

# 기후변화 영향평가 및 적응

## 01. 기후변화란?





## I. 기후와 기후시스템

기후는 수십년 동안의 온도, 습도, 강수량 등과 같은 기상요소들의 평균이다. 기후요소에는 일사량, 일조시간, 기온, 강수량, 습도, 증발량, 구름량, 기압, 바람 등이 있으며, 이들 요소의 지역적 특성을 주고 있는 위도, 고도, 수륙분포, 지형, 식생 등은 기후인자라고 불린다.

지구의 기후시스템은 그림 1과 같이 대기권, 수권, 설빙권, 생물권, 지권 등으로 복잡한 물리과정과정이 상호작용하여 현재의 기후를 유지한다. 기후시스템을 움직이는 에너지의 대부분은 태양에서 공급되며, 기후시스템 속에서 여러 형태의 에너지로 변하고 최종적으로 지구장과 복사의 형태로 우주로 방출된다. 대기 상층을 통과하는 태양복사에너지는 구름, 오존, 수증기 등에 의해 흡수되거나 대부분 지표까지 내려와 흡수된다. 지표면에 흡수되는 태양복사는 지표의 성질에 따라 흡수율이 달라진다.

지표는 지표의 온도에 비례하는 적외복사를 대기로 방출하는데, 지표에서 방출된 적외복사의 일부는 대기의 온실가스에 의해 흡수되어 다시 지표로 되돌아오지만 대부분은 외계로 방출된다. 지표에 흡수된 복사에너지는 열로 전환되어 대기의 난류과정을 통해 대기로 전달된다.

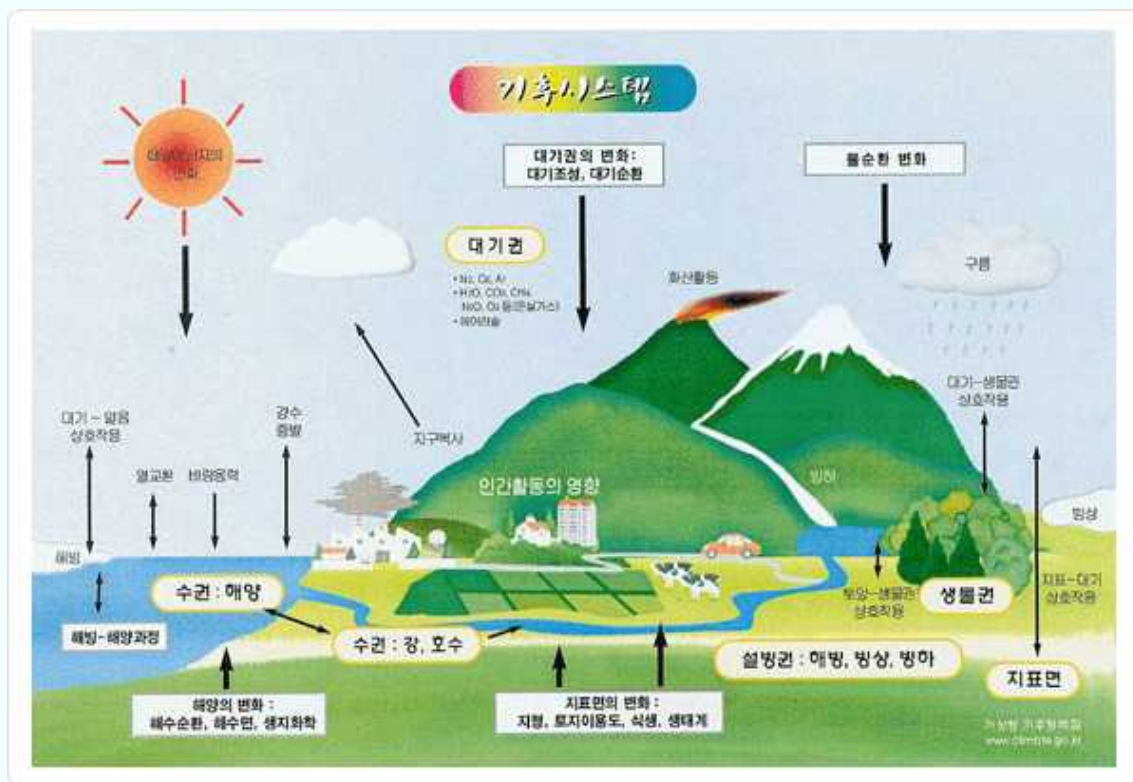


그림1. 지구 기후시스템

## II. 기후변화와 기후변동

기후변화(Climate Change)란 전지구 대기의 조성을 변화시키는 인간의 활동이 직접적 또는

간접적으로 원인이 되어 일어나는 기후의 변화이다. 이에 반해 기후변동(Climatic Variability)은 충분한 기간 동안 자연적인 원인에 의해 야기되는 기후의 변화이다.

기후변화의 요인에는 화석연료 과다 사용에 따른 이산화탄소 등의 온실가스의 현저한 증가, 인위적인 에어로졸에 의한 태양 복사의 반사와 구름의 광학적 성질의 변환, 과잉 토지이용이나 장작과 숲 채취 등에 의한 토지 피복의 변화 등이 있다.

기후변동의 요인에는 화산분화에 의한 성층권의 에어로졸 증가, 태양활동의 변화, 태양과 지구의 천문학적 상대위치 관계 등이 있다.

### III. 기후변화 현상

기후는 자연적으로 변화하고 있다(자연적 기후변화). 그러나 인간의 활동에 의해 야기된 이상(異常)적인 기후변화는 극단적인 기후 현상의 빈도와 강도에 미치는 단기적인 변화뿐만 아니라, 장기간에 걸친 온도상승, 강수량 변화, 강우 패턴변화, 해수면 상승 등을 포함한다.

IPCC에서는 아래에 제시한 6가지 기준에 입각하여, 기후변화와 변동성을 평가하고 있다.

- 기후는 온난화되었는가?
- 기후는 보다 습해졌는가?
- 대기/해양 순환이 변화하였는가?
- 기후가 보다 많이 바뀌었거나, 극단적으로 되었는가?
- 20세기의 온난화가 이상현상인가?
- 관측된 추세들이 내부적으로 일치하는가?

6가지 기준 중에서 관측된 추세의 일치성에 대해서는 관측에서의 결론 도출에 있어 관측이 정밀하고, 완전하며, 일관적이라는 것을 전제로 한다. 때로는 어떠한 추세가 관측으로부터 추출되지 않는다고 하여 그 추세가 없는 것으로 단정 지을 수는 없다. 그것은 자료의 부적합성을 반영하거나, 행해진 자료 분석이 불완전했음을 나타내기도 한다. Karl et al.,(1995a)은 기후변화를 탐지하고 설명하는 데에 중요한 역할을 하는 기후변수 자료 대부분이 분명한 결론을 이끌어 내기에는 현재 충분하지 않음을 제시한 바 있다. 특히 강수량과 같이 지역적으로 변동성이 큰 변수들의 경우에 있어 변수에 대한 지구규모 추세를 찾을 때는 더욱 그러하다. 위에서 제시한 나머지 5가지 기준에 대한 IPCC의 결론을 요약하면 다음과 같다.

#### 1. 기후는 온난화되었는가?

- 19세기 후반부터의 온난화 경향은 여러 자료(IPCC, 1990, 1992)와 기타를 이용하여 분석해 보았을 때 그리 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 전 지구적인 지표면 기온은 19세기 후반에 비해  $0.3 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ , 최근 40년(자료의 신뢰성이 있는 기간)동안은  $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$  정도 변한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 현상은 전 지구적으로 균등하게 나타난 것은 아니며 일부 지역에서는 오히려 기온이 하강한 사실을 알 수 있다. 최근 온난화 경향이 가장 뚜렷하게 나타난 지역은 북위  $40 \sim 70^{\circ}$ 도 대륙이다.
- 20세기 중반부터의 기온 변화를 살펴보았을 때, 육지에서는 대체적으로 일교차가 감소하는 경향을 나타낸다. 이에 대한 이유로는 주간 기온의 상승폭에 비해 야간 기온의 상승폭이 두 배 정

도로 높다는 것을 들 수 있으며, 운량 증가 또한 일교차 감소의 원인이 된다.

- 라디오존데와 MSU(Microwave Sounding Unit)를 통한 관측결과는 대류권 기온이 1979년 이래 약간 하강하고, 전 지구 지표 온도는 약간 상승한 것으로 나타난다. 그러나 표본 기간이 너무 짧은 관계로 화산활동이나 ENSO(El Nino and Southern Oscillation)와 같은 일시적인 현상의 영향이 크게 반영되어 나타날 수 있으므로 이러한 현상들을 고려하여 분석하는 것이 바람직하다. 실제로 이런 일시적 현상을 보정하면 지면과 대류권에서 모두 기온이 약간 상승했음을 알 수 있다. 한편, 1950년대부터의 라디오존데 기록을 분석한 결과는 대류권이 지상에서의 기록과 비슷한 양상을 보인다.
- 1979년 아래의 기록에서 성층권 하부가 냉각되고 있다는 사실이 나타났다. MSU의 관측 값보다 라디오존데의 관측 값이 더 큰 냉각 폭을 보이는데 이는 서로 다른 기기를 사용함에 따라 나타나는 결과일 것으로 예상된다. 1994년 현재의 전 지구 평균 성층권 기온은 위성이나 라디오존데 관측 이래로 최저값을 보이고 있다.
- IPCC(1992)가 예측했듯이 Pinatubo 화산 폭발(1991)이 일어난 다음해인 1992년과 1993년에 지면과 대류권은 차가워졌고 하부 성층권은 따뜻해진 것이 관측되었다. 1994년에는 다시 원래대로 지면과 대류권이 더 따뜻해졌으며 1994년의 지면 온도는 전 지구 평균값으로 1860년 이래 상위 5%를 기록했다.
- 온난화에 대한 간접적인 지표(시추공의 기온, 적설면적, 빙하의 후퇴 등)들의 결과 역시, IPCC(1990, 1992)가 온난화에 관한 직접 지표와 간접 지표들이 상당히 일치하는 양상을 보인다고 밝혔던 사실을 입증한다. 예를 들면 해면 바로 아래 온도(sub-surface)의 변화 경향은 지면 온도의 변동 양상과 일치하고 있어 지구 온난화의 직접 지표와 간접 지표가 일치함을 보여주는 것이다.
- IPCC(1992)가 언급했듯이 1973년 위성 관측이 실시된 이래 전 지구 혹은 반구의 해빙면적(sea ice cover)을 살펴보면, 해빙 면적이 뚜렷한 감소 현상을 보이지 않아 지구온난화를 뒷받침하는 경향을 찾아보기 어렵다. 하지만 북반구에서 해빙의 양은 1990년대 들어 대체로 평년치 이하의 값을 보여 왔다.

## 2. 기후는 보다 습해졌는가?

- 20세기 들어서 육지에서는 강수량이 1%정도 증가한 반면, 1980년 이래로는 강수량이 적은 편이었다. 북반구 고위도의 육지에서 특히 겨울철에 기온 상승에 수반하여 강수량이 늘어났다. 한편, 아프리카에서 인도네시아에 이르는 아열대 및 적도 지역에서는 1960년대 이래 기온이 상승함에 따라 강수량이 지속적으로 감소하고 있다. 이러한 다양한 변화 양상은 유선, 수면 고도, 토양 수분 등과 관련하여 나타난다.
- 최근 수십 년간 중부 태평양의 적도 지역에서는 강수량이 늘고 그 남북지역에서는 감소하였다. 기타 해양에서의 강수량 변화에 대해서는 아직 뚜렷한 결과가 없다.
- 1988년 이래 북반구에서의 적설면적은 21년 평균(1974-1994)값보다 낮은 값을 보여왔다. 눈-복사 피드백이 북반구 중-고위도 육지에서의 봄철 온난화를 증폭시켜왔다.
- 구소련에서 대부분의 기간에 걸쳐 증발량이 1951년 이래 감소하고 있다(미국도 같은 경향을 보임). 적도 해양에서는(모든 지역에서 그러한 것은 아니지만) 증발량이 증가하였다.
- 여러 증거들을 종합해 보면, 최소한 1973년 이후로는 대기 중의 수증기량이 증가하였다(IPCC, 1992).



- 최근 수십 년 동안에 걸쳐서 해상에서는 대류운, 중층운, 고층운이 증가하여 운량이 늘어났다. 육지의 많은 부분에 걸쳐 최소한 1970년까지는 운량이 증가했다. IPCC(1990, 1992)도 역시 운량 증가를 보고하고 있다.

### 3. 대기/해양 순환이 변화하였는가?

- 세계 곳곳의 물수지에 영향을 주는 ENSO의 양상이 1970년대 중반 들어 이상 현상을 나타내었고, 1989년부터는 그 양상이 더욱 심해졌다. 1970년대 중반부터는 엘니뇨의 빈도와 지속 기간이 증가했고, 라니냐는 반대 경향을 보여 왔다. 적도 태평양과 그 주변 육지에서의 강수량 변화(예를 들면 지난 20년간 아열대 육지에서 강수량 감소)는 ENSO의 양상과 관련되어 있으며, 또한 ENSO는 지표면 온도에도 영향을 미친다.

### 4. 기후가 보다 많이 바뀌었거나 극단적으로 되었는가?

- 기후의 변동 폭과 극값에 대한 자료는 아직 전 지구적인 변화가 있다고 말할 단계는 아님을 보여준다. 하지만 일부 지역에서는 극 기상(extreme weather)의 빈도와 변동 폭의 변화가 나타난다.
- Sahel 지방과 같이 장기적으로 강수량이 감소하는 일부 지역을 제외하고는 한발의 빈도와 강도에 변화가 생겼다는 증거는 없다.
- 강수량 극값 현상과 홍수 발생의 변화에 대한 연구는 거의 없었다. 기록이 있는 일부지역에서는 강수량 극값(extreme rainfall)의 강도가 높아졌다는 증거가 명확하진 않지만 그 현상은 넓은 지역에 걸쳐 나타난다.
- 최근의 자료를 보면(1988년 이래) 북대서양에서 강한 온대저기압(extra-tropical cyclone)의 발생 빈도가 높아졌음을 알 수 있다. 대서양 전체적으로는 강한 적도-사이클론의 활동은 1995년을 제외하고는 감소했다. 다른 지역에서는 관측 시스템과 분석방법의 변화로 인해 극단적인 종관 체제(extreme synoptic system)의 강도와 빈도가 나타나는 경향을 명확히 찾지 못하고 있다.
- 지난 수십 년 동안 극단적으로 낮은 최저기온의 빈도가 줄어들었음은 확실하다. 그러나 극단적으로 높은 최고기온의 발생 빈도 변화는 뚜렷이 드러난 바 없다.
- 북반구 중위도에서 최근 수십 년간의 일교차는 줄어들고 있다.

### 5. 20세기의 온난화가 이상현상인가?

- 여러 기록을 살펴보았을 때, 지난 수십 년간의 북반구 여름철 기온은 최소한 서기 1400년 이후 최고치를 기록하고 있다. 지난 세기 동안의 지구 온난화는 과거 600년 중 최저 기온을 기록한 이후 이루어진 것으로 나타난다. 기록의 한계로 인하여 1400년 이전의 자료를 통하여 지구 기온변화에 대해 논하기는 어렵지만, 얼음 봉(ice core) 자료를 통해 비교해 본다면 적어도 1400년 이래 20세기의 기온이 가장 높았음을 알 수 있고, 몇 군데의 얼음 봉 자료는 현재의 기온이 지난 수천 년간의 기온 중 최고치임을 보여준다.
- 대기, 해양의 순환과 기온 그리고 물순환계에 영향을 주는 대규모의 급격한 기후변화가 지난 빙하기동안 그리고 현재의 완신세(Holocene)로 전환기동안에 일어났다. 그린란드와 북대서양에서는 수십 년의 시간동안 5℃ 정도의 변화가 발생했다.

- 지난 일만 년(완신세)동안은, 그 전 일만 년에 비해 기온의 변동 폭이 작았다. 불완전한 관측과 고기후적 증거들을 통해 보면 지구 평균기온이 지난 일만 년의 기간 중 한 세기에 1℃ 이상 증가한 적은 없었던 것으로 평가된다.

20세기동안 관측된 기후변화 관련 지표는 IPCC 제3차보고서에 나타나 있으며 다음 <표1>과 같이 요약된다.

<표 1> 20세기 동안 관측된 기후변화 관련 지표

관측 지표	관측내용
대기 중 CO <sub>2</sub> 농도	280ppm(1000-1750년)에서 368ppm (2000년)으로 31±4% 증가
대기 중 CH <sub>4</sub> 농도	700ppb(1000-1750년)에서 1750ppb (2000년)으로 151±25% 증가
대기 중 N <sub>2</sub> O 농도	270ppb(1000-1750년)에서 316ppb (2000년)으로 17±5% 증가
지구평균지표기온	20세기에 걸쳐 0.6 ± 0.2℃ 상승
북반구 강수량	20세기에 걸쳐 5-10% 증가
지구평균 해수면	20세기에 걸쳐 연간평균 1-2mm 속도로 상승
극지방 빙하	1950년 이후 늦여름과 초가을 사이의 극지방 빙하의 두께는 40% 얇아졌으며 면적은 10-15% 감소함
작물재배기간	지난 40여년 동안 북반구에서는 매10년마다 약 1-4일 길어짐

자료: IPCC, 2001c. 「Climate Change 2001: Synthesis Report」

## IV. 기후변화의 원인

### 1. 지구대기에 관한 기초지식

일단 지구대기의 구조는 대류권, 성층권, 중간권, 열권으로 구성되어 있다.

'대류권'은 지표면으로부터 약 10~15 km 고도에 걸쳐 위치하며 고도가 상승할수록 평균 6.5℃의 율로 기온이 하강하여 대류권 상층부(계절별, 위도별 차이는 있으나 평균 11 km고도)에서 약 -56℃(217 K)의 기온을 나타낸다. 이와 같이 고도가 상승할수록 기온이 낮아져 불안정한 대기층을 이루어 대류 운동이 활발하게 일어나는 기층을 대류권이라 한다.

대류권 상층부로부터 약 50 km 고도까지는 기온이 계속 상승하여 약 50 km 고도에서 0℃(273 K)의 기온을 나타내는 안정한 대기층으로 주로 분자 확산에 의해 기체의 이동이 이루어지는데 이 층을 '성층권'이라 한다. 대기 중에 포함되어 있는 오존전량(total ozone)을 지상 기압으로 압축시켜 깊이로 환산하면 약 0.3 cm에 불과한 양이나, 이 양의 약 90 %는 성층권에 포함되어 있고 나머지 10 %는 대류권에 포함되어 있다. 특히 성층권 내에서도 25 km 부근에 오존이 밀집되어 있는데 이 층을 오존층(ozone layer)이라 한다.

'중간권'은 약 50~80km 고도에 위치하며, 중간권은 대기권 전체에서 평균 기온이 가장 낮은

곳이다.또 대류권에서처럼 대류 현상이 일어나고, 높이 올라갈수록 기온이 내려가는 특징을 갖고 있다.

'열권'은 대기권에서 가장 높은 부분을 차지하는 층으로, 지표면에서부터 85~600km의 고도에 있다. 열권에서는 높이 올라갈수록 기온이 급격히 높아져서 낮에는 약 1700℃나 되는 높은 온도에 이르며, 공기가 희박하므로 소량의 태양 에너지가 와도 입자 하나하나가 받는 에너지가 많으므로 밤과 낮의 기온차가 현저하게 나타난다.

대류권에서는 기상 현상, 성층권은 오존층에 의한 자외선의 흡수, 중간권은 대기권 중 가장 낮은 온도, 열권은 오로라 등의 특징이 나타난다.

## 2. 온실가스

온실가스 기체란 태양으로부터 방출되는 짧은 파장의 자외선 복사는 통과를 시키고 지구로부터 방출되는 긴 파장의 적외선을 통과시키지 못함으로써 지구대기의 온실효과를 가져오는 기체를 말한다.

열을 흡수하는 기체들의 종류와 특성 대기 중의 열을 흡수하여 저장함으로써 온실 효과를 일으키는 기체는 자연 상태의 수증기 외에 이산화탄소뿐만 아니라 메탄(CH<sub>4</sub>), 프레온 가스(CFCs), 및 산화이질소(N<sub>2</sub>O) 등이다. 화석 연료나 열대림의 화재로 대량으로 방출되는 이산화탄소, 가축 이용의 증대와 농업의 확대에 산출되는 메탄, 냉매제, 살충제 또는 세척제로 사용하는 프레온 가스, 그리고 화학 비료에서 나오는 질소 등이 최근에 크게 증가하고 있으므로, 과학자들은 이들 기체에 의한 온실 효과의 증대로 지구의 온난화를 염려하고 있다.

### 1) 이산화탄소

이산화탄소는 주로 화석 연료와 산림 등의 연소로 대기 중에 방출되며, 일단 방출되면 100년 이상 대기 중에 머무른다. 열을 흡수하는 기체로는 수증기 다음으로 풍부하며, 인위적 온실 효과에 대한 기여도는 약 50%를 차지한다. 메탄(CH<sub>4</sub>): 메탄은 홍수가 난 전답이나 가축들의 배설물, 및 범람원 등 주로 산소가 없는 환경에서 박테리아가 유기물을 분해할 때 생성된다. 일단 배출된 메탄은 대기 중에 십 년 정도 분해되지 않고 머무르며, 열을 흡수하는 능력은 이산화탄소의 약 20~30배에 이른다. 따라서 인위적 온실 효과의 기여도는 15~20% 정도이다. 전세기부터 단편적이나마 대기 중의 이산화탄소의 농도가 관측되어 왔으며 이에 의하면 19세기말의 농도는 약 290ppm이었던 것이 1982년에는 340ppm으로 최근에는 350ppm으로 변했으니 약 20% 증가한 셈이다. 단순한 비례배분을 가정한다면 전세기말부터 현재까지 약 0.4℃가 상승한 것으로 생각되고 있다. 산업혁명 이전에는 대기 중의 이산화탄소는 280ppm 정도이며, 이 수치는 약 1만년 전부터 거의 변화가 없다고 생각되고 있다. 그러나 산업혁명 이후의 급격한 농도상승은 현재의 이산화탄소 농도의 증가가 주로 인위적인 방출에 의한 것임을 확실히 보여주고 있다. 이러한 이산화탄소의 증가는 인류에 의한 것임을 확실히 보여주고 있다. 이러한 이산화탄소의 증가는 인류에 의한 화석연료의 소비와 열대의 삼림파괴가 주요한 원인으로 일어난 것으로 생각된다. 만약 이대로 방치하면 21세기 중반에는 이산화탄소의 농도는 600ppm을 초과할 것으로 추측되고 있다. 이산화탄소는 수증기, 오존과 더불어 가시광선에 대하여는 투명하지만 적외영역에 강한 흡수대를 가지고 있다. 그러므로 지구면에서 우주에 끊임없이 방출되고 있는 적외방사의 대부분을 흡수한다. 이러한 작용이 대기의 온실효과라고 불리 우며 지구의 기후의 중요한 역할을 하고 있

다. 그러므로 대기 중의 이산화탄소 농도의 증가는 지구의 기후를 변화시킬 것이라고 생각되고 있다. 미국 해양 기상청의 연구자료 등에 의한 수치기상의 결과에 따르면 이산화탄소의 농도의 배증은 전지구 평균기온을 약 2℃ 상승시키며 극지방에서는 10℃ 가까이 기온을 상승시킨다고 한다. 삼림생태계는 광합성에 의한 이산화탄소의 고정을 하고 있기 때문에 이전에는 이산화탄소 흡수원으로서 생각되었으나 최근의 연구에서는 연간 약 20억톤의 방출원이라고 생각되고 있다. 그것은 주로 흡수하고 있던 수목이 소각되거나 부패하여 이산화탄소를 방출하게 된 것에 원인이 있다. 삼림의 파괴속도는 연평균 1,000만 ha에 이르고 있으며, 이것은 전삼림 면적의 0.3%가 매년 소실되고 있는 셈이다.

## 2) 해양과 이산화탄소의 관계

해양은 연간 100억톤 전후의 이산화탄소를 물리, 화학적 과정에 의하여 방출 및 흡수한다. 화석연료의 연소 및 삼림의 감소에 의하여 방출되는 이산화탄소 225억톤 중 대기 중에 잔류하는 120억톤을 감한 약 105억톤이 해양에 흡수된다고 보고 있으나, 해양학자는 해양에게 그만큼 큰 흡수 능력이 없다고 지적하고 있다. 실제로 해양은 대기의 55배의 용량을 갖고 있는 거대한 물체이며, 이 물체의 부피에 비례하여 방출된 이산화탄소를 흡수한다면 대부분의 이산화탄소는 해양에 흡수되어 대기중의 농도가 그리 높아지지 않을 것이다. 그러나 이산화탄소의 가용성은 해양의 온도와 밀접하게 관계하고 있으며, 해수온도의 상승에 따라서 현저하게 저하한다. 그러므로 한냉한 해양은 이산화탄소에 대해서는 흡수원인 동시에 온난한 해양은 그 용출원이 된다. 현재 해양 전체로서는 이산화탄소의 흡수원이고 대기 중의 이산화탄소의 증가를 상당히 삭감하고 있다. 말하자면 해양은 어떤 경우에는 대기 중의 이산화탄소의 일부분을 흡수하고 다른 경우에는 대기 중에 이산화탄소를 방출할 수 있는 저장고이기도 하다. 해양 중에는 막대한 이산화탄소의 저장고로서의 의의는 크다고 할 수 있다.

또 해양은 연관성이 크기 때문에 이산화탄소의 증가에 따르는 기후온난화를 크게 지연시킬 수 있다. 그러나 해양의 이산화탄소의 흡수과정과 흡수능력의 문제는 아직 과학적으로 해명되지 않은 점이 많아서 앞으로의 중요한 연구과제의 하나이다.

## 3) 메탄

메탄은 1분자당 온실효과는 이산화탄소의 10~100배나 되고, 현재의 평균 대기 중 농도가 약 1.7ppm으로 이산화탄소의 0.5밖에 안되지만 지구온난화에 대한 기여도는 크다. 메탄 농도 증가에 관해서는 최근 많은 보고가 있다. 메탄농도의 상승은 현재 거의 직선적이며, 매년  $0.016 \pm 0.001$ ppm씩 증가하고 있다. 대기중의 메탄은 다양한 자연 및 인위적 과정으로 생성된다. 메탄의 농도는 금세기에 들어와서 현저한 증가를 보이고 있으며, 이산화탄소와 마찬가지로 메탄의 증가도 주로 인간활동에 유래한다고 생각되고 있다. 자연발생원은 천연의 습지로부터의 메탄이 기여도가 크다. 전세계의 습지의 분포는 북반구에 편재해 있다. 한편 인위발생원으로는 석탄이나 천연가스의 채굴, 천연가스 수송 및 사용시의 누출, 폐기 물매립, 식생연소 등이 있으며, 특히 인간활동에 의한 논 및 가축으로부터의 메탄의 방출이다. 이들 중 어느 것이 메탄농도 증가의 주요한 원인인가는 현재로서는 확정되어 있지 않으나, 농업 축산관계의 인간 활동이 주요한 역할을 하고 있는 것 같다.



#### 4) 일산화이질소

일명 "웃음 가스"(laughing gas)로 알려진 이산화질소는 토양이나 화학 비료, 그리고 화석연료의 연소 등에서 배출되며, 대기 중에는 약 180년 동안 머무른다. 이산화탄소에 비해 150배 정도 열을 잘 흡수하여 인위적 온실 효과의 기여도는 5% 정도를 차지한다. 일산화이질소도 1분자당 온실효과는 이산화탄소의 100~1,000배나 되는 중요한 온실효과 가스이다. 일산화이질소는 또한 성층권의 오존파괴에서도 중요한 역할을 하고 있다. 그 농도 상승은 금세기에 이르러 급격히 진행되고 있다. 이 급격한 온도상승 이전의 농도는 1600년부터 1800년의 평균농도로서  $289 \pm 10$ ppb라고 보고되고 있다. 현재의 일산화이질소의 농도는 약 300ppb까지 상승하고, 질소로서 약 15억 톤이 대기 중에 존재하는 계산이 된다. 발생원으로는 자연계로부터는 주로 해양과 담수 및 삼림의 토양으로부터 생기며, 인간 활동으로부터는 화석연료의 연소, 식생연소, 개간, 시비농지 등의 기여도가 크다. 인간 활동의 기여는 전체의 40%나 되며, 특히 시비농지로부터의 방출은 질소계 화학비료 사용량의 증대로 1950년의 1만 톤에서부터 1980년의 140만 톤으로 대폭 증가하고 있다.

#### 5) 프론류

프레온가스는 1930년대 이후, 사용량이 급격히 늘었는데, 주로 냉장고, 에어컨 등의 냉매제, 절연체 및 반도체의 세척제, 그리고 각종 스프레이 제품에 사용된다. 일단 대기 중에 방출된 프레온 가스는 400년 이상 분해되지 않고 머무르며, 열을 흡수하는 능력은 매우 효과적이어서 이산화탄소의 1만6천 배에 이른다. 실제 대기 중의 양은 0.001ppm 이하로 적지만 인위적 온실효과에 대한 기여도는 20% 정도이다. 프론은 오존층 파괴의 원인물질이기도 하지만 온실효과 기체로서도 중요한 역할을 하고 있다. 프론 11과 12는 1분자당 이산화탄소의 1만 배의 온실효과가 있으며 1980년으로부터 1990년간의 온실효과의 증가분의 25%를 프론류가 차지하고 있다. 금후 프론의 사용제한으로 프론류가 어떻게 변화하는지 또는 대체품인 HCFC라고 불리우는 수소원자를 가지는 하로카아본류가 어떻게 온난화에 영향을 미치는가를 주시할 필요가 있다.

#### 6) 수증기

수증기는 대기 중에서 가장 온실효과에 기여가 큰 기체이다. 그러나 대류권의 수증기의 농도는 오로지 기온만에 의존하므로 대류권의 농도는 다른 온실효과 기체와 같이 기후를 변동시키는 요인은 아니고 기후의 피드백현상의 하나이다. 그러나 성층권에서의 수증기의 유입은 대류권과의 권계면의 저온에 의한 응축과 강수에 의해 제한되어 있으므로 성층권의 수증기는 기온변동요인으로 될 수 있다. 최근 대류권으로부터 성층권에 유입하는 메탄의 성층권에 있어서의 산화반응이 성층권의 수증기의 증가를 초래한다는 지적이 있어, 고도 20~50Km의 수증기가 3ppm으로부터 6ppm으로 배증하면 지표의 온도가 0.06도 상승한다는 계산도 나와 있다. 그러나 성층권의 수증기 및 메탄의 농도에 관한 측정자료 등이 충분치 못하므로 앞으로의 연구의 진전이 기대된다.

## 7) 오존

대류권의 오존은 온실효과 의하여 지표의 온난화에 기여하지만, 성층권의 오존은 태양으로부터의 자외선을 흡수하므로 지표에 대한 영향은 대류권 오존과는 정반대이다. 최근 성층권의 오존은 감소하고 있으나 대류권의 오존은 증가하고 있다는 보고가 있다. 유럽에서는 지표 부근의 오존 농도가 금세기 초의 약 10ppb로부터 최근 200ppb로 배증했다는 보고와 연간으로서는 1~3%의 증가가 있다는 보고가 있다. 이러한 대류권 오존의 증가는 NO<sub>x</sub> 나메탄, 일산화탄소, 탄화수소와 같은 대류권 오존의 생성에 관여하는 미량기체의 인위적 발생량의 증가가 큰 영향을 미치고 있다고 생각한다.

## 8) NO<sub>x</sub>(녹스)

NO<sub>x</sub>는 광화학대기오염 이른바 광화학스모그의 발생에 중요한 역할을 한다는 것은 알려져 있으나 직접적인 온실효과체는 아니다. 그러나 대기중의 화학반응에 의해 OH리디컬이나 오존의 농도를 컨트롤하기 때문에 메탄 등의 다른 온실효과 기체의 농도를 컨트롤함으로써 간접적으로 온실효과에 관여하고 있다.

## 9) 일산화탄소

일산화탄소도 그 자체는 적외선의 흡수가 매우 미약하고 직접적인 온실효과는 없다. 그러나 대기 중의 OH리디컬은 약 80%가 일산화탄소와 반응한다고 생각되고 있으며, 일산화탄소의 농도가 변화하면 다른 미량성분의 농도에도 큰 영향을 미친다고 생각한다.

## 3. 온실효과

생활의 고도화에 따른 증대하는 인간의 산업 활동은 여러 가지 영향을 지구전체에 주고 있다. 지구온난화 문제도 그 일환으로 많은 사회적 관심을 모으고 있다. 태양으로부터 지구로의 일사에너지는 대부분 가시광선이지만 대기를 통하여 지표면에 달하여 그 곳을 가열한다.

가열된 지구표면으로부터 방사되는 에너지는 파장이 10 $\mu$ m정도의 전자파인 원적외선이며 그것은 대기 중의 수증기와 이산화탄소에 의해 강한 흡수를 받는다. 이 때문에 지구표면으로부터 적외선으로 방출된 에너지는 직접 우주공간에 유출되지 않는다. 적외선을 흡수하는 수증기와 이산화탄소는 동시에 그 온도에 상응한 강도의 열방사를 행한다. 말하자면 대기는 일사에 용이하게 통과시키나 지구표면으로부터의 열방사의 유출을 막는다. 이로 인하여 일사에 의해 지구표면에게 방사된 에너지는 지구표면 근처에 모이고 대기 상층보다 고온으로 된다. 또 이 지구표면온도는 같은 일사를 받고도 대기층이 없었던 경우의 온도보다도 높아지게 된다. 대기층(즉 그 속에 있는 수증기와 이산화탄소)에 의한 이 효과를 온실효과라고 부른다. 그런데 지표로부터 방사되는 적외선을 흡수하는 기체는 수증기만은 아니다. 탄산가스, 메탄, 오존, 이산화질소, 프론도 있다. 이러한 기체는 수증기가 흡수하지 않는 파장에 적외선의 흡수대를 가지고 있다. 그러므로 이러한 기체가 증가하면 당연히 우주로 빠져 나갈 열이 대기에 유보되어 온도가 상승한다. 이러한 현상이 지구 온난화와 직접 관계되는 온실효과이다