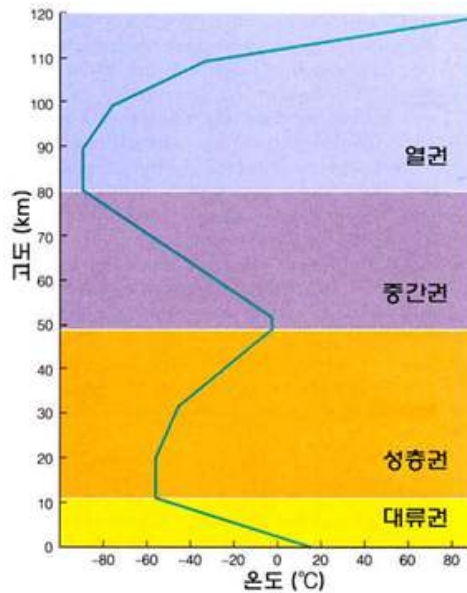


< 제1장 지구대기의 변화 >

1. 지구대기에 관한 기초지식

가. 지구대기의 구조



<그림 1> 지구대기의 구조

- ✓ 지구대기는 위의 그림과 같이 고도에 따라 대류권, 성층권, 중간권, 열권의 4개의 수직구조로 되어 있다.

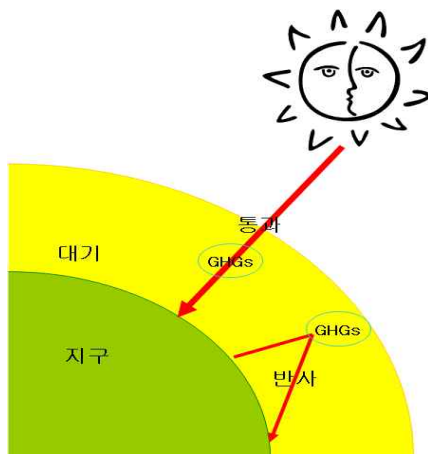
나. 단위에 대한 기초

- ✓ 대기 기체의 농도
 - ppmv(parts per million volume) : 100만분의 1, 용적비율
 - ppbv(parts per billion volume): 10억의 1, 용적비율
- ✓ 압력
 - 1기압 = 1 bar = 101.3 kPa(KiloPascals: 킬로 파스칼)
- ✓ 온도
 - K (켈빈) = °C(섭씨) + 273.1
- ✓ 길이 측정 (미터법, meter)
 - K (kilo)= 10^3 m, M(mega)= 10^6 m, G(giga)= 10^9 m, T(tera)= 10^{12} m, P(peta)= 10^{15} m
- ✓ 전 지구 규모에서 흔히 쓰이는 기체 수량 단위
 - Mt(megatonne- 106톤) 혹은 Tg (Teragrams -1012그램)

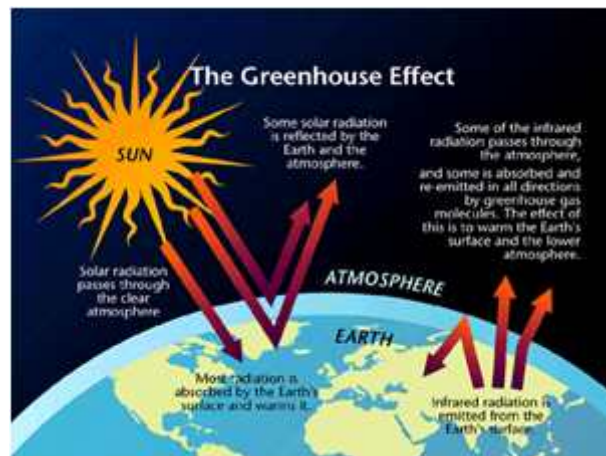
2. 온실효과란?

가. 온실효과란?

- ✓ 온실효과의 정의 : 이산화탄소 등의 온실가스가 태양으로부터 지구에 들어오는 짧은 파장의 태양 복사에너지는 통과시키는 반면 지구로부터 나가려는 긴 파장의 복사에너지는 흡수하여 지구 대기의 온도를 상승시키는 작용을 말한다.
- ✓ 지구대기에 이런 온실가스덕분에 현재 지구의 평균대기 온도가 형성될 수 있었다.
- ✓ 만약 온실가스가 없었다면 지구대기는 생물이 살기 힘들 정도로 추운 온도가 유지되었을 것이다.
- ✓ 문제는 이런 온실효과 자체가 아니라 산업혁명 이후 이런 GHGs의 대기 농도가 현저히 증가되어 오래된 태양과 지구간의 복사평형이 교란되기 시작하였다는 데에 있다.



<그림 2> 온실효과의 원리



<그림 3> 온실효과 개념도

나. 온실가스 (Greenhouse gases)

1) 온실가스의 정의

- ✓ 온실가스 기체란 태양으로부터 방출되는 짧은파장의 자외선 복사는 통과를 시키고 지구로부터 방출되는 긴파장의 적외선을 통과시키지 못함으로써 지구대기의 온실효과를 가져오는 기체를 말한다.
- ✓ 보통 대칭의 분자구조를 가지고 있는 기체(질소 N₂, 산소 O₂)는 GHG가 아니고 비대칭 분자구조를 가진 기체의 경우 (CO₂, N₂O)가 GHG가 된다.

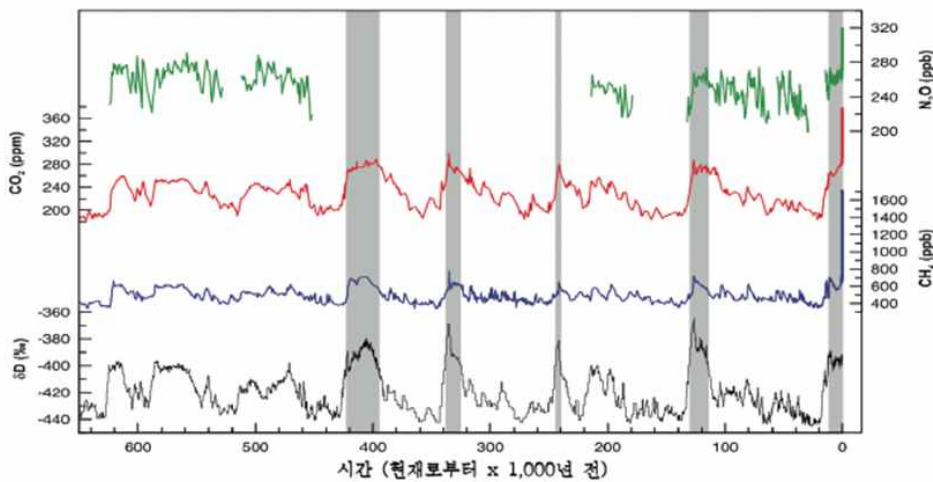
2) 과거의 대기조성

GHGs	산업혁명 이전 (1800년 대)	1992년대의 (1800년대)	1990년대 변화의 속도	대기 중 총량	수명	GWP*
단위	ppbv	ppbv	% per year	Tg	year	unitless
대류권 O ₃	<10	10-200	1	300	< 1 일	
CO ₂	278000	356000	0.4	76000 (탄소량)	50-200	1
CH ₄	700	1714	0.8	4850	12-17	21
N ₂ O	275	311	0.25	1480	120	310
7CFC-12	0	0.503	4	10.3	102	7400
HCFC-22	0	0.105	7	1.5	13.3	11700
CF ₄	0	0.070	2	0.9	50000	9200

*GWP: Global Warming Potential: 이산화탄소의 온실가스 효과를 1이라고 보았을때의 상대적 온실가스 효과 잠재력을 말함

[출처]Houghton et al. (1994)

<표 1> 기체의 변화 추이

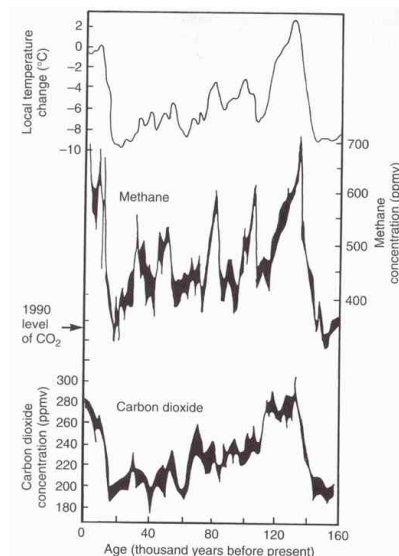


<그림 4> 주요 온실가스 농도의 변화추이

- ✓ 그림은 남극 얼음의 중수소 농도 변화와 대기의 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O의 농도 변화, 남극의 극지온도의 남극얼음의 프록시(Proxy) 자료를 이용하였으며, 대기의 온실가스 농도는 빙하코아 내 공기와 최근 대기 측정자료로부터 분석되었음. 범위는 650,000년이며, 음영 밴드는 현재와 과거 간빙시대 온난기를 나타낸다.
- ✓ 그림에서 보는 바와 같이 과거 65만년 동안의 주요 온실가스 농도의 변화를 살펴보면,

이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 농도는 증가와 감소를 거듭하여 왔으나 최근 몇 백년 사이 전례 없는 증가를 가져왔음이 명백하다.

가) 과거의 대기조성과 기후변화



<그림 5> 온도변화에 따른 메탄, 이산화탄소의 추이

- ✓ 남극의 빙하기록(ice core data)는 지난 빙하기와 간빙기 사이클을 포괄할 수 있는 오래된 과거 대기의 조성을 추정할 수 있다.
- ✓ 빙하의 두께는 거의 2km에 달하며 빙하에 있는 CO₂와 CH₄ 농도, 그리고 중수소의 농도는 과거 기후에 대한 많은 정보를 준다.
 - 빙하는 시간이 지날수록 계속 위로 쌓이는 것이므로 가장 위에 있는 빙하는 최근 빙하, 가장 깊이 있는 빙하는 과거의 빙하라고 말할 수 있다.
 - 중수소(2H, 원자량이 2인 수소)는 보통 수소(1H, 원자량이 1인 수소)에 비해 증발하는 데에 더 많은 에너지가 소비된다. 즉, 지구의 온도가 높은 경우 중수소가 해양으로부터 증발되어 극지방에 가서 응결되었을 확률이 높다. 그러므로 빙하에 중수소 함량이 높다는 것은 그 시기에 지구의 온도가 높았음을 의미한다.
 - 빙하분석에 의하면 지구의 온도와 이산화탄소 및 메탄의 농도는 매우 높은 연관성을 가지고 있음이 확인된다.

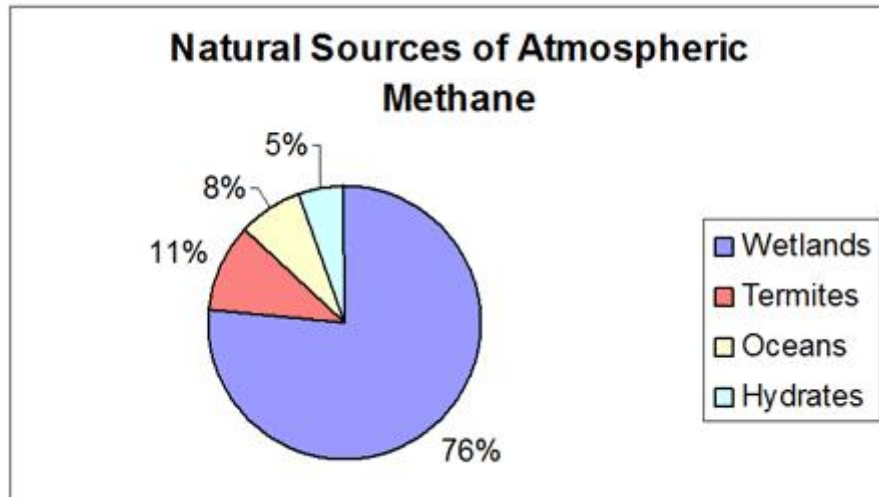
3) 온실 가스별 특징

가) 이산화탄소 (CO₂)

- ✓ 산업혁명이후의 대기중 이산화탄소 농도의 증가는 단순한 상관성(correlation)이지 인과관계(causes)는 아님. 그렇다면 인과관계를 뒷받침하는 증거
 - 대기중 이산화탄소 농도는 북반구가 남반구보다 더 높으며 농도의 차이는 이산화탄소 배출과 연관이 되어있다.
 - 화석연료에 포함된 탄소는 ^{13}C 양이 ^{12}C 보다 적는데, 산업혁명 이후 대기의 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율은 계속 감소되어왔다. 이는 화석연료 내의 탄소가 대기중으로 화석연료의 연소때문에 자꾸 유입이 되어 대기중의 ^{13}C 양이 희석되고 있음을 의미한다.
 - 화석연료에 포함된 탄소는 ^{14}C 를 가지고 있지 않는데 반해 대기는 ^{14}C 를 포함하고 있는데, 산업혁명 이후 대기중 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 의 비율이 꾸준히 감소되어 온다.
- ✓ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율
 - 화석연료의 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 과 비율 < 보통 대기중의 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$
 - 화석연료의 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 과 비율 < 보통 대기중의 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$

나) 메탄 (CH_4)

- ✓ 주요 원천 (Major source): 메탄생성 박테리아에 의한 혐기성 발효로 부터 온다.
 - 대기중 이산화탄소 농도는 북반구가 남반구보다 더 높으며 농도의 차이는 이산화탄소 배출과 연관이 되어있다.
 - 자연적 원천 : 습지, 흰개미(termites), 대양 등
 - 인위적 원천 :
 - 석탄, 석유 및 천연가스
 - 벼논
 - 가축 분뇨 등 유기물의 분해
 - 반추동물에 의한 메탄 발생 (소 위)
 - 하수 처리장, 매립지
 - Biomass burning
- ✓ 주요 저장고 (Major sink)
 - 대기에서의 제거
 - 대류권에 있는 하이드록실 라디칼(OH^*)에 의하여 제거됨(광화학 반응)
 - $\text{CH}_4 + \text{OH}^* \rightarrow \text{CH}_3^*$ (메틸 라디칼) + H_2O
 - 토양에서의 제거
 - 메탄이용 세균(bacteria)을 이용한 메탄의 제거(산화)



<그림 6> 메탄의 자연적 원천

다) 질소 산화물 (N_2O)

- ✓ 주요 원천 (Major source):): 탈질 및 질화과정에 의해 생성됨
 - 자연적 원천
 - 토양(열대 및 온대 산림, 사바나, 온대 초지)
 - 대양
 - 인위적 원천
 - 농경지
 - Biomass burning
 - 산업공정
- ✓ 주요 저장고 (Major sink)
 - 성층권에서의 제거 : 성층권에서의 UV 복사에 의해 매년 배출량의 2/3 가량이 제거됨

라) 할로젠탄소수소화합물족 (Halocarbons)

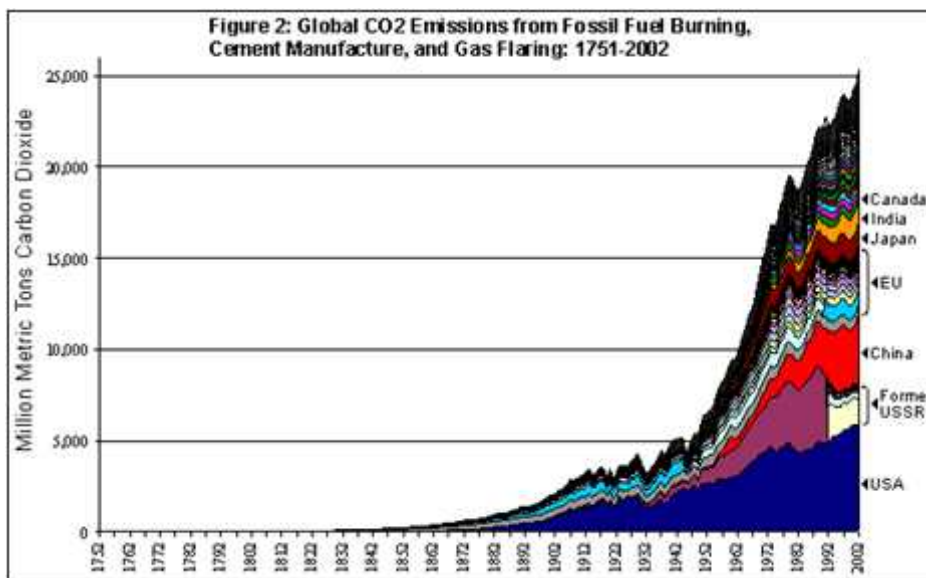
- ✓ 종류: CFCs (Chlorofluorocarbon프레온가스), HFCs(Hydrofluorocarbon수소불화탄소), PFCs(Perfluorocarbon 과불화탄소), SF6(Sulfur hexafluoride; 육불화 황)
- ✓ 주요 원천 : 자연적 원천은 없고 모두 산업공정에서 나옴
- ✓ 주요 저장고
 - 대류권에는 제거기작이 없고 이들 화합물은 화학적으로 매우 안정하여 평균 수명이 50-150 년에서 수백년까지 이름
 - 유일한 제거기작으로는 CFCs의 경우 성층권까지 도달하여 자외선에 의한 광분해를 하는 것 뿐임

다. 온실효과 기체 농도의 변화

1) 이산화탄소 배출 현황 및 예측

가) 배출현황

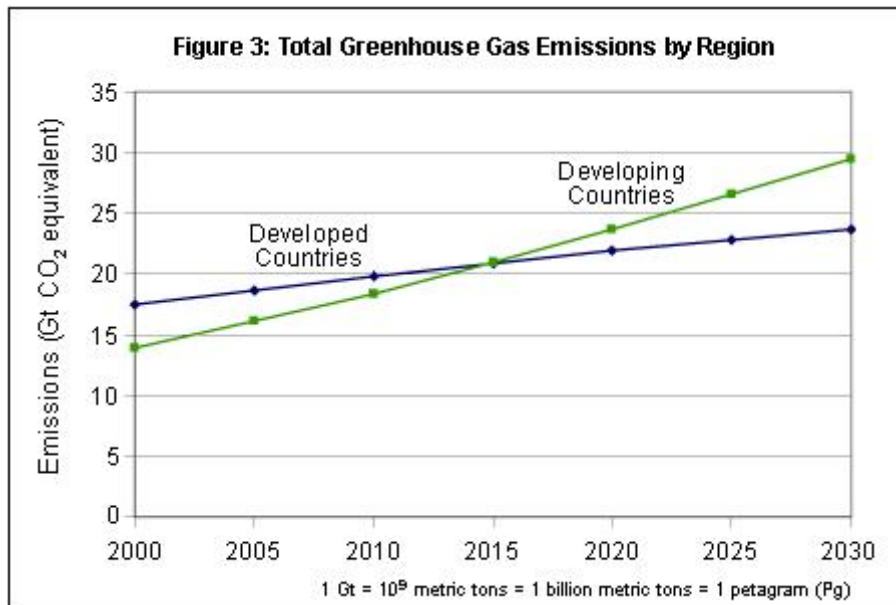
- ✓ 현재 이산화탄소를 가장 많이 배출하는 나라는 미국이다. 이 밖에도 인도, 중국, 일본, 한국 등이 상당한 양의 이산화탄소를 배출하고 있고 전지구적으로 아직도 빠른 증가 추세에 있다. 인류가 이런 이산화탄소 배출 저감을 위한 노력을 하지 않는다면 미래의 이산화탄소 배출량은 인류의 생존을 위협할 만한 수준까지 다다르게 될 것이다.



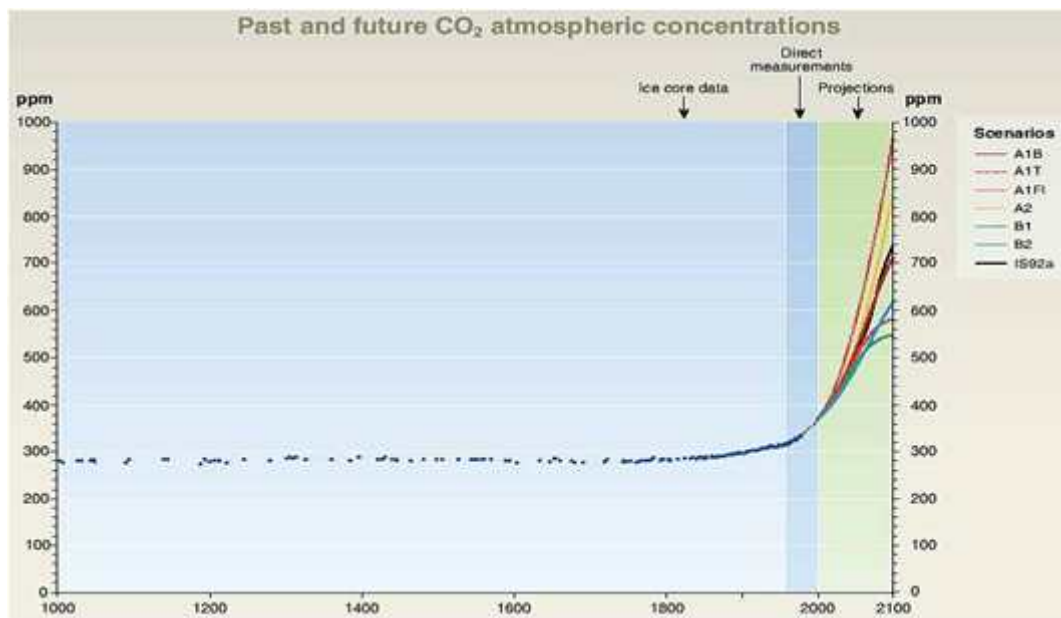
<그림 7> 화석연료 연소, 시멘트 공정 등에 의해 발생하는 이산화탄소 농도의 변화 (1751-2002)

나) 이산화탄소의 미래 배출 예측

- ✓ 이산화탄소 배출량은 <그림 1-6>에서 보는 바와 같이 아직도 증가 추세에 있다. 선진국들은 여러 환경정책의 시행으로 인해 증가추세가 안정화되어가는 반면 중국, 인디아 등 개도국의 배출량 증가 속도는 계속 증가한다. 미래의 이산화탄소 농도는 현재 인류가 어떤 선택을 하느냐에 달려있다고 해도 과언이 아니다. <그림 1-7>에서와 같이 각기 다른 시나리오에 따라 2100년대의 대기중 이산화탄소의 농도는 550 ppm ~ 1000 ppm까지 변화될 수 있다. <그림 1-7>에서 보는 시나리오는 미래 예측된 세계 인구, 기술의 발달 정도 등을 고려한 IPCC의 배출시나리오이다. 이 시나리오에 관하여서는 제4차시 강의에서 자세히 다루도록 하겠다.



<그림 8> 개발도상국과 선진국의 이산화탄소 배출 추세의 예측



<그림 9> 시나리오별 미래 이산화탄소 농도의 예측

2) 비이산화탄소 온실효과 기체의 농도현황 및 예측

- ✓ 아래의 표는 비이산화탄소 온실효과 기체의 농도 및 미래 농도 증가 예측에 관한 것이다. 인간의 산업활동이나 인간에 의한 토지이용의 변화로 인하여 비이산화탄소 온실효과 기체의 미래 배출량도 증가 추세로 보여지며 이의 배출을 완화하기 위한 인간의 노력이 절실한 실정이다.

구분		메탄 (CH ₄)	아산화질소 (N ₂ O)	프레온가스 CFC
대기중 농도(ppm)		1.7	0.3	0.002
배출원		농지경작, 가축사육	농지경작	냉매, 발포제
대기잔류수명(년)		10	150	65 ~ 130
대기농도	산업혁명이전	700 ppb	288 ppb	0
	1990년	1714ppb	311 ppb	280 ppt
	연평균농도증가	0.8 ppb/yr	0.25 ppb/yr	4 ppt/yr

<표 2> 비이산화탄소 온실효과 기체의 농도 및 예측