Part 5. 광역대기오염

목차

1. 오존층 파괴
2. 지구온난화
3. 산성비, 황사, 동북아 스모그

오존층 파괴

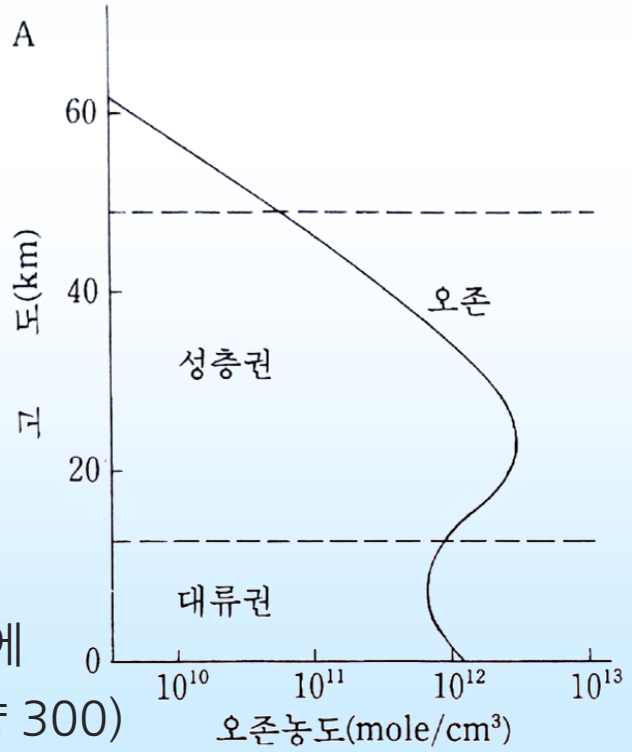
오존층의 정의

1) 오존

- 성층권에서 태양에서 복사되는 유해 자외선을 흡수 · 차단 필터역할
  → 지구생명체 보호, 지구온도 조절 기능
- 자연적으로 생성 · 소멸을 반복해서 평형상태 유지
  하지만 인위적 배출된 대기오염물질로 인한 소멸량 > 자연 생성량 → 균형이 깨짐

2) 오존층

- 성층권에 존재, 지상 약 20~30km구간에서
  최대농도 약 10ppm
- 오존층에선 계속되는 생성, 소멸로 오존농도 유지,
  유해자외선 흡수
- 오존층 두께를 표시하는 단위 : Dobson

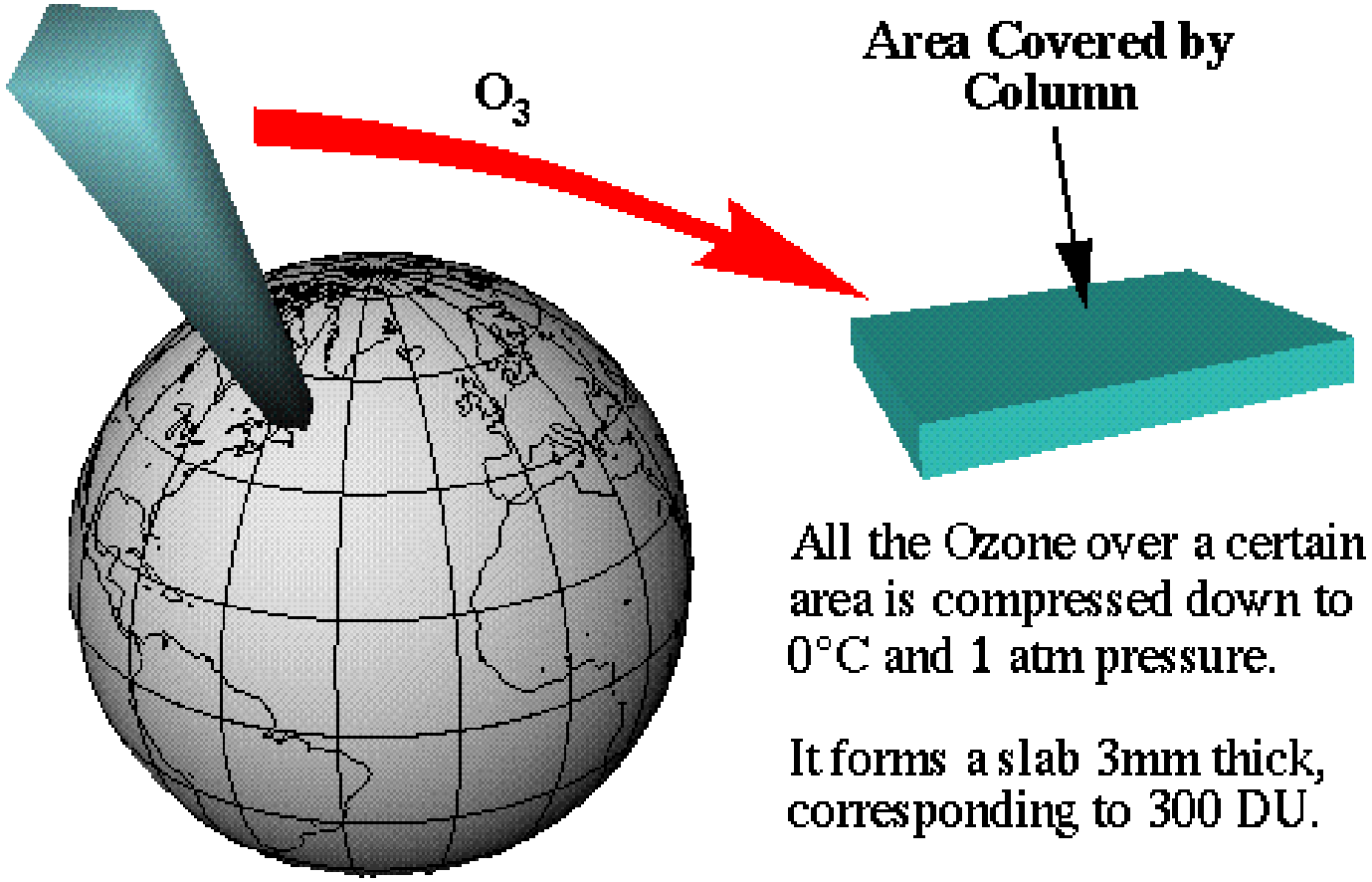


✎ 1DU (Dobson Unit) : 지구 대기 중 오존총량을
0℃, 1atm의 표준상태에서 두께로 환산했을 때 0.01mm에
상당하는 양 (적도 200, 극지방 400, 지구전체평균 오존량 300)

오존층 파괴

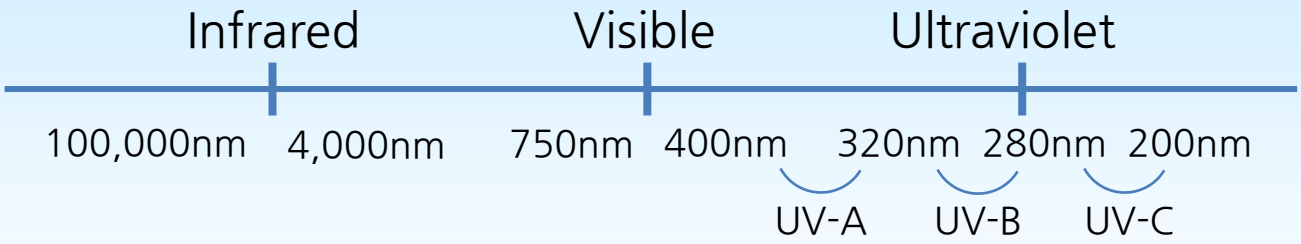
DU (Dobson Unit)

1DU (Dobson Unit) : 지구 대기 중 오존총량을 0℃, 1atm의 표준상태에서 두께로 환산했을 때 0.01mm에 상당하는 양 (적도 200, 극지방 400, 지구전체평균 오존량 300)



오존층 파괴

오존층의 생성과 역할



UV-C	단파장	인체에 유해하나 대기중의 가스성분에 의해 대부분이 흡수되어 지표면에 거의 도달하지 않는다
UV-B	중파장	10~30%가 지표면에 도달, 인체에 유해한 영향을 미침
UV-A	장파장	대부분이 지표에 도달하지만 유해하지 않음, 멜라닌 색소생성

생성, 소멸 및 파괴 반응

1) 생성

- O_2 +UV(240nm) → 2O [E=hv]
- O + O_2 + M(제3의 물질) → O_3 + M + 열

⇒ 성층권 대기 중에서 산소분자가 주로 240nm 이하의 자외선에 의해 광분해 되어 오존 생성, M은 물질로 에너지를 받아들이는 물질, 대표적인 물질은 질소

2) 소멸

- O_3 +UV(240~300nm) → O_2 + O · [E=hv]

⇒ 오존은 파장 240~300nm(200~290nm) 자외선에서 광분해 소멸

오존층 파괴

정상적인 오존층에서의 화학 반응식

Ozone formation (오존 생성)

$$O_2 + UV\ (\lambda < 240\ nm) \rightarrow 2O$$

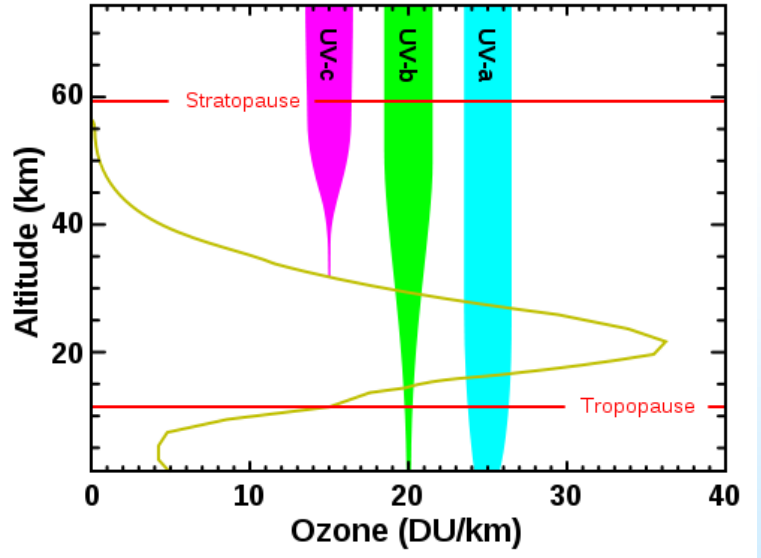
$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M + heat$$

Name	Abbreviation	Wavelength range (in nanometres)
Visible	VIS	760 – 380 nm
Ultraviolet	UV	400 – 100 nm
Ultraviolet A	UVA	400 – 315 nm
Ultraviolet B	UVB	315 – 280 nm
Ultraviolet C	UVC	280 – 100 nm

Ozone formation (오존 분해)

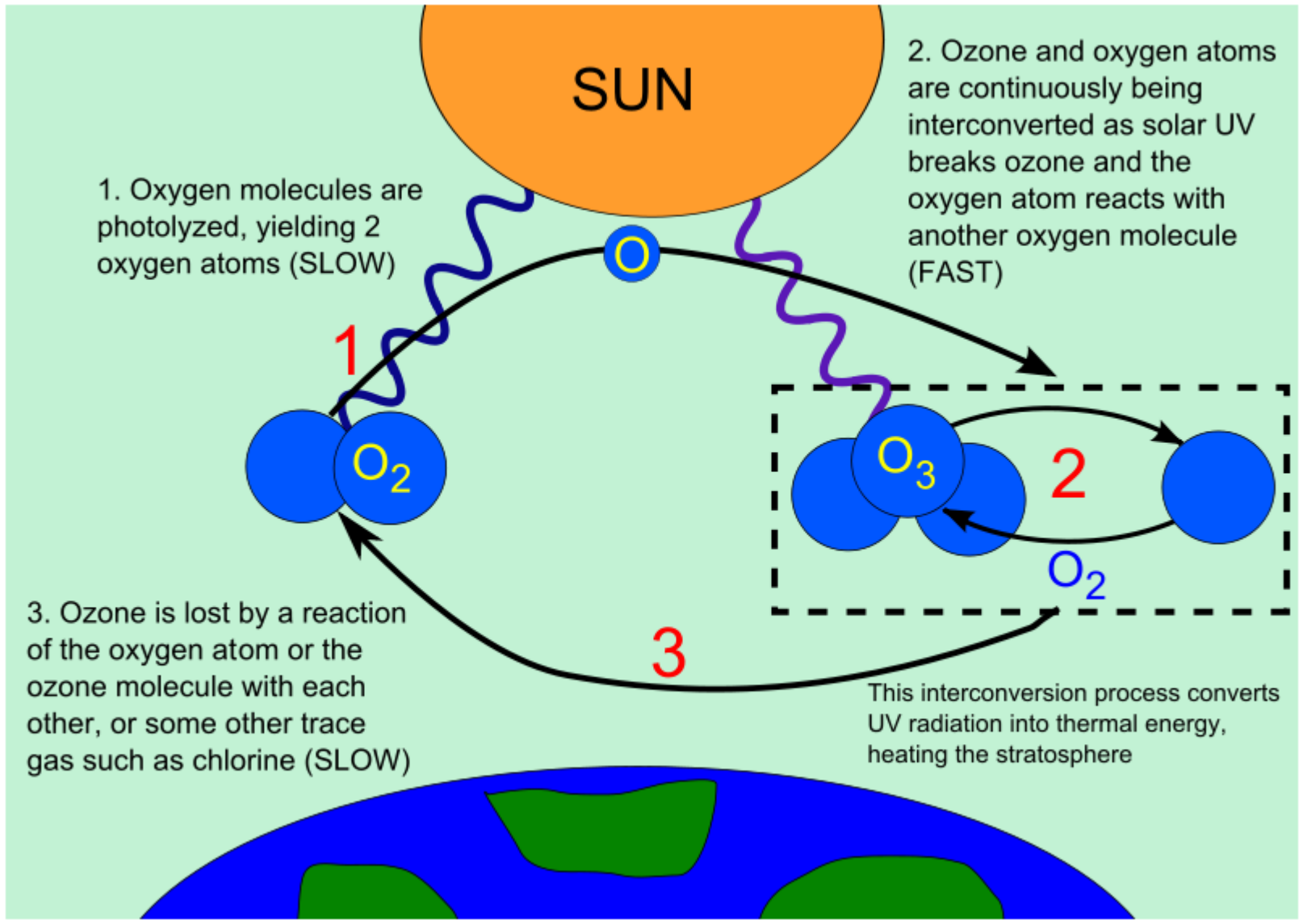
$$O_3 + UV\ (\lambda < 320\ nm) \rightarrow O_2 + O$$

$$O + O_3 \rightarrow 2O_2$$



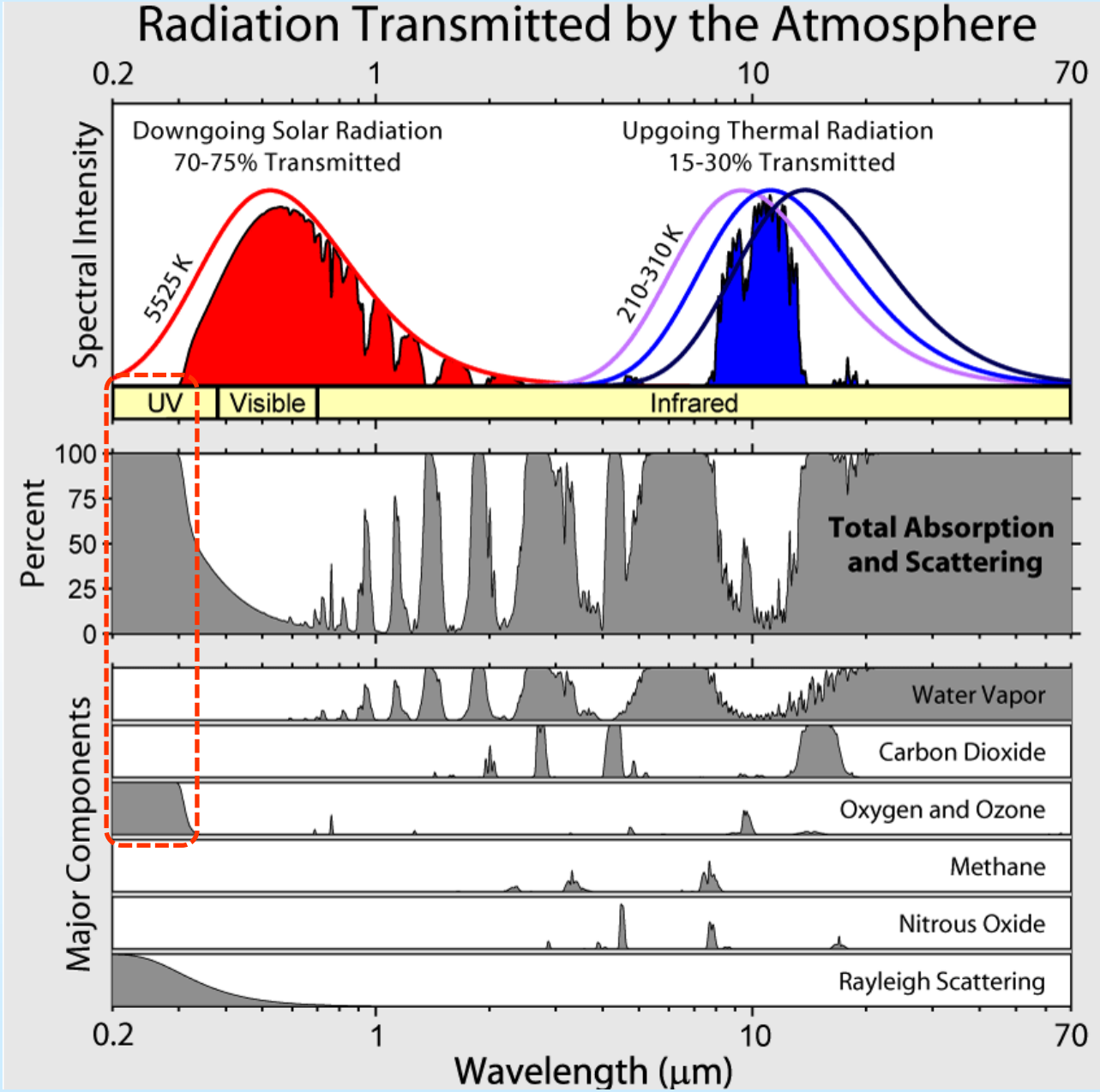
오존층 파괴

정상적인 오존층에서의 화학 반응식



오존층 파괴

오존이 태양광 중
UV영역을 흡수함



오존층 파괴

오존층의 생성과 역할

3) 파괴

- $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$

  ⇒ 염소원자는 오존과 반응해 오존파괴 진행

- $ClO + O \rightarrow O2 + Cl$

  ⇒ 일산화염소는 산소원자와 반응해 염소원자가 되어 위의 반응이 일어남

- $CF_xCl_y + UV\text{-}C \rightarrow CF_xCl_{y-1} + Cl$

  ⇒ 프레온가스가 성층권에 도달 시 자외선에 의해 분해(라디칼 반응)되어 염소원자(반응성이 큰 염소 라디칼)가 형성

오존층 파괴

오존층 파괴와 CFCs

- **오존을 파괴하는 촉매물질** : H, OH· NO, Cl, Br 라디칼
- **촉매물질의 주요원인물질** : N_2O, CH_4, Cl 화합물, Br 화합물
- **오존층 파괴 물질의 특징**

① 인위적으로 만들어진 물질　　② 매우 안정된 물질　　⇒ 프레온류 (CFCs)

- 하나의 촉매분자는 수천에서 수십만의 오존분자를 파괴하며, 지상에서 배출된 미량의 가스성분으로서 대류권에서 쉽게 분해 되지 않기 때문에 성층권으로 이동을 한 후 분해되어 오존을 파괴
- 오존층을 파괴하는 주요원인 물질은 냉장고의 냉매로 사용되는 프레온가스(CFCs)와 소화기에 사용되는 할론가스 등이다.

오존층 파괴지수(ODP : Ozone Depletion Potential)

: CFC 11의 오존층 파괴영향을 1로 했을 때, 오존층 파괴에 영향을 미치는 물질의 상대적 영향을 수치화 (단위중량당 오존의 소모능력)

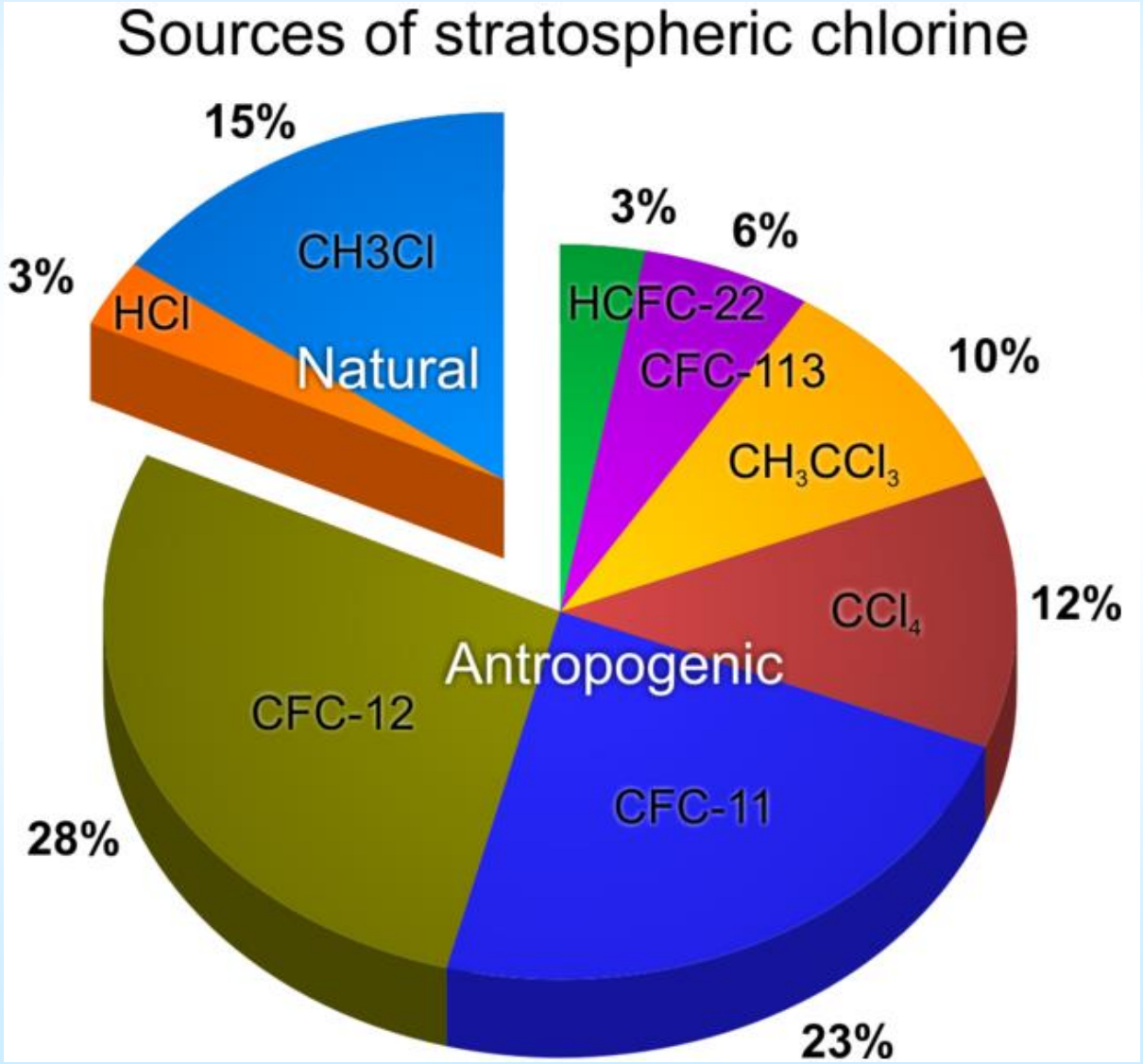
오존층 파괴

오존층 파괴와 CFCs

물질명	화학식	주요 용도	평균수명(년)	ODP
CFC-11	$CFCl_3$	세정제,발포제,냉매,분사제	60	1
CFC-12	CF_2Cl_2	발포제,냉매,분사제	120	1
CFC-113	$C_2F_3Cl_3$	세정제,냉매,분사제	90	0.8
CFC-114	$C_2F_4Cl_2$	발포제,냉매,분사제	200	1
CFC-115	C_2F_5Cl	분사제	400	0.6
CFC-22	CHF_2Cl	발포제,냉매,분사제,소화제	15.3	0.05
CFC-123	$C_2HF_3Cl_2$	세정제,발포제,냉매,분사제	1.6	0.01
CFC-124	C_2HF_4Cl	냉매,분사제	6.6	0.02
CFC-141b	$C_2H_3FCl_2$	발포제,냉매,분사제	7.8	0.09
CFC-142b	$C_2H_3F_2C$	발포제,냉매,분사제	19.1	0.06
Halon-1211	CF_2BrCl	소화제		3
Halon-1301	CF_3Br	냉매,소화제		10
Halon-2402	$C_2Br_2F_4$	소화제		6
사염화탄소	CCl_4		50	1.2
메틸클로로포름	CCl_3CH_3	세정제	6.3	0.14

오존층 파괴

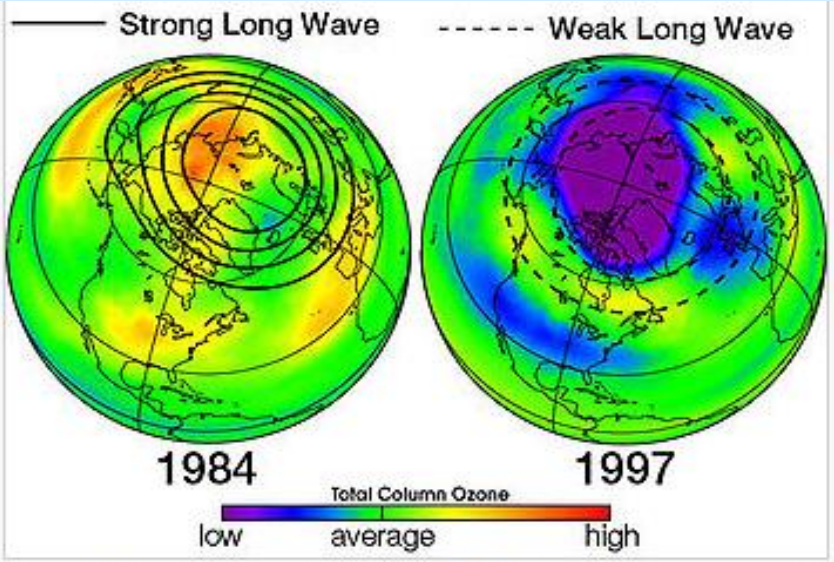
성층권에 유입된 배출원별 (자연적, 인위적) 염소화합물 종류



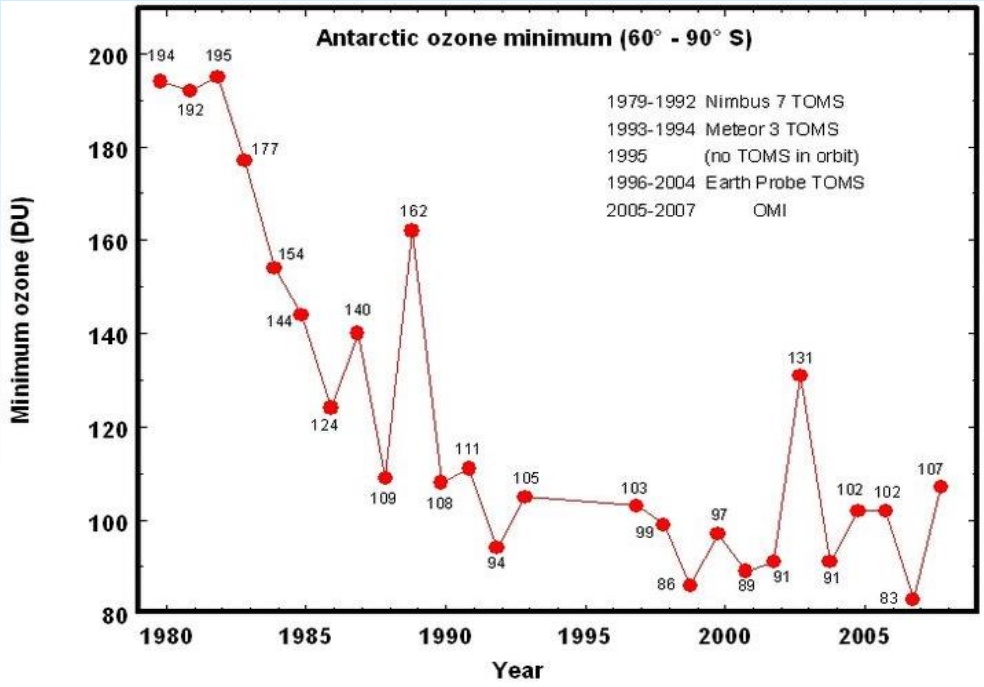
[C-1][H+1][F]

CFC-11 $CFCl_3$
CFC-12 CF_2Cl_2
CFC-113 $C_2F_3Cl_3$

오존층파괴 증거



Ozone hole in North America during 1984 (abnormally warm reducing ozone depletion) and 1997 (abnormally cold resulting in increased seasonal depletion). Source: NASA[14]



오존층파괴에 따른 영향

- 피부암 발생률 증가
- 백내장 질환 증가
- 식물생장 저해, 생산성 낮아짐
- 건물, 차량의 색상변화, 플라스틱 재질 부식
- 지표면 및 대류권의 온도상승
- 대도시의 지표면 광화학 스모그 발생횟수 증가

뻥 뚫린 지구 보호막… 남극 오존구멍 왜 줄지 않을까

강찬수의
자연, 그 비밀

4년 전에야 오존 파괴물질 금지
이미 배출된 성분 남아 효과 더뎌
"완전한 회복 2070년 돼야 가능"

4일 오전 서울 용산구에 위치한 숙명여대 이과대학 7층 옥상. 반쯤 열린 텐트형 덮개 속에서 둥근 판이 바쁘게 움직이고 있었다. 서울 상공의 오존(O_3) 농도를 고도별로 파악할 수 있는 장비다. 이 대학 오정진(화학과) 교수는 "하늘에서 날아오는 전파(마이크로파)를 반사판이 측정기로 보내주고 있다"고 설명했다. 오 교수가 직접 개발한 장비로 측정한 데이터는 국제적으로 신뢰성을 인정받았다. 실제로 이 측정소는 지난해 3월 미국 국립해양대기청(NOAA)의 국제 대기감시 네트워크(NDACC)의 관측소 중 하나로 등재됐다.

16일은 유엔이 정한 '세계 오존층 보호의 날'이다. 전 세계 과학자들이 고도 20~40㎞에 있는 성층권에 형성된 오존층에 관심을 갖는 이유는 '지구 생명의 보호막'이기 때문이다. 오존층에서 태양 자외선과 산소(O_2)가 반응해 오존이 만들어지기도 하고, 다시 파괴되기도 한다. 오존층이 자외선을 막아주지 않는다면 인류는 피부암으로 고통을 겪고, 양서류나 식물플랑크톤도 피해를 입게 된다.

봄철 남극에서 오존구멍이 생기는 이유는 제트기류로 극지방에 강력한 소용돌이가 생기고 차가운 공기가 그 속에 갇히기 때문이다. 대륙인 남극은 바다인 북극보다 기온이 더 낮다. 성층권 기온이 영하 78도 아래로 떨어지면 오존 파괴를 막아주는 질산염·황산염이 구름처럼 엉겨 아래로 가라앉는다. 질산염이 사라지면 성층권의 오존 파괴물질(ODS)은 '고삐 풀린 망아지'처럼 방해를 받지 않고 오존을 파괴한다.

프레온 가스와 같은 ODS를 규제하기 위해 마련된 몬트리올 의정서가 발효(1989년 1월)된 지도 25년의 세월이 흘렀다. 하지만 남극 오존구멍은 작아졌다 커졌다를 반복하면서 아직은 정상 상태로 회복되지는 않고 있다. 오존구멍은 오존층의 두께가 평소의 절반 수준으로 떨어지는 상태를 말한다. 오존구멍의 면적은 2006년 2660만㎢까지 이르렀다. 북아메리카 면적(2471만㎢)보다 컸다. 2012년에는 1780만㎢까지 줄었으나 지난해에 다시 2100만㎢로 커졌다. 올해는 6일 현재 1800만㎢를 넘어 계속 커지고 있다.

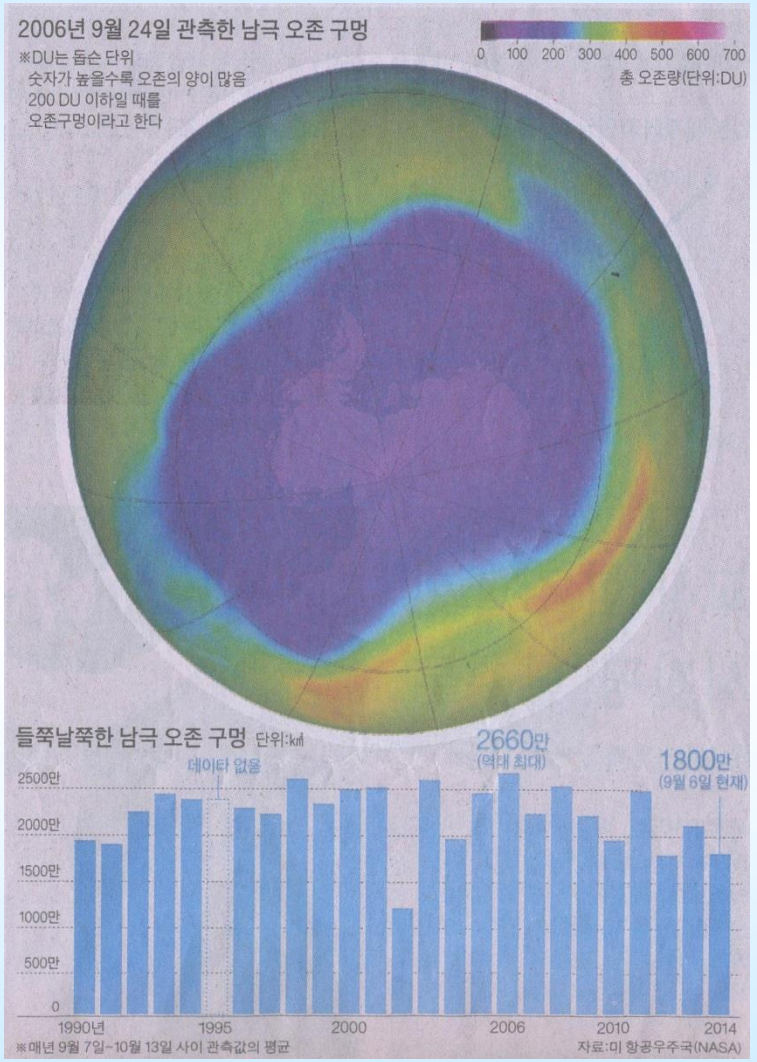
오존구멍이 쉽게 사라지지 않는 이유는 뭘까. 오존을 주로 파괴하는 대표적 ODS인 염화불화탄소(CFCs)의 생산·소비가 2010년에야 개발도상국에서도 전면 금지됐다. 겨우 4년 전이다. 줄고는 있다지만 그동안 배출된 ODS가 남아서 오존층을 파괴한다. 게다가 지난 3월 영국 이스트앵글리아대학 연구팀이 지금까지 알려지지 않았던 네 종류의 ODS를 찾아냈다. 염화불화탄소의 대체물질로 개발된 수소염화불화탄소(HCFCs)도 오존층을 파괴하지만 2040년까지 생산·소비할 권리를 인정 받았다.

성층권의 기상 현상도 예측을 어렵게 한다. 2012년 성층권의 저층에서는 오존파괴가 활발했지만 상층부에서는 바람을 통해 오존이 흘러들어 전체적으로는 오존구멍이 작아진 것으로 기록됐다. 반대로 2006년에는 오존이 흘러들지 못해 오존구멍 규모가 가장 컸다.

전문가들은 남극 상공의 오존구멍이 뚜렷한 회복세로 돌아서려면 앞으로도 10년은 걸리고, 오존구멍이 완전히 사라지려면 2070년 정도는 돼야 할 것이라고 예상하고 있다.

자기 자신을 지켜 줄 보호막을 생각 없이 파괴한 인류. 그 어리석음이 낳은 상처가 치유되는 데는 오랜 시간이 걸린다는 교훈을 남극 오존구멍은 조용히 일러주고 있다.

환경전문기자 envirepo@joongang.co.kr



오존층 파괴

오존층 파괴에 따른 영향

- 피부암 발생률 증가
- 백내장 질환 증가
- 식물생장 저해, 생산성 낮아짐
- 건물, 차량의 색상변화, 플라스틱 재질 부식
- 지표면 및 대류권의 온도상승
- 대도시의 지표면 광화학 스모그 발생횟수 증가

오존층 파괴

국제 협약

- 비엔나 협약

: 1985년 3월에 만들어진 오존층 보호를 위한 최초의 협약

: 즉, 오존층 파괴의 영향으로부터 지구와 인류를 보호하기 위해 최초로 만들어진 보편적인 국제협약

- 몬트리올 의정서(제1차 당사국회의)

: 1987년 9월 오존층 파괴물질의 생산 및 소비감축, 즉, 생산, 소비량을 규제하기 위해 채택한 것으로 염화불화탄소(CFC)의 생산과 사용규제를 주 내용으로 한 협약으로 1989년 1월 1일부터 발효, CFC와 할론의 사용을 줄이고, 전폐시키는 협약으로 개정

- 런던회의(제2차 당사국회의)

: 1990년 런던에서 몬트리올 의정서의 내용을 보완, 개정한 내용

- 코펜하겐회의(1992년)

: 지구 온난화 해결 방안을 모색하고 교토의정서를 대체할 새로운 구속력 있는 기후협약도출을 목표로 하여 덴마크 코펜하겐에서 개최됨

지구 온난화

지구온난화는 기후변화의 요인임

Climate (기후): 수십년, 수백년의 통계적인 날씨 패턴

Weather (날씨): 그날그날의 비, 구름, 바람, 기온 등 기상상태

Climate change (기후변화):
태양복사, 지구의 지각 및 화산활동, 인위적인 활동 등에 의한
대양과 대기의 에너지 순환에 따른 결과

- 지구온난화 : Global warming, Green house effect
- 지구암화 : Global dimming
- 해수면 상승: Sea level rise
- 엘리뇨: El Nino
- 라니냐: La Nina

지구 온난화

온실 효과

1) 온실효과

- 전 지구의 평균 지상기온은 지구가 태양으로 바는 태양에너지와 지구가 적외선 형태로 우주로 방출하고 이는 에너지 균형으로 결정하며, 이 균형은 대기 중 CO_2, 수증기 등 흡수 기체가 큰 역할을 한다.
- 온실기체가 대기 중 계속 축적되어 발생하는 지구대류권 온도증가 현상

2) 온실가스

- 파장이 짧은 태양광선(가시광선 등) 그대로 통과시키지만 태양광에 의해 따뜻해진 지표가 방사하는 파장이 긴 적외선을 잘 흡수하는 광화학적 성질을 가진 기체
- 7~20μm 이상 파장범위 적외선 흡수 지구온도 상승해 온실의 유리 같은 효과

온실가스의 대기 중 배출현황

구분	대기 중 체류시간	현재 연간 증가율	온실효과 기여도	주요 발생원
CO_2	50 ~ 230 년	0.5 %	50 %	화석연료, 삼림파괴, 토지이용변경
CH_4	10 년	0.9 %	18 %	늪지, 논, 화석연료, 매립지, 가축, 생체량 연소
N_2O	150 년	0.25 %	6 %	화석연료와 유기체 연소, 질소비료, 토지이용 변경
CFC-11	65 년	4 %	14 %	냉장고, 냉매, 공업용 냉매, 분사제
CFC-12	130 년	4 %	14 %	냉장고, 냉매, 공업용 냉매, 분사제
O_3	수시간 ~ 수 일	1 %	12 %	HC와 NOx의 광화학 반응

지구 온난화

온실 가스 종류

❖ Green House Gases (GHG, 온실가스)
- H_2O (water vapor, 수증기)
- CO_2 (carbon dioxide, 이산화탄소)
  인위적으로 배출되는 전체 온실가스 양의 60% 차지
- CH_4 (methane, 메탄)
- N_2O (nitrous oxide, 아산화질소)
- SF_6 (Sulfur hexafluoride, 육불화황)
- O_3 (ozone, 오존)
- HCFCs (Hydrochlorofluorocarbons, 수화염화불화탄소)
  HFCs (Hydrofluorocarbons, 수화불화탄소)
  PFCs (Perfluorocarbons, 과불화탄소)
  CFCs (Chlorofluorocarbons = Freon, 염화불화탄소,)

❖ Non-greenhouse gases
- N_2 (nitrogen, 질소)
- O_2 (oxygen, 산소)
- Ar (Argon, 알곤)

지구 온난화

지구전체 온실효과 기여도

Gas	Formula	Contribution (%)
Water vapor	H_2O	36 – 72 %
Carbon dioxide	CO_2	9 – 26 %
Methane	CH_4	4 – 9 %
Ozone	O_3	3 – 7 %

산업혁명 전과 현재의 온실가스 농도수준 비교

Gas	Preindustrial level	Current level	Increase since 1750	Radiative forcing (W/m^2)
Carbon dioxide	280 ppm	396 ppm	116 ppm	1.46
Methane	700 ppb	1745 ppb	1045 ppb	0.48
Nitrous oxide	270 ppb	314 ppb	44 ppb	0.15
CFC-12	0	533 ppt	533 ppt	0.17

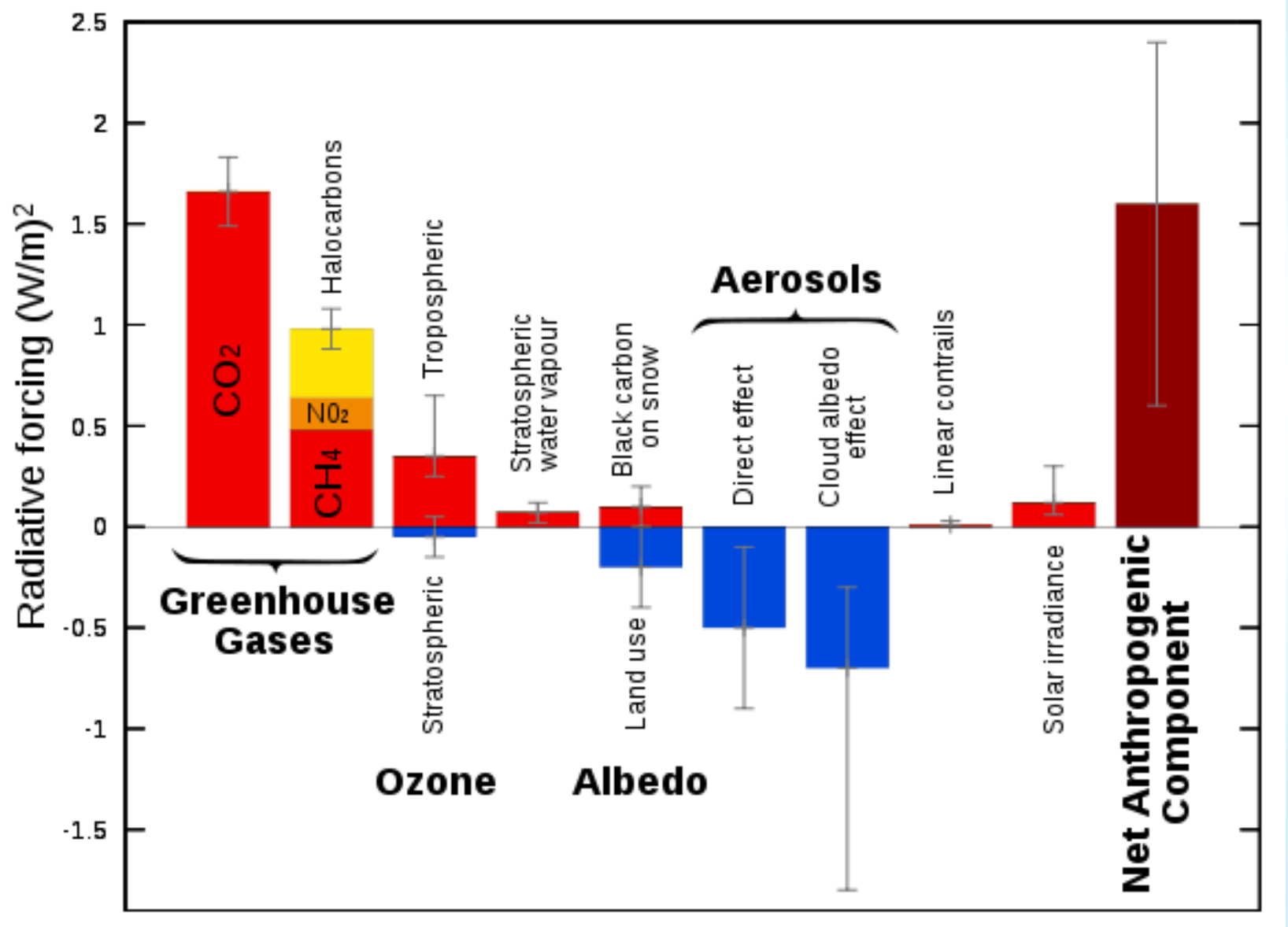
지구 온난화

Global Warming Potential (GWP, 지구온난화 잠재력)

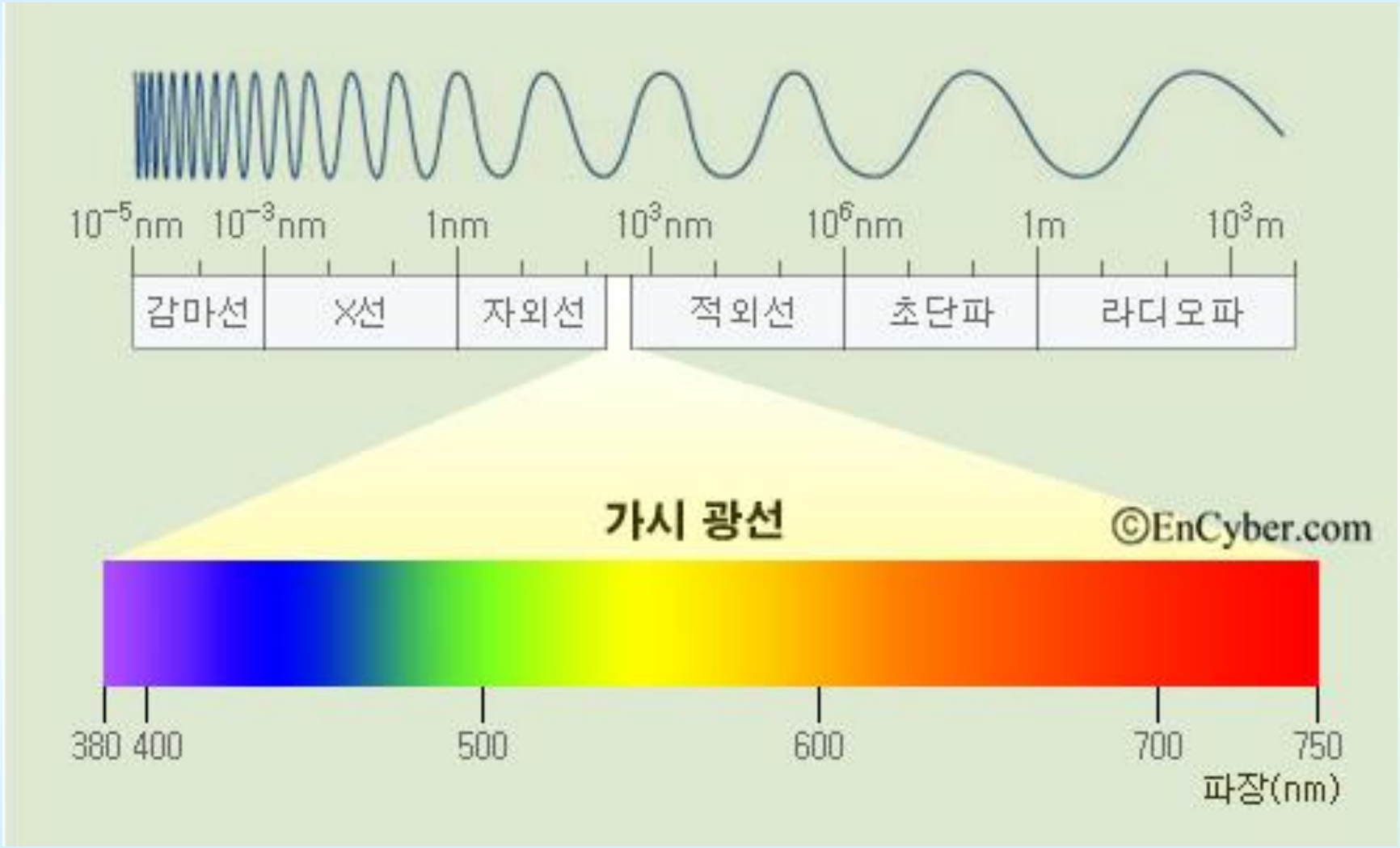
Gas name	Chemical formula	Lifetime (years)	Global warming potential (GWP) for given time horizon		
			20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO_2	See above	1	1	1
Methane	CH_4	12	72	25	7.6
Nitrous oxide	N_2O	114	289	298	153
CFC-12	CCl_2F_2	100	11 000	10 900	5 200
HCFC-22	$CHClF_2$	12	5 160	1 810	549
Tetrafluoromethane	CF_4	50 000	5 210	7 390	11 200
Hexafluoroethane	C_2F_6	10 000	8 630	12 200	18 200
Sulphur hexafluoride	SF_6	3 200	16 300	22 800	32 600
Nitrogen trifluoride	NF_3	740	12 300	17 200	20 700

지구 온난화

복사에너지의 흡수와 차단요소



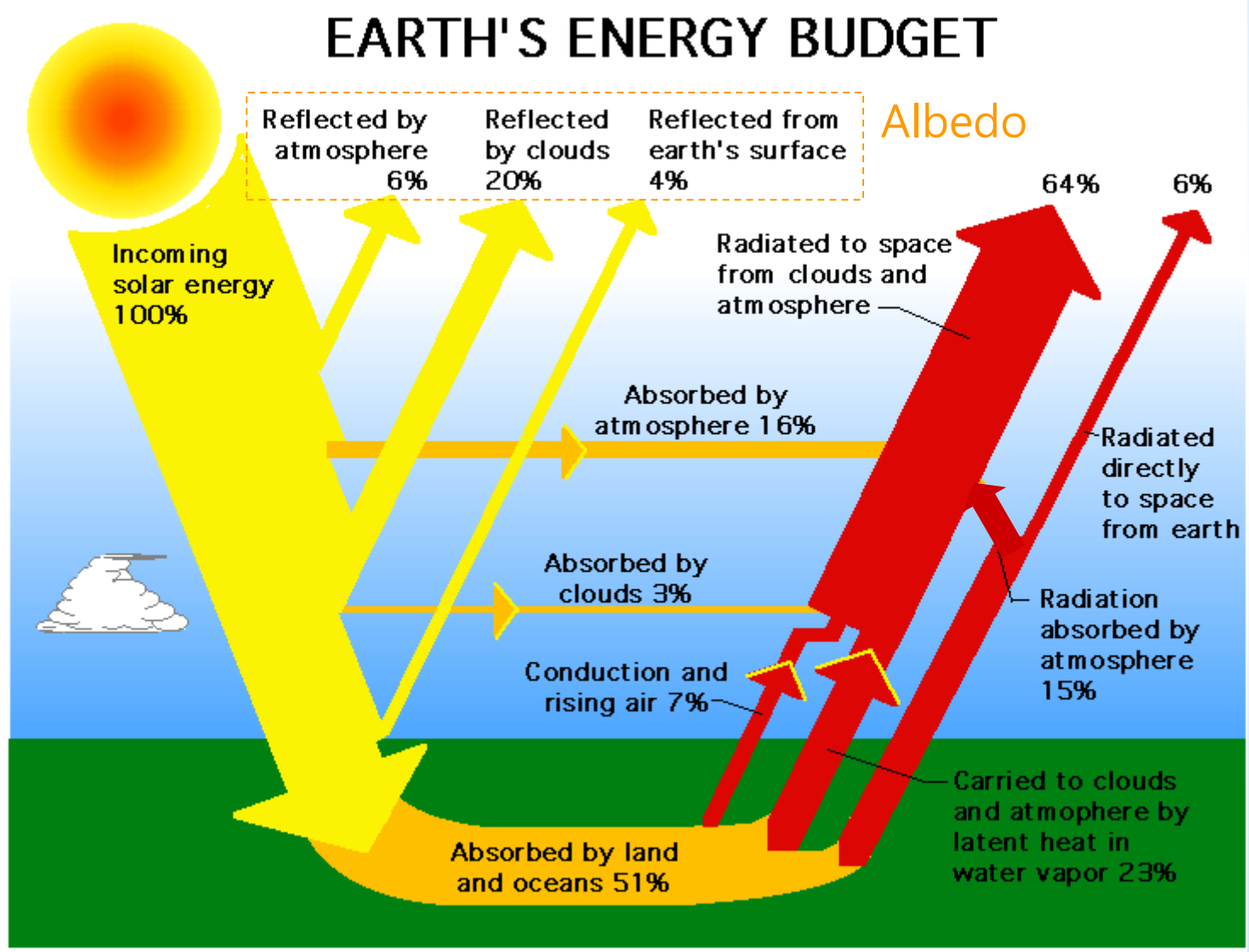
전자기 스펙트럼 (Electromagnetic Spectrum)



지구 온난화

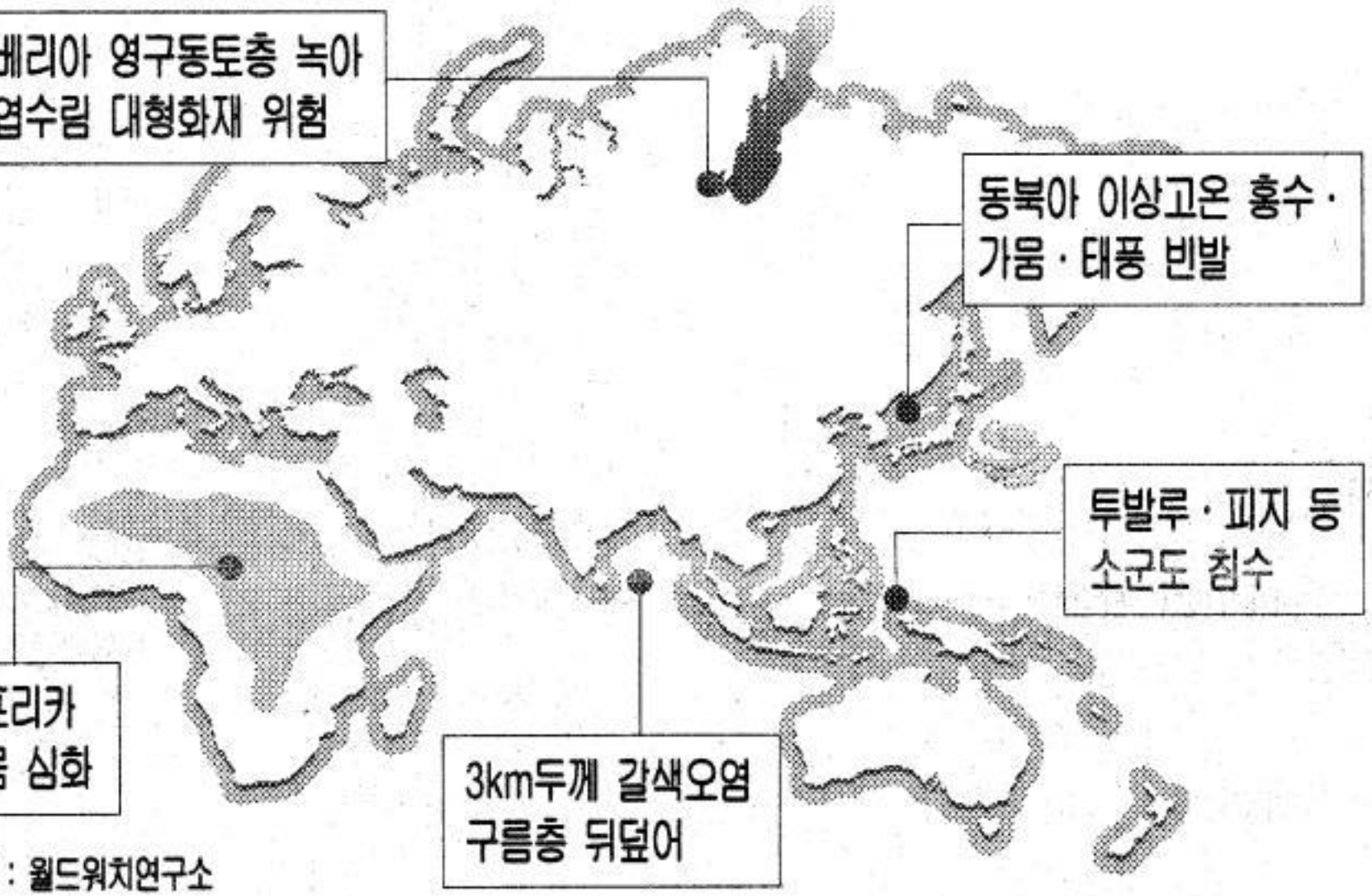
Energy balance (에너지 평형)

* **Albedo :** 어떤 표면에 의하여 반사되는 태양복사의 분율, 지구평균 알베도는 **0.3**



중앙일보 2002년 9월 10일

지구온난화로 인한 이상 현상



자료 : 월드워치연구소

지구 온난화

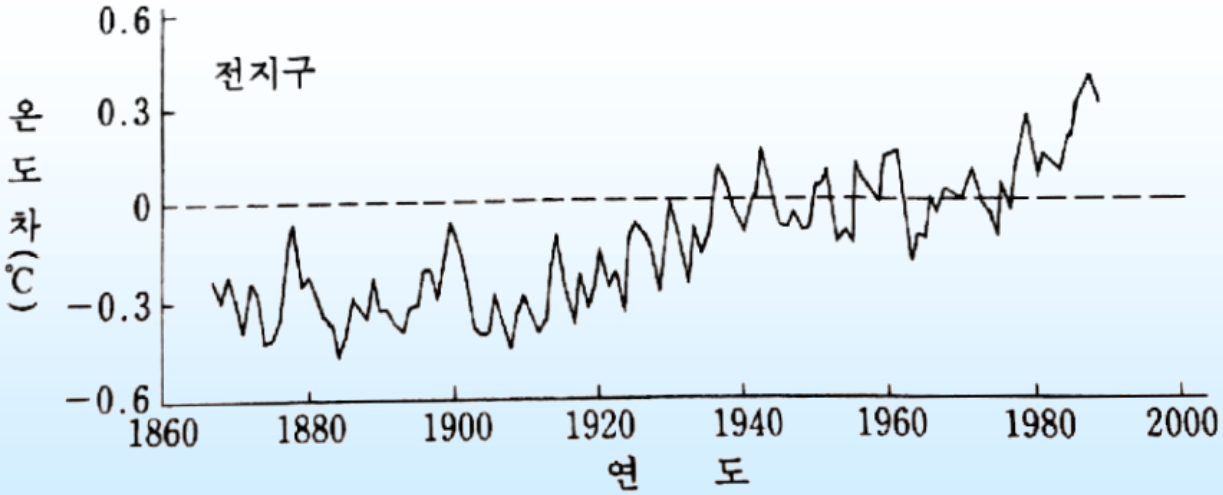
지구 온난화의 영향

1) 지구의 기온상승

- 지구의 평균기온은 19세기 말부터 증가하고 있으며,지구의 연평균 기온은 대략 0.5℃ 증가하였다.

⇒ 기후변동에 관한 정부간 협의회(IPCC)에서는 21세기 중반경에는 CO_2의 농도가 산업화 이전에 비해 2배 정도 증가 할 것으로 예측하였다.

⇒ 대순환모델(GCM)에 의하면 지구의 연평균 기온을 예측한 결과 1.4 ~ 4.0℃ 상승할 것으로 나타난다.

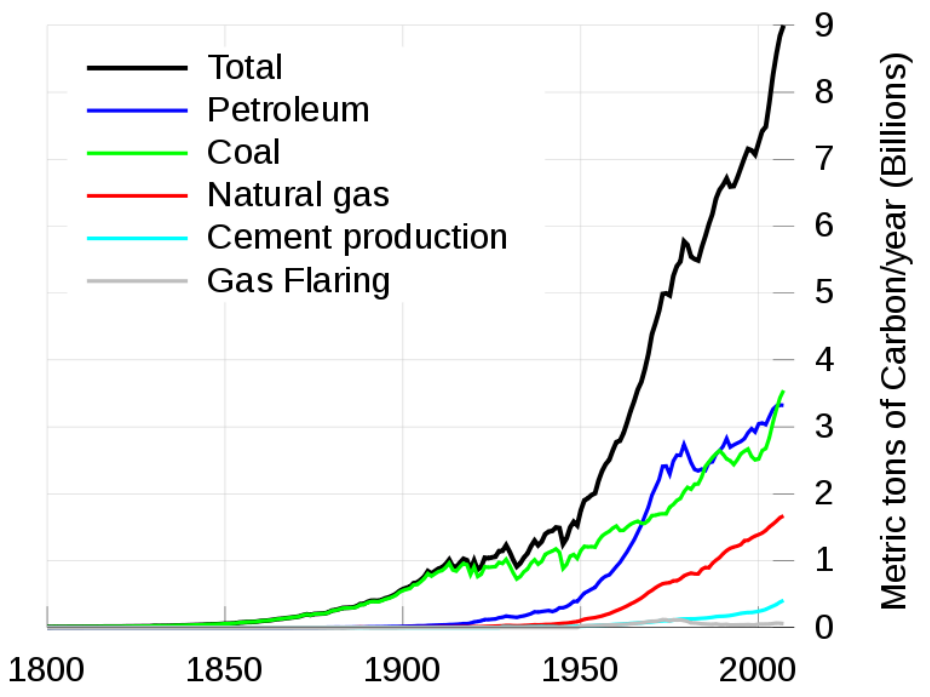


(그림8-11) 과거 100년 동안 지구 기온의 연평균 변화

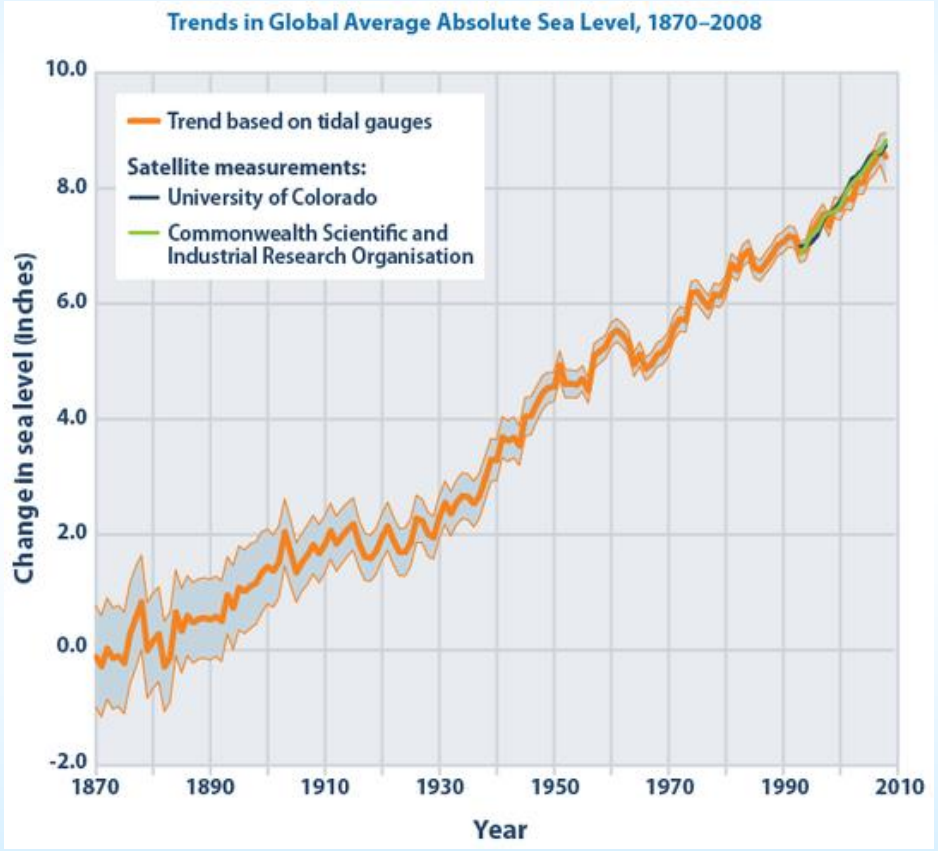
지구 온난화

지구 온난화의 영향

지구전체 연도별 탄소배출량 변화량



연도별 해수면 상승정도



지구 온난화

지구 온난화의 영향

2) 해수면 상승

- 지구의 기온 상승으로 극지방의 빙하가 녹아 해수면 의 높이가 상승

⇒ 지난 100년 동안 10~25cm 정도로 상승하였으며, ICPP에서는 현재수준으로 온난화가 진행되면 전세계적으로 해수면이 15~95cm 상승할 것으로 예측

3) 기상변동

- 기온이 상승하면 증발량이 ↑ 강수량은 ↑, 그러나 내륙지역의 토양 수분의 증발량이 ↑

⇒ 더욱 건조해짐으로써 넓은 지역에 걸쳐 사막화 현상이 진행

⇒ 극단적인 더위나 추위, 태풍을 동반하는 열대성 저기압 등의 이상기상이 일어날 가능성이 ↑

4) 수자원 부족, 사막화

- GCM에 의하면 CO_2가 2배로 증가할 경우 연 강수량은 5~10% 증가하지만 증발산량이 상대적으로 증가해 수자원 부족을 초래하게 될 것이다.

지구 온난화

지구 온난화의 피해사례 (해수면 상승, 극지방 빙하 녹음, 사막화)

지구 온난화

지구 온난화의 대책

- 에너지절약 (에너지효율화, 탄소시장, 배출권 거래)
- 신재생에너지 개발 (태양열, 지열, 조력, 파력, 풍력)
- CO_2 처리기술 개발 (해저, 지하에 저장, 약품 등의 원료로 전환)
- 숲의 보호, 나무 식생 (CO_2 처리)

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change,
  기후변화에 대한 정부간 패널기구)
  전세계 2,000 여명의 과학자가 참여

-IPCC 1차 보고서(1990) 국제기후변화협약 (UNFCCC)설립에 기여

-IPCC 2차 보고서(1995) 기후변화를 과학적으로 기정사실화

-IPCC 3차 보고서(2001) 가난한 열대국가일수록 기후변화에 취약

지구 온난화

지구 온난화의 대책

❖ 기후변화협약 (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)

-선진국의 책임 강조 (온실가스 배출의 역사적 책임, 기술, 재정능력)
-개도국의 특수사정 배려
-기후변화 예측, 방지를 위한 예방적 조치 시행
-모든 국가의 지속가능한 성장의 보장

❖ 교토의정서 (Kyoto protocol, 1997)

-선진국 감축목표 설정
-공동이행제도 (joint implementation)
(선진국A가 선진국B에 투자하여 온실가스 감축분 A국 저감실적으로 인정)
-청정개발체제 (Clean Development Mechanism)
(선진국A가 개도국B에 투자하여 온실가스 감축분 A국 저감실적으로 인정)
-배출권거래제 (Emission Trading)
(온실가스 감축의무국에 배출쿼터를 부여한 후 국가간 배출쿼터 거래를 허용)