



환경경제학

7차시

1. 기후변화에 따른 피해

1.1. 온실가스와 기온

1) 기후변화와 온실가스

- ① 21세기에 있어 전 지구적 환경문제 중 가장 중요한 것은 단연 **기후변화(climate change)**임
 - 기후변화는 지구표면의 온도가 장기적으로 꾸준히 상승하는 현상을 의미함
 - 이는 생태계와 인간의 생활에 대단히 큰 충격을 주며 그 피해가 상당할 것임
- ② 온실가스는 지구 내부로 태양빛을 유입시키지만, 유입된 적외선이 반사되어 외부로 유출되는 것을 차단하여 지구 내부온도를 높임
 - 온실가스의 균형은 산업혁명 이후 발생한 화석연료의 사용과 이로 인한 급속한 이산화탄소 배출량 증대로 무너짐
 - IPCC(2007)에 따르면 전 세계 온실가스 배출량은 1970년과 2004년 사이에만 70%가 증가함
- ③ 기후변화를 완화하기 위해서는 **온실가스(greenhouse gases)** 배출량을 줄이는 것이 필수적인데, 이는 전 세계 모든 국가의 경제활동에 큰 변화를 요구하므로 실제로 실행하기가 쉽지 않음

2) 온실가스 종류와 배출원

- ① 지구온난화를 유발하는 온실가스로는 약 20여종이 있는 것으로 알려져 있음
 - 대표적인 가스로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 과불화탄소(PFCs), 수소불화탄소(HFCs), 육불화황(SF₆), 염화불화탄소(CFCs)등이 있음
 - CFCs는 몬트리올의정서에 의해 규제되며, CFCs를 제외한 6가지는 교토의정서(Kyoto Protocol)에서 규제되기 때문에 교토가스라 부름
- ② 각각의 가스가 기후에 미치는 영향은 상이하므로 이들 가스들은 온실효과를 유발하는

정도인 이산화탄소로 환산된 양(CO₂ equivalent, CO₂e)으로 측정되기도 함

- 즉, ppm단위로 농도가 측정됨
- ppm은 공기질량에서 CO₂e질량이 차지하는 비중에 1백만을 곱한 것임

$$\text{ppm} = 1,000,000 \times \frac{\text{CO}_2\text{e 질량}}{\text{공기 질량}}$$

③ 온실가스의 가스종류별, 경제활동별 배출원은 다음과 같음

- 이산화탄소를 제외하면 메탄(14.3%), 아산화질소(N₂O)의 순서로 배출량이 많음
- 이산화탄소의 경우 화석연료 사용이 가장 큰 배출원이고 산림벌채나 바이오매스 감소에 의해서도 많은 양이 배출됨
- 경제활동 중에는 에너지공급 부문에서 가장 많은 온실가스가 배출되며, 다음으로 산업부문, 임업, 농업, 수송의 순서로 높은 비중을 차지함

〈그림 1〉 수요곡선 온실가스 종류 및 배출원 단위: %, 2004년 기준

온실가스 종류		배출원	
CO ₂ 화석연료	56.6	에너지공급	25.9
CO ₂ 산림벌채 등	17.3	수송	13.1
CO ₂ 기타	2.8	주거 및 상업용건물	7.9
CH ₄	14.3	산업	19.4
N ₂ O	7.9	농업	13.5
기타(F가스)	1.1	임업	17.4
		폐기물 및 폐수	2.8

자료: IPCC(2007, p. 36).

3) 온실가스 농도변화와 영향

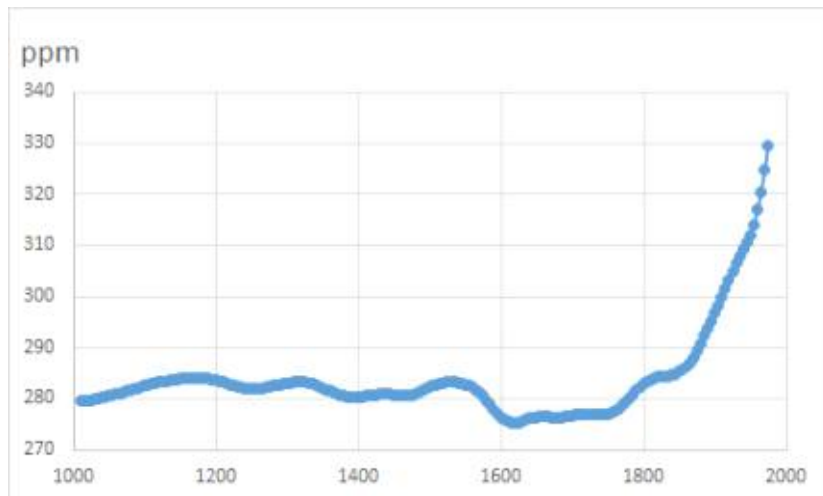
① 대기 중 온실가스 농도의 증가

- 에테리지 외(Etheridge et al., 1996)는 북극지방에서 채취한 3개의 아이스 코어(ice core)를 이용해 1006년에서 1978년 사이의 대기 중 이산화탄소 농도를 추정하여 공개함
- 비교적 일정한 수준을 유지하던 이산화탄소 농도가 1800년대 후반기부터 급속도로 빨리 증가함

② IPCC보고서의 기온, 해수면, 적설면적 변화

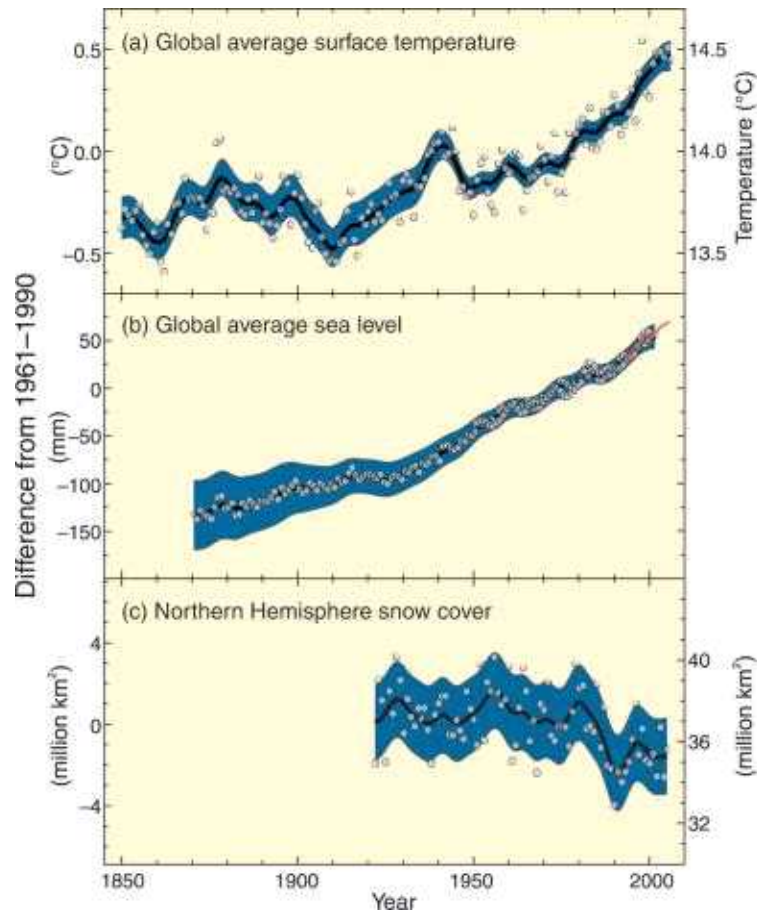
- 지표면 평균기온과 평균 해수면은 20세기 후반기에 들어와 급속히 높아짐
- 북반구의 적설면적은 급속히 감소함

〈그림 2〉 대기 중 CO₂ 농도의 변화



자료: 에테리지 외(Etheridge et al., 1996).

〈그림 3〉 기온, 해수면, 적설면적의 변화



출처: IPCC(2007), Figure 1.1 Changes in temperature, sea level and Northern Hemisphere snow cover

1.2. 과학적 논란

1) 과학적 논란

- ① 기후변화가 과연 전례가 없는 것인지 아니면 자연적으로 발생할 수 있는 범위 내에 있는지 과학적 논란이 있음

1. 과거 기후변수자료의 신뢰도에 대한 의문

: 기온이나 온실가스 농도 등의 1800년대 중반 이전의 자료는 나이테 분석, 아이스 코어 분석, 호수 퇴적물 분석, 과거 기록자료 분석 등과 같은 간접적 분석에 의존한 것이라 현재의 실측 자료와 같은 비중을 두고 비교하기 어렵다는 주장

2. 기후변화의 주원인에 대한 의문

: 현재 발생하고 있는 기후변화가 화산활동이나 해수 염도 변화, 엘니뇨현상과 같이 인간의 경제행위와 무관한 자연적 활동에 의해 발생할 수 있다는 주장

② 그러나 기후변화와 화석연료 배출 간의 상관관계를 보여주는 연구 성과가 많아지고 있음

1.3. 미래 전망

1) 기후변화 시나리오

① 미래의 온실효과가스 배출량, 대기 중 농도, 지구의 평균온도 등에 관한 공식적인 예측치로 IPCC의 2000년 보고서인 SRES (IPCC Special Report on Emissions Scenarios)의 예측치가 자주 인용됨

② 세계 경제에 관한 6가지의 시나리오는 다음과 같음

- 시나리오 A1: 세계 경제가 매우 빨리 성장하고, 인구가 21세기 중반에 피크에 달하며, 새롭고 효율적인 기술이 신속히 도입됨 가정

- A1 시나리오는 다시 기술변화 방향에 따라 세 가지로 나뉨

: 화석연료 집약적 기술(A1F1), 비화석연료(A1T), 모든 에너지원의 균형이 잡힌 경우(A1B)

- B1: 각국의 경제가 서로 수렴하는 상태에서 A1과 같은 인구성장률을 가정하지만 경제구조가 보다 빨리 서비스와 정보경제 쪽으로 전환한다는 가정을 하고 있음

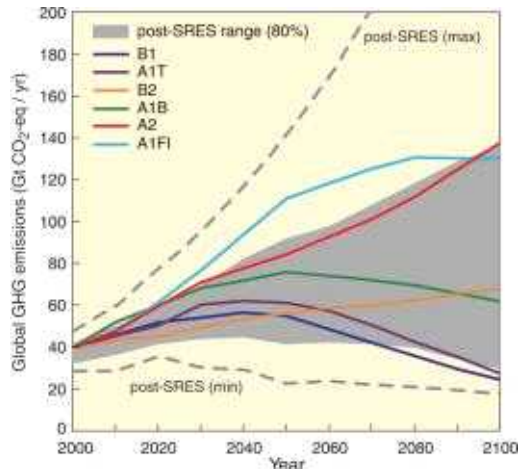
- B2: 경제성장과 인구성장이 중간 정도의 속도로 발생하고, 지역단위에서 지속 가능한 발전을 위한 조치가 취해진다는 가정

- A2: 각국별 발전단계가 매우 다를 것임을 가정하고, 인구성장률은 높은 반면 경제발전 속도와 기술개발 속도는 느릴 것임을 가정

2) 시나리오별 온실가스 배출량과 온도변화

① 시나리오에 따른 온실가스 배출량 전망은 다음과 같음

〈그림 4〉 별도 조치가 없을 경우의 시나리오별 온실가스 배출량: 2000-2100



출처: IPCC(2007), Figure 3.1 Scenarios for GHG emissions from 2000 to 2100 in the absence of additional climate policies

② 시나리오에 따른 지구 지표면 평균온도 예측치는 다음과 같음

〈그림 5〉 SRES 시나리오와 지구 지표면 평균온도 예측치

시나리오	온도변화(℃)	
	(2090-2099년의 1980-1999년 대비 증감)	
	예측치	범위 예측치
2000년 농도 유지	0.6	0.3-0.9
B1	1.8	1.1-2.9
A1T	2.4	1.4-3.8
B2	2.4	1.4-3.8
A1B	2.8	1.7-4.4
A2	3.4	2.0-5.4
A1F1	4.0	2.4-6.4

자료: IPCC(2007, p. 45).

③ 이상과 같은 배출량 및 기후변화 전망은 예측치이기 때문에 많은 불확실성을 갖고 있으며, 지역별로 상이한 결과가 나타날 수 있음

- ④ 기후변화는 지표면의 평균기온뿐 아니라 이상 고온이나 저온, 집중호우와 가뭄과 같은 기후변수의 가변성과 위험성을 높일 것임

1.4. 기후변화에 따른 피해

- 기후변화에 따라 예상되는 피해는 대단히 다양하며, 여기에서는 IPCC(pp. 48-53)의 예측을 정리하여 보여주고자 함

1) 생태계

- ① 기후변화와 홍수, 가뭄, 산불, 바닷물의 산성화 등으로 생태계가 큰 교란을 당할 것이며, 토지이용형태 변화, 오염, 자원이용의 남용 등도 생태계에 영향을 미칠 것임
- ② 기온상승과 CO₂ 농도 증가로 생태계의 구조와 기능, 종간의 상호작용, 종들의 지역별 분포 등에 큰 변화가 발생할 것임

2) 식량

- ① 중위도와 고위도 지역
 - 평균온도가 1~3℃ 정도 상승하면 작물생산성이 조금 높아질 것으로 예상되지만 효과는 작물 별로 다를 것이고, 그보다 기온이 더 상승하면 어떤 지역에서는 오히려 생산성이 하락할 것임
- ② 열대지방이나 건조한 저위도지방
 - 1~2℃ 정도의 낮은 기온상승에도 불구하고 작물 생산성이 하락할 것이며 기아문제가 심화될 것임

3) 연안

- ① 기후변화와 해수면상승으로 해안침식을 포함하는 여러 위험에 노출될 것임
- 해수면상승 때문에 홍수위험이 증가하여, 인구가 밀집된 아시아와 아프리카의 삼각주 지역, 그리고 작은 섬들이 위기에 처하게 될 것임

4) 산업, 주거, 사회문제

- ① 가장 민감한 영향을 받는 산업이나 주거지역은 다음과 같음
 - 연안이나 홍수가 잦은 하천지역, 기후에 민감한 자원에 의존하는 경제를 가진 지역, 기상이변이 자주 발생하는 지역, 특히 도시화가 급속히 이루어지고 있는 지역

5) 건강

- ① 수억 명의 인구가 영양결핍, 사망률증가, 기상이변에 따른 질병과 부상, 수인성 질환의 증가, 도시지역 오존농도 증가에 따른 심폐기능 이상의 증대, 감염성 질환의 지역별 분포 변화 등으로 인해 건강문제를 겪게 될 것임

6) 수자원

- ① 기후변화는 인구증가, 토지이용형태 변화, 도시화 등으로 인한 물수지 악화를 더욱 심화시킬 것임
 - 빙하와 적설면적의 감소 때문에 수자원 가용량이 줄어들
- ② 강수량변화와 기온변화는 지표수의 이용 가능량을 크게 바꿀 것임
 - 지표수는 중위도와 고위도 지역에서는 10~40% 늘어나고, 다른 중위도와 건조한 열대지방에서는 강수량 감소와 증발산량 증가로 10~30% 감소할 것임
- ③ 수자원 감소는 농업, 에너지 생산과 건강문제 등 여러 영역에서 문제를 일으킬 것이며, 관개수의 수요를 크게 늘릴 것임
- ④ 극심한 가뭄과 홍수가 발생할 확률이 동시에 높아짐으로써 여러 가지 피해가 예상됨

2. 기후변화에 대한 국제적 대응

2.1. 기후변화에 대한 국제적 대응의 필요성

1) 기후변화에 대한 국제적 대응의 필요성

- ① 기후변화에 따른 피해를 줄이기 위해서는 대기 중 온실가스 농도를 특정 수준에서 안정화(stabilization)하는 것이 필요함
- ② 보다 낮은 농도에서 안정화하기를 원할수록 시급히 배출 저감을 추진하여 배출량 피크가 빨리 도달되도록 해야 함

〈그림 6〉 CO₂ 농도 안정화와 달성조건 및 효과

CO ₂ 농도 안정화 수준 (2005=379 ppm)	CO ₂ 배출량 피크연도	2050년 CO ₂ 배출량 변화(2000년 대비 % 변화)	전 세계 평균기온의 산업혁명 이전 대비 증감(℃)	전 세계 평균 해수면의 산업혁명 이전 대비 증감(m)
350-400	2000-2015	-85에서 -50	2.0-2.4	0.4-1.4
400-440	2000-2020	-60에서 -30	2.4-2.8	0.5-1.7
440-485	2010-2030	-30에서 +5	2.8-3.2	0.6-1.9
485-570	2020-2060	+10에서 +60	3.2-4.0	0.6-2.4
570-660	2050-2080	+25에서 +85	4.0-4.9	0.8-2.9
660-790	2060-2090	+90에서 +140	4.9-6.1	1.0-3.7

자료: IPCC(2007, p. 67).

③ 기후변화에 대한 대처는 전 지구적 혹은 국제적 대응을 반드시 필요로 함

- 온실가스는 전형적인 전지구적 오염물질로, 어느 나라에서 배출되든 지구 전체에 동일한 효과를 미침
- 기후변화문제는 지구상의 대부분의 국가가 동참하는 노력을 통해서만 완화될 수 있음

- ④ 하지만 모든 국가는 국제협력에 동참하기보다는 무임승차자가 되려는 동기를 가지기 때문에 실효성 있는 국제 협력을 도출하기가 쉽지 않음

2.2. 지구온난화 문제에 대처하기 위한 국제적 노력

1) 지구온난화 문제에 대처하기 위한 국제적 노력

- ① 지구온난화문제에 대처하기 위한 국제적 노력은 1980년대에 들어와 시작되었고, 1992년 리우정상회담에서 UN기후변화협약(UN Framework Convention on Climate Change)을 채택함
 - 온실가스 배출량 증대에 크게 기여한 선진국들은 **2000년까지** 온실가스 배출량을 자국의 1990년도 수준까지 줄여야 함
- ② 1997년 12월 교토의정서(Kyoto Protocol)로 **2000년 이후**의 선진국들의 온실가스 감축목표를 설정함
 - 당초의 기후변화협약에서는 CO₂, CH₄, N₂O만을 온실가스에 포함시켰으나, CFC 대체물질인 HFC, PFC, SF₆까지 추가함
 - 또한 배출권거래제와 공동이행제도, 청정개발체제를 도입함으로써, 배출감소에 있어서의 효율성과 신축성을 달성할 수 있는 여지를 만들
 - 인간 활동에 의한 토지이용의 변화나 산림 등의 흡수원을 통한 온실가스 제거 행위를 인정하여 이를 감축량에 포함하기로 함

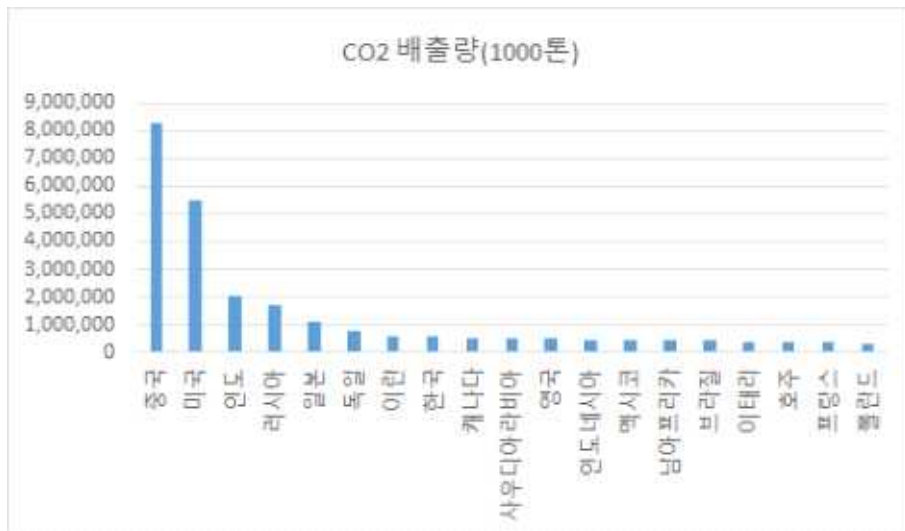
2) 지구온난화 문제에 대처하기 위한 국제 협력의 어려움

- ① 그러나 최대 배출국이었던 미국이 교토의정서에 서명만 하고 비준을 하지 않아 감축의무를 지지 않게 되었고, 조약의 실효성이 문제가 됨
- ② 또한 브라질, 러시아, 인도, 중국 등(BRICs)의 온실가스 배출 비중이 커지면서 교토의정서상의 의무감축국들이 전 세계 배출량에서 차지하는 비중이 갈수록 줄어드는 문제가 발생함
- ③ **포스트교토(Post-2012)** 도출의 가장 큰 장애는 선진국과 개발도상국의 이해관계

충돌임

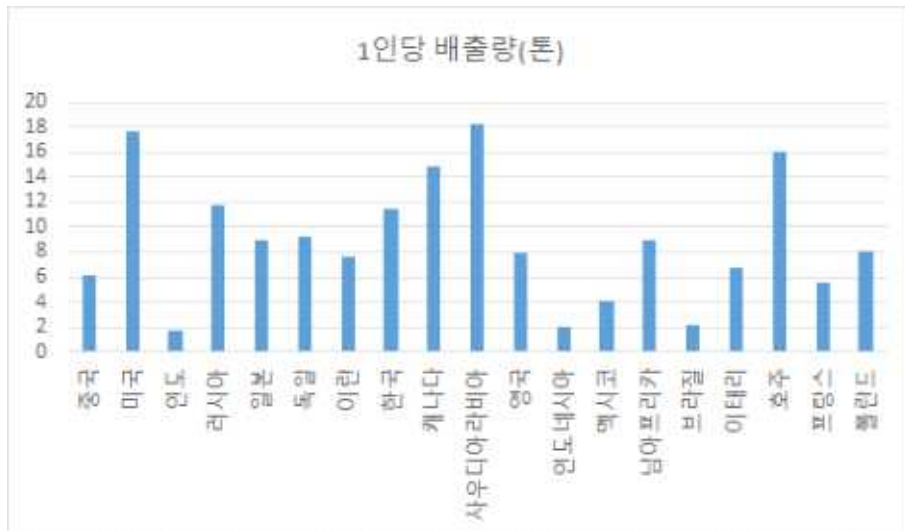
- 감축의무할당과 개발도상국에 대한 재정지원문제에 있어 각국의 입장 차이로 인해 결국 코펜하겐 회의에서 구속력을 갖는 합의를 도출하지 못함
- 총배출량만 놓고 보면 선진국이 아닌 중국, 인도, 러시아 등의 배출량이 매우 큼(그림 7))
- 그러나 1인당 배출량 측면에서 볼 때 개발도상국의 배출량은 아직도 대단히 적음(그림 8))

〈그림 7〉 배출량 상위 국가들의 2010년 CO₂ 배출량



자료: 미국 에너지부, 이산화탄소정보분석센터(CDIAC)

〈그림 8〉 배출량 상위 국가들의 2010년 1인당 배출량



자료: 미국 에너지부, 이산화탄소정보분석센터(CDIAC)

3. 기후변화의 경제적 효과분석

3.1. 기후변화의 경제적 효과분석

1) 기후변화의 경제적 효과분석

- ① 기후변화의 피해나 대응책의 효과 등을 분석하기 위해서는 기후변화라는 자연적 현상과 인간의 경제행위를 통합하여 분석하는 모형인 **통합평가모형(Integrated Assessment Model, IAM)**이 필요함
 - 변수들에 대해 가격을 부과하거나 가치평가하여 **기후변화의 영향이나 정책효과의 경제적 후생효과분석까지 가능하게 함**
- ② 통합평가모형에는 여러 가지가 있음
 - 스텐리뷰(Stern Review)의 작성을 위해 사용된 모형(Stern, 2007)

- OECD(2009)의 분석모형
- 노르드하우스(Nordhaus, 2008, 2013)의 DICE모형(이것을 중점적으로 다룰 것임)

3.2. 여러 가지 통합평가모형

1) 스턴리뷰(Stern Review)

- ① 영국의 저명한 경제학자 스턴이 대규모 연구진을 이끌어 수행한 연구 성과물
- ② 온실가스 농도증가와 그로 인한 기후변화의 효과분석, 그 피해액의 산정과 대응정책을 사용했을 때의 효과까지 분석한 종합적인 연구보고서임
- ③ 보고서의 주요 결론
 - 1) 당장 강력한 조치를 취할 경우 기후변화의 파국을 막을 기회는 여전히 있음
 - 2) 기후변화는 장래의 경제발전에 중대한 영향을 미칠 것임
 - 3) 기후를 안정화시키는 것을 지체할 경우 비용이 훨씬 더 커질 것임
 - 4) 기후변화에 대한 대응에는 전 세계 모든 국가가 동참해야 효과가 있음
 - 5) 배출 저감을 시행하는 방식은 여러 개가 있는데 이를 수용하도록 강력한 정책이 도입되어야 함
 - 6) 장기 목표에 대한 상호이해와 행동의 합의에 관한 국제적 협력이 있어야 함
- ④ 기후변화 안정화를 지체할 경우 그 비용이 천문학적으로 늘어난다는 결론은 모형의 할인율을 지나치게 낮게 잡아서 도출된 것이라는 비판이 제기됨

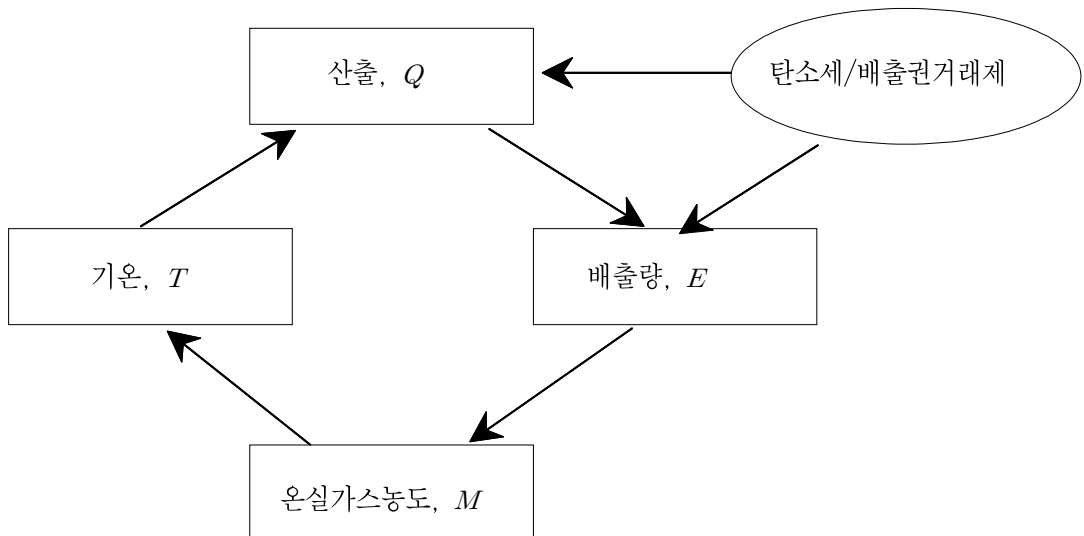
2) OECD(2009)의 연구보고서

- ① ENV-Linkages라는 전 세계 경제를 모두 포함하는 글로벌 동태 CGE모형을 활용함
- ② 가장 바람직한 기후변화 정책은 무엇인지, 전 세계 모든 국가가 대응에 참여하지 못할 경우 어떤 문제가 발생하는지, 전 세계가 참여하는 탄소시장을 구축하면 어떤 결과가 발생하는지, 적절한 기술투자정책은 어떤 효과를 가질 것인지 등을 분석하여 제시함

3) 노르드하우스(2008, 2013)의 DICE(dynamic integrated model of climate and economy)

- ① 이 모형은 비교적 단순하면서도 실제 관측되는 현상과 매우 부합되는 분석결과를 보여줌
- ② 또한 컴퓨터프로그램이 완전 공개되어 있어 누구나 활용할 수 있다는 장점을 가짐
- ③ DICE모형의 구조
 - 생산이 이루어지면 온실가스 배출량이 늘어나 온실가스 농도가 짙어짐
 - 이 때문에 지구의 기온이 높아지며, 생산성이 하락함
 - 온실가스 농도를 계속 높이지 않고 안정화시키기 위해서는 탄소세나 배출권거래제와 같은 정책을 도입할 수 있음

〈그림 9〉 IAM의 분석 내용



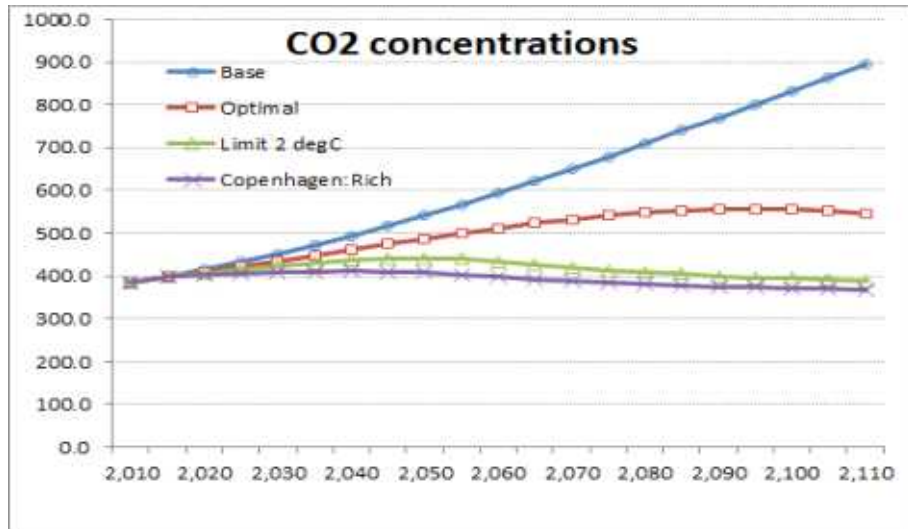
출처: 캔드릭 외(Kendrick et al. 2006, p. 292)

- ④ DICE모형은 일종의 최적화모형이며, 소비로부터 발생하는 모든 후생의 할인합을

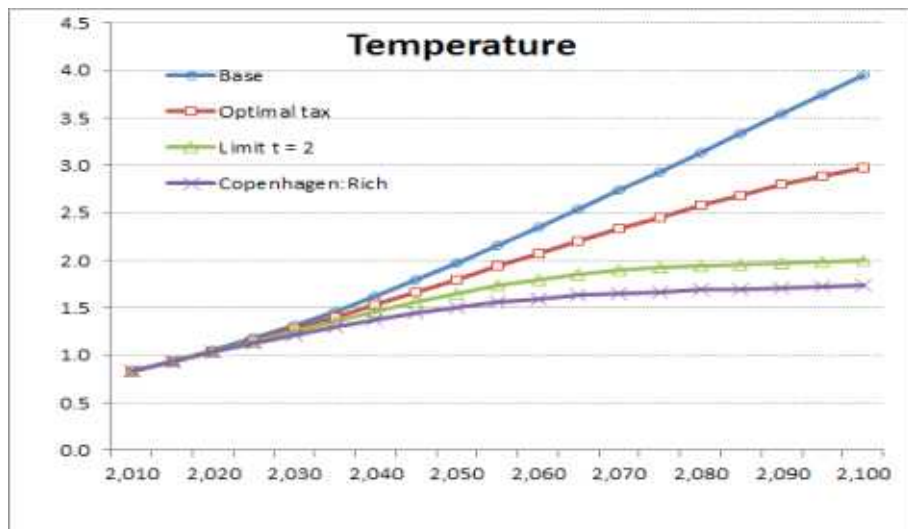
극대화하는 것이 목적이 됨

- 생산함수, 자본축적, 온실가스 배출 및 대기온도에 따른 생산성효과, 배출저감비용 등에 관한 식이 모형을 구성함
- 이상의 식들을 충족하면서 후생의 할인합을 극대화하는 생산량, 저감량, 소비량 등을 찾아내는 것이 모형의 주목적임
- ⑤ DICE모형은 경제의 편익으로는 소비량을, 피해로는 생산량 감소를 반영함
 - 질환이나 사망률 증가와 같은 기후변화의 비시장적인 피해는 반영되지 않음
- ⑥ DICE모형은 꾸준히 개량이 되고 있는데 2013년에 만들어진 최근의 모형에서는 다음과 같은 시나리오를 가정함
 - Base: BAU시나리오로서, 탄소배출에 대한 통제가 없는 경우
 - Optimal: 모든 국가가 참여하는 최적의 탄소세나 배출권거래제가 시행될 경우
 - Limit 2 deg C: Optimal 시나리오에 기온이 1900년 수준보다 2℃ 이하로 상승토록 하는 제약 추가
 - Stern: Optimal 시나리오를 적용하되, 스턴리뷰의 할인율 적용
 - Copenhagen Rich: 개발도상국은 감축의무를 지지 않고 선진국들만 코펜하겐 합의에 따라 높은 감축의무를 짐

〈그림 10〉 시나리오에 따른 이산화탄소 농도(ppm)

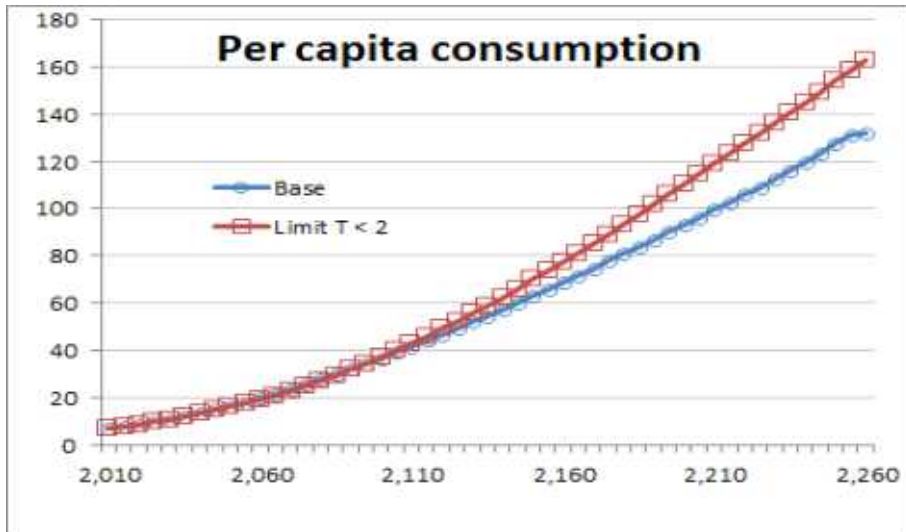


〈그림 11〉 시나리오에 따른 평균기온 변화: 산업혁명 이전 대비 증가(℃)



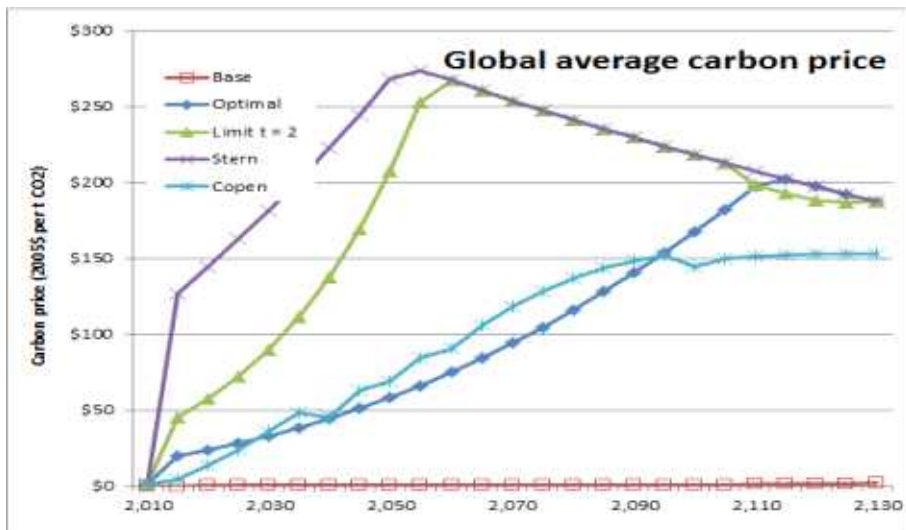
- ⑦ 정책도입 초기에는 저감비용 부담 때문에 1인당 소비가 줄어들지만 시간이 흐를수록 기후변화 안정화의 효과가 더 커져 결국 총후생이 증가함

〈그림 12〉 1인당 소비의 변화 (\$1,000/년)



- ⑧ 각 시나리오 목표수준 저감을 유도하기 위해 필요한 탄소세 혹은 배출권의 가격은 다음과 같음

〈그림 13〉 탄소가격의 변화



3.3. 할인율선택과 관련된 논쟁

1) 여러 가지 통합평가모형에서의 할인율

- ① 노르드하우스모형에서 다른 모든 시나리오에 적용된 할인율은 0.015였지만 스텐리뷰의 할인율은 0.001로 거의 무시해도 좋을 정도임
 - 노르드하우스는 시장에서 관측되는 자료를 이용해 할인율을 0.015로 도출함
 - 스텐은 이러한 과정 없이 미래세대를 더 고려해야 한다는 규범적인 맥락에서 할인율을 0.001로 선택함
- ② 어떤 할인율을 적용하느냐에 따라 목표수준 저감을 유도하기 위해 필요한 탄소세가 매우 달라짐
 - 할인율이 낮으면 미래세대의 후생에 큰 가중치가 부여되게 됨
 - 그 결과 초기에 많은 저감이 이루어져야 하고 초기 저감비용 부담도 커지게 됨
 - 이 때문에 초기에 탄소가격이 대단히 빨리 증가하여 2050년이 되면 274달러까지 치솟음(스텐 리뷰)

2) 할인율 선택 시 고려사항

- ① 할인율은 소비자들이 가지고 있는 **시간에 대한 선호나 자본투자의 기회비용**을 반영하기 위해 적용함
- ② 하지만 기후변화 논의의 경우 긴 기간 동안의 경제성장문제를 다루므로 자본의 기회비용뿐 아니라 **세대간의 분배문제**까지 반영하여 결정되어야 함