 여객 마일(mile) → '30년 약 6조 여객 마일(mile) (미국 교통부)
- 미국의 개인 소유 차량 누적거리: '20년 약 4조 여객 마일(mile) → '30년 약 0.3조 여객 마일(mile) (미국 교통부)



〈미국의 차량 공유 서비스 채택 속도〉

자료: 미국 교통부, ReThinkX(미국 신기술 연구소)



〈국내 차량 공유 서비스 사례〉

자료: 매일경제 자료(2020.1.23.)

- 도시화 대응을 위한 교통체계 마련 필요성 증대
 - 세계 각국은 도시의 기능을 회복하기 위하여 차량과 도로의 정보를 연계하여 교통정체를 줄이고, 대중 교통 중심의 모빌리티 서비스 제공을 위해 노력
 - 개별 차량의 정보는 도로와 교통 상황을 모니터링하는 데 활용되고, 차량은 인공지능(AI)과 자율주행차 기술이 접목되어 다양한 교통 서비스 창출에 기여할 것으로 전망
 - 자동차가 각각 자동차와 도로의 정보로 연결되어 스마트시티를 구현하는 데 AI·IT 기술을 적극 활용
 - 스마트폰, 소셜네트워크(SNS), 클라우드 컴퓨팅기술과 자동차의 스마트 네트워크가 하나로 연결되어 혁신적인 교통서비스 창출 기대
- 새로운 미래 모빌리티 서비스의 적용
 - 모빌리티 서비스 분야에서는 다양한 분야의 기술이 융복합되면서 새로운 서비스가 계속 등장하고 있지만, 새롭게 등장하는 미래 자동차도 일반 자동차와 마찬가지로 생애주기별로 유지되고 있는 자동차 관련 법과 제도에 의해 운용되는 기준에 충족되어야만 운행할 수 있음
 - 서비스 구현 기술을 보유하고 있음에도 불구하고 법·제도의 미비로 인해 서비스 제공에 큰 제약이 발생할 수 있으므로 새로운 미래 모빌리티 서비스의 적용을 위해서는 기술발전 속도에 맞게 기존 법·제도의 정비, 불필요한 규제의 개선 등을 추진 할 필요가 있음

3-5. 농축수산부문 감축수단

농축수산부문 배출량

(단위 : 백만톤CO₂eq)

| | | |
|--------------|------------------|--------------------|
| 기준배출량(2018년) | 2030NDC(2030년) | 탄소중립 시나리오(2050년) |
| 24.7 | 18 (27.1% 감축) | 15.4 (37.7% 감축) |

가. 개요

- 농축산 부문은 타 부문과 달리 에너지 사용으로 인한 온실가스 배출의 비중이 작다는 특징이 있으며, 농축수산 부문 온실가스 배출량의 약 85.8%(21.2백만톤)가 농작물 재배, 가축 사육 등 농업 생산과정에서 발생하는 메테인(CH₄)과 아산화질소(N₂O)임

(단위 : 백만톤 CO₂eq)

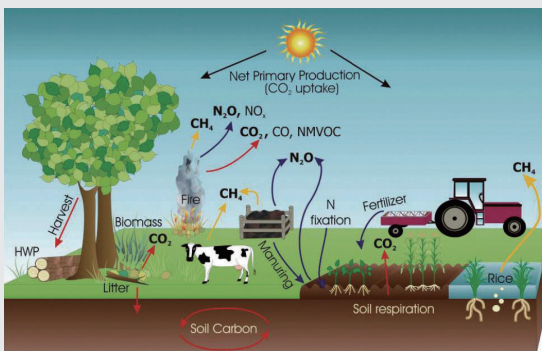
| 배출량 | 비에너지 | | | | | 에너지 (농축수산) |
|------|------|-------------------|-------|------|------|---------------|
| | 계 | 경증 ⁴¹⁾ | | 축산 | | |
| | | 벼재배 | 농경지토양 | 장내발효 | 가축분뇨 | |
| 24.7 | 21.2 | 6.3 | 5.5 | 4.5 | 4.9 | 3.5 |

▲ 그림69 농축수산 부문 유형별 온실가스 배출량, 2018년 기준

출처 : 2050탄소중립 시나리오

참고

농축산부문 온실가스 배출과정



- 작물을 재배하는 과정에서 발생하는 온실가스는 화학비료 또는 유기물 투입을 통해 주로 배출
 - 볃짚, 퇴비 등 토양에 유입된 유기물이 미생물에 의해 혐기적 분해되며 메테인(CH₄)을 배출
- 가축사육 과정에서 발생하는 온실가스는 가축의 소화기관 내 발효에 의한 메테인(CH₄)과 가축분뇨의 혐기적 분해에 의한 메테인(CH₄) 및 아산화질소(N₂O) 배출

- 농작물 잔사(찌꺼기)를 소각하는 과정에서 메테인(CH₄) 및 아산화질소(N₂O) 배출

- 농축수산 부문의 2050년 탄소중립 시나리오는 ① 식량안보 담보, ② 온실가스 감축을 통해 농어촌과 농어업의 지속가능성을 높이는 것, ③ 안전하고 건강한 먹거리를 생산·소비하는 것을 목표로 하여, 이를 달성하기 위해 가용할 수 있는 기술과 정책을 최대한 반영하여 도출

나. 감축수단

1) 연료전환

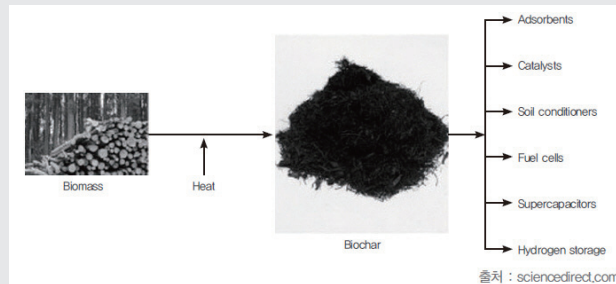
- 농축수산 시설 및 어선에서 사용되는 화석연료를 저탄소 에너지원으로 전환
 - 농기계 및 어선의 전기·수소 전환을 통해 석유(경유·등유) 수요를 전면 대체하고, 바이오매스 에너지화 등 신재생 에너지 적극 확대
- 시설원에 및 양식장, 수산물 가공공장 등 같은 고정형 시설에 공기열 히트펌프 보급 등 고효율 에너지설비 보급 및 노후 어선 대체 및 감척 등을 통한 효율화

2) 영농법 개선

- 화학비료 저감, 친환경 농법 시행 확대 등 영농법 개선으로 메테인과 아산화질소 발생 억제
 - ²⁸⁾토양검정을 통한 질소질 비료 적정량 공급으로 아산화질소 배출 감소
 - 메테인가스의 생성은 눈에 물을 가뒀을 때 일어나므로 벼 생장기 중 물이 필요 없는 시기에 논물을 빼주는 등 논물 관리 방식 개선
- 바이오차(Bio-Char) 토양개량제 보급을 통해 토양내 탄소저장 및 토양개선과 폐기물관리, 환경오염 저감 효과 발생

참고

바이오차(Bio-Char)를 통한 탄소 저장 및 토양개선



- 바이오차(Bio-Char)
 - 바이오매스(biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로 목재 등을 300~350℃ 이상의 온도에서 산소 없이 열분해하여 만든 숯 형태의 유기물로 바이오매스가 열로 분해되어 바이오차가 되는 경우 바이오매스에 고정된 탄소가 상당 부분 바이오차에 남게 되며, 미생물에 대한 분해나 화학적 변화가 거의 일어나지 않아 오랫동안 탄소를 토양 내에 저장 가능

3) 가축관리

- 가축사육 과정에서 발생하는 온실가스의 48%를 차지하는 메테인가스 및 분뇨 내 질소 감소를 위해 저메테인·저단백질 사료 보급 확대

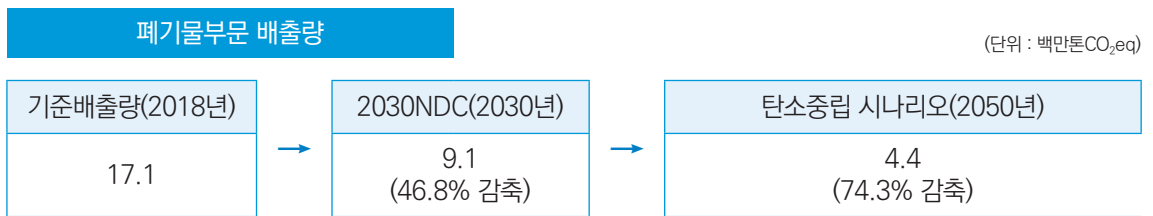
28) 과학적 근거에 의한 작물의 시비량(필요 거름양)을 결정하기 위한 사전 분석작업

- 스마트 축사 보급 등 디지털 축산 경영을 통해 가축 정밀 사양, 폐사율 감소 등 축산의 생산성 향상
- 분뇨에서 배출하는 메테인을 회수해 에너지원으로 활용할 수 있도록 가축분뇨 에너지화 시설 확대로 온실가스 발생량 35% 감축

4) 식생활 전환

- 인구구조 변화와 소득수준 향상, 식물성 단백질 선호도 증가, 대체가공식품(배양육, 식물성분 고기, 곤충 원료 등) 증가 등으로 인한 식단 변화 고려

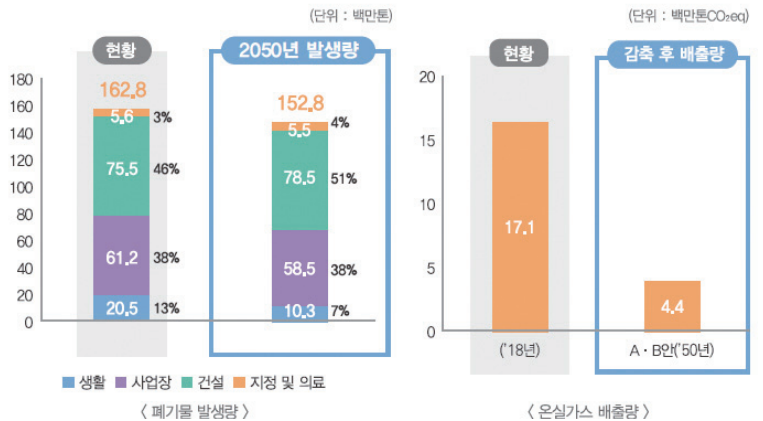
3-6. 폐기물부문 감축수단



가. 개요

- 폐기물부문은 우리나라 온실가스 총배출량 중 2.3%를 차지하며, 상당 부분은 매립과 소각처리로 인한 배출이며, 폐기물의 감량·재활용과 함께 메테인가스 등 회수를 통해 감축

※ 2050년 폐기물 발생량은 폐기물의 발생감량 및 재활용 정책을 통해 2018년 약 1억 6,280만톤에서 약 1억 5,280만톤 가량으로 감소 전망



▲ 그림70 폐기물부문 발생량 및 온실가스 배출량

출처 : 2050탄소중립 시나리오

나. 감축수단

1) 폐기물 감량 및 재활용

- 1회용품 사용제한, 음식물쓰레기 감축, 재생원료 사용 의무화 등으로 폐기물 감량 및 재활용을 통하여 온실 가스를 발생시키는 폐기물의 소각과 매립량을 최소화

- 2050년에 폐기물 감량을 25%, 재활용률 70~94% 달성 예상

| 구 분 | 감량 및 재활용률 | |
|---------|-------------------|---------------------|
| | 감량률* | 재활용률** |
| 생활 폐기물 | '50년 기준 전량 대비 25% | '18년 62% → '50년 90% |
| 사업장 폐기물 | | '18년 82% → '50년 94% |
| 지정 폐기물 | | '18년 66% → '50년 70% |

* 감량률 목표는 온실가스를 배출하는 폐기물 중심으로 적용(온실가스 발생폐기물 비율이 낮고 재활용률이 높은 건설폐기물과 특수성을 감안한 의료폐기물은 감량률 적용 제외)

** 재활용률에 페플라스틱 유화·가스화 등 新 재활용 수단 포함하여 전체

• 생산·유통·소비 전 과정에서 폐기물 대폭 감축 및 재활용 확대

| | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 제품 생산 | 생산자 책임을 강화하여 일회용품 생산·판매를 대폭 축소하고 재활용이 용이한 제품의 생산은 확대하며, 바이오 소재 플라스틱 기술개발과 보급에 주력 |
| 제품 유통 | 포장재 폐기물 발생을 획기적으로 저감할 수 있도록 다회용 포장재 활용 의무화, 과대포장 금지, 보증금 대상 확대정책 등을 추진 |
| 제품 소비 | 제품의 내구성과 수리가능성을 강화하는 등 지속가능형 제품을 확산시키는 한편, 중고거래 및 업사이클링 문화의 활성화 |

- 플라스틱, 음식폐기물 등 온실가스를 발생시키는 폐기물 중 성상의 특성으로 인해 재활용이 불가능하거나, 이물질로 인해 재활용이 불가능한 경우도 직접 매립을 하는 대신 소각 과정을 반드시 거치도록 하여 최종 폐기량을 최소화하고, 소각과정에서 발생하는 열은 지역난방 등과 연계하여 에너지 활용을 극대화
- 재생원료의 품질개선과 사용 의무화, 자원효율적 생산공정 개선, 건설현장 분별 해체 의무확대 등 산업·건설 현장에서 천연자원 사용을 줄이고 순환자원을 이용하는 순환경제체계 구축

2) 바이오 플라스틱

- 2050년에는 최종처리 단계에서 추가적인 온실가스를 배출하지 않는 바이오매스 기반 바이오 플라스틱²⁹⁾ 소재 개발 및 제도개선을 통해 생활 및 사업장 플라스틱의 47%를 바이오 플라스틱으로 대체 가능

3) 바이오가스 에너지 활용 및 매립지 준호기성 운영 강화

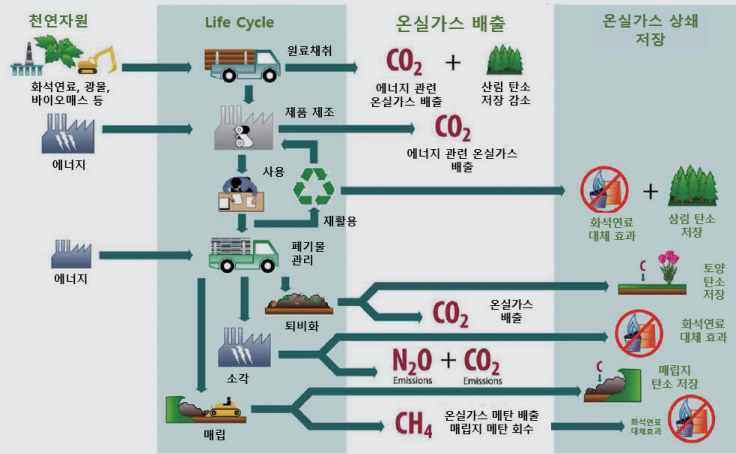
- 매립지 및 생물학적 처리시설에서 발생하는 메테인을 회수하여 메테인가스 발전 및 메테인가스 연료 대체 사용 등 재생에너지로 활용함으로써 폐기물 부문 온실가스 감축에 기여
- 메테인가스 회수가 어려운 매립지는 침출수 배수 시스템 등으로 매립지를 준호기성 상태로 유지하여 메테인 발생을 최소화하여 온실가스 감축

29) 식물 유래 자원 바이오매스 원료를 이용하여 생산된 플라스틱을 바이오 플라스틱이라 함. 분리가 어렵거나 이물질 등으로 재활용이 곤란한 플라스틱은 소각처리가 불가피하나 바이오 플라스틱은 이산화탄소를 흡수하여 성장한 식물을 이용하기 때문에 소각 등으로 처리하여도 추가적인 이산화탄소 배출을 발생시키지 않음. (IPCC에서도 바이오매스 연·원료 사용시 온실가스 배출량에서 제외 인정)

심화

순환경제

- (개념) 물질과 천연자원의 소비를 줄이고, 제품의 전과정(life cycle) 측면에서 최대한 자원을 활용하고 환경부하를 최소화하는 자원순환과 에너지 선순환에 초점을 둔 시스템
 - 자원순환성을 고려하여 친환경 제품을 설계하고, 폐기하는 과정에서 폐기물 발생을 최소화하기 위한 수리, 재사용, 재제조 또는 에너지원으로 활용하여 매립과 소각을 최소화



▲ 그림71 자원과 제품 생산, 온실가스 배출과 감축

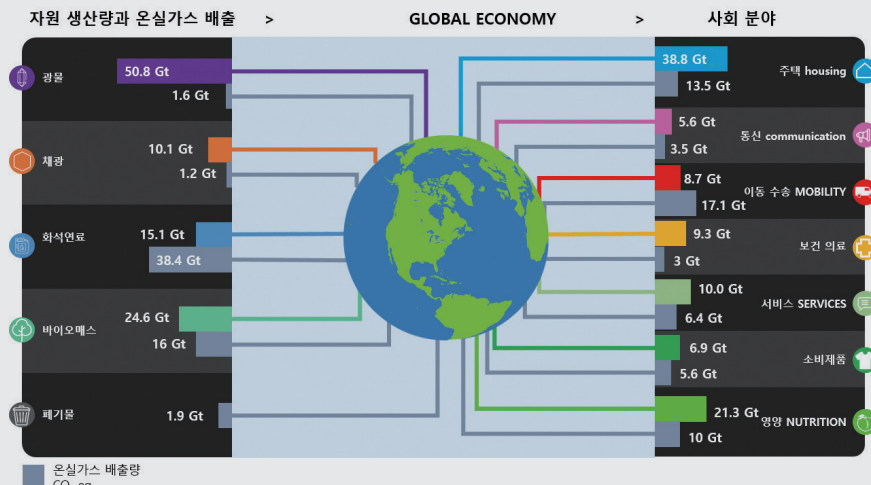
- (효과) 재생원료의 안정적 확보 가능, 천연자원의 고갈 예방, 폐기되어 처리되는 폐기물의 양 감소로 매립과 소각으로 인한 환경오염 저감효과 발생
- 순환경제 모델

표28 순환경제 모델

| | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 회수-재활용 모델 | 수명이 다한 제품을 회수하여 재활용한 후 재생원료를 생산하거나 에너지로 회수하는 것 |
| 제품의 수명 연장 모델 | 제품의 수리, 업그레이드, 재제조, 재사용을 위한 판매 등을 통해 기존 제품의 성능과 기능을 감소시키지 않으면서 제품을 다시 사용하는 것 |
| 순환 공급망 모델 | 비용 절감과 지속 가능성을 염두에 두고, 재생 가능한 자원과 재생원료, 재생분해 가능한 물질을 최대한 확보하여 기업체에 공급하는 것 |
| 공유 플랫폼 모델 | 디지털 기술을 활용하여 유휴 제품을 빌려주거나 교환, 대여하는 모델로서 유휴 자원을 최대한 공유함으로써 자원의 활용성을 극대화하여 그 가치를 창출할 수 있음 |
| 제품 서비스 모델 | 소비자가 제품을 소유하지 않고 대여하거나 사용한 정도에 따라 그 비용을 지불하는 것. 예를 들어 세계적인 가전업체 필립스는 서비스로서의 LED 조명을 사용 정도에 따라 소비자에게 비용을 청구하는 방식을 도입하고 있음. 태양광 업체인 솔라시티(Solar City)는 고객들이 태양광 패널을 구매하지 않고, 에너지 사용에 따라 지불할 수 있도록 태양광 발전 시스템을 제공하고 있음 |

• 순환경제 구축을 통한 탄소중립

- 2021년 Circularity Gap 보고서에 따르면 전체 온실가스 배출량의 약 70%는 물질과 천연자원 채취, 제품 생산과 소비와 연관되어 있으며, 스마트 전략과 자원소비 절약을 통한 순환경제 구축 시 전 지구적 온실가스 배출량의 약 39% 감축이 가능하고, 천연자원 사용을 28% 대체하는 효과가 있음(Circle Economy, The Circularity Gap report, 2021)
- 아래 그림은 전 지구적 규모에서 자원 투입(input) 단위에서의 다양한 자원 생산량과 온실가스 배출량, 그리고 산출(output) 단위에서의 사회 분야의 영역별 자원 소비량과 온실가스 배출량을 나타낸 것임



▲ 그림72 제품과 폐기물 관리에 따른 온실가스 배출과 감축

출처 : Circle Economy, The Circularity Gap report, 2021

3-7. 수소부문 감축수단

수소부문 배출량

(단위 : 백만톤CO₂eq)

| | | | | | |
|--------------|---|----------------|---|------------------|-----|
| 기준배출량(2018년) | → | 2030NDC(2030년) | → | 탄소중립 시나리오(2050년) | |
| - | | 7.6 | | [A안] | 0 |
| | | | | [B안] | 9.0 |

가. 수소 수요 및 공급

- 탄소중립 시대에 수소는 전력발전, 산업공정의 원료와 연료 사용 등에 따라 수요가 증대되며, 수소 공급에 따른 온실가스 배출 최소화를 위해 원칙적으로 재생에너지 전기를 활용하여 생산한 수전해 수소(그린 수소)로 공급되어야 함

참고

수소 생산방식

- 수전해 수소(그린 수소)
 - 전기화학 반응에 기인한 물 분해 방식으로 물에 전기를 가하여 생성하는 수소로, 수소 생산시 부산물로 온실가스가 배출되지 않음
- 추출 수소
 - 천연가스, 석탄, 석유 등 탄화수소계 화석연료를 활용하여 촉매 반응으로 추출하는 수소로, 생산 과정에서 온실가스를 일부 배출
- 부생 수소
 - 석유화학 공정이나 제철 공정에서 화학반응에 의해 부수적으로 생산되는 수소로, 생산 과정에서 온실 가스를 배출

- 2050년 수소수요는 전환, 산업, 수송 등에 필요한 양을 감안하여 27.4~27.9백만톤으로 추정 (단위 : 백만톤)

| 부문 | 주요내용 | 2050년 | |
|------|-----------------------------|-------|-------|
| | | A안 | B안 |
| 합 계 | | 27.4 | 27.9 |
| 전환 | 수소기반 전력발전 | 14.2 | 13.5 |
| 산업 | 수소환원제철 등 산업공정에서 사용되는 원료와 연료 | 10.6 | 10.6 |
| 수송 | 수소차 확대 보급, 대체연료 생산 | 1.5 | 2.2 |
| 농축수산 | 농기계, 어선 등 연료전환 | 0.003 | 0.003 |
| CCUS | CCU화학적 전환 | 1.0 | 1.6 |

(A안) 국내 생산 수소를 100% 수전해 수소(그린수소)로 공급

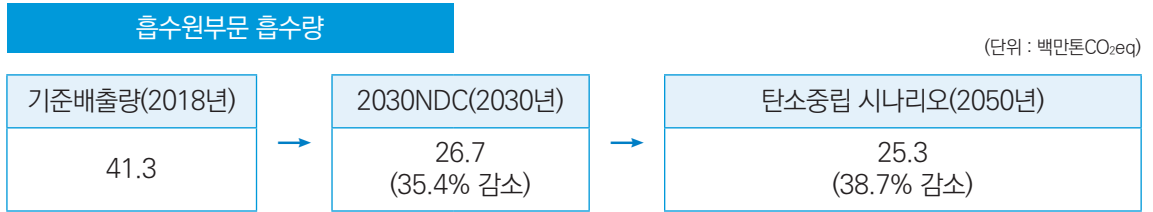
(B안) 국내 생산 수소일부를 추출수소 또는 부생 수소로 공급

- 현재 전망으로는 수소 수요를 감당할 정도의 재생에너지 국내여건이 충분하지 않아 탄소중립 시나리오에서는 80% 이상의 수소는 외국에서 재생에너지로 생산한 수소를 수입하는 것으로 가정
 - 다만, 에너지효율의 추가개선을 통해 수소 수요를 줄이고, 규제혁신과 부유식해상풍력발전기 대량 설치 등 기술개발을 통해 수전해 수소(그린 수소)의 국내생산 대폭 확대 가능

나. 감축수단

- 1시나리오 A안에서 국내생산수소는 모두 수전해 수소(그린 수소)이므로 온실가스가 배출되지 않으나, 시나리오 B안(추출·부생 수소 생산)은 LNG에서 수소를 추출하는 과정에서 LNG에 포함된 탄소로 인해 9.0백만톤의 온실가스 배출 전망
- 다만, 추출수소 생산 시 발생하는 온실가스 배출량은 전량포집하여 처리한다면 순배출 제로 가능

3-8. 흡수원부문



가. 개요

- 탄소중립을 달성하기 위해 온실가스 배출을 줄이는 것과 더불어 자연의 온실가스 흡수능력 제고 필요

참고

토지이용으로 인한 온실가스 배출과 산림의 이산화탄소 흡수

- 기후변화와 토지특별보고서에서는 토지이용으로 인한 온실가스 배출이 총배출량의 23%에 달하는 것으로 보고하였으며, 세계자연보전연맹(IUCN)은 세계 이산화탄소 배출량의 약 25%가 토지 부문에서 발생하는 것으로 보고함
- 세계자연보전연맹에 따르면 지구의 산림면적은 전체 육지 면적의 1/3 정도이며, 매년 약 26억 톤의 이산화탄소를 흡수하여 기후변화 대응에 기여
- 세계 산림면적을 2030년까지 매년 24백만ha 증가 시 산업화 대비 1.5℃ 상승을 제한하기 위해 필요한 탄소의 1/4을 저장 가능(IPCC, 2018)

- 자연의 탄소흡수원 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 산림이며, 국제사회에서는 이외에 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타 토지를 온실가스 흡수원으로 보고 이들을 ‘토지이용, 토지 이용변화 및 임업(LULUCF: Land Use, Land Use Change and Forestry)’ 범주로 묶어 온실가스 산정체계에 포함

표29 '18년 LULUCF 분야 온실가스 배출·흡수량

(단위 : 백만톤CO₂eq)

| 분야 | 부문 | | | | 배출·흡수총량 | | 순흡수량 |
|--------|--------|------|--------|-----|---------|--------|--------|
| | 산림지 | 농경지* | 초지 | 습지* | 배출 | 흡수 | |
| LULUCF | - 45.6 | 4.0 | - 0.02 | 0.3 | 4.3 | - 45.6 | - 41.3 |

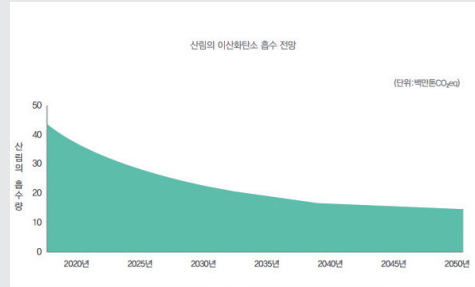
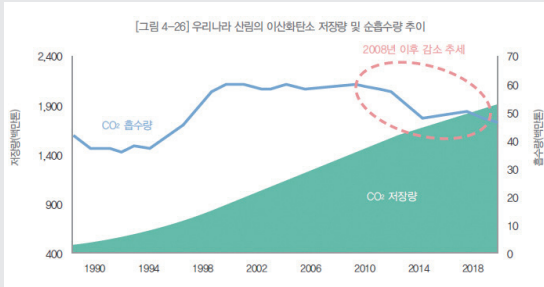
* 음수는 흡수, 양수는 배출. 농경지와 초지에서는 배출하는 것으로 나타남

참고

산림 흡수원 전망

- 우리 산림은 1970~1980년대 집중 조림의 영향으로 31~50년생 숲이 전체 산림의 2/3를 차지하는 불균형적인 나이 분포를 보이고 있음
- 숲의 평균 나이가 증가하면서 연간 순흡수량은 1990년대 이후 빠르게 증가하다 2008년 이후 감소추세 - 축적되는 전체 나무의 부피는 증가하나 연 나무부피 증가율은 빠르게 감소, 6영급(51년생) 이상 산림 면적이 급격히 증가* * 6영급 이상 산림면적 비율(%): (2020) 10.2 → (2030) 32.7 → (2050) 72.1
⇒ 산림의 상태와 목재생산 계획을 반영할 경우, 2050년에는 현재 탄소 흡수량의 약 30% 수준으로 감소 전망

출처 : 2020 국가온실가스 인벤토리보고서(온실가스종합정보센터, 2020)



나. 흡수원 확보 수단

1) 산림

- (흡수능력 강화) 숲가꾸기를 확대하고 탄소흡수능력, 생태계 영향 등을 종합적으로 고려하여 미래수종을 선정하여 숲의 지속가능성 증진을 위한 산림순환경영³⁰⁾ 강화
- (탄소흡수원 확충) 유휴토지에 숲을 조성하거나 도시숲을 늘려가는 등 신규 조림을 확대하고, 조성한 숲을 잘 관리
 - 섬 지역 산림, 산림훼손지 등에 대한 생태복원사업을 실행하고, 산불, 산사태, 산림병해충 등 온실가스 배출 요인이 되는 재해를 예방하고 피해를 최소화
 - 미세먼지 차단숲, 도시바람길숲 등 생활권 숲 조성 확대를 통한 흡수원 신규 확충
- (목재 사용) 수확한 목재(HWPs: Harvest Wood Product)는 자연적인 탄소저장고(natural CCS)이며, 저장수명이 긴 제품이므로 이를 이용하여 탄소 저장량을 증대
 - ※ 국산목재 이용은 온실가스 흡수량 산정 시 포함되며, 이의 확대를 위해서 공공건축물 등 공공부문의 이행 노력이 필요

30) 나무를 심고-가꾸고-수확하여 지속가능하게 이용함으로써 경제·사회·환경적 부가 가치를 창출하는 것

심화

국내 목재수확 및 이용현황

- (목재수확) 국내 산림자원량(축적)은 풍부해졌으나 국산목재의 효율적 이용 부족
 - (수확비율) 수확량은 증가 추세이나 여전히 자원량의 극히 일부 이용
 - 연간 평균 목재수확량은 전체 산림자원량(축적)의 0.5%*에 불과하며, 매년 증가하는 산림자원량 축적생장량, 2000만^m의 25% 수준에 그침
 - * '20년 기준 산림자원량(임목축적) : 1018백만 ^m / 목재수확량 5.2백만 ^m
 - (이용현황) 국산 원목을 대부분 부가가치가 낮은 칩 또는 보드류로 활용
 - 국산재 : 건축재 13%, 가구재 34%, 펄프재 13%, 연료재 34%, 기타 6%
 - 수입재 : 건축재 55%, 가구재 5%, 펄프재 4%, 연료재 5%, 기타 31%

* 출처 : 산림청, 2020년 목재이용실태조사

2) 해양

- 해양생태계에 저장되는 탄소를 블루카본이라 하며, 식물의 광합성이나 직접흡수로 대기 중 온실가스를 흡수
 - ※ 특히, 연안공간은 광합성 뿐 아니라 토양에 유입된 유기탄소가 분해되지 않고 축적되는 환경을 제공하므로 식생과 토양에 저장된 탄소를 장기적으로 보존
- 연안습지(염습지, 해초대), 바다숲, 갯벌 등을 신규 조성하고, 오랫동안 축적된 탄소가 다시 대기 중으로 배출되지 않도록 연안습지 보호 및 복원을 통해 흡수원 유지 필요

3) 댐, 하천 등 활용 흡수량 확보

- 댐, 유역 등 흡수조절 기능을 하고 있는 흡수터에 생태복원 및 생태마을을 조성하여 탄소흡수 기능을 강화하고 부유물 중 목분류(나무)를 활용하여 바이오차 생산, 유희수면에 수질개선을 위한 인공수초섬을 설치하여 탄소흡수기능 증대 가능
- 하천의 치·이수 기능을 가진 저류지의 고유기능을 유지하면서 이용 가능한 부지에 생태공간을 조성하고, 4대강 유역의 수변구역에 수변녹지 및 수변 생태벨트를 조성하며, 하천 주변 이용도가 낮은 친수공원과 4대강 보 개방으로 증가되는 수변공간의 자연성을 회복시키는 등의 노력을 통해 탄소 흡수기능을 확보

4) 초지 및 도시지역 녹지 활용

- 초지의 불법 전용을 방지하고, 초지의 보전 및 확대를 위한 방안을 마련
 - ※ 2019년 기준 전체 초지 면적은 32,788ha로 산림환원, 농업용지 및 각종 개발사업 등에 의한 전용으로 1995년 이후 지속적으로 감소 추세
- 각종 도시 관련 사업 진행 시 녹지를 보전·조성·복원하는 노력* 필요
 - * 그린벨트 환경문화·생활공원 조성, 신규 택지개발 사업 구간 내 녹지, 재개발·재건축 사업구간 내 녹지 조성 등
- 정주지(Settlements)의 온실가스 산정체계* 마련으로 LULUCF 온실가스 통계 완결성 제고
 - * 정주지의 온실가스 산정은 미산정(NE: None Estimated)임

3-9. CCUS부문

| CCUS부문 처리량 | | | (단위 : 백만톤CO ₂ eq) |
|---------------|----------------|------------------|------------------------------|
| 기준 처리량(2018년) | 2030NDC(2030년) | 탄소중립 시나리오(2050년) | |
| - | -10.3 | [A안] | -55.1 |
| | | [B안] | -84.6 |

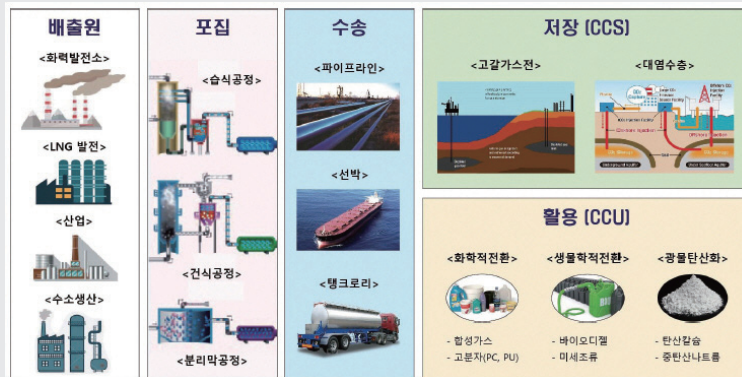
가. 개요

- 현재 CCUS 기술은 전 세계적으로 시장이 활성화되기 시작하는 단계로, 글로벌 CCUS 시장은 연평균 4.6% 성장 중이며, 2020년 27억 달러 규모에서 2025년에는 33억 달러 규모로 성장할 것으로 예상됨³¹⁾
- 국내는 아직 CCUS 관련 시장은 형성되지 않았으나, 탄소중립 추진에 따라 CCUS 기술수요 및 기업 관심도가 높아지면서 유망한 분야로 주목받고 있으며, 2050년 CCUS를 통해 감축할 수 있는 온실가스(CO₂)의 양은 약 8,518만톤으로 전망
 - ※ 최대 처리 가능량은 시나리오 A, B안 모두 8,518만톤으로 동일하나, 시나리오별로 타 부문 배출량에 따라 필요량을 산정하여 A안은 55.1백만톤, B안은 84.6백만톤으로 반영
 - ※ CCUS에 필요한 에너지는 전량 신재생에너지로 생산되어 CCUS에 따른 배출량은 없는 것으로 가정

참고

이산화탄소 포집 및 저장·활용(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)

- ① 발전소, 산업시설 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 농축·압축한 후 수송 과정을 거쳐
- ② 육상 또는 해양지층에 안전하게 저장(CCS)하거나,
- ③ 포집된 이산화탄소를 이용하여 다양한 화학 제품, 연료 및 원료물질, 탄산칼슘 등 인간의 삶에 유용한 제품으로 전환하여 활용(CCU)함으로써 온실가스 감축에 기여하는 기술



▲ 그림73 CCUS 개념도

출처 : 2050탄소중립 시나리오

31) 「2020 BCC Research」, 2020

나. 주요 확보수단

1) 이산화탄소 포집 및 저장(CCS)

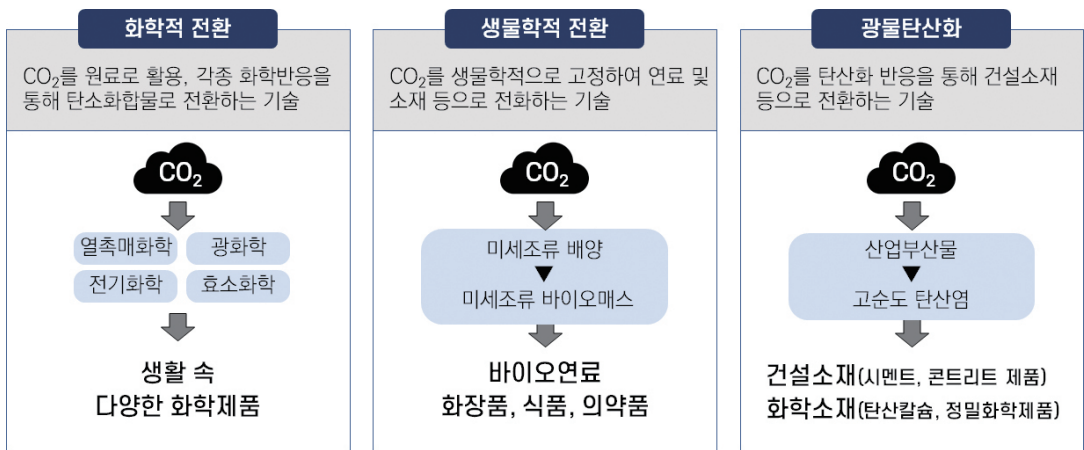
- 국내외 저장소를 활용하여 연간 최대 6,000만톤을 처리할 수 있을 것으로 예상
 - 한반도 주변 해저지층 등을 분석한 결과 국내 저장 가능 규모는 약 10억톤 내외로 예상되며, 이를 기초로 2050년에는 연간 최대 3천만톤의 온실가스를 국내 저장소에 처리할 수 있을 것으로 전망
 - 국외 저장 가능 규모는 정부와 기업 등이 적극적으로 관련 국가 등과 협력하여 해외 저장소*(10억톤 규모)를 개발 활용한다는 전제하에 연간 약 3천만톤의 온실가스를 처리할 수 있을 것으로 전망

* 한중일 공동수역, 호주, 동남아, EU, 북미 등

- 탄소중립을 위해 실제 필요한 CCS량은 시나리오 A안에서 연간 3,880만톤, B안은 5,960만톤 예상

2) 이산화탄소 포집 및 활용(CCU)

- 화학적 전환, 생물학적 전환, 광물 탄산화 기술을 이용하여 이산화탄소를 유용한 물질로 전환하여 활용하는 것으로 2050년에는 연간 2,518만톤의 온실가스를 처리 가능
- 탄소중립을 위해 실제 필요한 CCU량은 시나리오 A안에서 연간 1,630만톤, B안은 2,500만톤 예상



▲ 그림74 CCU세부기술

출처 : 산업통상자원부

4. 탄소중립과 핵심기술 개발

■ 누적 탄소배출량에 따른 점진적 기후반응 이해

- 이산화탄소를 배출하지 않고 깨끗하고 안전한 에너지를 공급하는 태양광, 풍력, 수소, 바이오에너지 등 신재생에너지 기술

■ 산업 부문 핵심기술

- 철강/시멘트/석유화학/반도체/디스플레이 등 우리나라 주요 산업 부문에서 사용 중인 화석연료와 원료를 친환경 연료와 원료로 대체하는 기술

■ 수송 및 건물 부문 핵심기술

- 환경 차세대 이동수단인 전기·수소 모빌리티와 건물의 단열, 냉난방 기기효율화, 건물에너지 최적화 등 제로에너지건물 기술

■ 탄소흡수 부문 핵심기술

- 발전소나 공장에서 배출되는 이산화탄소를 포집하고 이를 유용한 물질로 활용하는 이산화탄소 포집·활용·저장 기술

■ 부문 공통 핵심기술

- 전환·산업·수송·건물 등 전 부문에 걸쳐 에너지 소비를 최소화하고 효율을 최대화하는 에너지효율 향상 기술



[핵심기술이 적용된 2050 탄소중립 사회]

4-1. 에너지전환 부문 핵심기술

가. 태양광 고효율화

[태양광] 발전시스템(태양전지 셀, 모듈, 축전지 및 전력조정기, 직교류 변환장치 등)을 이용하여 태양 빛 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 기술

- 이산화탄소를 배출하지 않고 깨끗하고 안전한 전기 공급의 핵심 에너지원인 태양광 기술의 차세대 초격차 기술개발 추진
 - 우리나라가 차세대 태양전지 기술을 먼저 확보하여 차세대 태양광 산업을 이끌고 글로벌 시장의 선점 필요
 - 현재 태양광 발전시장의 95%를 차지하고 있는 실리콘 태양전지 시장은 중국 기업들의 저가화 공세로 인해 수익성이 악화
 - 실리콘 태양전지의 이론적인 최대 효율은 30% 수준으로 이를 뛰어넘는 초고효율 태양전지('50년 목표 40%) 기술개발 추진
 - 우리나라의 좁은 국토면적을 고려할 때 탄소중립을 위한 도시형 태양광 기술개발이 필요함에 따라 별도의 공간에 태양광 발전소를 짓지 않고 건물 지붕, 창호, 방음벽 등 도시의 다양한 공간에 적용할 수 있는 유연하고 가벼우며 투명하거나 색상이 다양한 태양전지 기술개발 추진

표30 빌딩 내 태양전지 적용 사례



건물외벽에 컬러 태양전지가 적용된 양천구 세신교회



한국 최초 에너지 주택단지
노원구 EZ센터

나. 풍력 대형화

[풍력] 바람의 운동에너지를 로터 블레이드에서 흡수, 기계적 에너지로 변환하여 전력을 생산하는 발전 기술

- 육상과 해상의 풍력 발전단지를 통해 청정에너지를 지속적으로 공급할 수 있도록 풍력발전 핵심기술의 국산화 추진
 - 10MW급 이상 대형 풍력발전기 핵심 부품의 높은 해외 의존도와 세계풍력발전기 대형화 추세에 대응
 - 풍력발전은 베스타스(덴마크), 지멘스(독일), GE(미국) 등의 기업들이 우위를 선점하고 있으며, 핵심부품 국산화 비율도 60% 수준으로 대형 블레이드 등 핵심부품 기술을 국산화하고, 대형 풍력발전 시스템 및 부유식 풍력 발전기 개발이 필요
 - 단위 풍력발전기와 풍력발전단지의 신뢰성 및 경제성 향상
 - 1년 내내 고르게 바람이 부는 해상지역에 비해 우리나라는 복잡지형(산지 등)으로 인해 육상 풍력 발전기의 고장률이 증가하고 있어 풍력발전기의 수명을 늘릴 수 있는 기술개발 추진
 - 육·해상 풍력발전을 통해 생산된 전기를 사용자들에게 전달하는 전력망의 부족으로 생산된 전기가 일부 버려지고 있어 전력 계통 안정성을 확보하기 위한 기술개발도 추진

다. 수소 전 주기 기술

[수소] 물, 유기물, 화석연료 등의 화합물 형태로 존재하는 수소를 분리, 생산하여 활용하는 기술

- 무탄소 전기를 공급하고 산업공정과 수송 분야에서의 화석연료(석탄, 석유 등)를 대체할 수 있는 수소 생산/저장·운송/활용 등 전주기 기술개발 추진
 - 수소를 생산하는 과정에서 이산화탄소의 배출이 없도록 블루수소³²⁾ 및 그린수소³³⁾를 중심으로 생산가격을 낮추고(현재 그린수소 기준 1만3,000원/kg → 2040년 2,500원/kg) 대량 생산할 수 있는 기술개발 추진
 - 수소 생산 단지에서 만들어진 수소를 전국 곳곳에 대량으로 공급할 수 있도록 수소를 저장하고 운송하는 기술 개발도 추진
 - 가정이나 건물 자체에서 에너지를 생산하고 이용할 수 있는 분산발전원으로 오래 사용할 수 있고 효율이 높은 연료전지 발전시스템 개발 추진

32) 천연가스를 개질하여 생산하는 그레이 수소는 다량의 이산화탄소를 배출하고 있고, 그레이 수소 생산 과정에서 배출되는 CO₂를 포집해 온실가스 배출을 줄인 수소를 블루 수소로 구분

33) 천물을 재생에너지를 이용해 생산된 전기를 이용해 분해하여 수소를 생산하고, 생산 과정에서 최종적으로 수소와 산소만 배출되는 친환경 그린 수소

라. 바이오에너지 연료화

[바이오에너지] 바이오매스(유기성 생물체)를 직접 또는 생화학적·물리적 변환과정을 통해 액체, 가스, 고체연료를 생산하여 열·발전 또는 수송용 연료로 활용하는 기술

- 전기와 열을 생산하고, 자동차, 선박, 항공 등 수송 분야에서 사용하고 있는 화석연료를 대체할 수 있는 바이오 연료 기술개발 추진
 - 현재 이용 중인 화석연료와 비교해 동등한 품질을 가지면서 더 저렴하게 공급할 수 있는 바이오 휘발유, 바이오 선박유, 바이오 항공유 등 수송용 바이오연료 기술개발
 - 볏짚, 왕겨 등 농산·목재 부산물 등 임산·음식물 쓰레기와 같은 도시폐기물 등 국내 미활용 바이오 매스를 이용해 바이오연료를 대량 생산

4-2. 산업분야 핵심기술

가. 철강산업

- 철강산업에서 사용 중인 화석연료 및 원료들을 저탄소연료 및 원료로 대체하는 기술개발
 - 제철과정에서 사용하는 다량의 화석연료(코크스 등) 대신 수소를 100% 사용하는 수소환원제철 기술을 개발하고, 수소와 암모니아 같은 무탄소 연료 및 원료를 이용할 수 있는 기술개발 추진
 - 철강산업에서의 탄소중립 실현을 위해서는 재생에너지 기반 전력을 이용한 전기로 확대가 필요하며, 고철, 폐플라스틱 등 폐자원을 활용하여 이산화탄소 발생을 줄일 수 있는 자원순환형 전기로 공정 기술개발도 추진

나. 시멘트 산업

- 석회석 채광부터 시멘트 생산까지 시멘트 산업 전반의 탄소저감형 친환경 시멘트 제조 기술개발 추진
 - 시멘트 산업에서 온실가스 배출은 석회석과 같은 원료의 탈탄산 반응에 의한 배출이 60%로, 석회석을 대체하는 원료를 사용해 공정배출의 이산화탄소를 줄일 수 있는 기술개발 추진
 - 시멘트 산업에서 사용 중인 화석연료 대신 가연성 순환자원을 활용하는 기술개발과 함께 수소, 바이오 에너지 등 친환경 열원을 공정에 활용하는 기술개발도 추진

다. 석유화학 산업

- 새로운 화학산업 구축을 위해 석유화학 산업 전 과정에서의 혁신적인 탄소 감축 기술개발 추진
 - 석유화학 산업의 원료를 바이오매스, 폐플라스틱 등 무탄소 또는 저탄소 원료로 대체하여 현재 사용하고 있는 석유화학 기반 제품들을 동일한 가격으로 제조할 수 있는 기술개발 추진
 - 석유화학 공정과정에서 필요한 화석원료 기반의 고에너지 소비를 재생에너지와 연계하여 에너지 소비와 탄소배출을 최소화하는 혁신 공정 기술개발 추진

라. 반도체/디스플레이 산업

- 반도체/디스플레이 산업 공정에서 직접 배출되는 이산화탄소에 비해 수백~수만 배의 지구온난화지수³⁴⁾를 가진 공정가스(PFCs, SF₆ 등)를 제어하기 위한 기술개발 추진
 - 자동차, 재생에너지 등 전력 반도체 수요 증가와 유기발광다이오드(OLED) 인기에 힘입어 공장 증설로 인해 대량 발생하는 공정가스 배출을 제어할 수 있는 기술개발 추진
 - 현재 사용 중인 지구온난화지수가 높은 공정가스를 대체할 수 있는 친환경 대체가스 기술개발과 함께 개발된 신규 대체가스의 효과를 검증하고 인증할 수 있는 기술개발 추진

마. 산업효율 개선

- 단위 기기, 공정, 공장 등 산업 현장에서 에너지효율 개선을 위한 기술개발 추진
 - 산업 부문에서 에너지를 많이 쓰는 전동기기, 열원기기 등 에너지 다소비 기기의 효율을 향상하고, 산업용 히트펌프³⁵⁾는 폐열 등 다양한 열원을 이용한 하이브리드시스템 기술개발 추진
 - 공정 효율 최적화를 통해 에너지 자원의 효율적 관리와 제어 가능한 FEMS³⁶⁾ 기술을 개발하고, 시뮬레이션을 통해 실제 공정에 적용하기 전에 최적화 방안을 제시할 수 있는 기술개발 추진

4-3. 수송 및 건물 부문 핵심기술

가. 무탄소 차세대 수송 기술

- 승용차, 상용차, 철도, 선박 등 탄소배출이 없는 차세대 모빌리티 기술개발 추진
 - 현재 상용화된 리튬이온 이차전지를 뛰어넘는 차세대 배터리, 고출력 시스템, 사용하기 편리한 충전 인프라 구축을 위한 기술개발 추진
 - 수송 부문 이산화탄소 배출량의 22.5%가 중·대형 상용차, 트럭 등에서 발생하고 있으므로 다양한 모빌리티(상용차, 철도, 선박 등)에 친환경 연료인 수소를 활용할 수 있도록 내구성 강화된 연료전지 개발과 함께 핵심 소재·부품의 국산화 기술 확보 추진

나. 탄소중립 건물 구현 기술

- 건물 단열, 차세대 냉난방 기술, ICT 기반의 에너지 관리를 통한 운영 최적화 등 제로에너지건물³⁷⁾ 경제성 확보와 건물에너지 효율 향상 기술개발 추진
 - 2025년부터 모든 신축 건축물을 제로에너지건물로 의무화하는 등 건축물의 에너지 소비량 기준이 강화됨에 따라 건물의 에너지 소비 최소화가 필요

34) 이산화탄소를 기준인 1로 두고 다른 온실가스가 지구온난화에 영향을 주는 정도를 나타낸 수치, Global Warming Potential(GWP)

35) 저온의 열원을 고온으로 전달하거나 고온의 열원을 저온으로 전달하는 냉난방 장치

36) 공장에너지관리시스템, Factory Energy Management System

37) 단열기밀 성능강화를 통해 건축물 에너지사용량을 저감(패시브)하고, 태양광 등 신재생에너지설비로 에너지 생산(액티브)을 통해 에너지소비를 최소화하는 건축물

- 단열재, 창호 등 건물 외피 성능을 향상시키고, 건물 내부에 거주하는 사람들에 의해 사용되는 에너지를 줄이기 위해 냉난방 기기 등 이용 설비 및 기기의 효율을 향상시키는 기술개발 추진
- 건물의 에너지사용 최적화와 함께 실내 거주자의 만족도를 극대화할 수 있게 건물 전체의 에너지·환경 데이터를 기반으로 에너지 성능을 평가하고 예측하며, ICT 기반으로 건물 및 커뮤니티 운영을 최적화할 수 있는 통합 플랫폼 기술개발도 추진

4-4. 탄소 처리 및 흡수원 핵심기술

가. 이산화탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 상용화 기술

- 불가피하게 배출되는 이산화탄소의 배출을 포집하여 심부 지층에 안전하게 저장하거나 포집된 이산화탄소를 전환하여 활용하는 기술개발 추진
 - 발전소, 산업 등 온실가스 배출원별로 이산화탄소를 최적으로 포집할 수 있는 기술을 개발하고, 대규모 포집 실증을 통해 비용을 절감할 수 있는 기술 확보 추진
 - 이산화탄소 수송 및 저장 과정에서의 발생 가능한 위험요소(누출, 지형변화, 환경오염 등)를 방지하기 위한 안전성 평가기술과 저장공간을 확보하기 위한 탐사 기술개발 추진
 - 포집된 이산화탄소를 청정연료나 기초화학제품과 같이 유용한 제품으로 전환하여 활용할 수 있도록 가격 경쟁력 확보를 위한 기술개발 추진

4-5. 부문 공통 핵심기술

가. ICT 기반 디지털화

- 우리나라가 기술적 우위를 선점하고 있는 ICT 기술을 기반으로 전 부문의 에너지효율 향상 및 ICT 디바이스와 인프라 고효율화 기술개발 추진
 - 발전·산업·수송·건물 등 부문별 에너지관리시스템에 데이터·네트워크·인공지능(D.N.A)을 활용해 에너지의 생산과 유통, 소비 전과정에서 통합 운영을 최적화하고 에너지 저장 가능한 기술개발 추진
 - 재택근무 등 업무환경이 변하고, 디지털 가속화에 따라 ICT 기기, 인터넷 등 급격히 증가하는 산업전력 수요에 대응하기 위해 고효율 통신·네트워크 기술개발 및 에너지 하베스팅³⁸⁾ 등 고효율 기기 개발 추진

나. 전력 계통 및 연계

- 재생에너지 전력 확대에 따른 안정적인 전력 공급을 위한 전력망 기술개발과 다양한 분산전원의 확대에 대응할 수 있게 차세대 분산자원관리 기술개발 추진

38) 일상적으로 버려지거나 사용하지 않는 작은 에너지(압력, 진동 등)를 수집해 전기에너지로 바꾸어주는 기술

- 재생에너지에서 생산된 전기를 안정적으로 공급하기 위한 차세대 송배전 전력망과 대용량 에너지저장 기술 개발 추진
- 재생에너지를 포함하는 다양한 분산자원 확대에 대응하기 위해 분산전원 운영의 안정성 및 신뢰성 향상과 함께 다른 종류의 분산자원들을 연계하여 통합 이용할 수 있는 기술개발 추진



교육주안점

- 탄소중립 기술혁신 추진전략(안)에 에너지전환, 산업 부문, 수송 및 건물 부문, 탄소흡수 등 부문에서 탄소저감을 위한 다양한 핵심기술 개발을 추진하는 내용을 이해하도록 한다.
- 2050 탄소중립 사회에서 탄소저감을 위한 어떤 기술들이 적용될지 생각해볼 수 있도록 한다.

참고자료

| | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | - 탄소중립 기술혁신 추진전략(안) (과학기술관계장관회의, 2021) - 탄소중립 기술혁신 추진전략 10대 핵심기술 개발 방향(과학기술정보통신부 · 한국에너지기술연구원 공동 발간) |
| 참고 사이트 | - 대한민국 정책브리핑 https://www.korea.kr/main.do - 탄소중립 기술혁신 추진전략 10대 핵심기술 개발 방향(ctpp.re.kr) |

5. 탄소중립 사회 실현을 위한 사회적 과제

■ 제도적 기반 마련

- 탄소중립 실현을 위하여 탄소가격 부과 등을 통한 재정 및 금융기반, 핵심기술 개발·투자, 국가 및 지역 추진체계, 법적기반, 온실가스 관리 등의 전반적인 제도기반 마련이 필요

■ 탄소중립 사회로의 공정하고 정의로운 전환

- 탄소중립 사회 전환 과정에서 소외되는 사회구성원이 없도록 취약 계층·지역 등을 지원하고, 전환에 따른 산업, 일자리 등 지원방안을 통한 안정적인 전환 필요

■ 탄소중립 핵심기술의 개발 및 투자 확대

- 태양광, 수소, 수송 및 건물 효율화, CCUS 등 탄소중립을 위해 지속적이고 체계적인 핵심기술 개발·투자 계획 마련 필요

■ 모든 사회구성원의 참여를 위한 소통·협력·교육

- 국민 누구나 참여할 수 있는 환경을 구축하여 양방향 소통을 통해 의견을 공유하고, 탄소중립과 관련한 다양한 정보제공 필요
- 2050탄소중립 실현을 위해 전연령 대상의 특징과 수준을 고려한 환경교육을 통해 환경소양 및 지속 가능한 역량을 증진하여 자발적이고 능동적인 탄소중립 참여 유도

2050탄소중립시나리오(탄소중립위원회, 2021)에서는 탄소중립을 실현하기 위하여 중점적으로 추진해야 할 사회적 과제를 제도적기반 마련, 정의로운 전환, 핵심기술 개발·투자, 국민참여(소통·협력·교육) 4가지 분야로 제시하고, 과제 추진방향을 명시

5-1. 제도적 기반 마련

- 국가 재정 운용 기반 마련
 - 재정기반 마련을 위해 '온실가스 감축인지 예산제도'와 '기후대응기금'을 시행할 예정

| | |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 온실가스 감축인지 예산제도 (2023년 적용 예정) | - 정부 예산이 온실가스 감축에 미치는 영향을 분석하고 평가함으로써 국가 예산이 탄소중립에 기여하도록 유도하는 제도 |
| 기후대응 기금 (2022년 적용 예정) | - 탄소중립 및 기후위기 대응의 재정적 뒷받침을 위해 새롭게 설치되는 기금 - 온실가스 감축, 산업구조 전환, 기후위기 취약지역 및 계층 지원, 연구개발 및 인재양성 등을 위한 사업 지원하도록 충분한 수준의 재원 마련과 탄소중립에 효과적으로 기여할 수 있는 사업 선별·구성이 중요 |

- 적절한 탄소가격 부과 체계 마련
 - 각종 세제, 부담금, 배출권 등의 형태로 탄소가격을 부과하는 현재 체계와 달리 각 제도의 효과, 기후대응 기금의 충분한 재원 마련 등을 종합적으로 점검해 탄소중립 실현에 효과적으로 기여하는 탄소가격 부과 체계 마련
- 지방자치단체가 효과적으로 탄소중립을 추진할 수 있는 기반 마련
 - 정보, 인력, 예산 등 인적, 물적 자원과 인프라 부족, 온실가스 감축을 위한 지자체의 역할과 책임 불분명의 한계를 넘어 기초자치단체까지 온실가스 배출 현황 파악 및 탄소중립 이행 모니터링을 위한 통계와 인프라를 구축
 - 개별 사업에 대한 국고보조를 넘어 지역 상황에 맞게 지자체가 자율적으로 탄소중립 사업을 편성할 수 있도록 포괄적 예산 지원을 비롯하여 지자체의 권한을 확대하는 분권 조치
- 탄소중립 법적기반 마련
 - 2050탄소중립 실현을 위해 석탄발전 등 온실가스 고배출 산업을 축소하는 과정에서 사업자와 노동자의 일방적 피해로 이어지지 않도록, 원칙적인 전환을 위한 법령과 적절한 보상·지원방안 마련 필요
- 에너지 및 온실가스 배출통계 개선
 - 에너지 이용형태별(전기, 열, 수송연료)로 에너지 분류체계를 재정립하고 온실가스 배출량 통계도 에너지 통계와 정합성을 갖추어 작성
 - 탄소중립에 대한 사회적 논의 촉진 및 온실가스 감축정책의 성과관리를 위해 에너지와 배출량 통계는 가능한 한 상세한 수준으로 공개

5-2. 탄소중립 사회로의 공정하고 정의로운 전환

- 탄소중립 사회로의 전환 과정에 모두의 책임과 역할이 있음을 인정하고 사회구성원 중 누구도 소외되지 않도록 이해관계자 모두가 참여할 수 있는 논의의 틀을 마련
 - 탄소중립 관련 정책과 계획 등의 입안 단계부터 실행과 결과까지 전 과정에 이해관계자의 의미 있는 참여를 보장하는 민주적인 운영으로 전환 과정의 성과와 책임을 공유하고 분담
- 전환과정에서 피해가 예상되는 산업의 노동자, 중소기업인, 지역 등이 겪을 수 있는 어려움을 최소화하면서 새로운 기회를 창출할 수 있는 방안 마련
 - 탈탄소 사회로의 전환에 따라 일자리 충격을 받을 수 있는 노동자들의 고용 안정성을 확보
 - 탄소중립의 영향을 받는 산업에 대한 면밀한 고용영향 평가와 지역경제에 미치는 영향검토, 근로조건 개선, 신규 일자리 창출, 노동전환 교육 확대, 지역 산업 재편 등 다각적인 지원방안 수립
- 국가와 지역은 기후변화를 감시·예측하고, 영향을 받을 수 있는 취약계층·지역 등을 지원하는 기후위기 적응 대책을 수립·시행
 - 기후위기로 인해 발생할 수 있는 사회적·경제적 불평등을 사전에 진단하고 이에 대비하는 사회적 안전망 구축

5-3. 탄소중립 핵심기술의 개발 및 투자 확대

- 2050 탄소중립 실현을 위해서는 발전, 산업, 수송, 건물, 폐기물, 농·축·수산 등 부문에서 탄소저감 노력 외 2021년 3월 발표한 「탄소중립 기술혁신 추진전략」에 따라 태양광·풍력, 수소, 바이오에너지, 철강·시멘트, 석유화학, 수송효율, 건물효율, CCUS 등 10대 핵심기술 개발을 위한 법적기반마련과 체계적 예산 지원 필요

5-4. 모든 사회구성원의 참여를 위한 소통·협력·교육

가. 국민과의 소통·협력

- 탄소중립 사회 실현을 위해 국민들이 공감하고 주도적으로 참여하는 협력체계를 구축하기 위하여 국민들에게 필요한 정보와 데이터를 공유하여 누구나 스스로 참여할 수 있는 환경을 만들어야 함
 - 정부-국민 간 양방향 소통이 가능하고, 탄소중립 목표, 이행계획 수립과정에서 국민들의 의견을 수렴하는 절차 마련
 - 국민들 간 상호작용을 극대화하면서 소통의 결과와 실천사례 등을 확산할 수 있는 공론의 장을 마련하고, 탄소중립과 관련한 정보를 알기 쉽도록 대상에 맞는 콘텐츠로 제작·확산

나. 교육

- 2050 탄소중립 사회 구현을 위해서는 교육이 핵심 기반이 되어야 하며, 온 국민이 동참하고 이끌어가는 탄소중립을 위해서는 모든 분야에서, 전 연령대를 대상으로 환경소양을 함양하고 지속가능성 역량을 증진하기 위한 교육 강화 필요
 - 기후위기 시대에 따라 학교 교육의 대전환이 필요하며, 이를 위해 교육과정의 총론과 각론의 목표 및 내용에 환경교육 대폭 강화
 - 실제 학교 적용을 위해서 학교 환경교육의 의무화가 필요하며, 이를 위한 법적 근거 및 실행 체계 마련
 - 예비교원 및 현직교원이 환경소양에 기반하여 환경 지도역량을 갖추도록 제도 및 지원 체계 마련
 - 유·초·중·고·대 전국의 모든 학교가 온실가스 관리를 강화하고 에너지 자립도를 높이며, 학교 전체가 탄소중립을 체득하고 학습할 수 있는 장 마련
- 또한 일상적이고 지속적인 교육을 위해, 학교 밖 평생 교육의 장에서도 탄소중립이 주요한 주제로 다루어질 수 있어야 함
 - 누구나, 언제, 어디서든 교육을 통해 환경소양을 함양하고 지속가능성 역량을 기를 수 있도록 국가 기후·환경교육 총괄체계 구축
 - 유아기부터 노년기까지 생애주기별, 주부·공무원·근로자·군인 등 분야별 특화된 환경교육을 촘촘하게 시행하여 전 국민이 환경시민으로서 자발적이고 능동적으로 탄소중립 참여 유도



The logo for the year 2050, with the numbers 2, 0, and 5 in blue and the number 0 in green. It is enclosed within a stylized orange U-shaped frame.

2050

VI

기후변화 적응력
강화를 위한 방안들

VI. 기후변화 적응력 강화를 위한 방안들

교육 개요

- 지속가능발전목표 연계 이행가능조건 개선을 통한 적응 가능성 향상
- 기후변화 적응을 위한 국가수준의 적응대책 마련과 기후탄력적 경로 방안 확인

교육 목표

- 지속가능사회로 전환을 위한 기후변화 적응에 대해 이해
- 기후변화적응을 위한 노력과 방안 이해

교육 요소

| | | |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| 기후변화 적응력 강화를 위한 방안 | 지속가능한 사회 전환을 위한 기후탄력적 적응 방안 | - 기후변화 적응과 지속가능발전 - 1.5℃ 기후탄력적 개발 경로 |
| | 우리나라의 적응 노력 | - 우리나라 적응대책 수립 개요 |

1. 기후변화 적응력 강화를 위한 방안

■ 지속가능한 사회 전환을 위한 기후 탄력적 적응 방안

- 1.5°C로 지구온난화를 억제하기 위한 낮은 에너지 수요, 자원 소비 등 감축과 기후적응의 시너지가 최대화되면 UN의 지속가능발전목표(SDGs)와 연계하여 사회취약계층이 겪게 될 불평등한 분배를 해결 가능
- 1.5°C로 지구온난화를 제한하는 다양한 경로 중 일부 경로는 빈곤퇴치와 불평등을 줄이면서 온실가스 배출량을 낮추는 등 지속가능발전을 동시에 달성 가능
- 현재 개발상태와 기후변화 영향 분포, 대응역량에 따라 지역과 국가 간 다르며, 이를 공정하고, 형평성 있는 기후 탄력적 개발 경로 설정 필요

☞ 지구시스템 정의, 날씨와 기후의 차이, 기후변화의 정의

■ 우리나라의 적응 정책 수립

| | |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 2008 | 최초 국가 적응계획 '국가 기후변화 적응 종합계획(2009~2012)' 수립 |
| 2010 | 최초 법정계획 '국가 기후변화 적응대책(2011~2015)' 수립 (「저탄소 녹색성장 기본법 제48조 및 동법 시행령 제38조」) |
| 2011 | '기후변화 적응대책 세부 시행계획(2011~2015)' 수립 |
| 2012 | 「저탄소 녹색성장 기본법」 개정 및 기초지자체 적응대책 수립 시행 법적근거 마련 |
| 2015 | '제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020)' 마련 |
| 2016 | '제1차 기후변화 대응 기본계획' 수립 |
| 2019 | '제2차 기후변화 대응 기본계획(2020~2040)' 수립 |
| 2020 | '제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025)' 수립 |

1-1. 지속가능한 사회 전환을 위한 기후 탄력적인 적응 방안

가. 기후변화 적응과 지속가능발전

- 윤리적인 측면과 형평성을 고려하면, 1.5°C 이상의 온난화뿐만 아니라 감축과 적응의 역량 차이로 인해 사회 취약계층이 겪게 될 악영향의 불평등한 분배를 해결할 수 있음
- 지속가능발전과 빈곤퇴치의 차원에서 1.5°C 온난화에 따른 위험을 억제하려면, 지구온난화와 빈곤퇴치, 불평등 감소 및 기후 행동과 같은 지속가능발전목표와 연계성을 확인하고 적응과 감축에 대한 투자 증가, 정책도구, 기술혁신과 행동 변화의 가속화를 통해 달성할 수 있는 시스템 전환이 필요

심화

지속가능발전목표(출처 : 지속가능발전포털)

- 지속가능발전(Sustainable Development)이란 현재 세대가 여러 가지 발전을 진행하면서도 미래 후손이 발전할 가능성을 보호하는 형태의 발전을 의미하며(1987, UN보고서), 미래 세대가 사용할 경제·사회·환경의 자원을 낭비하거나 기능을 저하시키지 않으면서 현재 우리 세대에서 ‘경제성장’, ‘사회 안정과 통합’, ‘환경보전’이라는 세 가지 목표를 통합적으로 추구

국제사회는 2015년 제70차 UN총회에서 지속가능발전을 달성하기 위해 17개 지속가능발전목표(SDGs: Sustainable Development Goals)의 169개 세부 목표를 채택하고, 2030년까지 전 세계가 함께 추구할 인류 공동의 목표로 설정



우리나라도 국제사회의 책임 있는 일원으로서 공동 목표 달성에 기여하고 한국사회가 처한 여러 문제를 해결하기 위해 한국형 지속가능발전목표 즉, K-SDGs를 수립하여 모두가 사람답게 살 수 있는 포용사회 구현, 모든 세대가 누리는 깨끗한 환경보전, 삶의 질을 향상시키는 경제성장, 인권보호와 남북평화구축, 지구촌협력의 5대 전략을 수립하였음. 이를 실천하기 위한 17개 목표와 119개 세부 목표, 236개 지표(제4차 기본계획 기준)를 설정하여 정부기관은 물론이고 지자체와 시민단체, 전문가, 이해관계자그룹 등 다양한 집단에서 노력 중

- 기후변화 위험을 줄이기 위한 다양한 적응 방안이 존재하지만 1.5°C 온난화에서도 인간계와 자연계의 적응역량 한계로 인한 손실이 발생하며, 온난화가 심화될수록 이러한 한계는 명확해짐
- 적응과 감축의 실천은 지구물리적, 환경생태적, 기술적, 경제적, 사회문화 및 제도적인 가능성을 망라하는 이행가능 조건에 의존하며, 다층적 거버넌스, 제도적 역량, 정책 수단, 기술 혁신과 이전, 재정 동원, 행동 및 생활양식의 변화 강화를 통한 이행가능 조건 개선을 통해 적응 가능성을 높일 필요가 있음

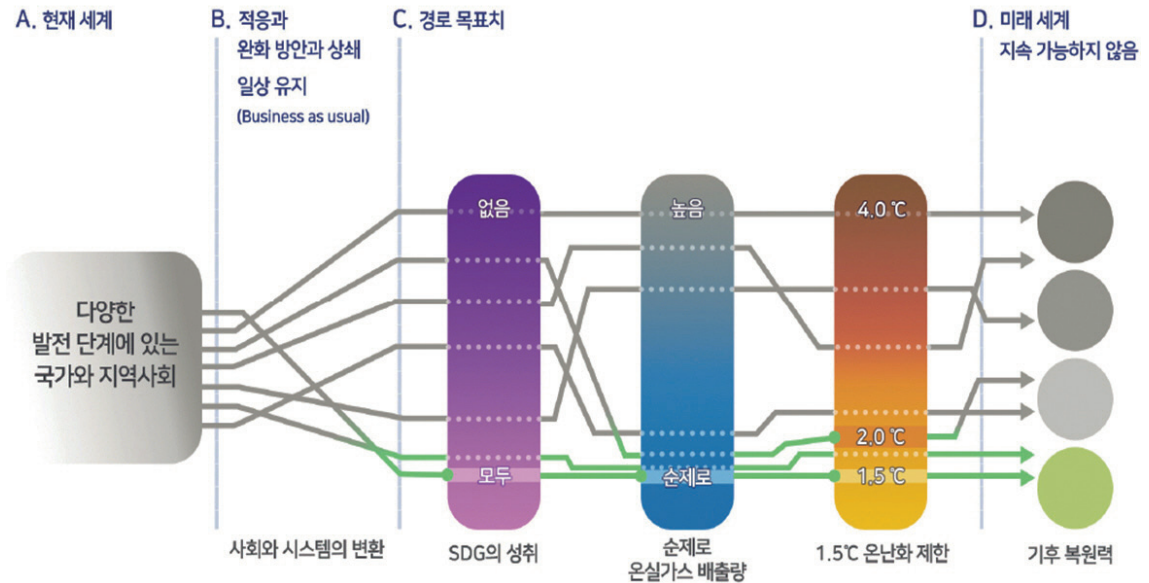
| | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 적응 대책이 잘 마련된 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 식량과 물 안보 확보, 재난 위험 감소, 보건 환경 개선, 생태계서비스 유지, 빈곤과 불평등 감소를 비롯해 지속가능한 발전과 1.5°C 온난화 억제 등 많은 시너지를 발생 - 핵심적인 이행가능 조건으로써 사회의 기후탄력성과 적응 역량 향상을 위한 물리적·사회적 기반시설의 투자 확대로 대부분 지역에서 적응 편익 발생 |
| 적응 대책이 잘 마련되지 않은 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 배출과 수자원 사용 증가, 성별 및 사회적 불평등 증가, 보건 환경 악화와 생태계 교란 등 지속가능한 발전에 대한 악영향과 함께 상충 또는 부적응 발생 - 감축과 적응 간의 상충은 식량안보, 생계, 생태계 기능과 서비스를 방해 |

- 빠르고 체계적인 시스템의 전환을 위해서는 참여적이고 통합적인 방식으로 감축과 적응 방안 결합 추진이 필요함
- 지역에 기반을 둔 정보를 포함하여 교육, 정보, 공동체의 접근방식은 온난화를 1.5°C로 억제하고, 적응하기 위한 광범위한 행동 변화를 가속화할 수 있으며, 접근방식이 다른 정책과 연계되고 특정 상황에 대한 동기, 역량, 자원에 부합할 때 더욱 효과적임

나. 1.5°C 기후 탄력적 개발 경로³⁹⁾

- 지구온난화를 1.5°C로 제한하는 다양한 경로들이 존재하며, 일부 경로는 지속가능한 개발을 동시에 달성하게 함. 이러한 경로는 빈곤퇴치와 불평등을 줄이는 데 기여하면서 온실가스 배출량을 낮추고 기후변화 영향을 줄이는 여러 가지 조치를 포함함
- 어떤 경로가 가능하고 바람직한지는 현재의 개발상태, 기후변화 영향 분포와 대응역량에 따라 지역과 국가 간에 다르며, 빈곤층 및 소외계층이 악화되는 것을 방지하기 위해 포괄적이고 공정하고, 형평성 있는 유연한 거버넌스가 필요함
- 지속가능발전은 지구온난화를 1.5°C로 억제하는 데 도움이 되는 근본적인 사회와 시스템 전환과 변화를 지원하고 이행 가능하게 함. 이러한 변화는 빈곤퇴치와 불평등을 줄이기 위한 노력과 함께 의욕적인 감축과 적응을 달성하는 기후 탄력적인 개발 경로 추구를 지원함
- 사회 정의와 형평성은 지구온난화를 1.5°C로 억제하기 위한 기후 탄력적 개발 경로의 핵심 측면으로 도전과 피할 수 없는 상충의 해결과 기회 확대, 빈곤층과 소외계층의 상황을 더는 악화시키지 않으면서 국가 간, 지역사회 내의 옵션, 비전과 가치를 신중하게 고려될 수 있도록 함
- 1.5°C 온난화 제한과 지속가능발전 목표 달성 경로에서 불평등을 악화시키거나 새로운 불평등을 일으키지 않기 위해서는 수혜자와 비용 지불자, 발생 가능한 부정적 영향의 피해자 측면에서 불평등을 줄일 수 있는 잘 계획된 적응과 감축 대책이 필수적임
- 기후 탄력적 개발 경로의 가능성은 다양한 개발 상황과 시스템의 취약성에 따라 지역과 국가마다 차이를 보이며, 현재까지 이러한 경로를 따르는 노력은 제한적이며, 모든 국가와 민간 활동가들의 시기적절하고 강화된 행동이 포함된 노력이 필요함

39) 일상적으로 버려지거나 사용하지 않는 작은 에너지(압력, 진동 등)를 수집해 전기에너지로 바꾸어주는 기술



▲ 그림75 기후 탄력적 개발 경로

출처 : 지속가능한 발전과 1.5°C 온난화(지구온난화 1.5°C 특별보고서 해설서, 기상청)

1-2. 우리나라의 적응 노력

가. 우리나라 적응대책 수립 개요

- 2008년 수립된 ‘국가 기후변화 적응 종합계획’은 최초의 국가 적응계획으로 ‘기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원’을 위해 전체 계획기간인 2009~2012년 체계적인 적응 역량 강화를 목표로 하며, 2030년까지 장기적으로는 기후변화 위험 감소 및 기회의 현실화를 목표로 수립되었음

| | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008년 | - 최초 국가 적응계획인 ‘국가 기후변화 적응 종합계획’은 기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원을 위해 전체 계획기간인 2009~2012년 체계적인 적응 역량 강화를 목표로 하며, 2030년까지 장기적으로는 기후변화 위험 감소 및 기회의 현실화를 목표로 수립 |
| 2010년 | - 4월 시행된 「저탄소 녹색성장 기본법」 제48조 및 동법 시행령 제38조에 따라 최초의 법정계획인 ‘국가 기후변화 적응대책(2011~2015)’ 수립 - 기후변화 영향의 불확실성을 감안한 5년 단위 연동계획으로 ‘기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원’을 비전으로 10개 부문 세부 목표에 대한 87개 세부과제를 제시 |
| 2011년 | - 국가 기후변화 적응대책의 이행을 위해 관계부처 합동으로 ‘기후변화 적응대책 세부시행 계획(2011~2015)’을 마련(11. 6.) - 16개 광역지자체의 기후변화 적응대책 세부시행계획도 수립 |
| 2012년 | - 「저탄소 녹색성장 기본법」 개정(12.12.0)을 통해 기초 지자체까지 적응대책 수립 · 시행을 위한 법적 근거를 마련하고 2015년부터 시행하였음 |

| | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2015년 | - '제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020)'이 마련되어 '기후변화 적응으로 국민이 행복하고 안전한 사회 구축'이라는 비전을 통해 '기후변화로 인한 위험 감소 및 기회의 현실화'라는 목표를 달성하고자 과학적 위험관리, 안전한 사회건설, 산업계 경쟁력 강화, 지속가능한 자연자원관리의 4대 정책 부문의 20개 중점과제를 마련하였음 |
| 2016년 | - 「저탄소 녹색성장 기본법」 제40조에 따라 20년을 계획기간으로 하는 법정계획인 '제1차 기후변화대응 기본계획'이 처음으로 수립되었음, 기존 '기후변화협약 대응 종합대책'이 감축 정책 실현에만 중점을 둔 반면에 기후변화대응 기본계획에는 기후변화 위험 및 영향 완화를 통한 건강·자연재해 등에 대응하는 적응대책이 함께 포함되었음 |
| 2019년 | - 2030 국가 온실가스 감축 로드맵의 감축 목표와 이행수단 등을 반영하기 위해 '제2차 기후변화대응 기본계획(2020~2040)'이 수립되었음. 파리협정의 5년 단위 NDC 갱신에 맞추어 국가 감축 목표 및 이행 로드맵을 포함하여 계획이 수립되었으며, 적응주류화 관련 추진과제로 공공기관 적응대책 수립 의무화와 평가제도 도입, 기후변화 취약성 저감 사업 발굴 및 산업계 적응대책 수립 지원 강화 등이 제시되었음 |
| 2020년 | - '국민과 함께하는 기후안심 국가 구현'을 비전으로 사회 전 부문의 기후탄력성 제고, 과학 기반 적응 추진, 적응 주류화 실현의 3대 목표 달성을 위한 '제3차 국가 기후변화 적응대책 (2021~2025)'이 수립되었음 |

심화

제3차 국가 기후변화 적응대책(2021-2025) (출처 : 정부부처합동)

- (법적 근거) 「저탄소 녹색성장 기본법」 제48조 제4항 및 동법 시행령 제38조에 따라 국가 및 지자체 단위 기후변화 적응대책 수립·시행 의무화
- (적응대책 점검 및 평가) 제2차 적응대책의 성과와 한계 등을 점검하고, 도출된 평가 결과를 제3차 적응대책 수립에 반영하기 위해 321개 세부과제를 점검하여 종합 결과를 도출하였음. 평가내용은 기후변화 리스크 대응 관점에서 대책의 적절성, 기후변화 적응대책 시행에 따른 리스크 저감 기여 정도, 제2차 국가 기후변화 적응대책 성과와 한계, 제3차 국가 기후변화 적응대책 수립 방향 제언 등을 포함하였음
- (4대 추진 방향) 대책수립 과정에서부터 모든 이행 주체와 함께하는 적응대책 수립, 취약계층 보호와 이상기후 피해에 대한 국민체감형 정책 중점 추진, 신기후체제 적극 대응 및 국제사회 기여 강화, 과학 기반 국가 기후리스크 관리
- (8대 국민체감형 과제) 국민적 관심이 높아 별도 평가를 추진하는 8대 분야(41개 세부과제)는 ① 미래 강우 위험을 고려한 홍수 대응(4개) ② 물 복지 실현을 위한 선제적 가뭄 대응(5개) ③ 이상고온에 따른 생물대발생 대응력 제고(3개) ④ 산사태, 산불 등 산림재해 대응 강화(2개) ⑤ 기후위험으로부터 식량안보 확보(7개) ⑥ 감염병, 질환으로부터 국민 건강 보호(8개) ⑦ 건강·경제·작업 등 기후변화 취약계층 중점 보호(8개) ⑧ 국민과 함께하는 적응대책(4개)

심화

| | | | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 비전 | 국민과 함께하는 기후안심 국가 구현 | | |
| 목표 | ◆ 2°C 지구온도 상승에도 대비하는 사회 전부문의 기후탄력성 제고 ◆ 기후감시·예측 인프라 구축으로 과학기반 적응 추진 ◆ 모든 적응 이행주체가 참여하는 적응 주류화 실현 | | |
| 3대정책 | 1. 기후리스크 적응력 제고 | • 미래 기후위험을 고려한 물관리 • 생태계 건강성 유지 • 전 국토의 적응력 제고 • 지속가능한 농수산 환경 구축 • 건강피해 사전예방 체계 마련 • 산업 및 에너지 분야 적응역량 강화 | |
| | 2. 감시·예측 및 평가 강화 | • 종합 감시체계 구축 • 시나리오 생산 및 예측 고도화 • 평가도구 및 정보제공 강화 | |
| | 3. 적응 주류화 실현 | • 기후적용 추진체계 강화 • 기후탄력성 제고 기반 마련 • 기후적용 협력체계 구축 및 인식제고 | |
| 핵심전략 | 기후탄력성 제고 | 취약계층 보호 | 시민참여 활성화 |
| | | | 신기후체제 대응 |

※ 8대 국민체감형 과제(홍수, 가뭄, 생물대발생, 산림재해, 식량안보, 감염병질환 취약계층, 거버넌스) 별도 평가 추진

교육주안점




- 1.5°C 온난화 억제를 위해 빈곤퇴치, 불평등 해소 등 지속가능발전과 연계하여 설명한다.
- 국가 간, 지역 및 계층 간 이행조건과 기후변화의 다름을 이해하고 형평성 확보의 중요성을 설명한다.
- 감축, 지속가능발전과 상호 시너지와 상충이 일어날 수 있는 적응 방안에 대해 설명한다.
- 저탄소 녹색성장 기본법과 우리나라 적응대책 수립 연혁을 순차적으로 설명한다.
- ‘3차 국가 기후변화 적응대책’의 비전, 목표 등을 설명하고 우리나라 영향과 연결해서 이해하도록 한다.

참고자료

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 참고 문헌 | - Global Warming of 1.5°C IPCC 특별보고서(IPCC,2018)+ |
| | - 지구온난화 1.5도 특별보고서 해설서(기상청, 2020) |
| | - “지구온난화 1.5도 특별보고서” 정책결정자를 위한 요약본(SPM) 한글번역(기상청, 2018) - “지구온난화 1.5도 특별보고서” 기술요약서(TS) 한글번역(기상청, 2018) |
| 참고 사이트 | - http://ncsd.go.kr/ 지속가능발전포털 |



2050



부록
교수학습방법

부록 - 교수학습 방법

1. 교수기초

1-1. 교수학습 이론

- 교수학습이란 가르치고 배우는 것을 의미하며, 더 구체적으로 교수(teaching)는 학습자에게 학습이 발생되도록 의도적으로 도움을 주는 활동을 뜻하며, 학습(learning)은 사전에 의도되고 계획된 다양한 경험에서 초래된 행동의 변화를 의미. 이러한 교수학습에 대해 크게 2가지의 관점에서 볼 수 있으며, 이러한 관점을 환경교육 이란 측면으로 다음과 같이 제시

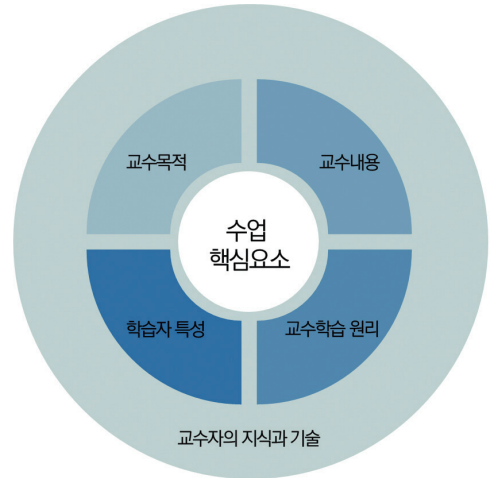
표31 객관주의 관점 및 구성주의 관점에서 환경교육

| 비교 항목 | 객관주의 관점 | 구성주의 관점 |
|----------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 수업의 목표 | - 환경지식의 전달과 학습자에게 지식을 이해 시키도록 하는 것 | - 경험과 인지적 구조, 그리고 객관적 사태를 해석하여 환경지식을 구성하는 방법을 알게 하는 것 |
| 주요 용어 | - 발견(discovery) - 일치(correspondence) | - 창조(creation) - 구성(construction) |
| 교사의 역할 | - 환경지식의 전달자 - 교육과정의 실행자 | - 안내자, 조연자, 학습 촉매자 - 학생과 함께하는 공동학습자 |
| 학생의 역할 | - 환경지식의 수동적 수용자 혹은 습득자 | - 능동적으로 지식을 구성하는 주체 - 자율적이면서 책임감 있는 학습 주체 |
| 학습환경의 특징 | - 학습 성취도의 강조 - 정보의 암기와 반복적인 축적 - 체계성과 논리성 중시 | - 협동학습 및 문제 중심 학습 - 소집단활동 - 사고력과 인지적 과정 강조 |
| 교수방법 | - 강의법 | - 토의토론 학습, 협동학습, 프로젝트학습 등 |

출처 : 환경교육론(최석진, 2014)

1-2. 교수학습 요소

- 수업에 영향을 미치는 요소들은 다양하며, 효과적인 수업을 진행하기 위하여 가장 핵심적인 요소 5가지를 이해하고, 수업계획을 수립
 - 학습 목표 : 탄소중립 수업을 통해 학습자가 성취하여야 할 목표
 - 교수 내용 : 교수 목적을 달성하기 위한 교과 내용으로, 적절하게 구성하여 교수 목적을 달성할 수 있도록 설정
 - 학습자 특성 : 학습자가 지닌 특성으로 연령, 흥미, 적성, 선행학습 수준 등으로 좋은 수업을 위해 학습자의 특성을 반영한 교수계획 수립
 - 교수학습 원리 : 학습자들이 효율적, 효과적인 수업이 일어나도록 교수학습 원리에 적절한 수업 진행
 - 교수자의 지식과 기술 : 학습 내용에 대한 전문지식 및 교수 목적, 내용, 학습자 특성, 교수학습 원리 등 교수기술을 갖추고 있어 수업을 효과적으로 계획 및 진행, 평가
- 위의 5가지 요소는 독립적인 것이 아니라 상호 밀접하게 수업에 영향을 미치므로, 효과적인 수업 전개를 위하여 교수자의 전문지식뿐만 아니라 명확한 목표 설정, 교수 내용 선정 및 조직, 교수학습 원리 반영, 학습자 특성 파악 등에 대해 전문성 함양이 필요



▲ 그림76 수업에 영향을 미치는 핵심 요소
출처 : 나승일, 교수법가이드(2020)

1-3. 교수원리와 수행전략

가. 교수학습 원리

학습자에게 의미 있는 학습을 제공하기 위하여 학습이 잘 일어날 수 있는 학습조건, 교수학습 원리를 고려해야 하며, 대학에서 효과적인 교수법 가이드(나승일, 2020)에서 제시한 교수원리와 수행전략을 참고로 재구성

원리1. 교육내용을 유의미하게 조직하면 학습자가 빠르게 배우고, 오래 기억한다.

- 학습자의 내적 동기를 유발하고, 학습내용 간 관계와 핵심 내용을 알기 쉽게 구성해야 학습효과가 증대

원리2. 교과내용을 학습자의 출발점 수준에서 제공해야 한다.

- 학습자의 선행지식이나, 학습 경험 수준에서 교육내용이 제시되어야 함

원리3. 학습활동은 학습자 특성을 반영하여 조직해야 한다.

- 학습자는 자신의 흥미와 요구사항에 부합하는 내용에 대해 배우고자 함

원리4. 학습자는 목표 설정 및 학습활동 계획에 참여함으로써 동기화된다.

- 학습자는 스스로 문제의식을 갖고 자신의 학습목표와 학습활동을 계획할 때 적극적으로 수업에 참여

- 원리5. 학습이 일어나도록 바람직한 학습자 행동을 강화해야 한다.
- 학습자가 바람직한 행동을 보이는 경우 즉시 칭찬, 점수 부여 등으로 긍정적 강화를 하여야 하며, 반대로 바람직하지 못한 행동에 대해 그 행동 제거 등 부정적 강화를 하여야 함
- 원리6. 교수자의 의도 하에 지시된 학습이 비지시된 학습보다 더 효과적이다.
- 교수가 의도된 목표를 갖고 적절한 수업자료와 수업기술을 활용하여 학습 기회를 적극 제공하는 지시된 학습이 효과적임
- 원리7. 학습을 극대화하기 위해서는 교과내용에 대해 학생들이 지도받기보다는 스스로 탐구하게 해야 한다.
- 문제를 중심으로 제공되는 학습 경험을 통해 스스로 학습할 수 있는 방법을 배움으로써 학습을 더 향상시킬 수 있음
 - 적절한 질문과 피드백으로 학생들의 응용력과 사고력을 키워줄 수 있는 교수방법 활용
- 원리8. 학습자들은 실제 적용하거나 실습을 통해 학습한다.
- 학습내용에 대해 실제 활용함으로써 이해 증진

나. 교수수행 전략

- 앞서 제시한 원리를 바탕으로 학생들이 능동적으로 참여하고 학습 몰입을 촉진하는 전략을 제시

전략1. 수업내용의 범위와 수준을 적절히 설정

- 학생들이 주어진 학습목표를 성취할 수 있도록 반드시 알아야 할 내용으로 구성

전략2. 인지적, 심동적, 정의적 학습목표 간 균형 유지

- 인지적 목표(지식습득), 심동적 목표(기술습득), 정의적 목표(내면화되는 태도)를 최대한 균형적으로 설정하여 지식, 기술 습득뿐만 아니라 가치관과 태도에 대한 학습도 추진

전략3. 다양한 교수법 활용

- 획일적인 교수방법은 학생들의 흥미를 낮추고, 학습효과를 감소시킬 수 있음
- 학생들이 선호하는 학습방법을 선택하여 다양한 학습방식 적용 필요

전략4. 소집단(팀) 학습활동 활용

- 학습자의 수업 참여 및 협력을 촉진하기 위하여 학습자를 소집단(팀)으로 짜서 집단학습 활용

전략5. 학습자의 사전경험 및 지식을 활용

- 학습자의 사전경험이나, 현안문제를 학습과 연계하는 경우 심도 있는 이해와 적용이 가능하여 수업 참여와 학습 효과가 극대화
- 학습자들이 기존에 습득한 지식과 해당 내용의 유사점, 차별점 혹은 연관성을 명료하게 제시하는 경우 새로운 내용에 흥미를 갖거나 학습의욕이 증진하여 학습효과 증대

전략6. 학습성과 정리

- 강의 마무리 단계에서는 학습 내용을 정리하는 과정을 통해 학습성과에 대해 확인해야 오랫동안 기억 가능

1-4. 교수학습과정 요약

표32 공대교수를 위한 수업 가이드북

| 구분 | | 수업 전략 |
|---------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 수업계획 단계 | 기본수업 설계 | ① 수업목표 설정 - 구체적이고 분명하게 제시 ② 수업내용 분석 - 수업목표 달성을 위해 수업에서 다뤄야 할 내용 결정 및 구성 ③ 학습자 특성 파악 - 학습자의 연령, 선행학습수준, 교육요구사항 등을 미리 파악 ④ 수업방법 결정 - 수업목표와 내용을 효과적으로 전달할 수 있는 다양한 수업방법과 매체를 선택 ⑤ 수업계획서 작성 - 학습자 특성을 반영하여 수업목표, 내용, 수업방법 등을 체계적으로 계획을 수립하여 수업 시 활용할 수 있도록 작성 |
| 수업실행 단계 | 도입 | ① 학습자의 주의 집중 - 수업 분위기 환기, 호기심 유발, 흥미로운 이야기나 시청각 자료 제공 ② 수업목표 제시 - 수업목표를 분명하게 제시하여 수업에 대한 기대감 유발 ③ 선행지식 확인 - 새로운 학습을 하기 전 학습자가 이미 알고 있는 지식, 기술, 태도를 확인 |
| | 전개 | ④ 학습내용 세분화 및 제시 - 수업목표 성취를 위한 교육내용을 세분화하여 단계적으로 제시 (구체적 → 추상적, 아는 것 → 모르는 것, 쉬운 것 → 어려운 것, 가까운 것 → 먼 것) ⑤ 학습내용 관련 예시 제시 - 새로운 지식을 제시할 때 구체적인 예시와 함께 제공 - 사전지식 및 친숙한 내용과 연계하여 새로운 지식으로 유도 ⑥ 다양한 수업방법 적용 - 수업의 효율성을 높이기 위하여 다양한 수업방식을 적용하여 학생들이 쉽게 이해하고, 오래 기억할 수 있도록 유도 ⑦ 학습내용 연습 또는 참여기회 제공 - 학습내용에 대해 연습 기회를 제공하거나, 참여할 수 있는 기회를 제공하여 경험을 축적할 수 있도록 유도 ⑧ 피드백 제공 - 학생들의 표정, 자세를 자세히 관찰하고 적절한 질문을 유도하여 학생들의 이해 여부를 파악 - 이해하지 못한 부분을 파악하고, 피드백 제공 |
| | 정리 | ⑨ 질의 응답 - 수업내용과 관련하여 학습자가 궁금한 사항에 대해 질의할 수 있도록 유도 ⑩ 요약 · 정리하기 - 주요 내용을 중심으로 교수 또는 학생이 요약 정리 |

출처 : 한국공학한림원

2. 교수기술

2-1. 다양한 교수기술

가. 학습의욕 강화하기

학생들에게 학습의욕을 갖도록 하기 위해서는 학생들 스스로 학습에 대한 동기가 생기도록 해야 하며, 학습자의 동기유발을 위해 다음과 같은 방안을 제시 가능

- 수업내용이나 방법을 학습자의 필요나 가치에 연결한다.
 - 학습자들의 흥미와 관심사에 기초한 자료를 활용하고, 익숙한 경험과 구체적인 예를 활용하여 생소한 경험이나 특이상황을 제시하여 학습에 흥미를 유발
- 성공에 대한 자신감과 긍정적 기대를 갖게 한다.
 - 학습목표를 제시하고, 교육내용을 통해 학습자가 학습목표 달성 시 성취감을 느낄 수 있도록 유도
- 학습자 노력의 결과에 피드백을 제공하고 성취감을 맛보게 한다.
 - 다양한 수행 결과에 대한 피드백을 즉각적이고 상세하게 제공하여 노력의 결과에 만족하도록 하며,이외에 다양한 학습자의 상황에 따라 학습의욕을 강화 가능

표33 학습의욕 강화 방안

| 비교 항목 | 구성주의 관점 |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 무엇을 학습해야 할지 모를 때 | - 수업을 통해 성취해야 할 학습목표를 분명하게 제시 - 무엇을 배우고, 왜 배우어야하며, 교육내용이 어떻게 도움이 되는지 안내 |
| 수업을 지루해하고 흥미 없어 할 때 | - 학습내용 관련 실제 사례 및 사진을 제시하고, 시청각자료 제공 등 학생들에게 필요한 정보를 제공 |
| 자신감이 부족하고 포부 수준이 낮을 때 | - 학습자들이 충분히 해결할 수 있는 과제를 제시하거나, 다양한 난이도의 학습과제를 제시 |
| 선수학습이 부족할 때 | - 사전지식을 보완할 수 있도록 사전지식 내용을 정리하여 수업자료로 제공 |

나. 신뢰감 형성하기

가르치고 배우는 것은 교수자와 학습자 사이의 상호작용이므로 수업효과 극대화를 위하여 학습자와 신뢰감 형성이 중요

학습자와 신뢰감을 형성하기 위하여 다음과 같은 사항을 숙지하고 활용

- 수업에 열의를 보인다.
 - 수업의 열의는 교수자가 사전에 얼마나 많이 준비했는지 가시적으로 보여줄 수 있는 부분

- 학습자를 인격체로 대하고 인정한다.
 - 학습자들의 학습능력에 상관없이 하나의 인격체로 대하며, 학생의 의견이나 노력을 인정하는 등 학습자의 반응을 존중
 - 학습자들을 무시하는 발언(예, 기초지식이 부족하다, 말해도 모를 거다 등) 금지
- 학습자를 돕는 자세를 보인다.
 - 학생들의 학습 분위기를 돋우기 위해 구체적인 방안들을 제시. 학생들에게 교육내용과 관련하여 궁금한 사항에 대해 도움을 받을 수 있는 방법을 제시하거나 학생들이 의견을 제시할 수 있도록 적절한 질문을 제시

다. 설득력 있게 설명하기

설득력 있는 설명이란 교수가 단순히 설명을 유창하게 하는 것이 아니라 학습자가 제대로 이해하도록 설명하는 것이며, 학습자의 수준을 고려하여 설득력 있게 설명할 수 있는 기술을 익히도록 노력하여야 함

- 교수의 전문성과 자신감을 보인다.
 - 학습내용에 대한 전문지식을 갖고 교수기술을 적절히 활용하며, 전문가로서 자신감과 여유를 갖고 강의 진행
- 순서를 고려하여 설명한다.
 - 설득력 있고 쉽게 설명하기 위하여 일정한 순서와 절차에 따라 설명하는 것이 필요

| | | |
|--------|---|--------|
| 아는 것 | → | 모르는 것 |
| 구체적인 것 | → | 추상적인 것 |
| 전체적인 것 | → | 세부적인 것 |

- 보충자료를 활용한다.
 - 구체적인 설명이 필요할 경우 시청각자료를 제시하여 이해를 도울 수 있도록 교육
- 설명하는 속도를 조절한다.
 - 설명을 할 때 교육내용과 학습자를 고려하여 적절한 속도로 조절
 - 빠르면 학습자가 알아듣지 못하거나 이해가 어려울 수 있으며, 느리면 수업을 지루하게 느끼거나 다른 생각에 빠질 수 있음
- 목소리 크기와 톤에 변화를 준다.
 - 수업에 생동감을 불어넣기 위해 중요한 포인트가 있을 때 말하는 단어에 액센트를 주어 강조

라. 학습자료 제시하기

학습자료란 학습목표를 효과적으로 달성하는 데 필요한 학습내용을 제시하는 수단이나 매개물로 학생들의 흥미를 유도하고 수업의 효과를 극대화하는 역할 제공

기술 발달에 따라 프레젠테이션, 동영상(이러닝), 전자판서 등 다양한 전달 방법 활용 가능

표34 학습자료별 효과적인 전달 방안

| 학습자료 | 효과적인 전달 방안 |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 프레젠테이션 | 다수의 교수들이 학습내용을 제시할 때 프레젠테이션을 활용하고 있으며, 효과적으로 활용하기 위하여 다음 사항을 고려 - 스토리보드를 제작하여 제목, 핵심 내용, 이미지 배치 등을 구성 - 슬라이드 장당 2분 내외의 분량으로 구성 - 슬라이드마다 제목을 제시하고, 하나의 아이디어만 제시 - 완전한 문장보다 구나 절로 제시 - 어휘보다 이미지로 구성 - 폰트와 크기, 디자인은 멀리서 식별이 가능하도록 구성 - 슬라이드 구성요소(이미지, 폰트 등)의 저작권에 유의 |
| 동영상(이러닝) | 움직이는 영상과 음향을 동시에 제공함으로써 학생들의 이해를 돕는 효과적인 교수자료로 활용하기 위하여 다음 사항을 고려 - 영상매체 활용 목적이 동기유발, 수업내용 전달, 구체적 사례 제시인지 명확화 - 수업내용 대신 설명하는 경우 학습자에게 간략하게 내용을 정리 - 수업에 필요한 부분을 편집하여 활용하며, 저작권에 저촉되지 않도록 주의 - 매체 활용 전 어떤 내용에 초점을 두고 봐야 하는지 설명 - 동영상 활용이 수업의 흐름을 끊지 않고, 다음 활동과 연계할 수 있도록 제시 |
| 판서 (칠판, 화이트보드) | 다양한 시청각 기자재 활용으로 판서가 줄고 있으나, 학문의 특성상 언어적으로 구체적인 설명이 필요하거나 도식화가 필요한 경우 활용할 수 있으며 다음 사항을 고려 - 핵심 내용을 판서 - 학습자들의 시야를 가리지 않도록 위치를 조정하고, 뒤에서도 잘 보이도록 크기, 색을 잘 조절 - 판서를 하는 동안에도 학습자에게 시선을 두어 주의력을 집중 |

마. 적절하게 질문하기

학습자들의 수업이해 정도 확인 및 학습자와 상호작용 촉진을 위하여 적절한 질문이 필요함
 질문은 학습단계(도입-전개-마무리)에서 다양한 목적으로 사용될 수 있음

- (도입) 학습자들의 선행학습 수준 파악 및 학습동기 유발
- (전개) 학습성과 확인 및 즉각적 피드백 제공
- (마무리) 수업내용 요약 및 학습내용 강화

1) 좋은 질문의 특징

- 흥미 있고 사고를 자극하며, 수업내용과 관련된 것
- 시간과 장소에 적절한 질문
- 임의로 추측하여 예/아니오로 답할 수 있는 질문보다 깊이 생각하여 의견을 답할 수 있는 질문
- 질문내용에 답을 암시하고 있지 않음
- 학습자에게 친근한 용어를 사용한 질문
- 단순 지식이나 이해 수준을 묻는 게 아니라 적용, 분석, 평가 등까지 파악할 수 있는 질문

2) 학습자들로부터 대답을 유도할 때 유용한 기술

- 답변을 논리적으로 제시할 수 있는 충분한 시간 제공
- 학생들의 답변을 긍정적으로 유도(말 끊기, 비방형 피드백 금지)
- 정확한 대답이 나온 경우 | 즉시 칭찬 등 긍정강화를 하고, 확답을 해준다
ex) “아주 잘했어요, 00은 ~~~입니다”
- 부분적으로 정확한 대답 | 정확한 부분은 칭찬하고, 부정확한 부분은 다른 학습자가 고치도록 유도
ex) “맞았어요, ~~부분에 대해 좀 더 보충할 분 있나요?”
- 틀린 대답 | 무비판적인 반응을 보이고 다시 대답을 유도하거나, 다른 학생에게 기회를 제공
ex) “좋은 시도(발상)예요, 그러나 중요한 부분이 빠져 있네요”

바. 수업에 대한 반응 향상

학습자들의 수업에 대한 반응이 좋다는 것은 강의가 성공적이었다는 것을 의미. 이러한 학습자의 반응을 향상 시키기 위해서는 학습자 중심의 수업을 설계하고 진행하여야 하며, 다음과 같은 기술을 수업 시 적절히 사용

- 학습 내용을 학습자의 수준에 맞춰 구성하여 이해하기 쉽게 설명한다.
 - 학습자들의 선행학습 수준을 고려하여 내용을 쉬운 내용에서 어려운 내용으로 점차적으로 설명하도록 구성하여, 학습자의 이해 증진
- 학생들에게 질문을 많이 한다.
 - 적절한 질문으로 학생들의 수업 참여를 유도하여 반응을 향상시킬 수 있음
- 학생들에게 관심을 갖고 수업내용과 방법을 학생들의 흥미에 맞춘다.
 - 학습자에 대한 관심을 보여 학습자 개개인의 존재를 느끼게 하고 학습자들의 흥미를 끌 수 있는 사례, 일화, 장면들이 실제 현장에서 어떻게 활용되고 있는지 제시하여 수업내용과 방법에 대한 학생들의 흥미를 유발함

사. 학습 강화 기술

학습강화는 학생들에게 바람직한 행위가 고착되도록 촉진하는 것을 의미하며, 학습강화 종류에는 긍정적 강화와 부정적 강화가 있으며, 각 특징 및 상황에 따라 적절하게 활용하는 방법을 제시

- 긍정적 강화
 - 긍정적 강화는 학생이 바람직한 행동을 보였을 때 칭찬, 격려 등 교수가 취하는 행위를 말하며, 상황에 따른 긍정적 강화 방안은 다음과 같이 제시 가능

표35 수업 중 학습자 긍정적 강화 방안

| | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 설명 중 | <ul style="list-style-type: none"> · 학생들을 바라보기 · 학생들에게 미소를 유지 · 학생들의 긍정적인 면을 언급 |
| 질문응답 시 | <ul style="list-style-type: none"> · 학습자의 발언에 대해 고개를 끄덕여주거나, 만족스러운 미소 표현 · 답변을 망설이는 학생에게 틀려도 괜찮다는 것을 전달 · 좋은 답변이 나왔을 경우 칭찬 또는 격려 제공 |

• 부정적 강화

- 부정적 강화는 학생이 바람직하지 못한 행동을 감소, 제거하도록 유도하는 행위로 함부로 사용하는 경우 역효과를 초래할 수 있으므로 조심스럽게 활용하여야 함
- 수업 중 태도가 불량한 경우 고개를 좌우로 젓거나, 수업을 중단한 채 해당 학습자를 가만히 응시 또는 수업에 집중할 수 있도록 자주 질문을 제공

2-2. 효율적인 교육을 위한 교수자들의 특성

교육현장에서 수업을 효율적으로 이끌어 가는 교수자들의 공통적인 특성은 다음과 같음

표35 수업 중 학습자 긍정적 강화 방안

| |
|-------------------------------------|
| - 가르치는 일에 긍지를 갖고 정열적인 교육자 |
| - 학습자에게 관심이 많은 교육자 |
| - 늘 긍정적인 태도를 가진 교육자 |
| - 쉽게 화내지 않고, 친절과 인정이 넘치는 교육자 |
| - 학습자와 함께 놀이를 즐기고, 유머를 발휘하는 교육자 |
| - 자신의 잘못을 이해하고 노력하는 교육자 |
| - 학습자들에게 공정하고 객관적인 교육자 |
| - 인내심이 강한 교육자 |
| - 학습자들을 이해하고 노력하는 교육자 |
| - 학습자들을 다정하고 따뜻하게 대하는 교육자 |
| - 창의력을 길러주고, 새로운 현상에 눈을 뜨게 해주는 교육자 |
| - 잘한 일에 대해서는 칭찬을 아끼지 않는 교육자 |
| - 학습자의 개인차를 이해하고, 노력을 인정해주는 교육자 |
| - 언제나 타인의 반응을 받아들이고, 인격을 존중하는 교육자 |
| - 학습자들이 최선을 다하도록 격려하는 교육자 |
| - 수업준비를 철저히 하는 교육자 |
| - 수업은 전체 계획 속에서 항상 융통적인 교육자 |
| - 학습자 개인의 요구가 다름을 인정하는 교육자 |
| - 흥미롭고 새로운 수업자료와 방법을 연구하는 교육자 |
| - 시범과 설명은 분명하고 구체적으로 하는 교육자 |
| - 방향 제시가 분명하고 철저한 교육자 |
| - 학습자가 스스로 학습하고, 평가할 수 있도록 유도하는 교육자 |
| - 실력을 갖춘 교육자 |
| - 학습자에 따라 알기 쉽게 가르쳐주는 교육자 |
| - 강한 성취감을 일깨워주는 교육자 |

출처 : 명강의핵심전략(김은주, 2004) 내용 일부 발췌

3. 교수설계

3-1. 수업설계

가. 수업설계의 개념

- 수업의 전체적인 계획과 흐름을 알 수 있는 지도와 같은 역할
- 수업설계 시 성취해야 할 목표(수업목표), 가르칠 대상(학습자)과 내용(교수내용)을 파악하고, 어떻게 가르칠 것인지(교수방법), 어떠한 매체(교수매체)를 활용할 것인지 등의 상호연관성을 고려하여 학습지도안으로 개발하여야 함

나. 수업설계의 필요성

- 수업목표와 학습성과를 선정하여 수업의 방향 설정
- 학습자의 개인차를 고려한 수업 전개를 위한 사전 계획
- 수업목표 달성을 위한 수업내용 선정 및 구성
- 다양한 자료와 매체별 장점을 고려하여 최적의 수업 매체 선정
- 수업 전개 시 오류 예방

다. 수업설계 필요 역량

- 수업목표를 설정하고 학습과제를 분석 역량
- 학습자의 능력과 선수학습 등 학습자에 대한 지식
- 학습내용과 수업구조에 대한 지식
- 수업내용에 맞는 적절한 수업방법과 매체에 대한 지식
- 오랜 수업의 경험을 통해 습득한 암묵적 지식

라. 세부 수업설계

1) 수업내용 설계

- 수업내용은 학습자들이 학습목표를 달성하기 위한 지식과 기술을 습득할 수 있는 교육내용을 다음 원리를 참고하여 구성하여야 함

표37 수업구성 원리

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 타당성 원리 | - 수업내용은 학습목표를 달성하기 위한 지식, 기능, 가치를 잘 전달할 수 있는 최적의 수단이어야 함 |
| 확실성 원리 | - 수업내용의 지식, 가치 등을 사회와 시대의 변화에 맞게 교재, 학계동향, 전문가 및 현장 종사자의 자문 등 신뢰성을 지속적으로 확인하여야 함 |
| 명확성 원리 | - 수업내용은 전달하는 의미가 분명해야 함, 수업내용의 단어, 문장, 그림, 삽화 등 적절하게 배치하여 제시 |
| 가능성 원리 | - 학습자 능력 수준에 알맞은 수업내용을 선정하여 학습자의 이해를 도울 수 있도록 해야 함 |
| 흥미의 원리 | - 수업내용은 학습자의 흥미를 유발할 수 있어야 하며, 이를 위해 수업 자료의 내용 또한 다양하게 활용 |
| 연계성의 원리 | - 수업내용 간 서로 관련되고 일관성을 가져야 함 |

출처 : 국가환경교육지원단 교수역량 안내서(환경부, 2020)

- 교수내용 분석을 통해 탄소중립 교육내용의 난이도(필수내용, 심화내용 등) 및 교육내용 핵심개념 간 계열성을 파악

2) 학습자 특성 파악

- 수업설계 시 학습자에 대한 분석을 통해 적절한 학습목표, 교육내용, 교수방법 등을 선정하여 효율적인 수업을 운영하여 학습자의 능력을 이끌어낼 수 있음
- 학습자의 특성은 크게 인지적, 심리·사회적, 생리적 특성으로 나눌 수 있으며, 각각 영역에 따른 학습자 특성 및 특성에 따른 처치영역은 다음 표와 같음

표38 학습자 특성 및 처치영역

| 분류 | 인지적 특성 | 심리·사회적 특성 | 생리적 특성 | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 학습자 특성 | <ul style="list-style-type: none"> - 일반적 적성 - 출발점 행동 및 사전지식 - 인지 및 언어 발달 - 독해 및 시각정보 처리 능력 - 인지 혹은 학습전략 | <ul style="list-style-type: none"> - 흥미 및 학습동기 - 학습 및 학교에 대한 태도 - 학문적 자아개념 - 학습불안 - 권위에 대한 감정 - 협동 또는 경쟁 경향성 - 도덕성 발달정도 | <ul style="list-style-type: none"> - 시각, 청각 등 감각기능 - 일반적 건강 - 나이 등 | |
| 처치영역 | <ul style="list-style-type: none"> - 진도 - 학습내용의 난이도 - 내용 예시 - 학습동기전략 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업매체 선택 - 수업내용의 추상성·구체성 - 학습내용 조직화 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업전략 - 학습진단구성 - 수업의 양 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자 통제 정도 - 사용용어 수준 - 수업시간 |

- 연령, 사전경험, 선행학습수준, 기초학력, 흥미, 사회경제적 배경, 기능 태도 등 학습자마다 다양한 개인차가 있으며, 이러한 학습자의 개인차를 제대로 파악하여 학습자의 특성을 반영한 교수를 설계할 때 효과적인 수업을 운영할 수 있으며 학습자의 능력을 이끌어낼 수 있음
- 학습자에 대한 분석을 통해 학습목표 및 교육수준을 조절하고, 수업내용을 선정
- 탄소중립 참고자료집은 성인학습자를 기준으로 작성하였으나, 다양한 연령층의 학습자를 대상으로 교육 시에는 사전에 학습자에 대한 분석이 필요

3) 학습목표 설정

학습목표는 교수자의 수업을 통해 학습자가 최종적으로 성취해야 할 도착점 행동으로, 수업의 명확한 방향을 결정하고, 수업내용을 선정하며, 학습자의 수업태도를 바로잡는 등 효율적인 수업을 가능케 함
 학습목표는 학습자가 수업이 끝났을 때 무엇을 할 수 있는지에 대해 수업과정에서 의도하는 세 가지 요소인 행위, 조건, 기준을 포함하여 구체적이고 명백하게 진술

표39 학습목표 국가환경교육지원단 교수역량 안내서(2020, 환경부)

| 요소 | 주요 내용 |
|---------------|--------------------------------------------------|
| 행위(Behavior) | 학습이 끝났을 때 학습자가 무엇을 할 수 있는지 관찰가능한 행위 |
| 조건(Condition) | 학습자가 행위를 수행하는 동안 제공될 환경 및 조건 |
| 기준(Criteria) | 학습자가 행위를 달성했는지 측정 가능하며, 달성과 미달성의 여부를 확인할 수 있는 기준 |

[예시] 인간 활동이 기후변화에 미치는 다양한 원인으로 제시(조건)되었을 때, 그 원인에 따른 적절한 해결 방안을 2가지(기준) 이상 제시할 수 있다.(행위)

출처 : 국가환경교육지원단 교수역량 안내서(환경부, 2020)

학습목표는 도달하고자 하는 도착점 행동에 대해 단순한 능력인 '기억'부터 고차원적 능력인 '창조'까지 교육 목표 위계를 다음과 같이 정리

표40 Bloom의 교육목표 위계 정리(Anderson & Krathwohl, 2001)

| 분류 | 특징 | 동사 | |
|----|-------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| 지식 | 과거 학습한 내용을 기억하고 상기해내는 능력 | 정의하다, 설명하다, 식별하다, 명명하다, 열거하다, 확인하다 등 | 단순능력 ↑ ↓ 복합능력 |
| 이해 | 내용이나 자료로 의미를 파악하는 능력 | 해석하다, 요약하다, 추론하다, 예시를 들다, 번역하다, 일반화하다 등 | |
| 적용 | 학습한 내용을 새로운 구체적 사례에 사용하는 능력 | 구현하다, 수행하다, 사용하다, 실행하다, 운영하다, 수정하다, 해결하다 등 | |
| 분석 | 자료의 구성요소, 요소 간 관계, 원리를 분석하고 발견하는 능력 | 분류하다, 변별하다, 구별하다, 분석하다, 추리하다, 정리하다, 세분하다 등 | |
| 평가 | 내·외적 기준에 비추어 가치나 중요성을 판단하는 능력 | 판단하다, 비판하다, 실험하다, 검토하다, 조정하다, 대조하다 등 | |
| 창조 | 요소나 부분을 결합하여 새로운 전체를 구성하는 능력 | 설계하다, 구성하다, 계획하다, 생산하다, 재구성하다, 제작하다, 발견하다 등 | |

- 학습목표 진술 시 다음 사항을 주의

| 오류 유형 | 잘못된 진술 | 올바른 진술 |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 수업행동이나 교사활동을 학습목표로 진술 | 탄소중립 실천영상을 시청한다. | 탄소중립 실천행동을 실생활에 적용할 수 있다. |
| 학습과정을 학습목표로 진술 | 에너지정책 방향을 토론한다 | 국가 에너지정책의 장단점을 비교할 수 있다. |
| 교과내용이나 주요 제목을 목표로 진술 | 우리나라 탄소중립 정책 | 우리나라 탄소중립 정책을 기술할 수 있다. |
| 한 학습목표에 두 가지 학습결과를 진술 | 탄소순환을 이해하고 탄소중립을 정의할 수 있다. | 탄소순환 개념을 활용하여 탄소중립을 설명할 수 있다. |

4) 수업방법 선택

수업방법은 교수가 가장 자신 있고 익숙한 형태를 활용할 수 있으나, 학습자 관점에서 최선의 수업방법을 선택하고 활용할 필요가 있음

- 수업방법은 강의식, 토의식, 문제중심, 플립러닝 등이 있으며 다음과 같이 학습목표, 학습활동, 학습자 특성, 교수자의 능력, 수업환경 등을 고려하여 선정해야 함
 - 학습목표 달성에 적합한 수업방법인가?
 - 학습활동에 적합한가?
 - 학습자 특성에 적합한가?
 - 교수가 자신 있게 지도할 수 있는 방법인가?
 - 수업환경에 적합한가?

5) 교수매체 선정 및 제작

- 수업의 3요소 중 하나로 교육내용을 학습자에게 전달하고자 할 때 사용되는 매체로 교구, 교보재 등 학습목표, 교육대상, 수업방법에 적절한 교수매체를 선정하여야 함
- 교수매체를 선정 시 고려할 사항은 다음과 같이 정리

| 구분 | 고려사항 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 학습자 특성 | 학습자의 연령, 지적수준, 태도 등을 고려 - 낮은 연령(실제 경험) : 그림, 사진, 애니메이션 등 - 높은 연령(추상적사고) : 그래픽, 표 등 구체적 정보 |
| 수업상황 | 수업형태, 주체 또는 전략 등 수업환경에 따라 적절한 교수매체를 선정하여야 함 - 수업형태(소집단, 대집단) - 수업주체(교사중심 vs 학습자중심) - 수업전략(설명수업 vs 발견수업) |
| 교수매체의 속성과 기능 | 교수매체는 시각, 청각, 시청각, 동작, 크기, 색채 등의 물리적 특성을 고려해야 하며, 교육 내용에 따라 그림 또는 사진처럼 정적인 매체와 동영상, 인터랙티브 콘텐츠 등 동적인 매체를 고려하여야 한다. |
| 수업장소 환경 | 교수매체를 활용할 수 있는 인프라를 교육장소에서 갖추고 있어야 함 ex) 사진, 동영상 등을 보여줄 수 있는 컴퓨터, 빔프로젝터 등 |

마. 교수설계 단계별 확인사항

| | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 교육내용 분석 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습지도안상의 교수 목적과 일치하는가? - 교수 내용과 관련 있는 참고문헌을 참고했는가? - 강의 시간 내에 충분히 가르칠 수 있는 분량인가? - 교수 내용의 난이도가 적정한가? - 이전 강의 또는 다른 강의와의 연계성을 고려했는가? |
| 학습자 분석 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자 특성을 파악하기 위하여 다양한 자료와 정보를 참고했는가? - 학습자 특성 파악을 위해 다른 교수자들이나 특강 계획자로부터 정보를 수집했는가? |
| 교육목표설정 | <ul style="list-style-type: none"> - 교수 목적과 학습 목표의 관련성을 고려했는가? - 교수 내용을 고려하여 학습 목표를 설정했는가? - 학습자 특성을 고려했는가? - 학생들의 도착점 행동이 관찰 가능한 동사로 진술되었는가? - 학습 목표가 학습자 입장에서 달성 가능한가? |
| 수업방법 선택 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습 목표 달성에 가장 적합한 교수 방법인가? - 학습 활동에 적합한 교수 방법을 선택했는가? - 학습자 특성에 맞는 교수 방법인가? - 강의실 환경에 적합한 교수 방법을 선택했는가? |
| 교수매체 선정 및 제작 | <ul style="list-style-type: none"> - 강의 내용을 고려했는가? - 강의 방법을 고려했는가? - 선정한 교수 매체를 강의 시간에 활용할 수 있도록 준비를 해놓았는가? |

3-2. 학습지도안 작성

학습지도안은 성취해야 할 목표(수업목표), 가르칠 대상(학습자)과 내용(교수내용)을 파악하고, 어떻게 가르칠 것인지(교수방법), 어떠한 매체(교수매체)를 활용할 것인지 등의 상호연관성을 고려하여 작성

- 구체성 : 학습지도안은 구체적으로 작성. 암기력이 뛰어나다고 자신하는 교수자라도 귀찮다고 생각하지 말고 교수할 내용을 기록해 놓는 것이 바람직. 질문할 내용, 설명할 사례까지 학습지도안에 포함
- 명확성 : 명확하게 볼 수 있도록 체계적으로 작성하고 교수 활동 중에도 자신이 쉽게 보고 확인할 수 있어야 함
- 실용성 : 교수 활동에 실질적으로 사용할 수 있도록 작성하고 학습 내용의 배열이 교수 활동을 효과적으로 수행할 수 있어야 하며, 내용을 강의 순서대로 정리
- 평이성 : 쉽게 작성해야 하며 학습자 수준을 고려하여 어렵거나 모호한 언어를 사용하지 말아야 하며, 이해하기 어려운 용어나 내용은 쉽게 설명
- 논리성 : 교안에 기술되어 있는 내용이 바로 강의이므로 논리적, 체계적으로 작성

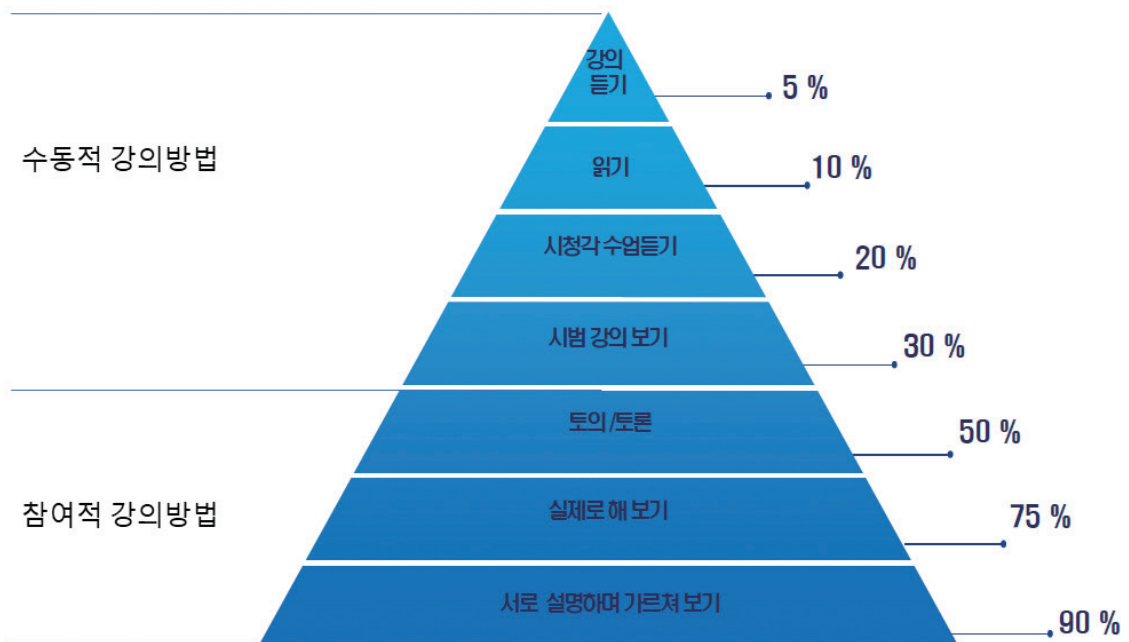
가. 지도안 구성요소

| 교육프로그램 | [탄소중립 교육주제] | | | 교수자 | ○○○ |
|---------|--------------------------------------|------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 강의방법 | [강의식/토의식/플립러닝/문제중심 ...] | 교육시간 | 00분 | 지도 대상 | 성인 00명 |
| 학습목표 | 1. 2. | | | | |
| 교수매체 | [PPT, 노트북, 빔프로젝터, e-learning, 동영상 등] | | | | |
| 교수학습 단계 | 교수 · 학습 활동 | | | 교수매체 및 지도시 유의점 | 시간 |
| | 교수자 | 학습자(예상반응) | | <div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;"> ★ 교수매체 ● 유의점 </div> | |
| 도입 | 동기 유발 | · | | ☆PPT | 15' |
| | 학습 목표 파악 | · · | | | |
| | 수업 방법 안내 | ▣ | | | |
| 전개 | 수업 전개 | ▣ · ▶ · | ▶ | ☆PPT, 동영상 | 10' |
| 정리 | 수업 요약 정리 | · | ▶ | - | 15' |
| | 사후 과제 | · | · | | |

4. 교수방법

수업은 하나의 방법으로 진행되는 것이 아니라 다양한 방법이 있으며, 학생에게 가장 효과적인 수업방법은 수업 목표에 따라 각기 다르므로 여러 수업방법에 대한 이해가 필요하다,

학습피라미드(미국 행동과학연구기관(NTL))에 따르면 수업방법에 따라 학습효과가 다르며, 강의듣기는 5%, 서로 설명하며 가르쳐보는 방법은 90%까지 학습내용을 기억. 교수자는 학습목표, 학습자의 특성, 학습내용을 바탕으로 적절한 강의방법을 선택하여 활용 가능



▲ 그림77 습효과성 피라미드

출처 : 미국의 행동과학 연구기관 NTL의 학습 효과성 피라미드

본 참고자료집에서는 ‘대학에서 효과적인 교수법 가이드(나승일, 2020)’를 참고하여 다양한 교수방법을 제시

4-1. 강의

가. 정의

강의는 교육주제에 대한 정보, 아이디어, 사실, 개념 등을 구두로 제공하는 수업방식으로, 가장 많이 사용되고 있으며 교수자들도 큰 부담을 느끼지 않는 방식임

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 다수의 학습자 대상으로 동시에 수업을 진행 가능 - 학습자들이 학습할 지식의 범주를 통제 가능 - 교수자의 전문지식을 광범위 분야에 폭넓고 조리있게 제공 가능 - 융통적으로 내용 전달 가능 - 교수가 주도적으로 수업 진행 가능 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자는 교수의 경험과 강의 속도에 맞춰 학습해야 함 - 개별적 지도, 조언 등을 얻기 힘들 - 학습자들의 능동적, 창의적 사고가 어려움 - 언어적 의사소통 능력 함양이 어려움 - 학습자들의 이해수준 판단이 어려움 |

다. 수업준비

학습자 활동이 수동적인 수업방법이므로 학습자들의 동기유발이나 학습의욕 고취를 위하여 다음 사항을 특별히 고려하여 준비하여야 함

1. 학습자의 선행학습수준, 흥미, 학습요구 등에 대한 정보를 수집
2. 교수목적과 학습자 수준에 맞는 학습 목표 설정
3. 주어진 시간에 정해진 학습내용을 효율적으로 가르칠 수 있는 강의자료 준비
4. 학습효과 극대화 및 학습자 흥미유발, 주의집중을 위한 교수매체(프레젠테이션, 동영상 등) 준비

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습에 몰입할 수 있도록 학습자들의 주의를 집중 - 개인경험, 사례를 언급하거나 짚막하면서도 참신한 질문 등으로 학습동기 유발 - 학습목표를 학습자들에게 숙지할 수 있도록 전달 |
| 전개 | <ul style="list-style-type: none"> - 전체 수업시간의 70~80%를 할애하며, 단계적이고 논리적인 순서로 정보 제공 - 새로운 정보를 학습자의 사전지식과 연관지을 수 있도록 유도 - 중요한 부분들을 강조 - 주의집중을 위해 교육내용에 적절한 보조자료를 활용 - 적절한 질문을 통해 학습 이해정도를 파악하고, 수업집중을 도모 |
| 마무리 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습내용을 정리 및 강화하고, 일반화 |

마. 문제점과 해결 방안

강의식 수업에서 나타날 수 있는 문제점과 해결 방안은 다음과 같음

| 문제점 | 해결 방안 |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 수업내용을 이해하지 못하는 경우 | - 중간중간 이해정도를 확인 - 발음이나 화술의 문제라면 정확한 발음과 표현을 하도록 하고, 적절한 속도로 수업 진행 |
| 학습에 대한 의욕이 낮은 경우 | - 명확한 학습목표를 다시 제시 - 학습내용과 관련된 실제 사례, 시청각 자료 활용 |
| 주의가 산만한 경우 | - 학습내용의 중요성 강조 및 실생활 적용사례 제시 - 질문을 제시하여 주의집중 |
| 학습자와 신뢰감이 낮은 경우 | - 학습자와 상호작용을 하며 자연스럽게 교류하고, 학습자의 의견을 인정하고, 적절한 피드백제공 |
| 수업에 대한 반응이 없는 경우 | - 학습자 수준에 맞는 수업내용인지 재확인 - 수업내용과 관련된 응용사례를 많이 제시 |

4-2. 토의

가. 정의

교육주제에 대하여 교수자-학습자 또는 학습자-학습자 간 언어 또는 매체로 의견을 상호교환하는 수업방식으로 학습자가 결론이나 결정을 내려야 하는 경우에 많이 사용되며, 문제해결과 의사결정 능력의 함양을 목적으로 하는 수업에 적합함

1) 토의 기법

토의 기법에는 집단토의, 패널토의, 심포지엄, 워크숍, 세미나, 브레인스토밍, 버즈그룹 등 다양한 기법이 있으나, 대상을 고려하였을 때 소집단 토의 기법인 브레인스토밍과 버즈그룹이 주로 활용되고 있음

| 구분 | 브레인스토밍 | 버즈그룹 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 특징 | 특정 주제나 문제점에 대해 학습자들의 의견이나 아이디어를 자유롭게 제시 학습자의 창의력을 촉진하고 학습참여도를 높여 주는 수업방식 | 학습자들을 소집단으로 편성하여 특정 주제나 문제점에 대해 토의하도록 하여 수업에 참여시키고, 독창적인 사고를 개발하는 수업방식 |
| 참여인원 | 10~12명 | 6명 이하 |
| 토의시간 | 10~15분 이내 | 6분 이내 |
| 장점 | 학생들의 다양한 의견 도출 | 학생들의 협동심 향상 |
| 추진방법 | - 주제 또는 문제점은 구체적이고, 학습자가 이해하기 쉽고 흥미를 가질 수 있는 수준의 것으로 선정 - 학습자들이 자기의 의견이나 제안을 거리낌 없이 생각나는 대로 발표 - 교수자는 수업진행 도중 학생들의 의견을 평가하지 않고, 모두 다 발표된 이후 평가 실시 | - 교수자는 특정 주제에 대한 설명을 통해 사전 지식을 함양 - 소집단 대표를 선발하고, 예정된 짧은 시간 내에 실시하고, 모든 구성원이 의견을 제시할 수 있도록 유도 - 소집단 대표는 그룹 내 의견을 요약하고, 전체 학습자에게 발표 |

나. 장단점

토의식 수업에서 나타날 수 있는 문제점과 해결 방안은 다음과 같음

| 장점 | 단점 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 학습자가 적극적으로 수업에 참여 가능 - 학습자의 문제해결능력, 비판적 사고능력 향상 - 전체 학습자들의 의견을 통해 다양한 아이디어 발견 가능 - 학습자가 논리적으로 사고하고, 의사소통능력을 향상 - 타 학습자의 의견을 존중하는 민주시민의 자세 함양 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업진행 속도가 느리며, 토의주제를 벗어날 수 있으므로 중간중간 논점을 정리 필요 - 일부 학습자가 주도권을 차지할 수 있음 - 신속한 의사진행을 위한 적절한 토론 조정기술 필요 - 토의를 위한 교수의 사전준비가 매우 중요 |

다. 수업준비

토의식 수업은 교수자의 사전계획과 준비가 매우 중요하며, 토의식 수업방법을 활용하고자 할 때 다음 사항을 숙지하여야 함

1. 학습자 수준에 맞고, 학습목표를 달성하는 데 중요하고 도움이 되는 주제 또는 문제 선정
2. 형식적이 아닌 자유로운 분위기에서 토의할 수 있도록 좌석 배치
3. 필요한 경우 토의에서 다룰 주제에 대해 전부 또는 일부를 예습해오도록 안내
4. 학습자들이 편안함을 느끼도록 수업을 진행하기 전에 상호간 신뢰가 쌓이도록 분위기 조성
5. 교수자가 토의 주도 또는 토의 중재 역할을 할 것인지 결정 필요

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자들이 토의목적이나 목표를 이해하도록 지도 (예. 대조적인 상황이나 장면을 담은 시청각자료 제시 후 특정 문제 유도) - 학습주제가 학습자의 요구 및 흥미와 관련된 문제라는 것을 인지 - 토의기법, 규칙, 주제, 토의시간, 매너 등을 소개 |
| 전개 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자가 동일한 참여기회를 가지고, 편안하게 의견을 발표할 수 있는 자유로운 분위기 조성 - 교수자는 가능한 한 안내자 역할을 하고 교수자가 간섭하여 보조설명 등을 하는 경우 학생들의 적극적인 참여를 방해하게 됨 - 학습자들의 의견에 고개를 끄덕이거나 미소를 지어 학습자의 활동에 관심을 준다 - 학습자의 행위, 태도 등을 모니터링하고 이해도를 파악 |
| 마무리 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자들의 의견에 대해 요약, 정리하고 주요사항들을 언급 - 토의를 통해 새롭게 학습한 내용을 선행지식에 연결할 수 있도록 유도 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 아무도 먼저 자신의 의견을 발표하지 않으려는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 교수자는 구체적인 질문을 통해 학습자에게 자신감을 주고 자발적인 답변을 유도 - 정답이 없다는 것을 인지시켜주어 자유로운 의견을 유도 |
| 소수학습자만 참여하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 다른 학습자가 자연스럽게 의견을 말할 수 있는 기회를 주고, 참여를 잘하는 소수 학습자에게 다른 사람의 의견을 기다릴 수 있도록 안내 |
| 상반된 의견이 제시되어 논쟁이 심화된 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 교수는 중립적인 자세를 취하고, 다양한 학생이 자신의 의견을 발표할 수 있도록 시간과 순서를 중재하거나 분위기를 전환할 수 있는 재치 필요 |

4-3. 플립러닝

가. 정의

학습자가 수업 전 동영상, 학습자료 등으로 관련된 이론 등을 학습하고, 수업시간에는 사전에 학습한 내용을 바탕으로 토의나 토론, 실험, 실습, 질의응답을 통해 학습한 내용을 적용하도록 하여 선행지식이 완비된 상태에서 수업에 참여하게 되어 수업 시 단순한 내용 전달이 아닌 심화된 학습이 가능

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 수업 전 충분한 학습이 가능 - 수업시간에 불필요한 내용 전달 시간이 감소 - 다양한 관련 자료를 사전 공유 가능 - 수업시간에 논의, 활동 등을 강화 가능 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자가 수업 준비에 많은 시간이 소요 - 학습속도가 느린 학생의 참여가 어려움 - 교수자의 자료 준비 및 제작시간이 길어짐 - 사전학습이 되지 않은 학생의 참여가 어려움 |

플립러닝의 효과

- 선행학습을 통해 학습자-교수자 간 실제 적용에 대한 깊이 있는 학습 가능
- 학습자의 능동적인 참여 가능
- 사전학습수준에 따라 수업목표 달성을 위한 추가학습이 가능(문제풀이, 토론 등)
- 사전지식을 실제 적용 과정에서 교수자의 즉각적인 피드백으로 학습 강화 가능

다. 수업준비

학습자의 사전지식 여부, 사전학습 환경, 학습내용 등을 사전에 파악하여 설계

1. 수업내용에 적합한 필수 내용을 학습자 수준을 고려하여 다양한 콘텐츠 형태로 학습에 사용될 사전학습 자료를 준비
2. 학습자들에게 해당 수업 준비사항, 사전학습자료 배포 등 수업방식을 안내하여 차질 없는 수업 운영
3. 사전에 숙지해야 할 이론, 현상 등을 주요 키워드를 제공하여 교수자의 의도대로 학습자의 수준을 일정 수준에 도달할 수 있도록 해야 함

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자가 사전학습을 통해 내용을 습득하였는지 간단한 질문이나 질의응답으로 확인 - 사전학습준비 정도가 낮은 학습자를 파악하여 집중적으로 관리 |
| 전개 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자들의 수업활동에 관찰자 역할로 참여하여 학습 내용 반영 여부, 학습내용에 맞게 진행 되는지 판단 - 학습자들이 학습내용과 다르게 진행하거나, 잘못된 이해를 바탕으로 진행하는 경우 개입하여 올바른 방향으로 진행되도록 지원 - 대표적인 전개 활동으로 토론 및 토의, 문제풀이, 시연을 적용할 수 있으며, 학습내용이 이전 수업시간과 연관된 내용인지 파악하고, 새로운 내용일 경우 간단하게 설명하는 과정 필요 |
| 마무리 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업을 준비하는 과정, 수업 중 얻게 된 지식의 확장을 종합적으로 정리 - 필요시 관련 과제를 부여하여 학습자들의 이해 여부를 파악 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 학습자가 사전학습을 하지 않고 참여하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업 이전 학습 여부 점검 및 학습내용에 대한 간단한 설명으로 지식 일부 제공 - 사전학습 미이행에 대한 페널티 등 부여 |
| 학습자가 사전학습 내용을 이해하지 못하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 자료 배포 시 해당 차시에 대한 성취 수준과 학습자들이 핵심적으로 파악해야 할 내용을 명확하게 제시 - 수업 이전 간단한 질문으로 중요한 개념에 대해 확인할 수 있는 기회 제공 |
| 활동에 소극적으로 참여하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 사전에 의도된 질문, 구조화된 질문 등을 준비하여 학생들이 참여할 수 있도록 유도하거나, 계획된 활동으로 이어질 수 있도록 안내 |
| 계획된 학습을 달성하지 못하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업내용이 학습자 수준에 비해 어려운 경우 준비된 내용을 학습하지 못할 수 있으므로 피드백을 통해 추가적인 자료 또는 학습자 눈높이에 맞춘 학습자료를 사전에 제공 |

4-4. 문제중심형

가. 정의

다양한 상황에서 직면할 수 있는 문제들을 활용하여 해결 과정을 통해 학습이 이루어지는 수업으로 현실적이고 실제적인 문제를 다양한 해결 방안을 도출하는 과정으로 교수자는 지식전달자가 아닌 튜터이자 촉진자로 직접적인 해결 과정에 참여하지 않고, 학습자들의 토론과 비판적 사고를 촉진하는 역할로 참여

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 현장성 있는 학습능력 습득 가능 - 업무 문제를 통해 직접 체험 가능 - 문제에 대한 총체적인 과정 이해 가능 - 학습자의 자율성과 능동적 능력 형성 가능 - 협동학습을 통해 민주적 태도 배양 가능 | <ul style="list-style-type: none"> - 계통적 기초학력 형성이 어려움 - 학습방향의 일관성 유지가 어려움 - 노력에 비해 지적성장이 비효율적 - 진보, 발전하는 학문에 대한 빠른 학습이 어려움 - 교과의 체계적 학습이 어려움 |

다. 수업준비

1. 학습자의 이해와 참여가 필수적으로 학생들이 원활하게 지식을 공유하고 다양한 문제해결 방안을 찾아내 새로운 정보를 수집하고 토론할 수 있도록 학습환경을 제공
2. 교수자의 역할이 튜터이자 촉진자로서 학습자가 적극적으로 참여하여 자기주도적으로 주어진 주제에 관한 지식을 습득할 수 있도록 학습동기 유발 및 방향성을 유도
3. 실제 현장성이 포함된 깊은 사고와 다양한 해결책을 제시할 수 있는 문제로 학습자들의 사전지식과 조사 내용을 토대로 결론을 도출할 수 있는 문제 선정
4. 학습자가 자기주도적으로 주어진 주제에 관한 지식을 습득

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자의 완전한 과정 이해를 전제로 자기주도학습이 이루어질 수 있도록 교육 이전 교육과정에 대한 안내 - 학습자 스스로 '나의 문제'로 인식할 수 있도록 하며, 학습자 간 역할을 분장하고 문제해결을 위한 계획서 수립 지원 |
| 전개 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자 인원내 따라 그룹을 분배하고, 구성원 간 자유롭게 소통할 수 있는 분위기 조성 - 문제중심학습 중 개별적 학습의 팀별 공유를 강조하고, 학습목표와 학습내용의 관련성 지속적 검토 - 그룹별 토론 과정에서 소수의 의견독점을 방지하고, 각 그룹에서 잘못된 내용이나 방향으로 진행되는 경우 문제해결에 대한 간접적 질문을 제시하여 학습자의 비판적·성찰적 사고 촉진 |
| 마무리 | <ul style="list-style-type: none"> - 종합정리를 통하여 그룹별 해결방법을 비교하고, 특정 문제해결의 경험이 유사한 사례에서 어떤 식으로 일반화하여 적용시킬 수 있는지 논의 |

| 과정 | 세부단계 | 교수자 | 학습자 |
|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | 문제상황 | <ul style="list-style-type: none"> - 문제중심학습 과정 소개 - 현장성과 직무연관성이 있는 문제상황 제시 파악 | <ul style="list-style-type: none"> - 문제학습과정 인지 및 문제상황 파악 |
| 전개 | 학습 이슈 | <ul style="list-style-type: none"> - 튜터이자 촉진자로서 간접적 문답을 통해 문제해결과정에 대한 피드백 제공 - 섹션 사이에 충분한 학습과 토론이 이루어 지도록 학습환경 조성 - 섹션별로 오버랩을 피할 수 있도록 간접 지원 - 토론이 진행되는 동안, 소수의 의견 독점 방지를 위해 역할 분장에 대한 순환유도 - 원활한 토의가 이루어질 수 있도록 그룹 관리 및 제어 | <ul style="list-style-type: none"> - 문제 상황에 대한 학습이슈 도출 - 그룹별 역할 분장 및 문제해결을 위한 계획서 작성 |
| | 개인학습 | | <ul style="list-style-type: none"> - 개인적 자기주도적으로 분장된 문제에 대한 학습시행 및 정보수집 |
| | 그룹 공유 | | <ul style="list-style-type: none"> - 개별적 학습내용 그룹 공유 - 그룹 리더는 분장된 업무를 순차적으로 공유하게 한 후 정리 |
| | 토의 검토 | | <ul style="list-style-type: none"> - 그룹토의를 통하여 문제해결 의견 도출 |
| | 문제해결 | | <ul style="list-style-type: none"> - 문제해결에 대한 간접적 질문 제시 - 직접적 지식전달보다 학습자의 비판적 성찰적 사고 촉진 - 학습자에게 정답에 대한 확신이 들지 않도록 긍정적 혹은 부정적 피드백을 주는 것을 주의 |
| 마무리 | 발표 평가 | <ul style="list-style-type: none"> - 종합정리를 통해 그룹별로 해당 문제의 해결 방법을 비교 - 특정 문제의 해결 경험이 다른 유사한 경우에 어떤 식으로 일반화하여 적용시킬 수 있는 가에 관해 논의 | <ul style="list-style-type: none"> - 과정 및 결과에 대한 내용을 정리 발표 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 교수자가 튜터 역할이 익숙하지 않은 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자와 정서적 공감대를 형성하고, 체계적으로 문답법을 활용하고, 사전에 문제해결에 대한 다양한 해결 방안을 미리 구성하고 도움이 될 만한 질문 사항을 사전에 체크 |
| 토의 및 소통이 원활히 이루어지지 않는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 문제해결과정에 대해 구체적으로 학습시키고, 피드백과 간접적 질문을 통해 학습자의 비판적 사고 촉진 |
| 수강생이 많아 보조교수를 이용해야 할 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 동료교수자나 교육조교를 활용 시 문제중심학습 내용에 대해 구체적인 교육을 시행하고, 튜터 역할에 대한 사전검증 |

4-5. 프로젝트수업

가. 정의

학습자가 스스로 생각하고 해결하고자 하는 것을 정하여 구체적인 실천과정을 통해 결과물을 산출하도록 하는 수업으로 학습자가 질문을 만들고 해당 질문을 중심으로 학습활동 구성
실생활 및 현장과 직접적으로 연결되며, 학습자들의 적극적인 학습 참여를 유도하는 도전적 질문이나 문제 중심으로 전개

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 학습자가 다양한 지식과 경험을 획득하는 데 도움을 줌 - 하나의 주제에 대해 여러 가지 방법으로 탐구가 가능 - 수업내용이 실제 현장과 밀접하게 연관 - 프로젝트 수행과정을 통해 문제해결능력 및 대인 관계능력 향상 가능 | <ul style="list-style-type: none"> - 많은 시간이 소요됨 - 자료 선정 및 획득이 어려움 - 팀 활동을 수행하는 학습자들의 개별 관리가 어려움 - 프로젝트 수행결과물에 대한 객관적 평가 어려움 |

다. 수업준비

1. 학습자에게 제공할 프로젝트 이슈를 최근 논란 쟁점이나 현안문제를 중심으로 선정
2. 프로젝트 팀 구성은 주제 및 학습인원을 고려하여 4~5명으로 구성
3. 각 팀의 진행과정을 모니터링할 수 있는 전략 수립(특정 공유공간에 수업자료 등을 공유하여 진행과정 확인)
4. 프로젝트 운영에 필요한 물적·인적 자원을 제공하여 진행과정에서 학습자들이 직면한 문제점을 함께 해결할 수 있도록 교수자의 역할 및 학습활동 지원방식 규정

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | 프로젝트 수업 진행을 위한 팀 구성(전문가 및 교수 등 촉진자도 팀에 포함 가능) |
| 전개 | 과제분석 및 명료화 - 문제상황 속 목표과제를 분석 및 사전지식과 알아야 할 지식 파악 - 브레인스토밍을 통해 과제해결을 위한 다양한 아이디어를 도출 - 교수자는 다양한 사고기법이나 자료 제공, 생산적인 대화 유도 과제 해결방안 도출 - 팀원 간 생산적인 토론 진행 및 실현가능한 해결 방안 도출 - 중요성, 수행일정 및 절차, 실현 가능성을 고려하여 우선순위 결정 - 수립된 의견을 토대로 과제 수행 설계안 작성 과제 수행 및 결과물 도출 - 과제수행 설계안을 기반으로 실제 결과물 도출 - 교수자의 역할 수행(물적·인적 지원 및 설계안, 제작물에 대한 피드백 등) |
| 마무리 | - 최종 결과물과 프로젝트 수행 전과정 발표 및 공유 - 프로젝트 수행과정에서 학습자 역량 파악 및 피드백 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 교수자가 튜터 역할에 익숙하지 않은 경우 | - 사전에 학습자와 수업내용에 대해 정확하게 파악, 프로젝트식 수업에 대한 연수 및 워크숍 등 교수역량 신장 |
| 학습자 개별적 특성에 대한 배려가 부족 시 | - 교수자와 학습자 간 상호작용을 늘리며 학습에 흥미를 가질 수 있도록 배려하고, 개별 학습자의 욕구를 존중하여 원하는 활동을 자유롭게 선택하여 활동하도록 유도 |

4-6. 팀티칭

가. 정의

학생들에게 더욱 넓은 안목을 주기 위해 각자 전문성을 지닌 두 명 이상의 교수가 팀이 되어 교수설계 교수준비, 수업진행, 평가 등 활동을 공동으로 진행하는 수업 방법
 교과내용 특성이 다른 여러 개 분야로 분리되는 경우 적합한 수업 방식

| 유형 | 특징 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| 리더/보조 교수자 | - 경험이 풍부한 교수(리더)와 다소 부족한 교수(보조)가 함께 구성되는 유형으로 리더 교수가 수업 전반에 대한 책임 |
| 다수의 교수자 | - 교수설계는 공동으로 진행하고, 수업은 학습집단에 따라 분담하여 수업 진행 |
| 협력 교수자 | - 모든 영역에 동일하게 책임을 지며, 수업을 분담하여 진행하는 유형 |
| 외부강사 | - 한 명의 교수자가 수업을 전반적으로 이끌고, 수업의 일부분을 외부 강사가 담당하는 유형 |

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 학습자들이 다양한 전문가의 전문적인 학습내용을 접할 수 있음 - 교수의 개성을 살려 지도 가능 - 교수의 지도방법을 개선할 수 있음 - 학습집단 및 학습공간의 활용에 대한 유연성 확보 - 교수 간 노력의 중복 최소화 | <ul style="list-style-type: none"> - 교수들 간에 기준이나 가치관의 차이로 개인적인 충돌이나 팀워크에 문제 발생 가능 - 자료제작이나 사전협의에 충분한 시간 필요 |

다. 수업준비

1. 학습목표 및 팀티칭에 대한 설명을 명확히 전달
2. 팀티칭 수업 시 가르치게 되는 수업내용을 결정
3. 교수 간 역할 분담을 명확히 하고, 각 교수자의 역할을 기록하는 등 협력
4. 학습자 소집단 구성 방법 및 어떠한 형태의 수업방식을 적용할지 결정
5. 대집단 학습활동, 소집단 학습활동, 개인 학습활동의 시간 배당을 결정

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|
| 대집단 학습 | - 모든 학생들이 알아야 할 공통된 주제나 기본지식, 배경자료 등을 전달 - 학습목표, 수업방식, 유의사항 등을 명확하게 제시 |
| 소집단 학습 | - 능동적으로 대집단 학습 내용을 토의하거나 소속된 소집단 교육내용을 학습 |
| 개인학습 | - 특정 주제나 관심 분야에 심화 탐구하는 과정, 소집단 학습을 마무리한 학생에게 심도 있는 학습을 학생 개인별로 수행할 수 있도록 제시 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|------------------------|-----------------------------|
| 소집단 학습분야 간 관련성이 불명확할 때 | - 대집단 학습 시 소집단 분야별 연관성을 명확화 |

4-7. 시뮬레이션 수업

가. 정의

실제의 상황이나 그와 유사한 사태를 인위적으로 만들고 학습자의 능동적인 학습이 이루어지도록 하는 수업방식

| 유형 | 특징 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 놀이학습 | - 학습자가 구체적 사물을 직접 조작하는 활동으로 사실이나 개념을 얻는 수업방식 - 학습자들의 흥미를 유발시키며, 즉각적인 피드백이 제공되고 적극적인 참여 가능 |
| 사례연구 | - 사실적으로 묘사된 문제상황을 제시하고, 학생들이 직접 관련된 입장에서 문제를 고려하고 해결하는 수업방식 - 사례는 학습자의 흥미를 유발하고, 수준에 적합하며 친숙한 것으로 설정 |
| 역할연기 | - 주어진 상황에서 연습 없이 역할을 연출하여 자신이나 참관자에게 그 상황을 명확히 제시하는데 목적을 둠 - 역할 연출은 상황적 사실과 밀접한 유사성을 유지하면서 자유롭고 자발적으로 반응하여야 함 |

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 수업에 현실성을 부여 - 낮은 비용으로 학생들은 사실적 경험을 할 수 있음 - 학생들의 흥미를 유도 가능 - 의사소통 및 의사결정 연습기회를 제공 - 학습자 상호간 설득력과 친밀도 증가 - 문제해결능력과 의사결정능력 향상 | <ul style="list-style-type: none"> - 준비가 부족시 시간, 노력, 경비가 낭비 - 실제 세계를 단순화하기 어렵고 변수가 많음 - 산만한 학습 분위기 형성 |

다. 수업준비

1. 학습주제는 교육내용과 시간계획에 따라 사전에 구상하여 명확화
2. 시뮬레이션 수업을 적용할 단계를 결정(도입-학습동기유발, 본문-학습자 이해증진, 마무리-학습내용 확인)

라. 수업진행과정

| 학습단계 | 주요 내용 |
|------|--------------------------------------------------------|
| 도입 | - 학습자가 익숙한 상황으로 문제 및 주제를 제시하고, 학습자가 파악을 하도록 유도 |
| 전개 | - 주어진 상황 및 문제에 따라 적절한 언어 및 행동을 취하며 해결 방안을 모색 |
| 마무리 | - 시뮬레이션을 통해 참여자들이 취한 각 행동과 역할이 실제생활에서 어떻게 연관되었는지 의견 청취 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 노력, 시간, 비용 투자 대비 진행이 부진한 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자 수준을 고려하여 수업이 진행되었는지 확인 - 지속적인 시뮬레이션 수업적용 필요 시, 수업의 일부로서 시뮬레이션 적용을 고려 |
| 시뮬레이션 수업 이후 남는 것이 없다고 느끼는 학습자 | - 시뮬레이션 수업은 학습자들의 역동적인 활동을 요구하기 때문에 몰입이 쉬운 수업방법이므로 수업 이후 수업결과를 논의하여 정리하도록 안내 |
| 시뮬레이션 수업에 소극적으로 참여 시 | <ul style="list-style-type: none"> - 수업 시 교수자의 참여가 과다할 경우 학생들이 위축되고, 참여가 없는 경우 수업이 산만해질 수 있음 - 수업 시 지배적 역할이 적은 '안내자', '촉매자' 역할을 수행 |

4-8. 협동식 수업

가. 정의

학습자를 소집단으로 구성하고, 소집단의 집단목표 또는 학습과제를 구성원 간의 상호작용을 통해 모든 구성원이 달성하도록 하는 수업방식으로 팀워크 기술 형성 및 학습에 적극적인 참여기회를 제공하여 학습자의 전반적인 성취와 비판적 사고기술, 의사소통능력, 협동정신에 긍정적인 영향을 제공

나. 장단점

| 장점 | 단점 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - 우수한 학습자가 부족한 학습자를 이끌어 줄 수 있음 - 학습자들 간에 정보를 공유 가능 - 조원 전체가 협력하여 학습하므로 협동심과 희생정신 함양 가능 - 학습자들의 자부심을 기를 수 있음 - 학습자들의 성취욕구가 증가될 수 있음 - 토론과 논쟁을 통하여 높은 수준의 사고력이 발달 가능 | <ul style="list-style-type: none"> - 교수의 감독이 없을 경우 수업이 산만해질 수 있음 - 일부 우수한 학습자에 의해서만 학습이 이루어질 수 있음 - 많은 시간과 노력이 요구 - 학습자들끼리 잘못 이해한 것을 정답으로 오해할 수 있음 - 적극적으로 학습에 참여하지 않아도 좋은 성과를 얻을 수 있음 - 학습능력이 우수한 학습자는 자신의 노력이 다른 학습자와 공동으로 분배되기 때문에 학습에 회의를 느낄 수 있음 |

다. 수업준비

1. 협동식 수업에서 소집단 구성이 가장 중요하며, 소집단 구성은 학습능력뿐만 아니라 학습자 개인적 특성이 상호 이질적인 4~6명의 학생으로 구성하는 것이 바람직함
2. 협동식 수업을 통해 도달하고자 하는 명확한 학습목표를 제시하고, 수업 진행에 대한 안내를 하여 원활한 수업이 진행되도록 유도

라. 수업진행과정



▲ 그림78 Jigsaw II 협동식 수업의 일반 순서

| 학습단계 | 주요 내용 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도입 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습목표와 관련된 주요 학습내용을 학습자들에게 자세히 설명 - 학습자가 익숙한 상황으로 문제 및 주제를 제시하고, 학습자가 파악하도록 유도 |
| 과제제시 및 선택 | <ul style="list-style-type: none"> - 개인별 전문과제 부과 - 교수자는 소집단 구성원 수만큼 하위 주제 준비 |
| 전문가집단 활동 | <ul style="list-style-type: none"> - 동일 하위주제를 선택한 학습자들끼리 소위 전문가 집단 형성 |
| 원집단활동 | <ul style="list-style-type: none"> - 전문가집단 활동 이후 처음 구성된 소집단으로 돌아와서 자신이 학습해 온 하위주제에 대해 집단 구성원에게 내용 공유 - 소집단 구성원 간 협력이 원활하게 이루어지도록 교수자는 격려 및 지원 |
| 마무리 | <ul style="list-style-type: none"> - 학습자로 하여금 학습내용을 요약하도록 지도 - 학습 이후 조별 활동내용에 대한 피드백 제공 |

마. 문제점과 해결 방안

| 문제점 | 해결 방안 |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 정해진 시간 내에 협동식 수업을 끝내지 못하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 정해진 시간 내에서 논의할 수 있도록 단계별 시간을 정해놓고 수업을 진행 |
| 일부 학습능력이 우수한 학생이 학습을 독점하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 교수자는 지속적으로 각 소집단 활동을 관찰하며, 모든 학생이 자신의 의견을 말할 수 있도록 하며, 동료 학습자의 의견을 존중할 수 있도록 지도 |
| 협동식 수업을 제대로 진행하지 못하는 경우 | <ul style="list-style-type: none"> - 협동식 수업에 어려움을 느끼는 팀에는 중요절차나 방법을 점검하고 안내 - 학습자들의 질문에 대답해 주며, 필요한 기능을 안내 |

5. 수업평가 · 분석 및 개선

5-1. 수업평가 · 분석

- 교수자는 수업능력 향상을 위하여 학습자 또는 스스로 수업평가를 실시하여 수업의 강·약점을 객관적으로 분석하고 개선점을 모색
- 다양한 문제점에 대해 종합적으로 이해하기 위하여 기억이나 느낌에 의한 평가보다 객관적이고 과학적으로 평가할 수 있는 전문적인 틀을 활용하는 것이 효과적
- 수업평가 분석을 통해 교수자가 지향하는 수업과 현재 수업 간의 격차를 해소 가능

평가 시기 | 다양한 학습자를 대상으로 진행되는 탄소중립 교육의 특성을 고려하여 효율적인 평가를 위해 매 교육운영 시 실시하여 지속적인 개선이 필요

평가 요소 | 수업 중 이루어진 구체적인 사항을 평가하기 위한 것으로 수업운영(동기유발, 수업내용, 자료제공 등) 및 수업태도(의사소통, 피드백 등) 등에 대해 평가할 수 있음

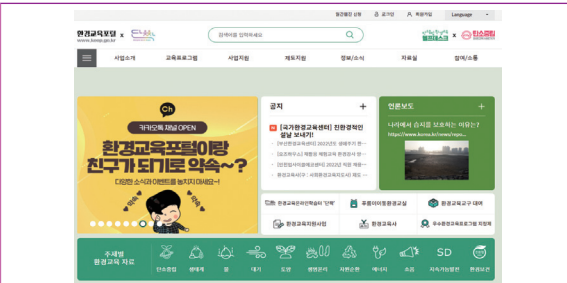
평가 방법 | 수업평가 방법으로는 자가진단 체크리스트를 활용하는 방법, 자신의 수업을 학습자 또는 녹화 후 모니터링, SWOT 분석 등이 있으며, 각 평가 방법에는 다음과 같은 특징이 있음

- 체크리스트 평가 : 수업 종료 후 손쉽게 즉각적으로 평가할 수 있으며, 일정한 평가항목에 따라 지속적인 평가로 수업 개선 정도를 확인 가능
- 학습자 평가 : 수업의 직접 수혜자인 학생들로부터 교수자의 수업에 대해 개선이 필요한 정보를 학생들로부터 확인
- 녹화영상 평가 : 자신의 수업에 말투, 말의 속도, 목소리 크기, 표현 방법 등을 학습자 관점에서 바라볼 수 있어 명확한 평가가 가능
- SWOT 분석 : 내부역량인 강점(Strength), 약점(Weak)과 외부환경 기회(Opportunity), 위협(Threat) 요인을 나열하여 분석하는 방법으로, 구체적인 분석이 가능

탄소중립 교육 참고사이트



환경부
(me.go.kr)



환경교육포털
(www.keep.go.kr)



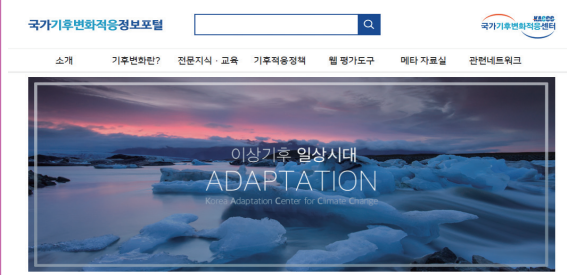
2050탄소중립 누리집
(www.gihoo.or.kr/netzero)



탄소중립위원회
(www.2050cnc.go.kr)



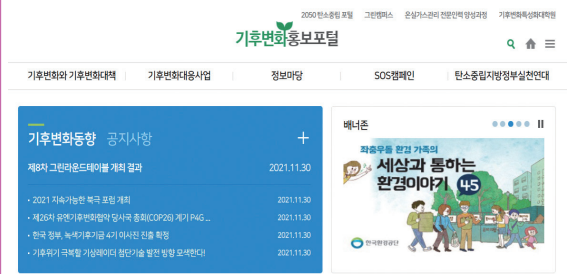
기상청 기후정보포털
(climate.go.kr/home)



국가기후변화적응정보포털
(kacc.kei.re.kr)



e기후변화교육센터
(educenter.kcen.kr)



기후변화 홍보포털
(www.gihoo.or.kr)

2050 탄소중립 교육 참고자료집

| | | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 발행일 | (초판) 2022년 2월 | |
| 발행기관 | 환경부 | |
| 발간참여위원 | 부산대학교 극지연구소 한국환경연구원 숙명여자대학교 서울대학교 한국환경연구원 고려대학교 충남대학교 한국에너지기술연구원 한국교통연구원 국토연구원 한국법제연구원 | 이준이 교수 진 경 박사 정휘철 선임연구위원 유승직 교수 정수종 교수 이창훈 선임연구위원 이우균 교수 장용철 교수 박민희 실장 김규옥 센터장 박종순 박사 현준원 연구원 |
| 기획 · 편집 | 환경보전협회 | |
| 디자인 | 광문인쇄사 | |



교육 참고자료집



환경부



공공기관 / 환경부 법정법인
환경보전협회