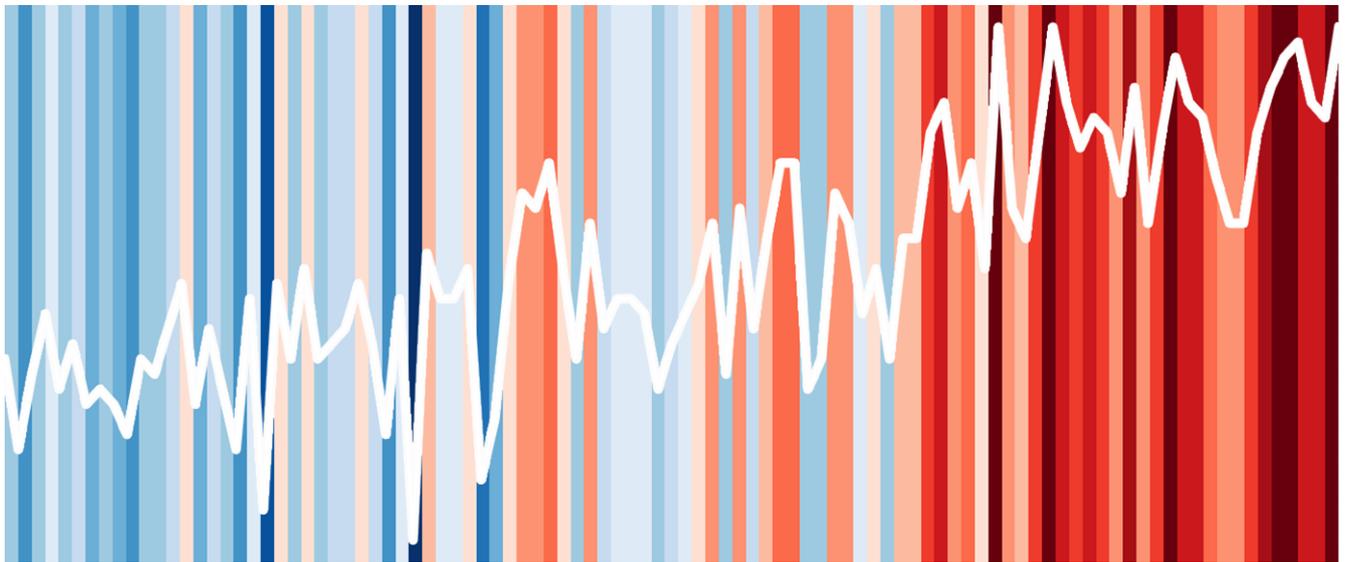


발간 등록 번호

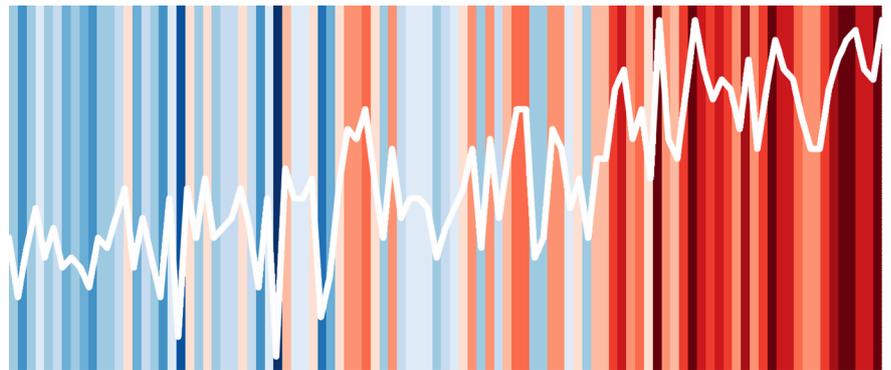
11-1360000-001468-13



# 기후변화과학 용어 설명집



기후변화에 따른 기온상승



기후변화에 따른 기온상승

국내 6개 도시(서울, 인천, 강릉, 대구, 부산, 목포)의 1912년부터 기후변화에 따른 기온편차를 히트맵으로 표현  
빨간색으로 갈수록 기온이 높아지는 것을 의미하며,  
기후변화에 따른 기온상승추세가 잘 반영됨.

# 기후변화과학 용어 설명집

## 차례

제1장. 기후와 기후변화의 이해 .....	1
1.1 기후와 기후변화 정의 .....	2
1.2 기후변화의 원인 .....	5
1.3 기후시스템 .....	8
제2장. 대기권의 기후변화 .....	11
2.1 지구대기감시 .....	12
2.2 온실가스 .....	15
2.3 반응가스 .....	20
2.4 에어로졸 .....	23
2.5 강수화학 .....	27
2.6 대기복사 .....	30
2.7 자외선 .....	33
2.8 성층권 오존 .....	35
제3장. 해양권의 기후변화 .....	40
3.1 해양의 기후변화 .....	41
3.2 수온 상승 .....	42
3.3 해수면 높이 .....	43
3.4 해양산성화 .....	44
3.5 해양 염분 .....	46

# 기후변화과학 용어 설명집

## 차례

제4장. 빙권/지권의 기후변화 .....	47
4.1 빙권의 기후변화 .....	48
4.2 지권의 기후변화 .....	52
제5장. 기후 전망 .....	55
5.1 장기예보 .....	56
5.2 기후감시 .....	59
제6장. 기후변화 전망 .....	65
6.1 기후변화 시나리오 .....	66
6.2 전지구 및 한반도 기후변화 전망 .....	70
제7장. 기후변화 영향 .....	72
7.1 기후변화 영향 .....	73
7.2 기후변화 응용정보 .....	77
참고문헌/관련 홈페이지 .....	79

# 01. 기후와 기후변화의 이해

- 1.1 기후와 기후변화 정의
- 1.2 기후변화의 원인
- 1.3 기후시스템

# 1.1

# 기후와 기후변화 정의

우리가 살아가는 기후 환경이 변하고 있다.

우리의 생활은 의식주뿐만 아니라 문화, 사회적 관습, 경제활동 등 모든 면에서 날씨 또는 기후와 밀접한 관련이 있다. 지역에 따라 계절에 따라 날씨와 기후가 변하면 우리의 생활도 변하게 된다.



**기후변화** 연관어

- 기후
- 날씨
- 지구온난화
- 기후변동

## 기후

- 기후는 장기간(대개 30년)에 걸친 날씨(기상)의 평균이나 변동의 특성을 말한다. 세계기상기후(World Meteorological Organization, WMO)가 정한 평균 산출기간은 30년이다. 과학자들은 기후가 변하고 있다는 것을 확인하고(IPCC<sup>1)</sup> 평가보고서), 이는 인류의 에너지 수요 급증으로 인한 화석연료 사용 증가 등 인간 활동으로 인하여 발생했을 가능성이 매우 높다고 평가하였다.

## 기상

- 대기 중에서 일어나는 여러 가지 물리 현상
- 날씨는 순간적이고 국지적인 다양한 기상현상으로, 시시각각 변하는 특성이 있다.
- ※ 보통, 지구의 기분은 '기상', 지구의 성격은 '기후'로 비유함.

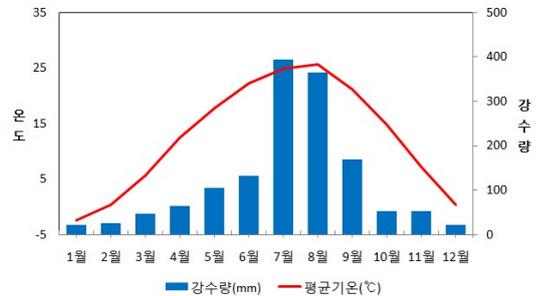
1) IPCC 정부에 관한 정부간 기후변화 협의체 : Intergovernmental Panel on Climate Change 1988년 UN 기구로 설립되어 기후변화의 과학, 기술, 사회경제적 평가보고서를 작성하여 국제기후변화협약에 기여하고 있음

## 날씨

날짜	내일(16일 금)												모레(17일 토)											
	시간	24	03	06	09	12	15	18	21	24	03	06	09	12	15	18	21	00						
날씨																								
강수확률(%)		20	20	20	20	20	0	20	30	30	0	0	0	0	0	0	0	0						
강수량(mm)																								
최저/최고(℃)		10/18						11/19																
기온(℃)		12	11	11	13	17	17	15	13	13	12	12	14	17	18	16	13	12						
풍향/풍속(m/s)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	7	7	4	4	4							
습도(%)		65	70	75	65	55	55	75	80	85	90	95	80	55	45	60	70	80						

<매일 매일의 날씨>

## 기후



<30년 이상 특정지역의 날씨를 평균>

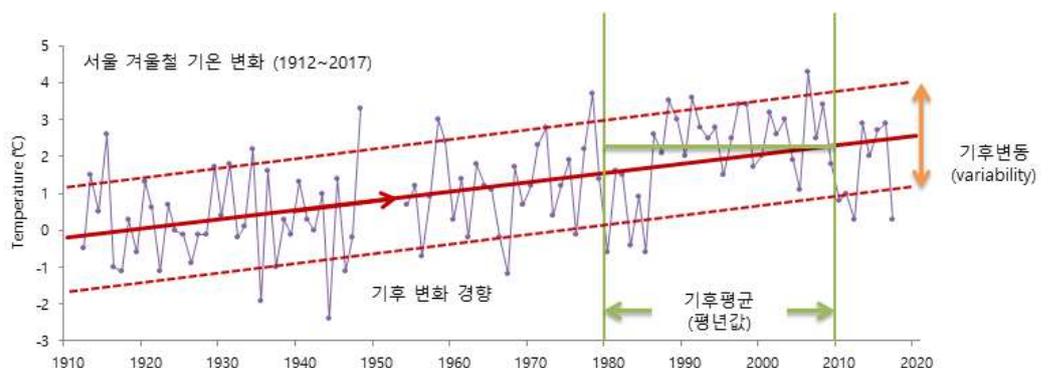
**기후요소** - 기후는 다양한 요소로 구성되는데, 기온, 강수량, 적설, 풍향·풍속 등이 있다.  
 ※ 예시: “여름은 무덥고 비가 많다”에서 기후요소는 강수량, 기온임.

**기후인자** - 기후요소의 시간적·공간적 차이를 가져오는 원인을 말하며, 위도, 수륙분포, 지형, 해류, 기압 등이 있다.

**기후변동** - 긴 시간 동안의 평균값에서 약간의 변화를 보이지만, 평균값을 크게 벗어나지 않는 자연적인 기후의 움직임이다.  
 - 기후는 느리게 변하는 경향이 있는데 보통 몇 달에서 수십 년에 걸쳐 기후변동 현상이 나타난다.  
 ※ 예: 적도 부근의 해수면온도는 몇 년 주기로 온난화와 냉각화가 번갈아 나타남.

## 기후변화

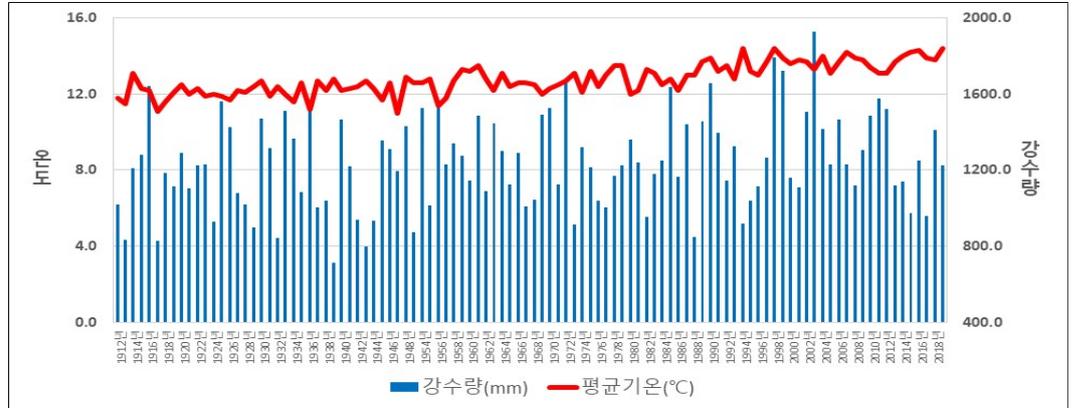
- 자연적 기후변동의 범위를 벗어나 더 이상 평균적인 상태로 돌아오지 않는 평균 기후계의 변화를 말한다.
- 기후변화는 기후의 상태변화가 기후 특성의 평균이나 변동성의 변화를 통해 확인되고 그 변화가 수십 년 이상 지속되는 것을 말하며 자연적 원인(태양에너지 변화, 지구공전궤도 변화, 화산활동, 내부변동성 등)이나 인간 활동으로 인한 대기조성(온실가스 에어로졸) 또는 토지이용의 변화 등 외부강제력 변화 때문에 발생한다.



<기후변동과 기후변화>

기후변화 추세

- 최근 10년(2006~2015년) 동안 관측된 전지구 평균기온은 1850~1900년보다 0.87°C 증가했으며, 10년에 0.2°C씩 증가했다.
- 우리나라는 1912~2019년까지 평균기온은 10년당 0.2°C 비율로 상승하며 강수량은 약 10년당 16.7mm 비율로 증가했다.

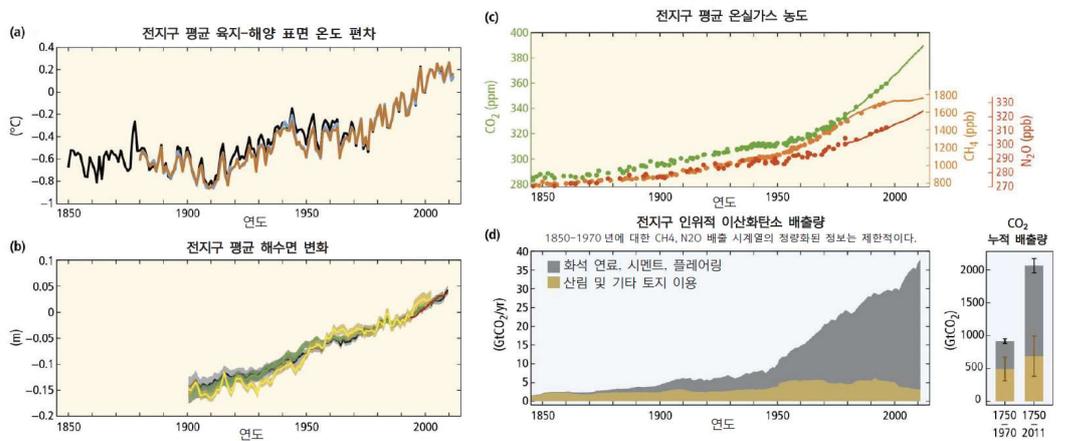


<1912~2019년 우리나라의 평균기온과 강수량 변화>

\* 6개 기상관측지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 부산, 목포) 평균

지구온난화

- 석탄, 석유 등 화석연료의 연소, 삼림 훼손, 농업 활동 증가 등으로 대기 중 온실가스 (이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 불소화합물 등) 농도가 높아지면서 온실효과가 증가하여 발생하는 기후변화 현상이다.



<관측된 변화: a)지구평균기온, b)해수면, c)온실가스 농도, d)이산화탄소 배출량(IPCC)>

# 1.2

## 기후변화의 원인

### 긴 기간의 기후를 변화게 하는 원인은 무엇일까?

대규모 화산활동, 긴 주기의 태양활동의 변화 등 자연적인 원인뿐만 아니라 산업혁명 이후 온실가스 배출이 많아지면서 생기는 인위적인 원인 등이 있다.



#### 기후변화원인 연관어

- 태양에너지 변화
- 지구공전궤도 및 자전축의 변화
- 화산활동
- 온실가스 농도 증가
- 토지 이용 변화

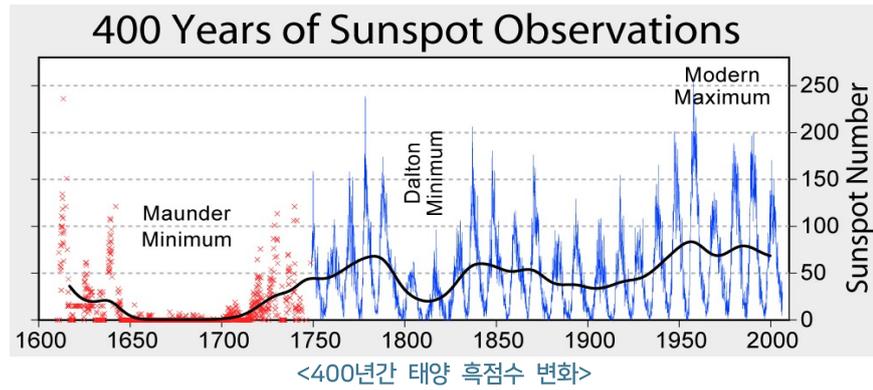
### 기후변화 원인

- 지구 기후가 변하는 원인은 크게 자연적인 원인과 인위적인 원인으로 구분할 수 있다.
- 자연적인 원인으로는 태양 복사에너지 변화, 지구공전궤도 변화(밀란코비치 이론), 화산활동 또는 조산활동 등이 원인이 되며, 내부에서는 기후시스템의 자연 변동성으로 인한 엘니뇨, 북극진동, 몬순(장마) 등과 대기 및 해양 순환의 변화가 원인이 된다.
- 인위적인 원인으로는 이산화탄소 등 온실가스 농도 증가와 에어로졸 농도 변화 등이 있으며 삼림훼손이나 토지이용도 변화 등 환경 변화도 포함된다.

### 자연적인 기후변화 원인

#### 태양에너지 변화

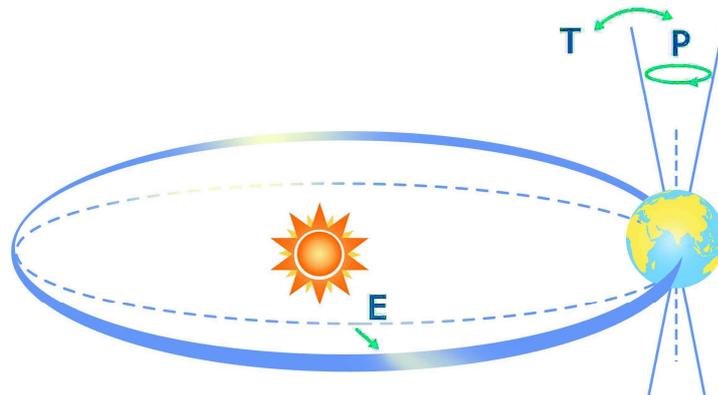
- 태양에너지는 수백만 년 이상 장기적인 생애에 따른 에너지 변화뿐만 아니라 11년 주기의 흑점활동으로 인해 방출되는 에너지가 변한다.
- 지구에 도달하는 에너지가 감소하면 기온이 낮아지는데, 15-18세기에 걸쳐 나타난 소빙기는 태양 흑점활동이 적었던 시기와 관련이 있다.
- 이 시기를 흑점의 극소기라 하고, 기후와 태양 흑점과의 연관성을 입증한 영국의 천문학자 이름을 따 '마운더 극소기(Maunder Minimum)'라고 부른다.
- 태양의 복사에너지는 흑점이 많을 때 크고, 적을 때 작아진다.



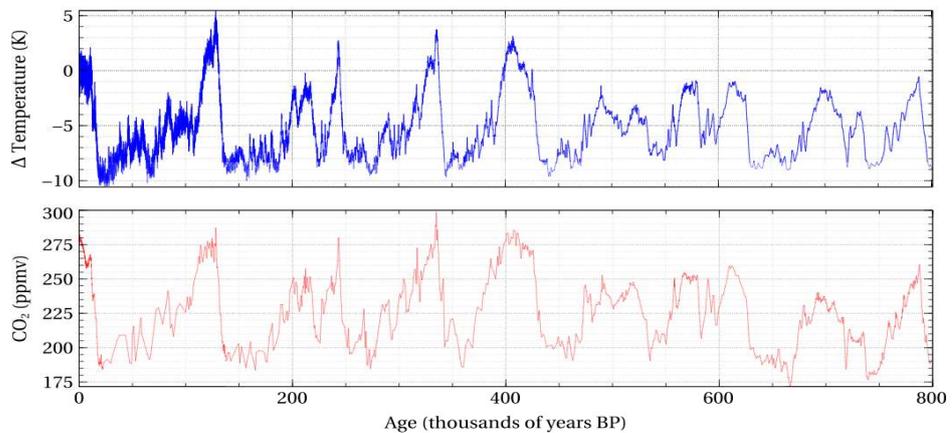
[출처 : Robert A. Rohde, Global Warming Art Project.]

지구공전궤도 및 자전축의 변화

- 지구공전궤도의 변화는 세르비아의 과학자 밀루틴 밀란코비치(1879~1958)가 지구 기후변화를 설명하기 위해 최초로 제안했다. 지구가 자전과 공전을 함께 따라 지구 공전 궤도 이심률(E)과 자전축 경사(T)의 변화, 세차운동(P)에 따라 지구와 태양 사이의 거리가 달라지며, 도달하는 태양에너지 양도 달라지는데 이러한 태양에너지 변화가 지구 기후에 영향을 미친다는 이론이다.
- 지구공전궤도의 변화 중 이심률은 대략 10만년, 41만년, 자전축 경사는 4만년, 세차운동 2만 6천년 주기를 가지고 변화하는데, 이에 따른 태양에너지 변화와 고기후 연구로 구한 지난 백만년 동안 빙하시대의 기후변화가 밀접한 관계를 보이는 것이 밝혀졌다.



<빙하기 순환을 주도하는 지구궤도의 변화>



<남극 빙하코어의 80만년간 평균기온과 이산화탄소 농도 변화>

[출처: By Fabrice.Lambert, <https://commons.wikimedia.org>]

### 화산활동

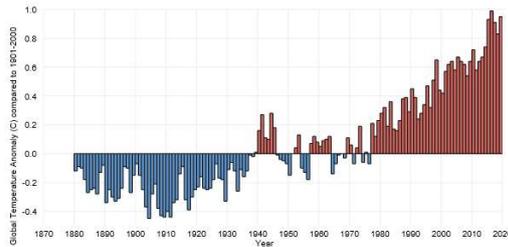
- 화산활동으로 많은 양의 화산재가 방출되면 일부는 성층권에 도달하게 되어 수년간 머무르면서 태양복사를 반사하여 지표에 도달하는 태양에너지가 감소하여 냉각화되는 현상이 나타난다.
- 1991년에 폭발한 필리핀의 피나투보 화산은 2천만 톤의 이산화황이 분출되어 성층권을 통해 전지구를 순환하면서 1~3년 동안 지구 평균 기온을 0.2~0.5°C 냉각시켰다.

## 인위적인 기후변화 원인

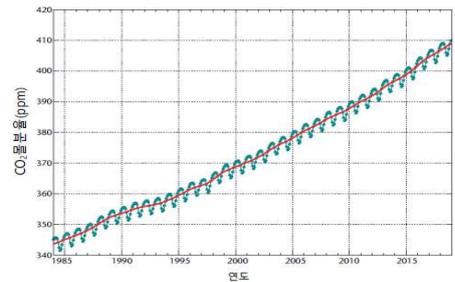
- IPCC에서 발표한 5차 평가보고서에 따르면, 인간은 기후 시스템에 명백한 영향을 미치고 있으며, 최근 배출된 온실가스의 양은 관측 이래 최고 수준이다. 18세기 산업혁명 이후 인류에 의해 막대한 양의 온실가스, 에어로졸 등이 배출되었고, 경작을 위해 산림이 훼손되는 등 토지이용에도 많은 변화가 있었다.

### 온실가스 농도 증가

- 대기 중 이산화탄소 농도가 높아질수록 전지구 평균기온이 높아진다. 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 인위적 온실가스 배출이 온난화의 주원인일 가능성이 높으며, 특히 이산화탄소의 배출량이 전체 온실가스 배출량의 많은 부분을 차지한다. 이산화탄소 배출의 증가는 전세계 경제 성장과 인구 증가에 의한 것이나, 최근에는 대부분 경제 성장에 의한 것으로 보인다.



<1901~2000년 대비 전지구 기온 편차>  
[출처: NOAA]



<전지구 이산화탄소 농도 변화>  
[출처: WMO]

### 토지 이용 변화

- 토지는 생물다양성 뿐만 아니라 식량공급, 담수와 기타 다양한 생태계 서비스 등 인간의 생태와 복지의 근간을 제공한다. 토지는 온실가스 배출원인 동시에 흡수원이며 지표면과 대기 간 에너지, 물, 에어로졸의 교환에 중요한 역할을 한다.
- 지구상 부동지역(ice-free land) 중 1/4 정도가 인간에 의해 황폐화 되었고, 기후변화로 인해 저지대 해안지역, 하천의 삼각주, 영구동토 지역에서 특히 심하다.
- 지난 50년(1959~2018년) 동안 전체 배출량의 82%는 화석연료 CO<sub>2</sub> 배출량에 의한 것이며, 18%는 토지이용 변화에 의해 배출된 것으로 추정된다.

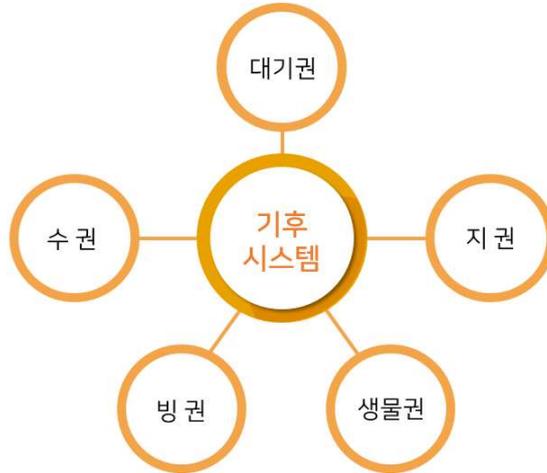
# 1.3

## 기후시스템

### 지구의 기후를 결정하는 기후시스템

인간은 공기, 지표, 해양, 얼음, 식생이 있는 기후시스템 속에 살고 있으며, 각 권역 간에서 복잡한 물리 과정을 거쳐 현재의 기후를 유지하고 있다.

기후시스템의 구성요소가 상호 작용을 거쳐 반응하는데 최종 결과는 기후변동으로서 측정이 가능하다.

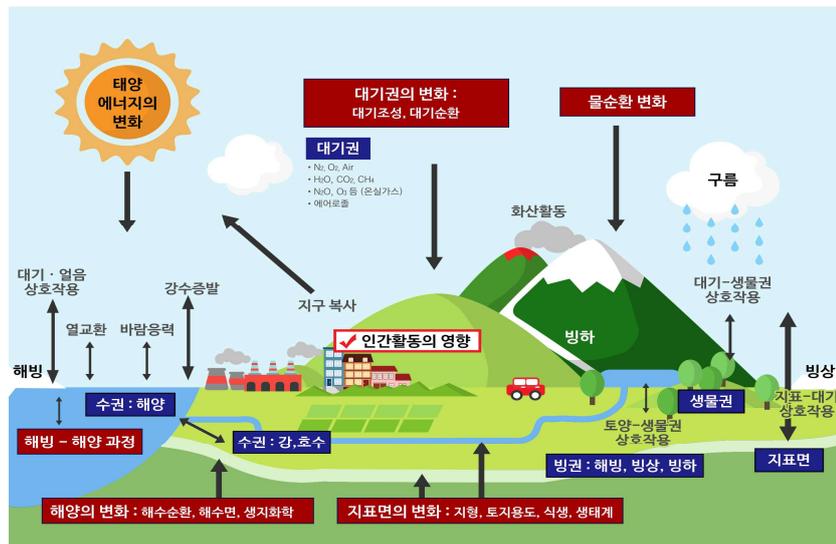


#### 기후시스템 연관어

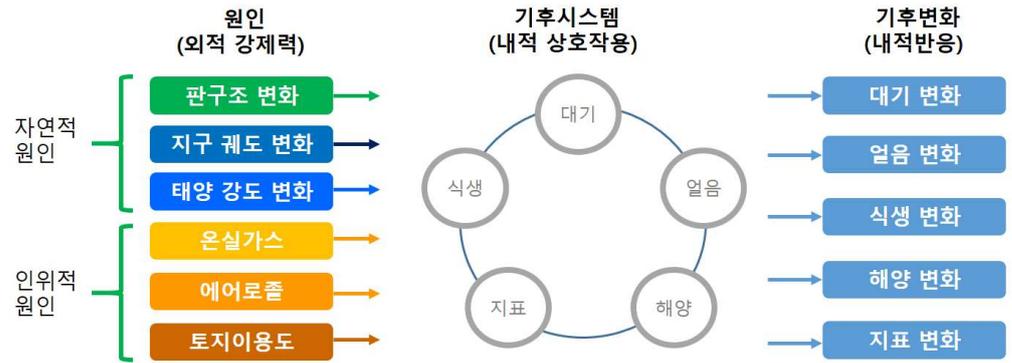
- 대기권
- 수권
- 빙권
- 생물권
- 지권

### 기후시스템

- 기상이나 기후를 결정하는 광역적인 지구시스템으로 대기권, 수권, 빙권, 생물권, 지권의 5개 요소로 구성되어 있다.
- 기후시스템 안에서 각 요소는 끊임없이 활발하게 서로 작용을 한다. 해양은 대기에 열과 수증기를 공급하고 대기는 해양에 운동에너지를 주고 있다. 빙권은 지구의 반사도(알베도)를 변화시켜 지구의 복사수지에 영향을 미친다. 지권은 식생과 토양을 통해 대기로 에너지를 방출하며, 생물권은 탄소순환 등으로 기후시스템에 영향을 미친다. 지구의 기후변화를 이해하려면 이러한 모든 요소를 한 틀에서 고려하여야 한다.



<지구의 기후시스템>



<지구의 기후시스템과 각 구성요소의 상호작용>

- ※ ① (원인) 기후변화를 일으키거나 강제하는 외부의 힘.
- ② (기후시스템) 기후시스템의 내적 구성요소(공기, 물, 얼음, 식생, 지표) 사이에서 상호작용을 함.
- ③ (기후변화) 기후시스템에 나타나는 기후반응으로서 측정 가능한 변화임.

**대기권** - 지구를 둘러싸고 있는 대기권역을 말함. 다양한 기상 및 기후 현상이 발생하여 우리 생활에 영향을 미친다.

**수권** - 대기권의 수증기 및 빙권을 제외하고 지구상의 물이 존재하는 권역으로 해양과 육지의 강, 호수로 구성된다.

**빙권** - 지표나 해양에서 눈과 얼음으로 덮여 있는 권역을 말하며 육빙(고산빙하, 빙상), 해빙으로 구성된다.

**생물권** - 지구상의 생물 전체가 생활하고 있는 권역을 의미한다.

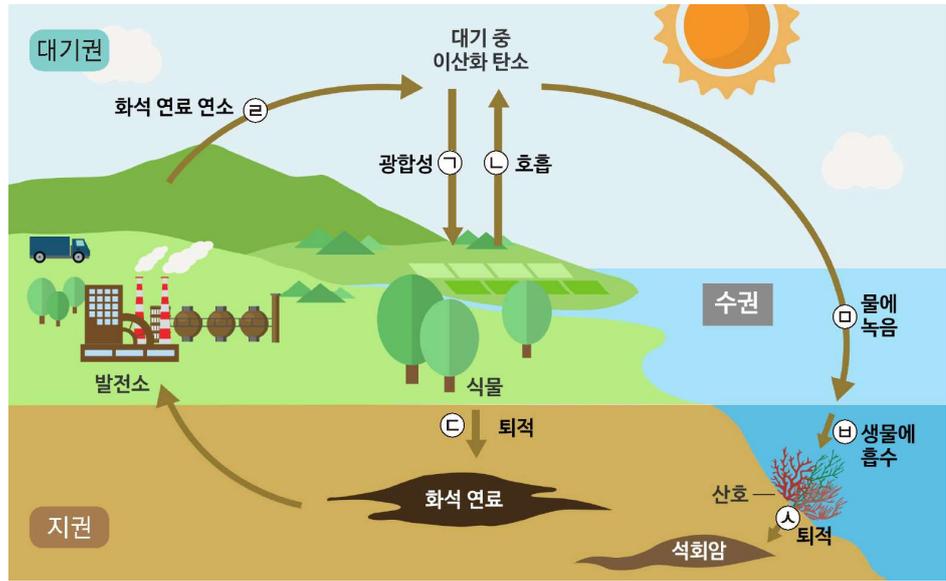
**지권** - 암석과 토양으로 구성되며 기후영역에서 가장 느리게 변화하는 영역으로 지권 중 기후시스템에 가장 강력하게 영향을 주는 것은 화산활동이다.

**기후되먹임 (피드백)** - 기후시스템에 존재하는 각 과정들 사이에서 최초 과정의 결과가 두 번째 과정에 변화를 촉발하고 이 과정이 다시 최초의 과정에 번갈아 영향을 미칠 때, 이러한 상호작용 메커니즘을 말한다.

- ① 양의 되먹임 : 지구온난화 → 반사도 높은 눈·빙하 녹음 → 햇빛 흡수 증가 → 온난화 가속
- ② 음의 되먹임 : 지구온난화 → 수증기 증발량 증가 → 구름의 햇빛 반사 증가 → 햇빛 흡수 감소 → 온난화 감소(그러나 구름이 증가하는 경우 온실효과 증가로 양의 되먹임도 나타나서 구름 증가의 효과는 불확실함)

**탄소 순환**

- 탄소가 형태를 바꾸면서 기후시스템 내의 지권, 대기권, 수권, 생물권 사이를 이동하며 순환하는 것을 탄소 순환이라고 한다.



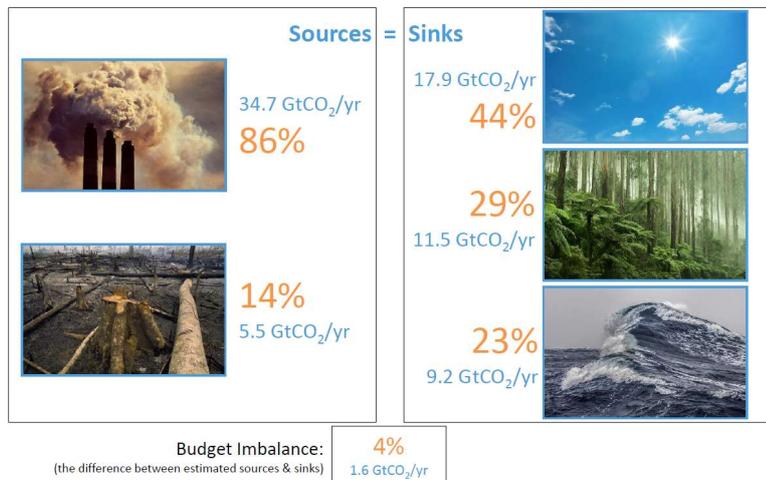
- ㉠ 광합성으로 이산화탄소 흡수 : 대기권 → 생물권
- ㉡ 호흡으로 이산화탄소 방출 : 생물권 → 대기권
- ㉢ 동식물의 유해가 땅속에 묻혀 화석 연료가 됨 : 생물권 → 지권
- ㉣ 화석 연료의 연소로 이산화탄소 방출 : 지권 → 대기권
- ㉤ 이산화탄소가 물에 녹음 : 대기권 → 수권
- ㉥ 물에 녹은 탄소가 산호, 조개껍데기 구성 : 수권 → 생물권
- ㉦ 물에 녹은 탄소나 해양 생물체가 퇴적되어 석회암 생성 : 수권 → 지권, 생물권 → 지권

**탄소 수지**

- 최근 10년간(2009-2018년) 이산화탄소의 배출량은 화석연료의 연소 및 시멘트 생산으로 34.7GtCO<sub>2</sub>, 삼림훼손 등 자연환경변화로 5.5GtCO<sub>2</sub>가 배출되고 식물의 광합성과 해양의 흡수로 96%가 소멸되어, 나머지 4%가 남아 탄소 수지 불균형이 이루어진다.

[출처: <http://www.globalcarbonproject.org>]

※ 1GtCO<sub>2</sub> = 이산화탄소 10억톤, 1GtC = 탄소 10억톤, 1GtC = 3.664GtCO<sub>2</sub>



<2009~2018년 전지구 탄소 수지>

[출처: Global Carbon Budget 2019]

## 02. 대기권의 기후변화

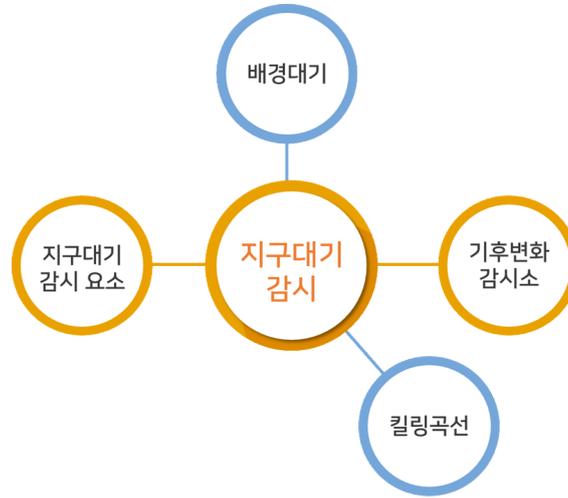
- 2.1 지구대기감시
- 2.2 온실가스
- 2.3 반응가스
- 2.4 에어로졸
- 2.5 강수화학
- 2.6 대기복사
- 2.7 자외선
- 2.8 성층권 오존

# 2.1

## 지구대기감시

### 청정지역에서 기후변화 원인물질을 감시하다

18세기 중반 산업혁명 이후 경제 성장과 인구증가로 인한 에너지 소비가 급증하면서 이산화탄소 등 온실가스와 미세먼지를 포함한 에어로졸의 농도가 증가하고 있다.



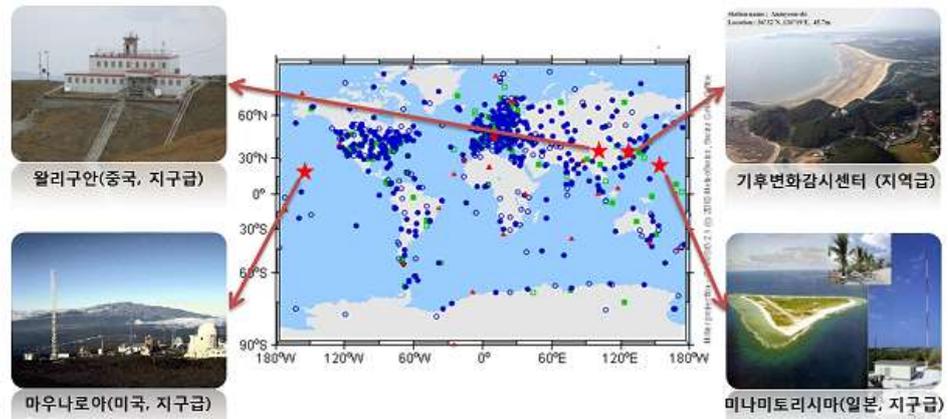
#### 지구대기감시 연관어

- 배경대기
- 기후변화감시소
- 지구대기감시 요소
- 킬링곡선

### 지구대기감시(GAW)

- 세계기상기구(WMO)<sup>2)</sup> 과학기술 프로그램 중 하나인 지구대기감시 프로그램(Global Atmosphere Watch)은 지구온난화, 오존층 파괴, 산성비 등과 같은 환경문제에 대처하기 위해 1989년에 전지구오존관측망(GO3OS)과 배경대기오염감시망(BAPMoN)을 통합하여 시작되어 전세계 지구급 관측소 31개소, 지역급 관측소 400여 개소, 협력 관측소 100여 개소가 운영 되고 있다(2020년 현재).

\* 지구대기 자료 : 성층권 오존 등 주요 온실가스와 지역 대기질에 영향을 미치는 가스상·입자상 물질



<지구대기감시 프로그램의 관측소 현황>

2) 세계기상기구 :  
World Meteorological Organization  
1950년 3월 23일 설립되었음.  
현재 191개 회원국이 참여하고  
있으며 기상·기후·수문 분야를  
총괄하는 국제기구임.  
(www.wmo.int)

- ※ WMO는 지구환경 실태를 정확히 파악하고 과학자료를 산출하기 위해 지구대기감시 관측소를 지정
  - ① 지구급관측소: 전 지구 규모의 환경문제(기후변화 등) 및 중요성을 다룰 수 있는 관측자료를 생산·제공할 수 있는 곳
  - ② 지역급관측소: 지구환경문제의 지역적인 면과 지역 규모의 환경문제 및 중요성을 다룰 수 있는 관측 자료를 생산·제공할 수 있는 곳
- ※ 지구대기감시 관측분석자료는 기상청에서 운영하는 기후정보포털 홈페이지(www.climate.go.kr)에서 확인 할 수 있음.

**배경대기와  
온실가스 농도**

- 해당 위도대에서 대표할 수 있는 지역 활동의 영향을 직접적으로 받지 않은 공기(배경대기)에서 산출한 온실가스 농도로 기후변화감시, 기후변화예측, 국제기후변화협약에서 기초자료로 활용된다.

온실가스 농도변화

=

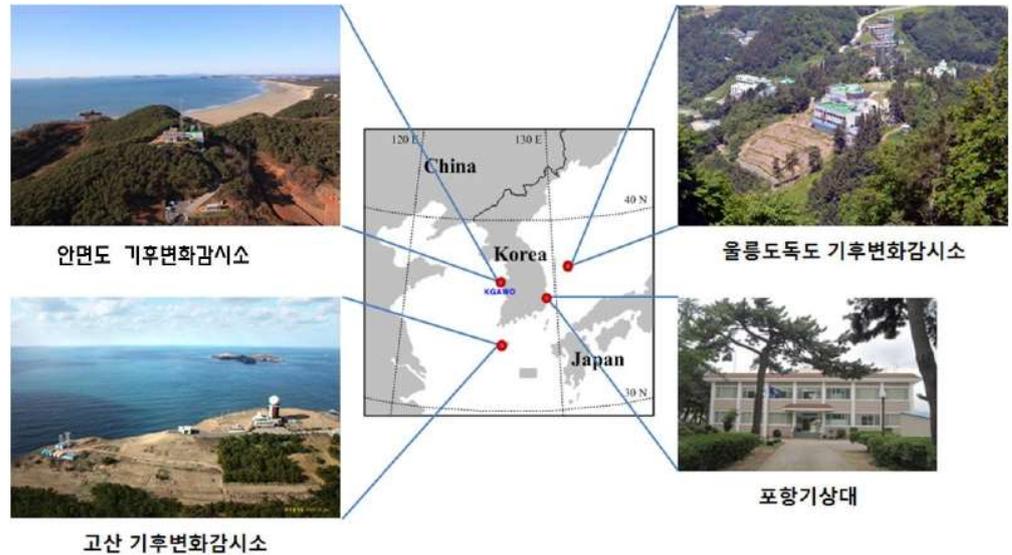
배경대기  
일·계절(월)·연 변화

+

국지적 발생·소멸에 의한  
단주기 변화

**기후변화감시소**

- 기후변화로 지구온난화가 사회경제적인 이슈가 되면서 기상청은 한반도에서 기후변화 원인물질의 유출입을 감시하기 위한 지구대기감시 관측망을 운영한다.
- 기후변화 원인물질의 유입 지역에 해당하는 중부 서해안에 1996년 9월 안면도 기후변화감시소를 설치하고 남쪽으로는 제주도에 고산 기후변화감시소가 2008년 11월에 신설되었다. 2011년 10월에 기후변화 원인물질의 유출 지역에 해당하는 우리나라 가장 동쪽에 위치한 독도에 온실가스를 관측하기 시작하였으며, 2013년 12월에 울릉도에 울릉도독도 기후변화감시소가 신설되었다. 1994년부터 포항기상대에서는 성층권 오존과 자외선 관측을 시작하였다.



<한반도 기후변화감시망 구성>

**지구대기감시 요소**

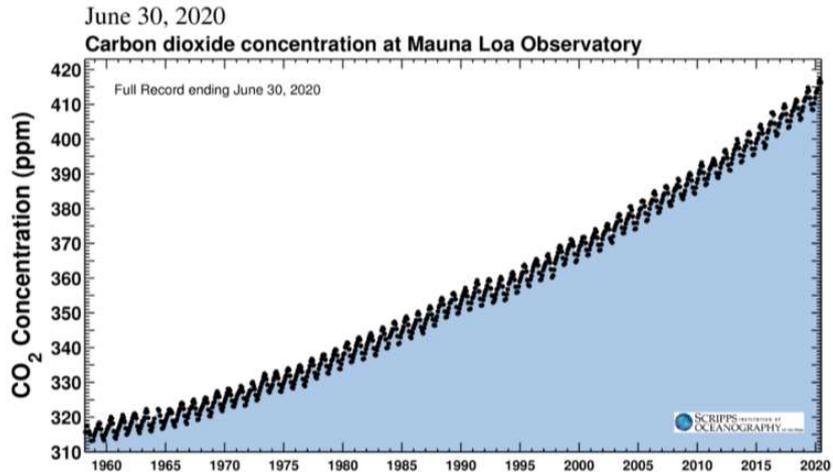
- 지구대기감시(GAW)에서 권고하는 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 대기복사, 성층권오존/자외선, 총대기침적 분야 총 36종의 요소를 관측하고 있다.



<한반도 지구대기감시 요소>

**킬링곡선**

- 1958년부터 지구대기의 이산화탄소 농도를 나타낸 그래프로 최초로 이산화탄소 농도를 측정한 찰스 데이비드 킬링(1928-2005)의 이름을 따서 지어졌다.  
 - 기후변화의 원인이 되는 순수한 지구 배경대기 값을 얻기 위해 하와이 마우나로아에서 이산화탄소 농도를 측정해 왔으며 이산화탄소의 농도 변동이 계절적인 변동을 넘어 매년 증가하는 것을 발견하였다.



<마우나로아 이산화탄소 농도 그래프>

[출처 : <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>]

# 2.2

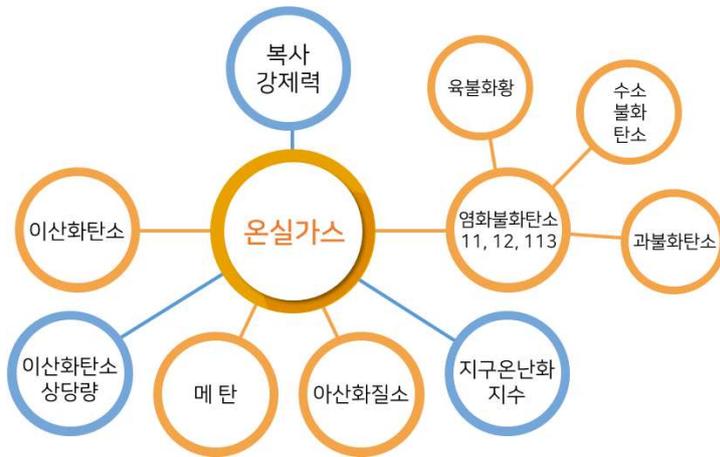
## 온실가스

### ‘따뜻한’ 지구의 원인인 ‘온실가스’

만약 온실가스가 없다면 지구평균기온은 -19℃가 될 것이다. 그러나 대기 중에 이산화탄소, 메탄, 수증기 등 온실가스에 의해 지구평균기온을 약 14℃로 인류가 살기 좋은 기온을 유지하고 있다. 또한 지난 130여년간 지구평균기온이 상승하는 지구온난화가 나타나고 있다.

UN 산하 ‘기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)’ 제5차 보고서는 1950년 이후 나타난 지구온난화가 화석연료의 사용 등 인간 활동 때문일 가능성이 매우 높다(95% 이상의 확률)고 결론을 내렸다. 에너지를 얻기 위해 사용된 화석연료(석유, 석탄, 가스 등)의 연소는 지구온난화의 주범인 이산화탄소 농도를 꾸준히 증가시키고 있는 것이다.

계속되는 온실가스의 증가로 지구의 평균기온 상승이 불가피한 가운데 어느 때보다 기후변화를 효과적으로 대응하기 위하여 우리 모두 꾸준한 노력을 기울일 필요가 있다.



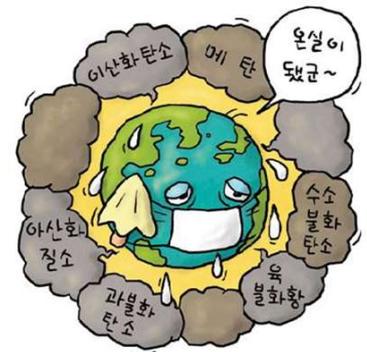
#### 온실가스 관련어

- 이산화탄소
- 메탄
- 아산화질소
- 육불화황
- 수소불화탄소
- 과불화탄소
- 염화불화탄소-11, 12, 113
- 지구온난화지수
- 복사강제력
- 이산화탄소상당량

### 온실가스

- 대기 중에 가스 상태로 장기간 체류하면서 대부분의 태양복사를 투과시키고 지표면에서 방출하는 지구복사를 흡수하거나 재방출하여 온실효과를 유발하는 물질이다. 온실효과를 유발하여 지표온도를 상승시킬 수 있는 온실가스 중에는 이산화탄소 이외에 메탄, 아산화질소, 염화불화탄소 등의 미량기체를 꼽을 수 있다.

이산화탄소(CO <sub>2</sub> )	산림벌채, 에너지 사용, 화석연료의 연소 등
메탄(CH <sub>4</sub> )	가축 사육, 습지, 논, 음식물 쓰레기, 쓰레기 더미 등
아산화질소(N <sub>2</sub> O)	석탄, 폐기물 소각, 화학 비료의 사용 등
수소불화탄소(HFCs)	에어컨 냉매, 스프레이 제품 분사제 등
과불화탄소(PFCs)	반도체 세정제 등
육불화황(SF <sub>6</sub> )	전기제품과 변압기 등의 절연체 등



<교토의정서 규제대상 6대 온실가스(1997)>

<온실가스의 특성>

온실가스 종류	화학식	체류시간(년)	지구온난화지수(GWP) <sup>1)</sup>
이산화탄소	CO <sub>2</sub>	5~200	1
메탄	CH <sub>4</sub>	12.4	28
아산화질소	N <sub>2</sub> O	121	265
육불화황	SF <sub>6</sub>	3,200	23,500
염화불화탄소	CFC-11	45	4,660
	CFC-12	100	10,200
	CFC-113	85	5,820
삼불화질소	NF <sub>3</sub>	500	16,100

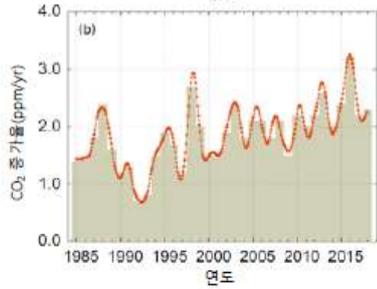
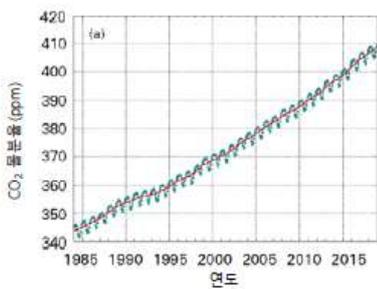
\* (출처 : IPCC, 2013) <sup>1)</sup>100년 동안 1kg 온실가스의 적외선 흡수능력으로 CO<sub>2</sub> 1kg의 상대비율로 산출.



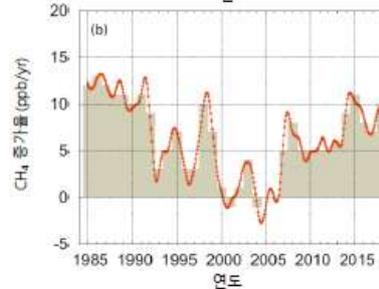
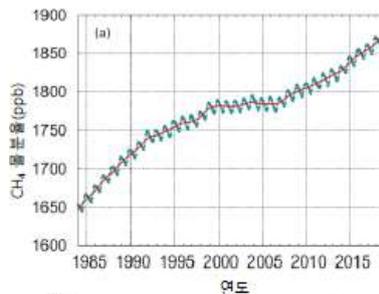
화석연료의 사용

산업화 도시화에 따른 영향

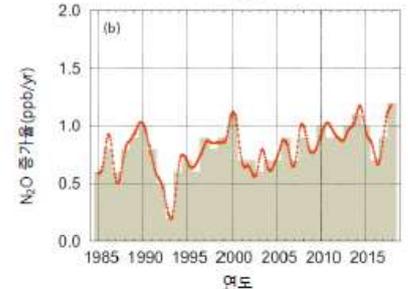
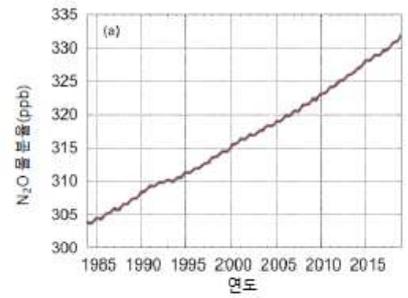
다양한 온실가스 발생



1984-2018년의 전지구 평균 CO<sub>2</sub> 농도(위) 및 증가율(아래)



1984-2018년의 전지구 평균 CH<sub>4</sub> 농도(위) 및 증가율(아래)



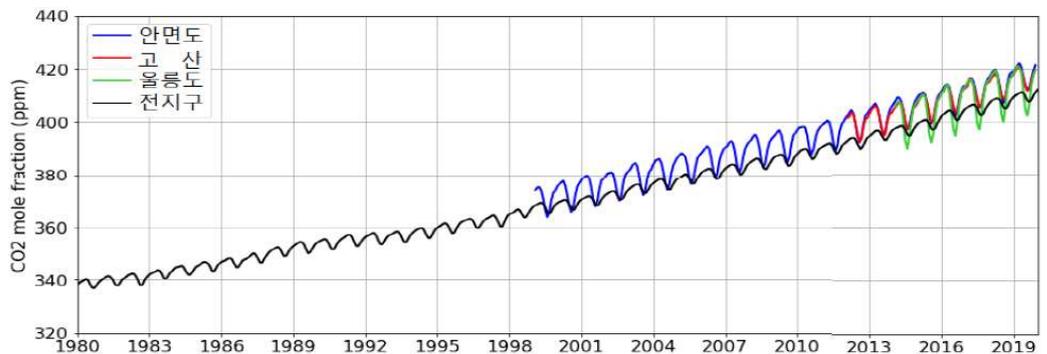
1984-2018년의 전지구 평균 N<sub>2</sub>O 농도(위) 및 증가율(아래)

## 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)

- 인간의 화석연료 소비 증가로 배출되는 대표적 온실가스로 전지구 평균농도는 꾸준히 증가 추세이다. 관측단위는 ppm(100만분의 일)이며 대기 중에 머무르는 시간이 100~300년으로 전체 온실효과의 65%를 차지한다. 화석에너지 사용과 시멘트 생산 등 인간 활동과 동식물의 호흡과정, 유기물의 부패, 화산활동 등 자연활동으로 대기 중에 배출되고 식물의 광합성 작용과 해양 흡수로 배출된 양의 약 60%가 제거되고 나머지 40%는 대기 중에 남아 농도가 증가한다.
- 최근 이산화탄소 농도는 산업혁명 이전의 280ppm보다 현저하게 증가하고 있다. 전지구 이산화탄소 평균 농도\*는 2019년 409.8ppm을 기록하였고, 안면도 기후변화감시소(기상청 소속)에서 관측된 평균 농도는 2019년 417.9ppm을 기록하였다.
  - \* 미국해양대기청(NOAA)에서 발표한 값으로 WMO 발표 농도와 차이가 있을 수 있음
- 과거 대기 중 이산화탄소 농도의 장기변동은 남극, 그린란드, 고산 빙하 속에 포집된 공기 중 농도를 분석하여 밝혀졌다.



<온실가스 관측역사>



<전지구와 우리나라의 이산화탄소 농도 비교>

#### 메탄(CH<sub>4</sub>)

- 이산화탄소 다음으로 중요한 온실가스 중 하나로 ppb(10억분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다.
- 전지구 온실가스 복사강제력 대비 17% 기여하고 있으며 주요 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 다양한 인위적·자연적 요소가 존재하는 반면, 소멸원은 주로 대기 중 수산화이온(OH) 라디칼로 알려져 있다.
- 다른 온실가스에 비해 체류시간이 12년으로 짧아 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다.

#### 아산화질소(N<sub>2</sub>O)

- 대기 중 체류시간이 114년 되는 온실가스로 복사강제력의 6%를 차지한다.
- 발생원은 해양, 토양 등이 있으며 화석연료, 생태소각, 농업비료의 사용, 여러 산업공정에서 배출되는 인위적 기원 등이 있다. 아산화질소는 성층권으로 올라가 광분해 되어 성층권 오존을 파괴하면서 소멸된다.

#### 육불화황(SF<sub>6</sub>)

- 육불화황은 인공적인 온실효과를 유발하며 화학적, 열적으로 안정된 기체이다. 전기를 통하지 않는 특성이 있으며 반도체 생산 공정에서 다량 사용된다.
- 이산화탄소와 같은 양일 때 온실효과는 약 22,800배로 가장 크며 한번 배출되면 3200년 까지 영향을 미친다(이산화탄소 200년).
- 대부분 성층권이나 그 상층에서 주로 짧은 파장의 자외선에 의해 파괴된다.
- 안면도 기후변화감시소에 육불화황 세계표준센터를 유치하여 WMO 회원국의 대상으로 적합성 평가를 수행하고 있다.

#### 수소불화탄소(HFCs)

- 오존층을 파괴하는 프레온 가스로 염화불화탄소의 대체물질로 개발되었다.
- 냉장고나 에어컨의 냉매 등 주로 인공적으로 만들어 산업공정의 부산물로 쓰인다.

#### 과불화탄소(PFCs)

- 염화불화탄소의 대체물질로 개발. 탄소(C)와 불소(F)의 화합물로 만든 전자제품, 도금산업, 반도체의 세척용, 소화기 등에 사용된다.

#### 염화불화탄소-11, 12, 113 (CFC-11, 12, 113)

- '프레온 가스'로 널리 알려져 있음. 오존층을 파괴시키는 물질 중 하나로 몬트리올 의정서에서 규제대상 물질(1989)로 지정되었으며, 냉장고 냉매, 발포제, 충전제로 주로 사용된다.
- 지속적인 배출로 농도가 꾸준히 증가하였으나, 몬트리올 의정서 발표 이후 현재 감소 추세에 있다.
- ※ 교토의정서에서 규제되었으나, 몬트리올 의정서에서 규제되지 않은 물질은 그 농도가 증가 추세에 있음 (예: HFCs와 SF<sub>6</sub>)

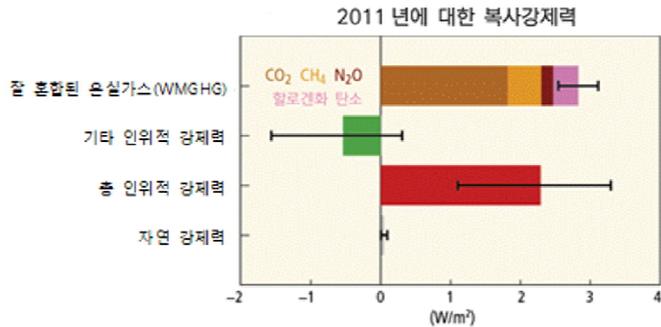
**지구온난화지수**

- 이산화탄소 1kg과 비교하여 온실가스가 대기 중에 방출된 후 특정기간 그 가스 1kg의 상대적 온난화 효과

	이산화탄소	메탄	아산화질소	수소·과불화탄소, 육불화황
지구온난화지수	1	25	298	675~22,800

**복사강제력 (Radiative Forcing, RF)**

- 기후변화를 일으키는 물질들의 영향력을 나타내는 척도로 단위면적 당 에너지 변화율로 표현(W/m<sup>2</sup>). 양의 복사강제력은 지구-대기 시스템의 에너지를 증가시키고, 음의 복사강제력은 감소시킨다.



<기후변화의 복사강제력(IPCC 제5차 보고서)>

※ 1750~2011년 인위적인 복사강제력의 총량과 이산화탄소의 복사강제력: 2.3W/m<sup>2</sup>, 1.68W/m<sup>2</sup>  
복사강제력 증가에 가장 크게 기여한 요인은 이산화탄소임

**온실효과**

- 대기 중의 수증기와 이산화탄소 등이 온실의 유리처럼 작용하여 지구 표면의 온도를 높게 유지하는 효과를 말한다. 대기는 태양에서 복사되는 단파장을 거의 통과시켜 지표면까지 도달하게 하지만, 지표면에서 방출되는 복사는 파장이 길기 때문에 대기 중의 수증기·이산화탄소·오존 등에 대부분 흡수되거나, 다시 열로 지표면으로 방출된다. 이 결과 지표면과 하층대기는 온도의 상승이 있게 된다.

**이산화탄소 상당량**

- 온실가스 농도를 지구온난화 효과를 기준으로 이산화탄소 농도로 환산한 값. 환산 농도에는 모든 온실가스(대류권 오존 포함) 및 에어로졸과 알베도 변화에 의한 복사강제력이 포함된다. 1750년~2011년 간 총 인위적 복사강제력 2.3W/m<sup>2</sup>은 이산화탄소상당량으로 환산 (CO<sub>2</sub>-상당농도=278 e<sup>RF/5.35</sup>)하면 430ppm에 해당된다(IPCC 제5차 보고서).

# 2.3

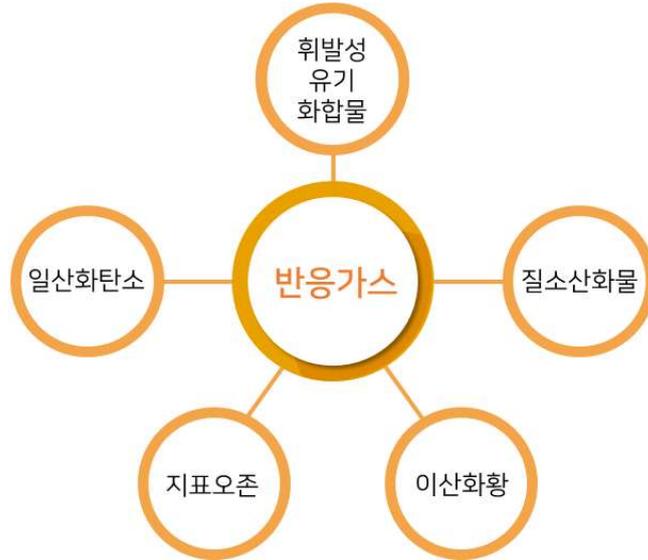
## 반응가스

### 기후변화에 영향을 주는 반응가스

일산화탄소(CO), 지표오존(O<sub>3</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 휘발성유기화합물(VOCs)은 인체와 식물 성장에 유해한 영향을 미치기 때문에 대기오염물질로만 생각해왔다. 그러나 일산화탄소와 질소산화물의 영향으로 생성되는 지표오존은 다른 온실가스와 같이 강력한 온실효과를 나타낸다.

또한 이산화황이나 질소산화물은 황산 및 질산 에어로졸을 생성하는 전구체\*이다. 이렇듯 반응가스는 대기질 뿐 아니라 온실효과에 직간접적인 영향을 미친다.

※ 전구체: 어떤 물질대사나 반응에서 특정물질이 되기 전 단계의 물질



반응가스	연관어
- 일산화탄소	
- 지표오존	
- 이산화황	
- 질소산화물	
- 휘발성유기화합물	
- 탄화수소화합물	
- 광화학반응	
- 이차오염물질	

### 반응가스

- 다른 가스 상 물질들과의 결합력이 좋아 대기 중에 체류시간이 짧기 때문에 반응가스라 부른다. 이 가스는 1차 오염물질과 2차 오염물질로 나뉘는데 배출원에서 바로 배출된 물질이 1차 오염물질이고 배출된 이후 대기 중에서 다른 화학반응으로 새롭게 생성된 물질을 2차 오염물질이라고 한다.

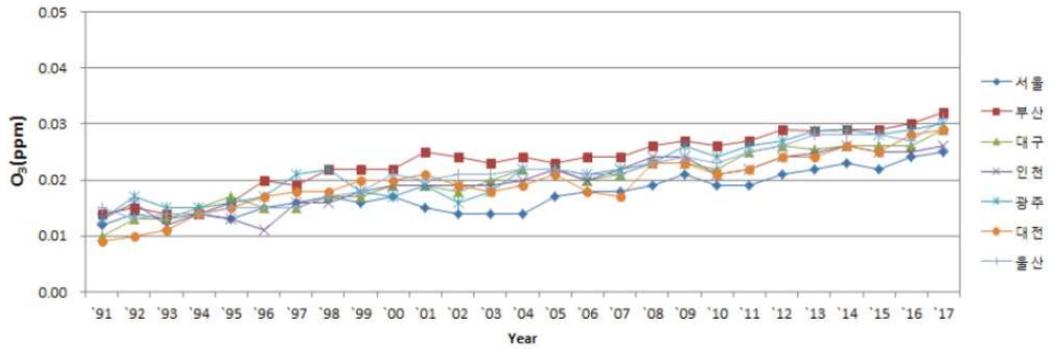
#### 일산화탄소

- 복사강제력은 0.23W/m<sup>2</sup>으로 수산화이온(OH라디칼)<sup>3)</sup>과의 반응으로 이산화탄소 등 온실가스 농도를 변화시켜 지구온난화에 영향을 미친다(IPCC, 2013).  
 - 주로 화석연료나 탄화수소화합물의 불완전연소, 메탄 등 탄화수소 계열 물질의 산화과정, 화산폭발, 산불, 해수 중의 미생물 작용 등에 의해 생성된다.

#### 지표오존

- 강력한 온실효과를 일으키는 기체 중의 하나이며, 대류권 오존의 복사강제력은 0.4W/m<sup>2</sup>로 지구온난화에 직접적으로 영향을 미친다(IPCC, 2013).  
 - 화학반응에 의해서 생성되어 광화학스모그의 원인물질 뿐 아니라 장파복사에너지를 흡수하는 온실가스로 작용하며, 시각장애와 폐수종, 폐충혈 등을 일으킨다.  
 - 경제 성장과 산업 구조의 고도화에 따른 인구 증가와 오염물질 배출량 증가로 인해 대기 중 지표오존농도가 지속적으로 증가 추세이다.

3) 수산화이온(OH) : 산소 하나에 수소 하나가 결합된 형태의 수소 산화물로 물에 녹아 염기성 용액이 되며 수산화이온의 농도는 용액의 염기성의 척도임



<주요도시의 연평균 지표 O<sub>3</sub> 농도 추이>

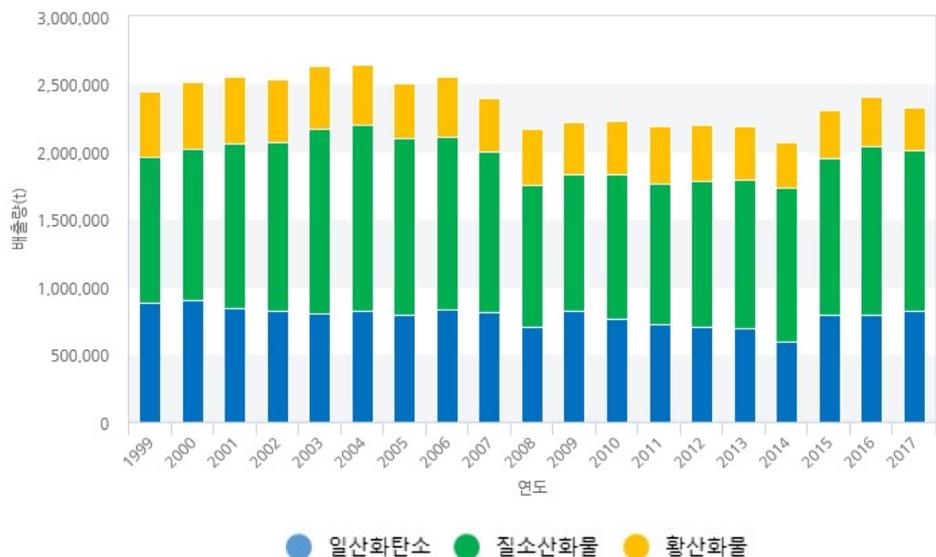
[출처 : 국립환경과학원, 2018]

※ 오존주의보

- 지표 오존은 일상생활에서 배출되는 자동차의 배기가스, 스프레이, 공장 매연, 질소산화물 등이 태양빛을 받아 광화학 반응을 일으키면 오존 농도가 높아지게 됨.
- 특히, 인위적인 배출로 인한 질소산화물(NOx)와 휘발성 유기물질(VOC)의 농도가 높고, 기온이 높고, 일사량이 클수록 많이 생성됨.
- 오존이 적당량 존재할 경우 강력한 산화력으로 살균, 탈취작용을 함. 그러나 오존 농도가 일정 기준이상 높아지면 호흡기나 눈이 자극을 받아 기침이 나고 눈이 따끔거릴 수 있으며 심할 경우 폐기능 저하 등 인체에 피해를 줄 수 있음.
- 대기 중 오존 농도가 1시간 평균 0.12ppm 이상일 때 오존주의보가 발표됨.

이산화황

- 황산에어로졸의 전구체로 복사강제력이  $-0.41W/m^2$ 로 나타나며 태양빛을 산란시켜 지구 냉각화에 기여한다(IPCC, 2013).
- 석탄, 기름 연소, 난방 등에서 주로 배출되며 무색의 자극성이 강한 기체로 액화되기 쉬우며, 기관지염, 천식, 폐기종, 폐쇄성 질환을 일으킨다.



<국내 연도별 반응가스 배출량>

질소산화물

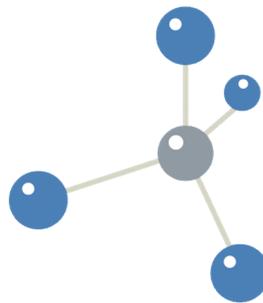
- 지구온난화를 일으키는 오존의 주요 전구물질임과 동시에 지구 냉각화를 일으키는 질산에어로졸의 전구물질이다(IPCC, 2013).
- 질산에어로졸의 냉각화 영향으로 복사강제력은  $-0.15W/m^2$ 이다.

### 휘발성유기화합물

- 대기 중에서 쉽게 증발하는 액체 또는 기체상 유기화합물로 메탄올, 프로판, 아세틸렌, 휘발류 등이 있으며 대기오염 뿐만 아니라 발암성 물질이다.
- 다른 물질과의 반응성이 매우 높아 대기 중의 질소산화물과 반응하여 광화학 스모그의 주 원인인 오존 발생을 촉진시키는 전구물질 역할을 한다.

### 탄화수소화합물

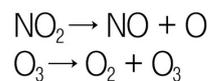
- 유기화합물은 탄소가 수소와 산소, 질소 등과 결합하여 만드는 화합물을 말하는데 그 중 탄소와 수소로 이루어진 유기물을 탄화수소화합물이라 한다.
- 탄소와 탄소가 결합한 모양과 탄소의 개수에 따라 이름이 다르고 각각의 반응도 다르게 나타난다.
- 메탄은 가장 간단한 유기화합물로 화학식은  $CH_4$ 이며 천연가스의 주성분임. 대칭구조이며 무극성을 띠고 물에 용해되기 어렵다.
- 메탄 분자를 구성하는 탄소 원자와 수소 원자의 결합이 비교적 안정하기 때문에 쉽게 반응하지는 않지만 자외선을 받아 광화학 반응을 거치면 탄소와 수소의 결합이 끊어지고 탄소와 염소의 결합이 형성된다.



<메탄의 분자 모형>

### 광화학반응

- 광합성과 같이 새로운 물질을 합성하거나 특징에 변화를 주는 화학반응임. 복사 에너지의 흡수 혹은 방출에 관여하는 화학반응을 말한다.
- 자외선의 흡수는 대기에서 분자들의 화학 결합을 끊어 연쇄반응을 일으킬 수 있도록 만들며 광화학반응의 예로 이산화질소나 오존의 광분해를 들 수 있다.



- 이후 화학반응은 대류권에 존재하는 탄화수소와 그 외의 오염물질들을 제거하는 연쇄반응을 촉발한다.

### 2차 오염물질

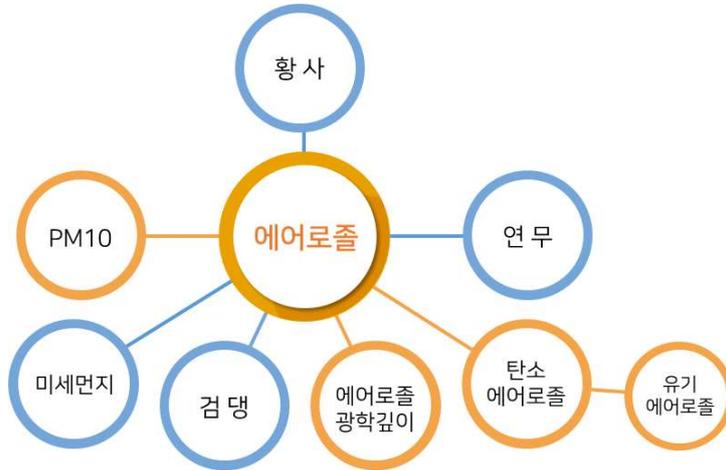
- 오염 발생원에서 직접적으로 배출된 오염물질을 1차 오염물질이라고 한다. 이러한 오염물질이 자외선을 받아 새로운 물질로 변화되어 오염현상을 일으킬 때 새롭게 생성된 물질을 2차 오염물질이라 한다.
  - 오염물의 화학적인 변환이 일어날 때 어떤 오염물질은 방출된 직후 인체에 피해를 주지 않지만 화학작용에 의해 고농도의 해로운 오염물질로 변환되기도 한다.
- ※ 예: 오존은 질소산화물( $NO_x$ )과 휘발성 유기화합물( $VOCs$ )이 광화학반응을 일으켜 생성된 2차 오염물질임

# 2.4

## 에어로졸

### 공기질을 넘어 삶의 질을 결정하는 미세먼지(에어로졸)

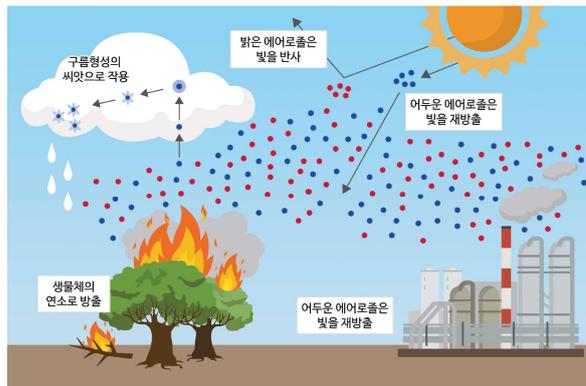
아시아 지역에서 대기 중의 에어로졸에 따른 대기오염으로 북반구의 기후 패턴까지 바뀌고 있으며, 에어로졸에 의한 대기질이 인간건강에 직접적인 영향을 주면서 관심이 더욱 커지고 있다. 또한 반응가스와 결합하여 산성비, 스모그, 시정 감소의 원인이 되며, 대기 중에 부유하여 지표면으로 들어오는 태양복사에너지를 차단하거나 흡수해 기후변화를 유발시키는 강제력을 가진다.



- 에어로졸 연관어**
- 에어로졸 광학깊이
  - 황사
  - 연무
  - 미세먼지
  - PM10
  - 검댕
  - 탄소 에어로졸
  - 유기 에어로졸
  - 에어로졸과 기후변화

### 에어로졸

- 대기 중에 떠 있는 고체 또는 액체 상태의 작은 입자(약 0.001~100 μm)로 연무, 황사, 안개 등의 기상현상과 관련이 있다.
- 바람에 의한 비산, 화산폭발, 해염, 산불 등 자연적인 요인과, 산업 활동, 자동차 등 인간활동의 결과로 생성된다.



**자연적 발생**

- 지각, 해염, 화산, 산불
- 응결가능한 가스(이산화황, 휘발성 유기화합물 등)

**인위적 발생**

- 발전소, 자동차 등의 연소
- 응결가능한 가스(이산화황, 휘발성 유기화합물)

<에어로졸의 생성(왼쪽)과 발생(오른쪽)>

**에어로졸 광학깊이**

- 에어로졸 광학깊이(AOD : Aerosol Optical Depth)는 태양복사가 대기의 상한에서 지표까지 도달하는 동안 대기 중 에어로졸에 의해 감쇄되는 효과를 나타내는 척도이다.

지상에서 정밀필터복사계(PFR\*)와 같은 태양광도계를 사용하거나 인공위성에서 관측할 수 있다.

\* PFR : Precision Filter Radiometers

※ 에어로졸 광학깊이는 GAW-PFR AOD 네트워크로 실시간 전송

① 관측현황

- 장비/관측요소: 파장별일사관측시스템(GAW-PFR)/관측: 파장별일사(368, 415, 500, 862nm)



<안면도>



<고산>



<울릉도독도>

② GAW-PFR AOD 네트워크 현황

- 30개 관측소 참여(동아시아 3개국 참여/한국 안면도, 일본 료리, 중국 왈리구안)

주관 : 세계광학깊이연구 및 교정센터/PMOD WRC\*



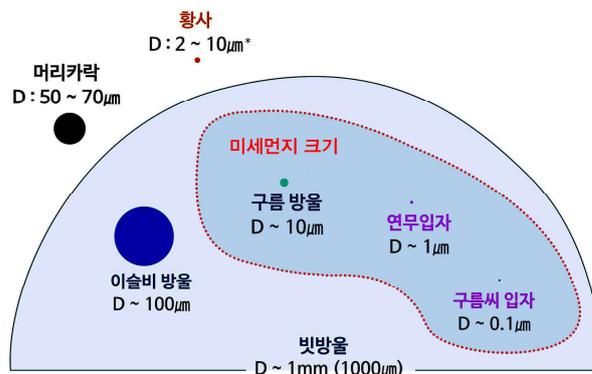
\* PMOD WRC : Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos World Radiation Center

**미세먼지**

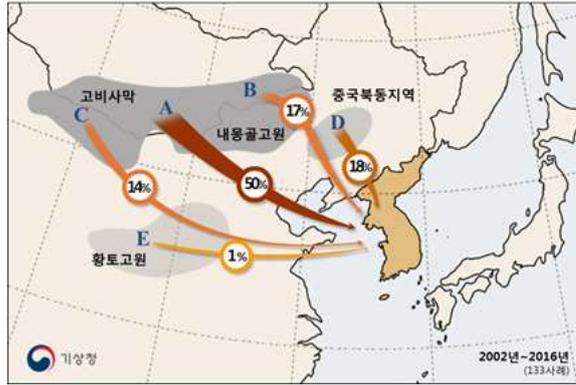
- 입자크기(직경)가 10 $\mu$ m 이하인 먼지

- 황사와 구분하기 위해 인위적 배출에 의한 입자를 가리키기도 한다.

\*우리나라에 주로 영향을 주는 대표적인 크기

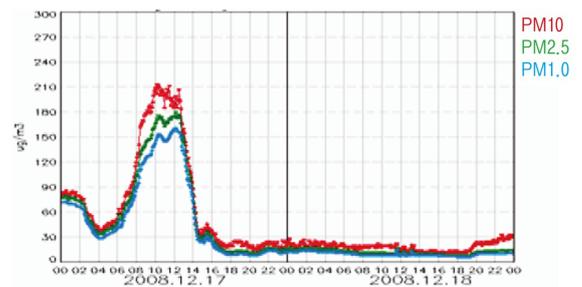
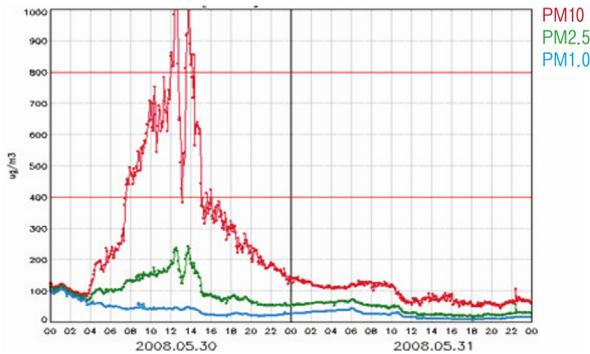


**황사** - 먼지 연무의 일종으로 주로 대륙의 황토지대에서 불려 올라간 다량의 황토먼지가 온 하늘을 덮고 떠다니며 서서히 하강하는 현상으로 입자크기는 2~4 μm 이상이다.



<우리나라에 영향을 준 황사 발원지와 이동경로>

**연무** - 시정 1km 이상으로 습도가 비교적 낮을 때 대기 중에 연기·먼지 등 미세한 입자가 떠 있어서 공기의 색이 우윳빛으로 부영게 보이는 현상.



<큰입자 증가(PM10)>

<작은입자(PM1.0, PM2.5)>

황사 vs 연무(그래프에서 빨간선은 PM10, 초록선은 PM2.5, 파란선은 PM1.0)

※ 연무와 안개의 차이점

연무 : 가시거리 1km 이상으로 미세한 고체입자가 공기 중에 부유하는 것으로 회백색을 띤.

안개 : 가시거리 1km 이하로 미세한 물방울이 공기 중에 떠 있는 현상으로 습도가 높게 나타남.

\* 가시거리 : 수평방향으로 어떤 물체를 확인할 수 있는 최대거리

PM10

- 눈에 보이지 않을 만큼 미세한 입자의 먼지로, 지름 10 μm(마이크로미터, 1 μm=1000분의 1 mm) 이하의 먼지. PM(Particulate Matter)이란 대기 중에 떠다니는 고체 또는 액체 상태의 미세한 입자를 뜻한다.

검댕

- 화석연료의 불완전연소로 인해서 발생하는 지름 0.02~0.4 μm 크기의 작은 탄소 알갱이

탄소 에어로졸

- 탄소성분으로 구성된 에어로졸로 원소탄소와 유기탄소로 구분

유기 에어로졸

- 자연적 요인에 의해 배출되거나 기체상 유기화합물이 대기 중 광화학 반응 등에 의해 입자로 변환되어 2차적으로 생성되기도 한다.

에어로졸과 기후변화

- 에어로졸은 전체적으로 온실가스와는 달리 기후를 냉각시키는 역할을 하며 기후변화에 영향을 미치는 3가지 효과는 다음과 같다.

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

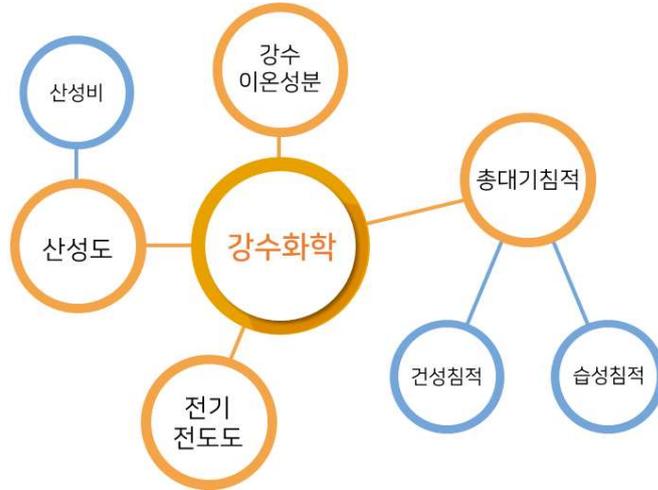
※ 에어로졸의 복사강제력은 전지구 평균  $-0.9(-1.0 \sim -0.1)W/m^2(1750 \sim 2011년)$ 임

# 2.5

## 강수화학

### ‘새콤한 비’가 무섭다?

서울 종로 탑골공원에 가면 유리 보호각에 들어있는 원각사지 십층석탑(圓覺寺址 十層石塔)을 볼 수 있다. 이 탑을 유리 보호각에 넣은 이유는 여러가지지만, 그 중 하나가 산성비로 대리석이 부식되는 것을 막기 위해서라고 한다. 서부 유럽에서는 산성비로 훼손된 문화재를 많이 볼 수 있는데 흔히 대리석으로 만들어진 유적의 피해가 크다고 한다. 일반적으로 pH 5.6 이하의 비를 산성비라고 정의하는데, 이때 pH는 용액 중 수소이온 농도의 음의 대수 값으로 나타낸다. 산성비는 1960~1970년대 유럽과 북동 아메리카 지역에서 주요한 환경문제로 대두되었다. 산성비의 피해는 문화재나 건물의 부식, 토양이나 호수의 산성화, 산림의 파괴 등으로 다양하고 넓게 발생한다.



#### 강수화학 연관어

- 건성침적
- 습성침적
- 총대기침적
- 산성비
- 산성도
- 전기전도도
- 강수이온성분

### 산성비

- 산성비란 말 그대로 산성을 띤 빗물로, 빗물의 pH가 정상(5.6)보다 낮을 때를 말하며, 자연 상태에서 오염되지 않은 빗물의 경우에도 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 빗물에 녹아 있기 때문에 빗물에 포함된 수소이온의 몰 농도는 pH 5.6이다.

$$pH = -\log[H^+] = 5.6$$

- 대기 중 이산화황(SO<sub>2</sub>)과 질소산화물(NOx) 등이 물과 반응하여 황산과 질산 등의 산성 물질이 되고, 빗방울과 섞여 지면으로 떨어진다.



<산성비에 부식된 철근과 석상>

[출처 : (cc) Anna Frodesiak at Wikimedia.org]

[출처 : (cc) Nino Barbieri at Wikimedia.org]

## 강수화학

- 대기 중에 부유하는 가스상, 입자상의 물질이 비, 눈, 안개 등에 의해 지상에 낙하 또는 침착하여 떨어진 강수를 시료로 이용하여 화학성분을 분석하는 것을 말한다. 지구대기감시 강수화학 분야에서는 강수의 산성도, 전기전도도, 이온 성분 등을 측정한다.

### 건성침적

- 대기 중의 가스상·입자상 물질이 확산, 흡착, 충돌, 중력낙하 등에 의해 지면에 도달하는 과정이다.

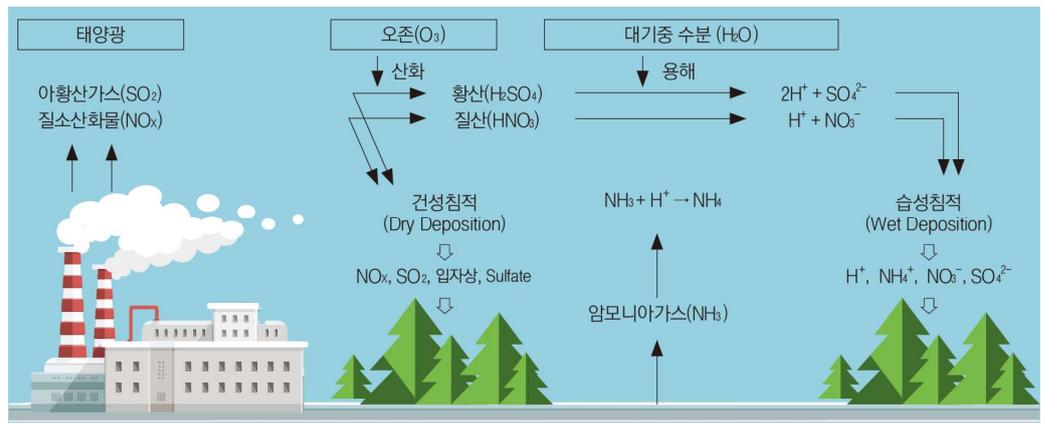
### 습성침적

- 대기 중에 가스상·입자상 물질이 강수(비, 눈, 우박 등)에 의해 제거되는 과정이다.

### 총대기침적

- 세계기상기구(WMO) 지구대기감시(GAW) 프로그램의 한 분야인 총대기침적은 습성 및 건성 침적의 조성을 파악하는 것으로 산성화, 부영양화, 스모그, 기후변화 등의 원인과 영향을 이해하는데 중요하다.

- 건성침적과 습성침적 모두를 말하며, 생태계나 건강에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두 가지 모두 중요하다.



<산성화 생성 과정>

### 산성도

- 강염기를 중화시킬 수 있는 수용액의 세기로, 수용액에 포함된 수소이온의 농도를 지수로 계산한 pH로 표현한다. pH가 작을수록 산성도가 강하고, pH가 클수록 산성도가 약해진다.

\* 산: 물에 녹아 수소이온(H<sup>+</sup>)을 내는 물질 / 염기: 수산화이온(OH<sup>-</sup>)을 내는 물질

### 전기전도도

- 물질이나 용액에서 전하<sup>4)</sup>를 운반할 수 있는 정도로, 물질이 전류를 흐르게 할 수 있는 능력을 의미한다. 수용액에 용해된 염분의 농도를 평가할 수 있는 지표이다.

4) 물체가 띠고 있는 정전기의 양이며, 음과 양으로 구분되며, 전기현상의 근원임.

**강수이온성분** - 강수에 포함된 주요 수용성 이온 9종( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ )

**강수시료 채취**

당일 09시부터 익일 09시까지



강수자동채수기

강수시료(Wet)

산성도(pH),  
전기전도도 측정

필터링

표준용액제조  
(11단계)

이온성분 분석  
(9종)

분석결과검증(QA/QC)

분석결과(DB)

**산성도(pH), 전기전도도 측정**

강수시료의 산성도 및 전기전도도 측정



산성도측정기 전기전도도측정기

**분석결과 검증**

이온 균형 전기전도도 균형

ION BALANCE		CONDUCTIVITY BALANCE	
Ion Difference (%) = $\frac{EC - EC_{calc}}{EC} \times 100$	EC: 400 EC <sub>calc</sub> : 400	Conductivity Difference (%) = $\frac{EC_{calc} - EC_{meas}}{EC_{meas}} \times 100$	EC <sub>calc</sub> : 400 EC <sub>meas</sub> : 400
$EC_{calc} = 2[Ca^{2+} + Mg^{2+}] + [Na^+ + K^+] + [NH_4^+] + [NO_3^-] + [Cl^-] + [SO_4^{2-}]$ (M <sub>eq</sub> basis) EC: 400 EC <sub>calc</sub> : 400 Ion Difference: 0.0%	$EC_{calc} = 2[Ca^{2+} + Mg^{2+}] + [Na^+ + K^+] + [NH_4^+] + [NO_3^-] + [Cl^-] + [SO_4^{2-}]$ (M <sub>eq</sub> basis) EC: 400 EC <sub>calc</sub> : 400 Conductivity Difference: 0.0%	$EC_{calc} = 2[Ca^{2+} + Mg^{2+}] + [Na^+ + K^+] + [NH_4^+] + [NO_3^-] + [Cl^-] + [SO_4^{2-}]$ (M <sub>eq</sub> basis) EC: 400 EC <sub>calc</sub> : 400 Ion Difference: 0.0%	$EC_{calc} = 2[Ca^{2+} + Mg^{2+}] + [Na^+ + K^+] + [NH_4^+] + [NO_3^-] + [Cl^-] + [SO_4^{2-}]$ (M <sub>eq</sub> basis) EC: 400 EC <sub>calc</sub> : 400 Conductivity Difference: 0.0%

**이온성분 분석(9종)**

[ $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ]

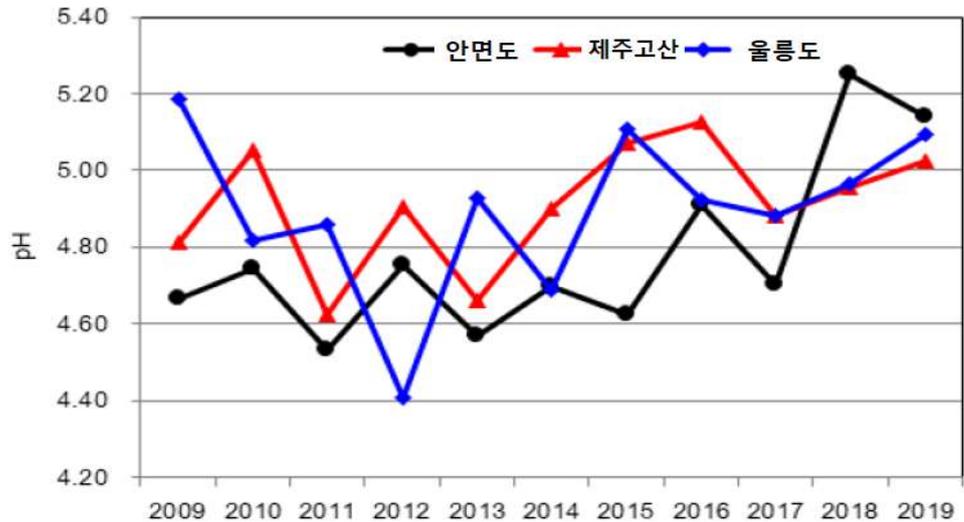


이온크로마토그래피(IC)

※ 측정요소

산성도(pH), 전기전도도(Conductivity), 불소(F<sup>-</sup>), 황산염(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 질산염(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 염화물(Cl<sup>-</sup>), 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 나트륨(Na<sup>+</sup>), 칼륨(K<sup>+</sup>), 마그네슘(Mg<sup>2+</sup>) 및 칼슘(Ca<sup>2+</sup>)

<강수화학 시료채취 및 분석절차>



<최근 10년(2009~2019년) 안면도, 제주고산, 울릉도의 강수에 따른 산성도 변화>

[출처 : 2019 지구대기감시 보고서]

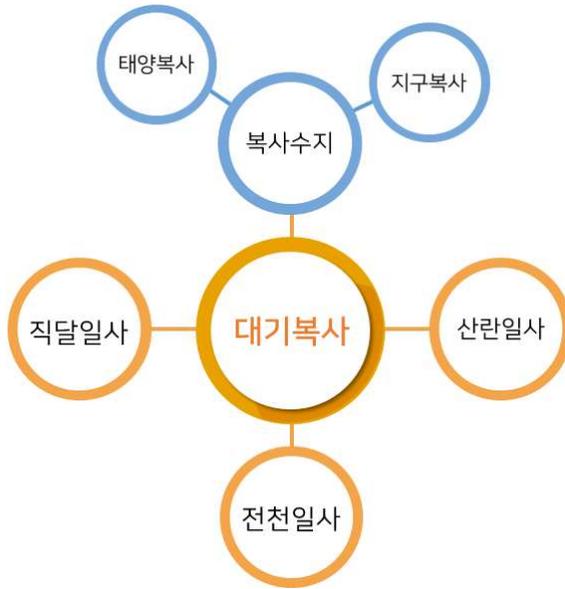
# 2.6

## 대기복사

### ‘균형’이 중요한 태양복사량과 지구복사량

지구에 도달하는 태양복사에너지 중의 약 49%가 적외선, 약 44%가 가시광선 그리고 약 7%가 자외선영역으로 이루어져 있다. 또한 지구의 자전축이 기울어진 채로 태양의 주위를 공전하기 때문에 지구가 받는 복사량에는 계절적인 변화가 있고, 흑점과 같은 태양 자체의 지속적인 활동으로 인해 태양복사량은 일정하지 않다.

정기적으로 지구가 받는 태양복사량과 지구에서 방출되는 지구복사량은 균형을 이루고 있다. 지구의 대기층은 입사되는 태양에너지를 대부분 통과시키지만 지구에서 방출되는 지구복사에너지를 흡수한 후 지표로 재방출하는 역할을 하여 지표와 대기의 온도를 상승시키는 온실효과를 발생시킨다. 만일 이러한 역할을 하는 온실효과의 양이 변하게 되면 복사평형을 유지하기 위해 지구에는 이상기후가 나타나게 된다.



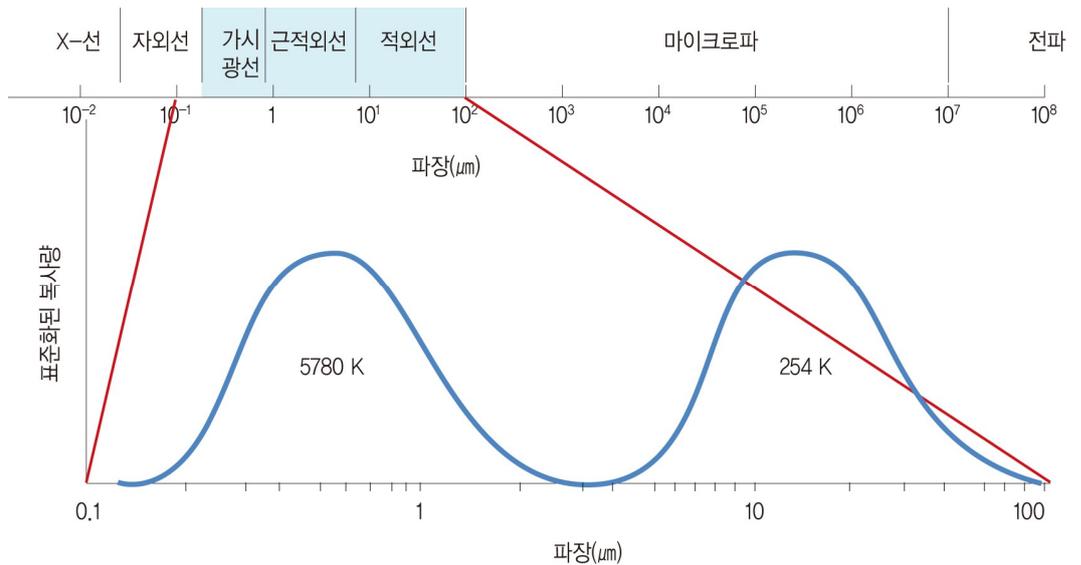
#### 대기복사 연관어

- 직달일사
- 산란일사
- 전천일사
- 순복사
- 태양복사
- 지구복사
- 복사수지

### 대기복사

- 대기복사는 태양복사와 지구복사로 구분할 수 있는데, 지구대기에 유입되는 에너지는 태양에서 방출한 빛에너지이다.
- 태양복사는 가시광선, 적외선, 자외선을 모두 포함하는데 그 중 가시광선을 가장 많이 방출하며, 대기를 통과하면서 일부는 구성성분에 의해 산란, 반사 또는 흡수되고 나머지는 지표에 도달한다.
- 태양에너지는 공기, 지표 등 기후시스템을 가열하는데 사용되므로 지구 대기를 움직이는 1차 원동력이자 지구상의 모든 생명체를 위해 필수적인 에너지원이다.
- 지구복사는 지구가 흡수한 태양에너지와 거의 같은 양의 에너지를 적외선 복사의 형태로 우주 공간으로 내보내는 것을 말하는데, 지구의 지표, 대기, 구름 등 모든 물체에서 절대온도에 따라 복사에너지를 방출한다.

※ 복사에너지 : 모든 물체는 물체의 절대온도의 네제곱에 비례하여 전자기파의 형태로 에너지를 방출하며 다른 물질의 도움을 받지 않고 직접 전달되는 에너지임.



<태양과 지구복사의 흑체 스펙트럼>

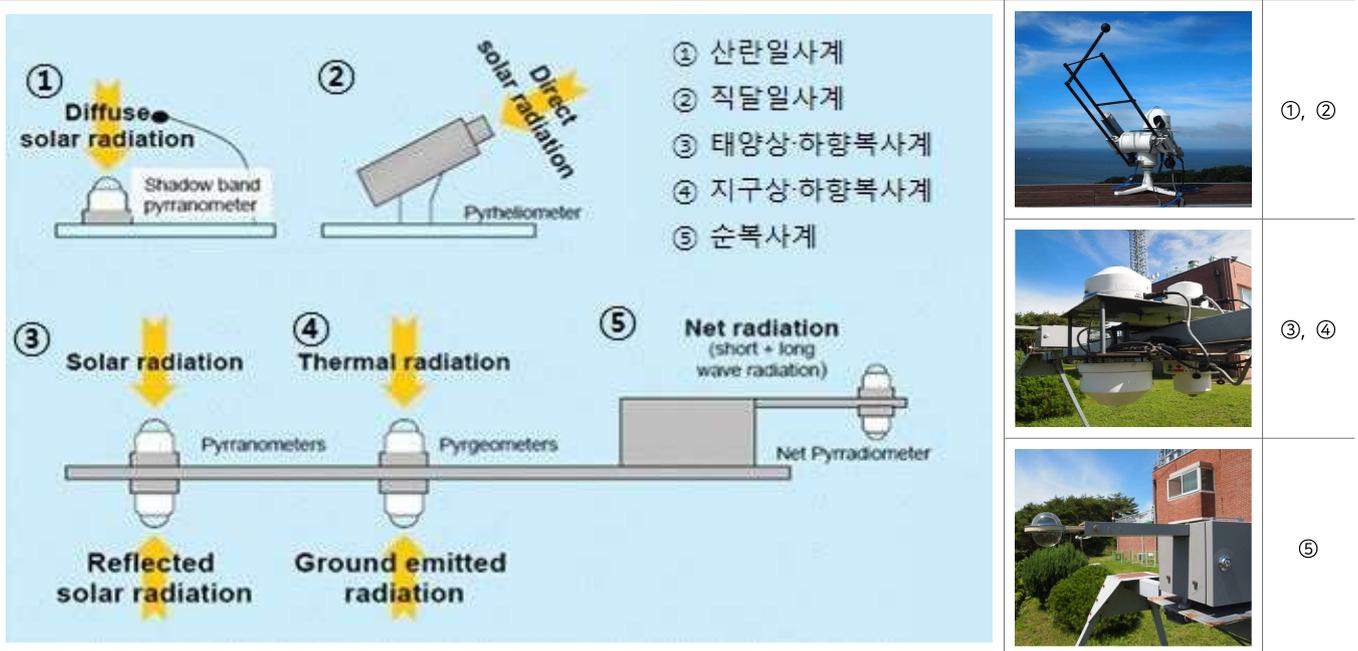
**태양복사**

- 태양이 방출하는 단파복사로서 상향과 하향의 태양복사량으로 관측한다.
- 대기권 밖에 도달하는 태양에너지는  $340\text{W}/\text{m}^2$ 이다.

※ 태양하향복사(전천일사) : 태양으로부터 지표에 도달하는 모든 일사량으로 수평면 직달일사와 산란일사의 합으로 나타냄.

태양상향복사 : 구름 및 에어로졸 등에 의해 산란되어 외계로 방출되는 일사량

직달일사 : 대기, 구름 등에 의한 산란 없이 태양으로부터 직접 도달하는 복사량



<관측장비>

**지구복사**

- 지표나 대기에서 방출하는 적외선 장파복사를 말하며 지구복사 에너지량은 입사되는 복사에너지량보다 지면에서 대기로 방출하는 복사에너지량이 크다.
- 지구복사수지는 기후변화의 원인이 되는 에너지이기 때문에 그 변화를 감시하는 것이 중요하다.

※ 지구상향복사 : 지표에서 대기로 방출되는 장파복사.

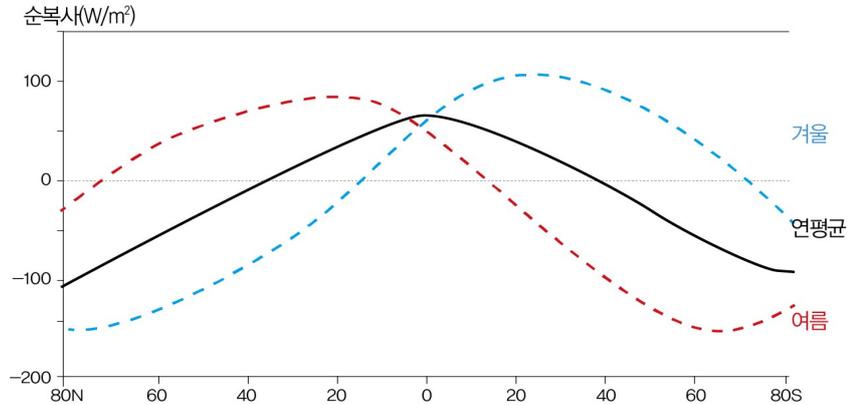
지구하향복사 : 지구상향복사가 온실가스, 구름 등에 의해 흡수되어 재방출되어 지표에 도달하는 장파복사.

**순복사**

- 태양 및 지구복사의 입사량과 방출량 차이를 말한다.

※ 순복사 = 태양하향복사 - 태양상향복사 + 지구하향복사 - 지구상향복사

- 순복사는 지표 에너지수지를 결정하는 중요한 요소로 일별 순복사는 열대와 아열대지역, 적도 근처에서 일년 내내 양의 값을 가지는 반면, 그 외 지역에서는 양과 음의 값이 계절에 따라 다양하게 나타난다.

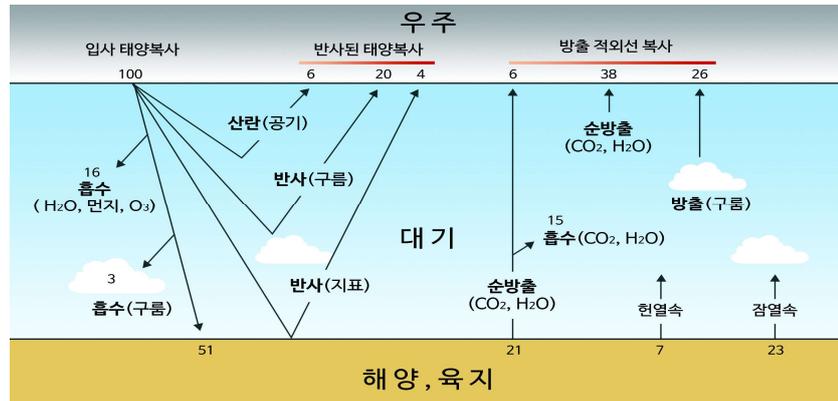


<대기 상부에서 북반구 여름과 겨울, 연평균 동서 평균 순복사>

- ※ ① 연평균을 나타내는 선을 보면 북반구와 남반구의 위도가 약 40°인 지점과 극지방 사이에 복사에너지 부족이 나타나며 북반구 겨울에는 복사에너지 부족이 위도 15°까지 확장되고 여름에는 복사에너지 과잉이 약 위도 70°까지 도달함.
- ② 겨울(12, 1, 2월) 기간 동안 남반구의 복사에너지 과잉이 여름(6, 7, 8월) 기간 동안 북반구의 복사에너지
- ③ 극-적도 간 복사에너지 분포의 불균형을 바로 잡기 위해 적도에서 극지방으로 에너지 수송이 이루어져야 함.

**복사수지**

- 지구와 지구대기가 태양에너지를 우주로 방출하는 것보다 더 많이 흡수하면 지구는 따뜻해지고, 지구와 지구시스템이 태양으로부터 받는 것보다 더 많이 방출하면 지구는 차가워진다. 흡수된 에너지와 방출된 에너지가 균형을 이루면서 변하지 않는 상태를 복사평형이라고 한다.



<지구-대기권의 에너지수지>

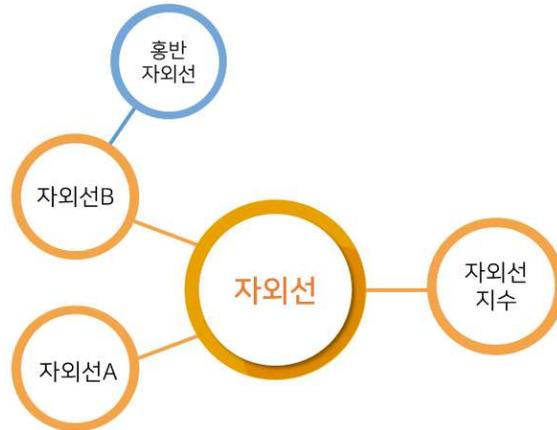
※ 지구 전체로 볼 때 태양에너지의 70%는 흡수하고 30%는 반사함. 대기 중에서 19%를 흡수하고 지표면에서는 51%를 흡수하여 다시 적외선복사의 형태로 우주공간으로 방출.

# 2.7

## 자외선

### 나들이 필수정보, '자외선지수'

자외선은 태양광선 중 지구대기에 도달하면서 인체에 생물학적 반응을 일으켜 세계보건기구가 1급 발암물질로 지정하고 있다. 파장이 가장 긴 자외선A는 인체의 피부 깊숙이 침투하여 피부노화에 영향을 준다. 그 보다 파장이 짧은 자외선B는 피부, 눈 등에 부정적인 영향이 있지만 체내에 필요한 비타민D를 80%가량 피부 내에서 합성시켜주는 좋은 자외선이기도 하다. 자외선의 긍정적인 효과와 부정적인 효과를 제대로 파악하여 자외선지수 정보를 매일 활용해 보자.

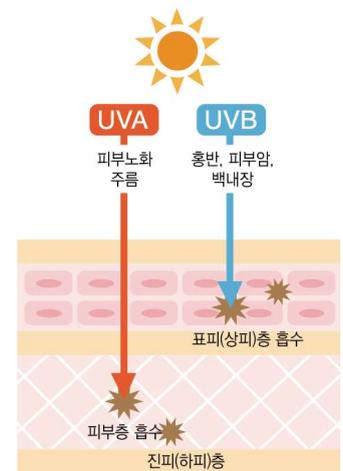
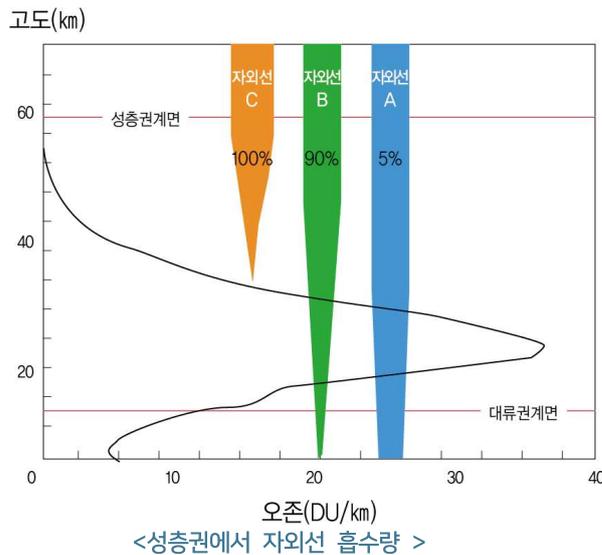


#### 자외선 연관어

- 자외선A
- 자외선B
- 홍반자외선
- 자외선지수

### 자외선

- 자외선복사의 파장 영역은 100~400nm<sup>5)</sup>이며, 이는 자외선A(320~400nm), 자외선B(280~320nm), 자외선C(100~280nm)로 분류된다.
- 자외선복사는 복사파장, 태양천정각, 오존 및 기타 미량기체, 구름, 에어로졸 등에 영향을 받는다. 따라서 자외선복사의 변화폭은 매우 크다. 오존변화는 자외선에 영향을 끼치며 특히 파장이 짧은 영역에서 변화가 커 오존층 감소에 따라 그 복사량 증가가 우려되면서 기후환경에 중요한 문제가 되고 있다.



<자외선A와 자외선B의 피부 침투 정도>

5) 1nm = 10억분의 1 미터

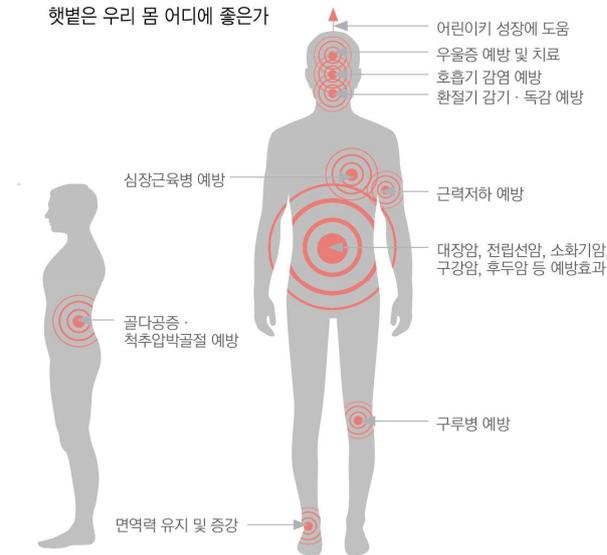
\* 태양의 자외선은 자외선A, B, C로 구별되며, 성층권 오존층을 통과하면서 자외선C는 모두 흡수되고, 자외선B는 10%만이, 자외선A는 90% 이상이 지표에 도달

**자외선A**

- 320~400nm 파장 영역으로 90% 이상이 지표에 도달. 생물에 큰 영향은 없으나 파장이 길어 유리창을 통과하고 장기간 노출 시 주름과 피부노화에 영향을 준다.

**자외선B**

- 280~320nm 파장 영역으로 10% 미만만 지표에 도달한다. 오존층 농도에 따라 지표에 도달하는 복사량은 차이가 있고 맑은 날 태양 남중시간에 정점을 보인다. 에너지가 강해 장기간 노출 시 피부암, 백내장 등을 유발하나 체내에 필요한 비타민D를 합성하여 건강에 도움을 주기도 한다.



① 자외선B의 긍정적인 효과

: 체내에 필요한 비타민D를 80% 가량을 피부 내에서 합성하여 비타민D 부족으로 야기되는 질병 예방에 도움.

② 비타민D의 효능

: 뼈 성장과 건강에 필요한 칼슘과 인의 흡수를 돕고 다양한 화학반응을 유도 (우리나라 남성 87%, 여성 93%가 비타민 D 부족/보건복지부 통계)

<자외선B의 긍정적인 효과와 비타민D의 효능>

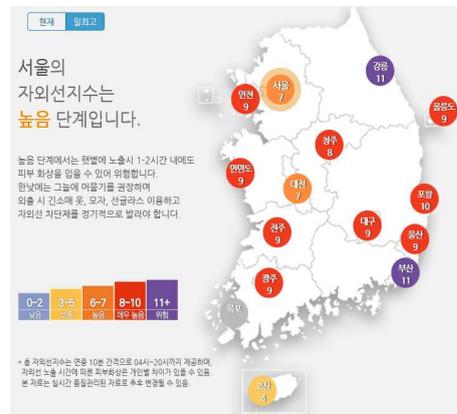
**홍반자외선**

- 태양에 노출되었을 때 피부홍반(강한 햇빛에 오래 노출되어 피부가 붉어지는 반응, 주로 자외선B 복사에 의해 나타남)을 강하게 발생시키는 영역인 250~300nm의 자외선C와 B영역에 높은 가중값을 주고 300nm부터 400nm까지 감소하도록 반영된 자외선 복사를 말한다.

**자외선지수**

- 태양고도가 최대인 남중시각 때 지표에 도달하는 자외선 영역의 복사량을 지수식으로 환산한 것을 말한다.

- 자외선으로 인해 우리 몸의 피부가 얼마만큼 위험할 수 있는가 하는 정도를 숫자로 나타낸 것으로 위험, 매우높음, 높음, 보통, 낮음 5단계로 제공되며, 숫자가 높을수록 위험하다.



<자외선지수 관측자료>

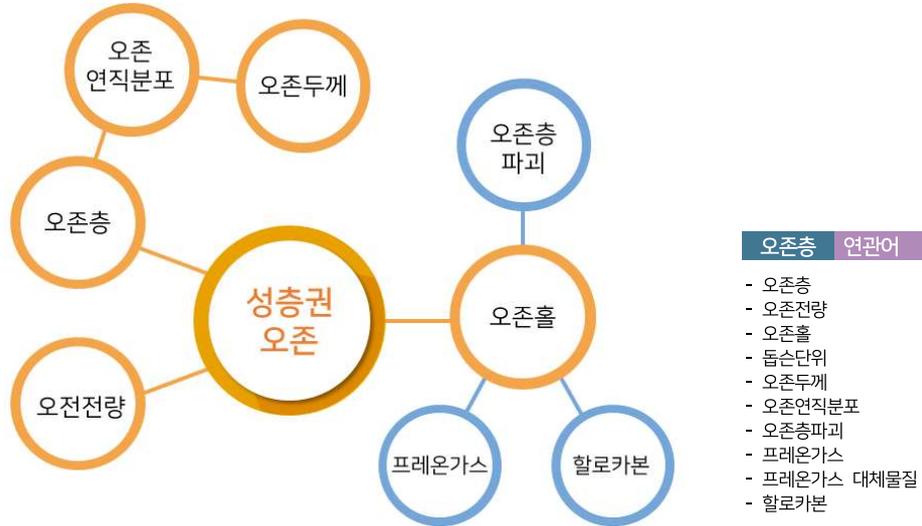
단계	지수범위	대응요령
위험	11 이상	- 햇볕에 노출 시 수심 분 이내에도 피부 화상을 입을 수 있어 가장 위험함 - 가능한 실내에 머물러야 함 - 외출 시 긴 소매 옷, 모자, 선글라스 이용 - 자외선 차단제를 정기적으로 발라야 함
매우높음	8 이상 11 미만	- 햇볕에 노출 시 수심 분 이내에도 피부 화상을 입을 수 있어 매우 위험함 - 오전 10시부터 오후 3시까지 외출을 피하고 실내나 그늘에 머물러야 함 - 외출 시 긴 소매 옷, 모자, 선글라스 이용 - 자외선 차단제를 정기적으로 발라야 함
높음	6 이상 8 미만	- 햇볕에 노출 시 1-2시간 내에도 피부 화상을 입을 수 있어 위험함 - 환날에는 그늘에 머물러야 함 - 외출 시 긴 소매 옷, 모자, 선글라스 이용 - 자외선 차단제를 정기적으로 발라야 함
보통	3 이상 6 미만	- 2-3시간 내에도 햇볕에 노출 시에 피부 화상을 입을 수 있음 - 모자, 선글라스 이용 - 자외선 차단제를 발라야 함
낮음	3 미만	- 햇볕 노출에 대한 보호조치가 필요하지 않음 - 그러나 햇볕에 민감한 피부를 가진 분은 자외선 차단제를 발라야 함

<자외선지수의 단계별 주의사항>

# 성층권 오존

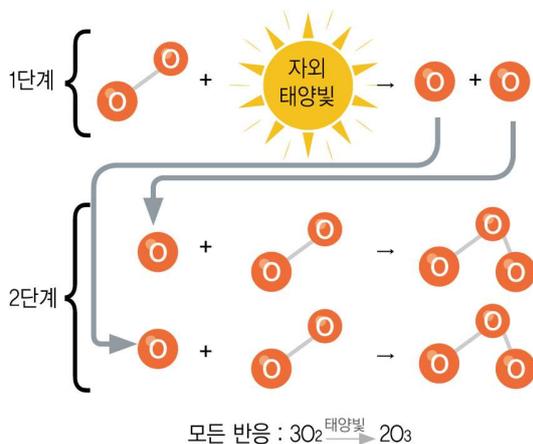
## 오존의 두얼굴

성층권 오존은 태양에서 방출되는 유해한 자외선복사를 다량 흡수한다. 이 같은 유익한 역할로 성층권 오존은 좋은 오존으로 불린다. 반면 지표면에서 인위적으로 형성된 오염원 가스의 화학반응으로 형성된 오존은 인간과 동식물에 해롭기 때문에 나쁜 오존으로 간주된다.



## 성층권의 오존

- 성층권 오존은 대기 중 21%를 차지하는 산소 분자가 태양 자외선복사와 화학반응을 일으켜 자연적으로 형성된다. 이 화학 반응들은 성층권에 태양복사가 존재할 때 발생하며 열대지방의 성층권에서 오존이 가장 많이 생성된다.
- 성층권의 오존 생성은 화학반응으로 파괴되는 오존에 의해 균형을 이룬다. 성층권의 오존 일부는 규칙적으로 대류권에 수송되어 내려오고 때때로 지표면의 오존량, 특히 지구상에서 오염이 되지 않은 외딴 지역의 오존량에 영향을 미칠 수 있다.
- 성층권 오존은 태양빛 뿐 아니라 다양한 자연·인위적 화학물질과 지속적으로 반응을 일으키는데 오존을 파괴하는 주요 반응성 가스는 산화수소와 산화질소, 그리고 염소와 브롬이 함유된 반응성 가스가 있다.

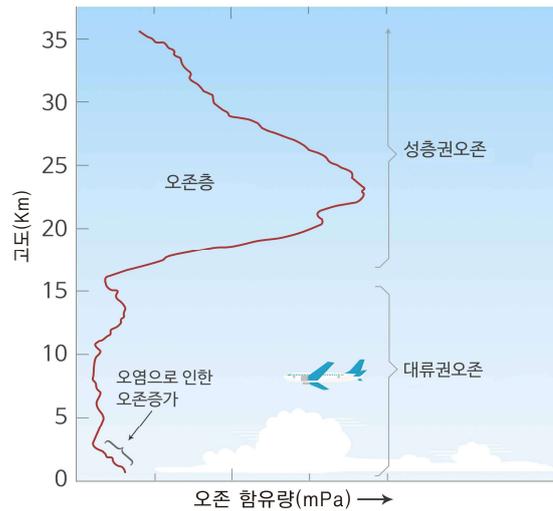


- 성층권 오존은 2단계의 반응과정을 거쳐 자연적으로 생성
- 첫 단계에서, 산소 분자 1개가 태양 자외선 복사 (태양빛)에 의해 해리되어 산소 원자 2개(2O)로 분리됨
- 두 번째 단계에서, 각각의 원자는 다른 산소 분자와 결합 충돌을 일으켜 오존 분자 하나를 생성
- 전 과정을 통해 산소 분자 3개가 태양빛과 반응해 오존 분자 2개를 생성

<성층권 오존의 생성>

**오존층**

- 지구대기에 존재하는 오존의 약 90%는 지표 위 10km(극지역)~16km(열대지역)이상에서 50km까지의 성층권에 존재하며 나머지 약 10%의 오존은 지표에서 성층권 하부지역에 위치한 대류권에 존재한다.
- 성층권은 대류권 상층부로부터 약 50km 고도까지는 기온이 계속 상승하여 약 50km 고도에서 0°C의 기온을 나타내는 안정한 대기층으로 주로 분자 확산에 의해 기체의 이동이 이루어진다. 성층권 내에서도 20~25km 사이의 오존이 밀집되어 있는데 이 층을 오존층이라 한다.
- 오존층은 태양으로부터의 자외선 복사를 흡수하여 자외선의 대부분을 지표면에 도달하기 전에 막아주는 보호막 역할을 한다.



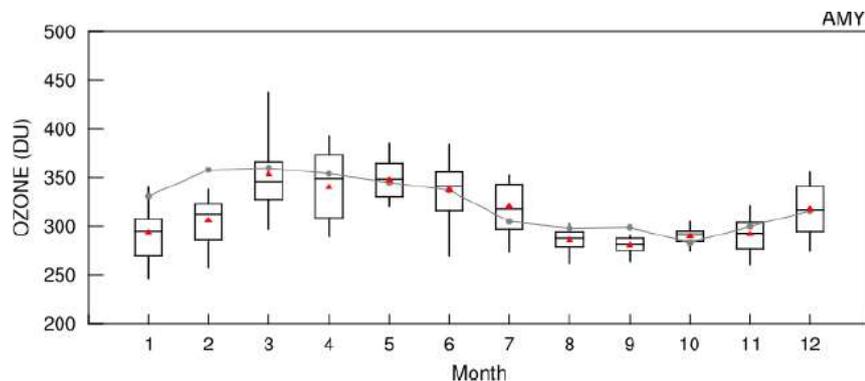
<대기의 오존분포(Fahey, D. W., 2002)>

**오존전량**

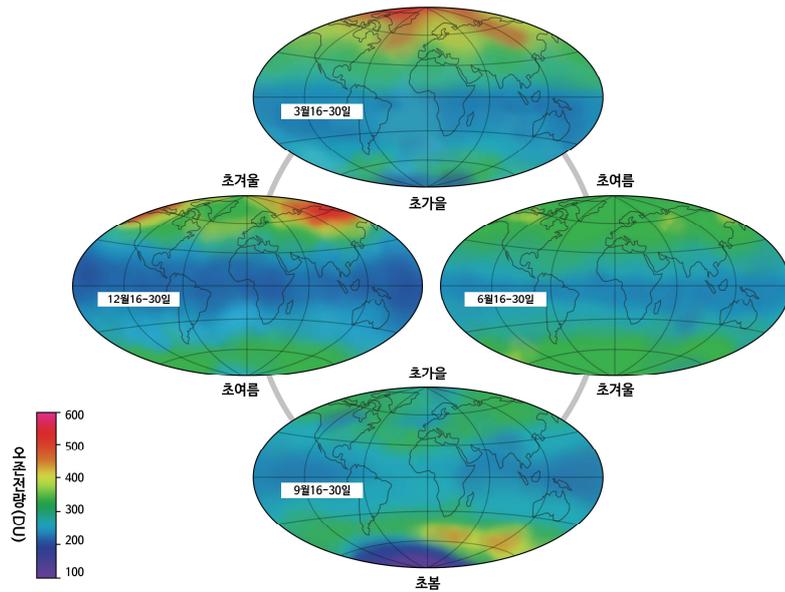
- 오존전량은 지상 어느 위치든 그 위치 상공에 존재하는 오존분자의 총량으로 정의되며, 위도, 경도, 계절에 따라 달라진다. 오존전량의 약 90%는 성층권에 존재하기 때문에 성층권 오존을 나타내는 값으로 사용할 수 있다. 성층권 오존은 지구 대기로 입사하는 유해한 자외선을 흡수해 지상의 생태계를 보호하는 역할을 한다.

(지구분포) 태양자외선 복사에 의한 오존 생성 비율이 열대지방에서 최댓값을 보이며 성층권 내 공기 대순환으로 열대지방 오존이 극지방으로 서서히 수송되기 때문에 오존층의 두께는 중위도와 고위도에서 두껍고, 저위도에서는 상대적으로 얇아진다.

(계절분포) 북반구의 오존전량은 봄에 뚜렷한 최대값을 갖고 여름부터 가을까지 값이 낮아지는 계절변동을 보인다. 이는 늦가을과 겨울동안 열대지방에서 극지방으로 오존 수송이 증가하여 봄철 고위도에서 최댓값을 보인다.



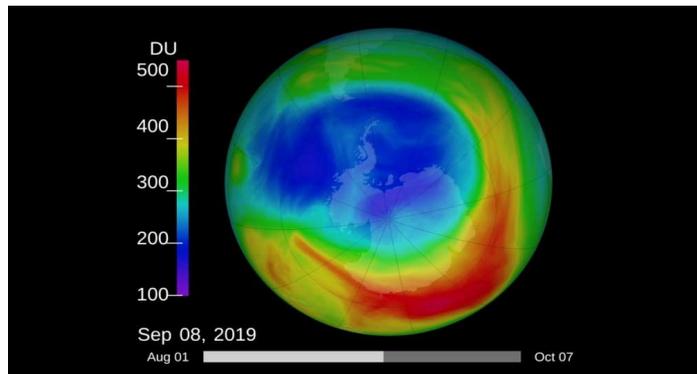
<안면도 기후변화감시소의 2019년 월평균 오존전량 분포>



- 열대지방(북위 20°~남위 20°)은 모든 계절에 오존전량에 변화가 거의 없지만 오존함유량이 높은 공기가 열대지방으로부터 이동해 고위도에 축적되기 때문에 열대지방 외의 지역의 오존전량은 일별부터 계절별 기간에 따라 크게 달라진다.

**오존홀**

- 남극대륙의 늦겨울에서 초봄 사이에 성층권 오존층이 심각하게 파괴된 영역을 오존홀이라고 한다.
- 오존전량이 220DU보다 낮은 영역을 의미하며, 남극 극소용돌이에서 제트기류가 강화되는 8~12월 사이에 오존홀이 생기며, 주로 남극 봄인 9~10월에 최대면적을 보인다.



<오존홀(ozone hole)의 예(2019년 9월8일, 남극상공)>

[출처 : NASA 홈페이지 <https://svs.gsfc.nasa.gov>]

※ 남반구 극지방 오존홀 발생 이유

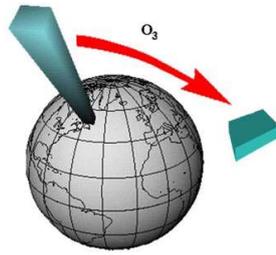
겨울철 남반구 극지방은 태양광이 전혀 들어오지 않는 극야 현상으로 인하여 급격히 차가워진다. 이렇게 차가워진 대기는 극야 제트류(polar night jet) 혹은 극 소용돌이(polar vortex)를 동반하는데, 이 때 강한 극 소용돌이가 고위도 공기를 고립시켜 기온의 하강을 가속시키는 역할을 한다. 이 때문에 겨울철 남극 성층권 기온은 영하 78도 이하로 내려간다. 이와 같은 극저온 상태에서 질산과 수증기 등이 얼면서 극지방 성층권 구름(polar stratospheric cloud)이 만들어진다. 이 구름은 입자 표면의 불균질(heterogeneous) 화학 반응으로 통해 염소분자를 축적한다. 봄철이 되면 태양광이 극 성층권에 들어오면서 극지방 성층권 구름이 급격히 소멸하게 된다.

이때 겨울철에 축적된 염소 분자가 대기로 배출되면서 오존층을 급격히 파괴하는 것이다.

[출처: 네이버 지식백과] 오존홀(기상학백과, 한국기상학회)

※ 돝스단위(DU)

- 옥스포드대 Gordon Dobson이 개발한 단위로 단위 면적의 기둥에 포함된 미량 가스를 0°C와 1기압 상태에서 압축했을 때 높이를 말함.
- 1DU는 표준상태에서 압축했을 때의 물리적 두께로 0.01mm 로 정의됨.



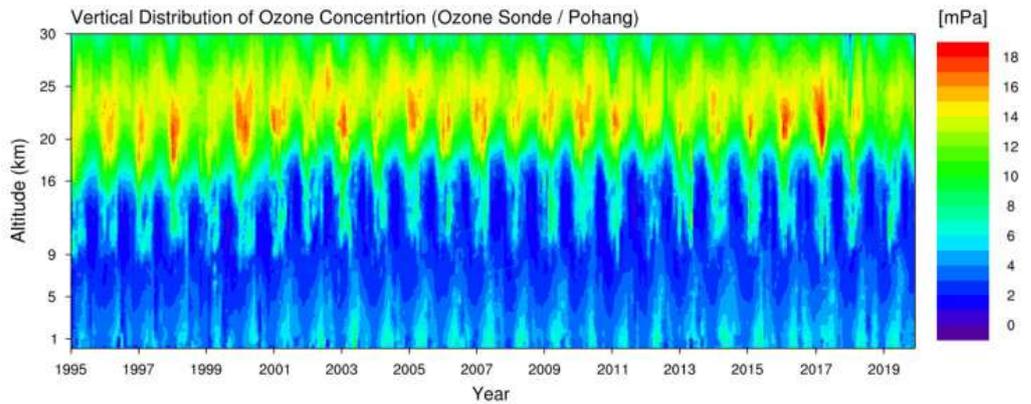
<돝스단위의 이해>

오존두께

- 대기 중 오존의 낮은 상대적 함유량을 보여주기 위해 대류권과 성층권에 있는 오존을 모두 모아 지표면으로 가져왔을 때 두께를 의미한다. 이 오존 분자들을 지구 전체에 균일하게 분포시켜 얇은 기체층을 만든다고 가정했을 때, 순수한 오존층의 평균 두께는 약 3mm이다.

오존연직분포

- 연직 공기기둥에 존재하는 각 층의 오존정보로 오존 생성의 광화학과정에 의해 결정된다.
- 오존은 성층권에서 주로 생성이 이루어진 후, 대류권으로 수송되어 소멸된다. 이러한 특성상 오존 농도는 하부성층권에서 최대로 나타나며, 대류권에서는 대체적으로 균일한 농도를 보인다.



<포항지역의 오존농도 연직분포(1995~2019년)>

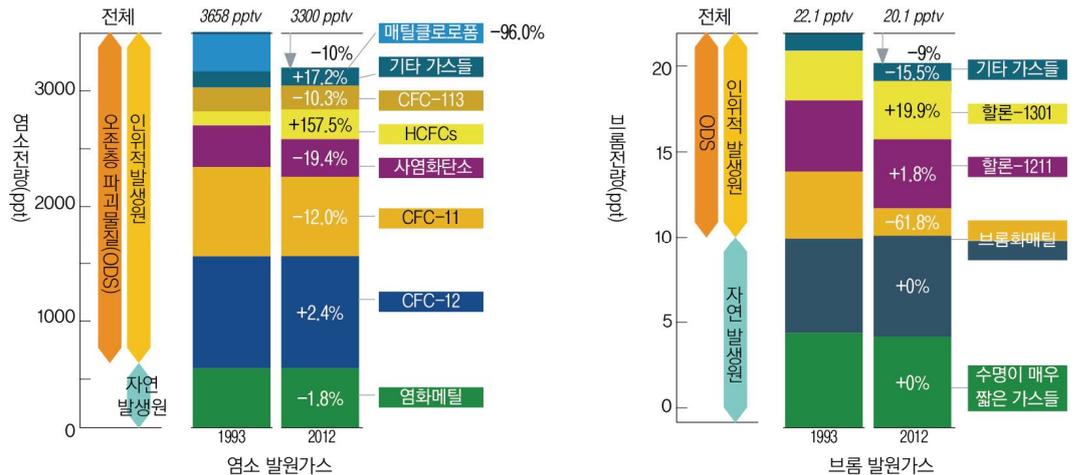
[출처: 2019 지구대기감시보고서]

### 오존층 파괴

- 성층권 오존은 태양 자외선과 산소 분자가 포함된 화학반응으로 자연적으로 생성된다.
- 오존은 성층권에서 다양한 자연적인 요소와 인간이 만들어 낸 화학 성분에 끊임없이 반응하며, 각 반응에서 오존 분자를 잃어버리고 다른 화학 성분이 생성된다.
- 염소와 브롬을 포함하는 중요한 반응 가스는 오존을 파괴한다.

#### ※ 오존층 파괴물질

- 몬트리올의정서에 의거하여 세계적으로 규제되는 인위적인 할로겐 발원가스임.
- 이 기체들은 염소와 브롬원자를 성층권으로 유입시켜 오존을 파괴하는 화학반응을 일으킴.
- 한때 거의 모든 냉장고와 에어컨 냉매제로 사용되었던 염화불화탄소와 소화기에 사용되었던 할론이 대표적인 예임.



### 프레온가스

- 염화불화탄소(CFCs)는 오존층 파괴물질로 지구온난화를 일으키는 온실가스의 일종이다.

### 프레온가스 대체물질

- 프레온가스의 대체물질은 수소불화탄소와 과불화탄소로 에어컨과 냉장고 등의 냉매로 쓰이며 온실가스에 해당한다.

### 할로카본

- 메탄의 수소원자 전부를 할로겐 원자로 치환한 것으로 메탄보다 탄소원자 수가 많은 탄화수소의 과할로겐 치환체의 총칭으로 사용한다.
- 대기 속에 방출된 인공 할로카본류는 안정하기 때문에 그대로 대류권에 축적되어 있다가 성층권으로 퍼져, 태양 자외선 분해로 생기는 염소원자가 오존층을 파괴한다.

## 03. 해양권의 기후변화

3.1 해양의 기후변화

3.2 수온 상승

3.3 해수면 높이

3.4 해양산성화

3.5 해양 염분

# 3.1

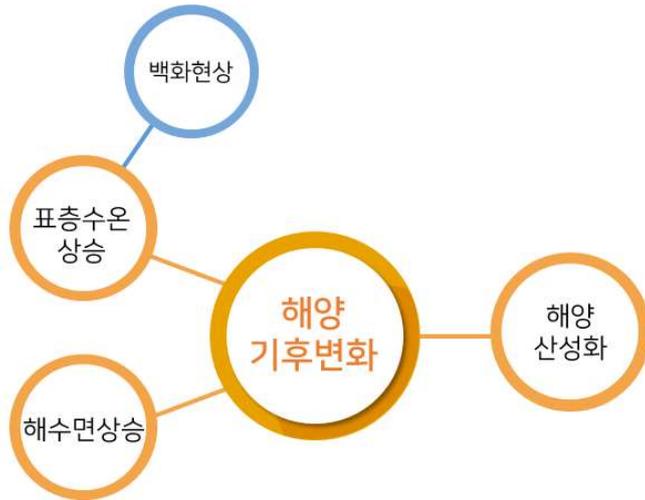
## 해양의 기후변화

### 물로 가득한 바다에도 사막이 있다고요?

육지에도 숲이 있는 것처럼 바다에도 '바다 숲'이 있다. 이러한 바다 숲에는 많은 해조류가 살고 있다. 그러나 이러한 해조류는 백화현상으로 말라가게 된다.

지구온난화로 인해 바다의 수온이 올라가면서 높은 수온에서 잘 자라는 산호말이 번식하게 된다.

산호말은 석회질의 탄산칼슘을 가지고 있는 홍조류로 산호말이 번식하게 되면 다시마나 미역과 같은 해조류는 달라붙을 장소를 확보하지 못해 잘 자라지 않는다. 바다 속 산소와 영양물질을 만들고 바다동물의 직접적인 먹이감인 해조류가 사라지게 되면 바다 속이 황폐화된다. 따라서 이러한 백화현상을 '바다의 사막화'라고 부른다.



#### 해양기후변화 연관어

- 해수 온도 상승
- 표층수온
- 해양산성화
- 백화현상(갯녹음)

### 해양 기후변화

- 해양의 기후변화는 해양 온도 상승, 해양 산성화, 해수면 상승으로 나타나는데 해양은 표면의 온도가 가장 빨리 상승하지만 깊은 곳까지 온도가 올라가는 현상이 관측되고 있다.
- 또한 대기 중 이산화탄소를 흡수하면서 해양의 산성화가 진행되고 있어 앞으로 해양생태계에도 악영향을 미칠 것이 우려된다. 해수면 상승은 주로 육지빙하가 녹은 물이 해양에 유입되거나 해양의 온도가 상승함에 따라 물의 부피 팽창으로 상승하고 있는데 앞으로 해수면 상승으로 연안지역의 해수 범람과 갯벌생태계에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

# 수온 상승

## 3.2

### 표층수온

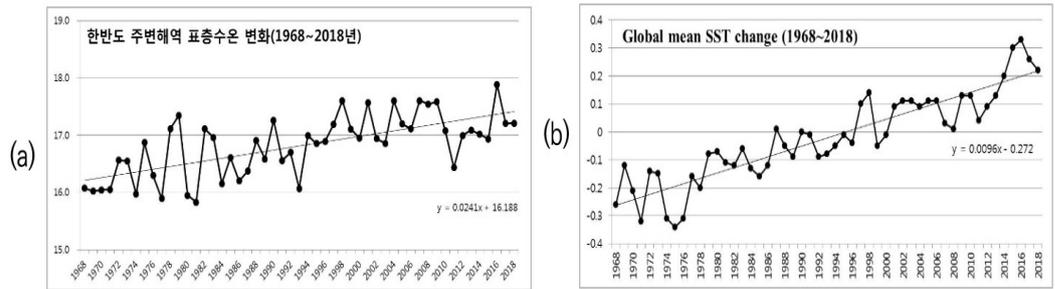
- 바다 표면과 가까운 해수를 일반적으로 표층수라고 하며 태양의 열로 인해 바닷물이 따뜻해지는데 이러한 부분을 수온약층이라 한다. 표층수는 풍랑, 강수, 증발 등 기상현상에 민감하게 변화한다. 바닷물의 온도는 적도 쪽으로 갈수록 높게 나타나며 극지방으로 갈수록 낮게 나타난다.
- 표층수온의 변화는 중위도의 대륙 가장자리에서 크게 나타난다.

### 전지구 표층수온 상승

- 최근 50년간(1968~2018년) 전지구 표층수온은 약 0.5°C 증가하였으며 연간 평균 0.0096°C 증가하였다.

### 우리나라 표층수온 상승

- 최근 50년간(1968~2018년) 우리나라 연근해 연평균 표층수온 변동 경향은 1.23°C 상승했으며, 연간 0.0241°C 상승하는 경향을 보였다.



<1968~2018년 우리나라 주변(a) 및 전 세계(b)의 연평균 표층수온 변화(단위 °C)(국립수산과학원, 2019)>  
[출처: 수산분야 기후변화 평가 백서, 2019]

### 백화현상

- 백화현상이란 바닷물 속에 녹아있는 탄산칼슘(석회가루)이 해저 생물이나 해저의 바닥, 바위 등에 하얗게 달라붙는 현상을 말한다.
- 지구온난화로 인해 수온이 올라가면서 산호말과 같은 탄산칼슘을 갖고있는 홍조류가 바다의 바닥면이나 바위에 달라붙기 시작하며, 바닥에 쌓인 탄산칼슘으로 인해 기존에 살던 해조류는 죽게 되어 해저는 불모지 상태가 된다.

# 해수면 높이

## 3.3

### 해수면 상승

- 해수면은 기온변화에 따라 변화하는 대륙 빙하의 양과 해수의 열팽창 정도에 따라 지속적으로 변화하고 있으며, 마지막 극대 빙하기였던 2만년 전에 비해 현재는 100m 이상 상승한 것으로 분석되었다.
- 기온이 높을수록 대륙 위에 얼음형태로 고정되어 있던 담수가 녹아 바다로 흘러가게 되고 해수 역시 온도가 높아질수록 부피가 증가하게 되어, 지구온난화는 비닷물의 양과 부피 모두에 영향을 주어 해수면을 상승시키게 된다.
- 빙하가 녹아서 대륙 빙하의 질량이 작아지고, 이에 따라 중력이 작아지면서 평균 해수면이 상승하는 효과도 있습니다.

[출처: 네이버 지식백과] 해수면상승(기상학백과, 한국기상학회)

#### 전지구 해수면 상승

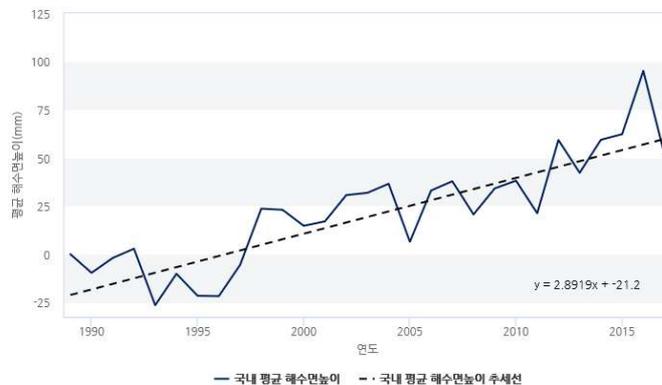
- 1902-2010년 전 세계 해수면 상승은 0.16m이며, 최근 10년(2006-2015년) 상승 속도는 3.6mm/yr로 지난 100년(1901-1990년)의 상승 속도인 1.4mm/yr의 약 2.5배임. 이 같은 상승 속도는 빙산과 빙하가 녹아 발생했을 가능성이 크며, 해양의 열팽창 효과를 넘어섰다.
- 남극을 제외한 빙하의 변화와 열팽창이 전지구 해수면 상승의 75%를 차지한다.
- 1970년 이후 전지구 평균 해수면 상승의 지배적인 원인은 인위적인 강제력이다.

[출처: (IPCC, 2018, 2019)]

#### 우리나라 해수면 상승

- 우리나라 주변 해수면은 지속적으로 상승 중이며, 상승률은 전지구 해양 평균보다 약 2~3배 높은 것으로 보고되었으며, 지난 10년(2009~2018년) 동안의 우리나라 연안 해수면 상승 폭이 연평균 3.48mm로 지난 30년(1989~2018년) 동안의 연평균 2.97mm보다 0.51mm 더 높았다.

[출처: 네이버 지식백과] 해수면상승



<국내 연평균 해수면 높이>

※ 국내 조위관측소 21개 지점의 연평균 해수면높이를 1989년의 해수면높이를 기준으로 변환한 그래프.

※ 1989년을 기준으로 점차 상승하여 연 2.8mm 비율로 상승

[그림출처: 기후정보포털, 자료출처: 국립해양조사원]

# 해양산성화

## 3.4

### 해양산성화 정의와 진행과정

- 해양산성화는 해수의 수소이온농도가 증가하는 현상의 의미함. 대기 중의 이산화탄소 양이 많아지면 바다가 흡수하는 이산화탄소 양 또한 증가하게 된다. 바다로 흡수된 이산화탄소는 물과 만나면 탄산이 발생하게 되고 해양산성화가 진행된다.
- 2009-2018년의 최근 10년간 해양은 연간 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 23%를 흡수하여 기후변화의 영향을 완화시키는 데 기여하지만 흡수된 CO<sub>2</sub>가 해수와 반응하여 해양 pH를 감소시키고 해양의 산성도를 증가시킴으로써 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 상승은 해양의 화학적 특성을 바꾸어놓는다. 이 과정을 해양산성화라고 부른다.

### 해양산성화 영향

- pH 변화는 해양 탄산염의 화학적 특성을 변화시켜 홍합, 갑각류, 산호와 같은 해양 생물의 석회형성 능력을 감소시킬 수 있다. 이러한 복합적인 변화가 해양생물의 성장과 생식 능력을 약화시킨다. 지난 20~30년간 외해에서 측정된 관측값에 의하면, 1980년대 후반 이래 매 10년간 0.017~0.027pH의 비율로 전지구 평균 표면 해수 pH는 확연히 감소 경향을 보인다.
- 해안 지역의 경우, 인간에 의한 해양산성화에 따른 탄산염의 화학적 특성 변화는 환경의 복잡성과 그에 미치는 영향의 다양성으로 인해 더욱 파악하기가 어렵다. 이러한 변화는 해안을 중심으로 이루어지는 수산업, 수산양식, 관광, 레크레이션 등, 인간 복지에 중요한 해양서비스산업에 부정적인 영향을 미친다.

[출처: WMO 2019 전지구 보고서]

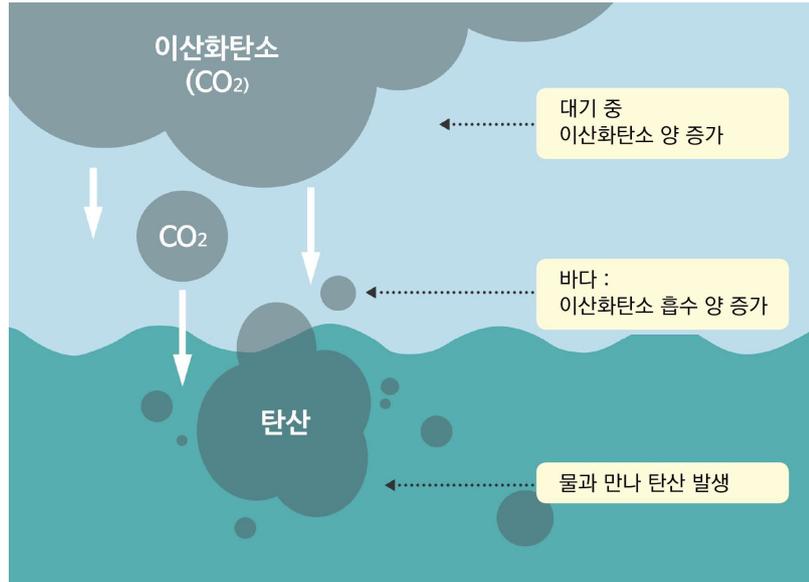
- 지구에서 배출되고 있는 이산화탄소의 약 4분의 1이 바다에서 녹아 탄산을 생성한다.
- 이산화탄소 배출량이 급격히 증가하면서 바다 pH를 약 30% 떨어뜨려 바다의 산성도가 빠른 속도로 증가하고 있다.

[출처: UNEP 국제연합환경계획 보고서, 1985]



<파푸아 뉴기니의 이산화탄소 분압(pCO<sub>2</sub>)와 수소이온농도(pH) 분포에 따른 해양산성화>

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



<해양 산성화 진행과정>

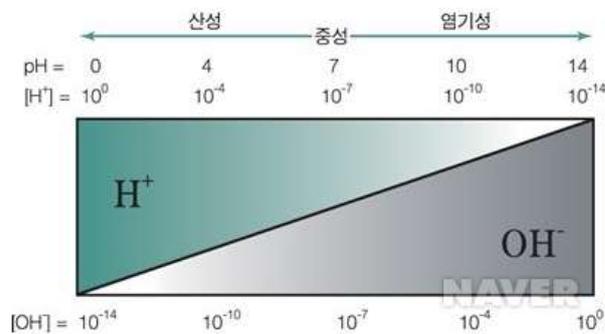
해양의 탄소순환

- 해양의 탄소순환은 생지화학적 순환(biogeochemical cycle)의 일환이다.
- 해양에서는 해수면을 통하여 대기 중 탄소가 용해되고, 해수의 증발에 따라 다시 대기중으로 배출된다. 심해에서는 용존 무기 탄소의 농도가 표층보다 약 15% 높고, 이러한 용존 무기 탄소는 긴 시간에 걸쳐 해양 심해로 저장된다. 심해와 표층 사이의 탄소순환은 심해 해류의 열염분 순환에 의해 서로 교환된다.
- 대기 중에서 해양으로 흡수되는 탄소는 주로 탄산염 형태로 변환되어 용해된다. 탄산염으로 변환된 탄소는 식물성 플랑크톤의 광합성을 통해 유기탄소로 전환되고, 식물성 플랑크톤은 동물성 플랑크톤과 해양 생물체의 먹이사슬을 통해 교환된다. 해양 생물체가 썩어서 탄산칼슘과 같은 형태로 전환되고 심해로 침전되어 탄소 퇴적물을 형성하기도 한다.

[출처: 네이버 지식백과] 해양의 탄소순환(기상학백과, 한국기상학회)

수소이온농도

- 용액 1 l 속에 존재하는 수소이온의 수를 의미한다. 수소이온농도를 나타내는 지표는 pH로 p는 지수의 power를, H는 수소이온을 나타낸다.
- pH로 산성, 중성, 염기성인 수용액을 간단한 숫자로 나타낼 수 있다.



<수소 이온 지수 [pH]>

[출처: Basic 고교생을 위한 화학 용어사전]

## 해양 염분

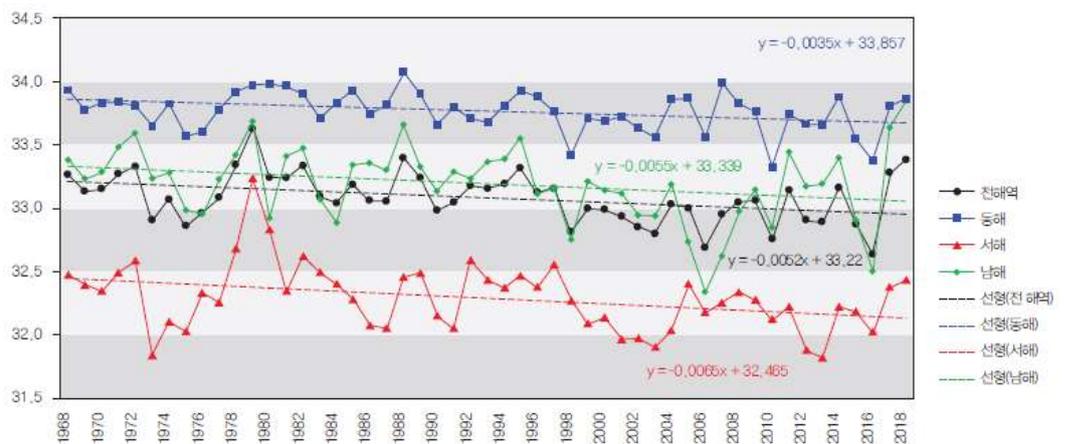
### 염분

- 염분은 해수를 담수와 구분하게 하는 성분으로 1kg의 물속에 녹아있는 염의 양(g)을 나타내며, 단위는 실용염분단위(practical salinity unit; psu) 또는 g/kg 으로 표시한다. 염분은 수온과 함께 해수의 밀도를 결정하고 해양의 열염순환을 만드는 중요한 요소이다.
- 해양 표면의 염분은 강수, 담수 유입, 빙산과 빙하의 용해 등에 의해 낮아지고, 증발에 의해 높아진다. 해양의 염분의 양은 거의 보존되지만, 담수의 양이 염분을 결정한다. 담수 유입의 영향이 큰 연안 해역에서는 하천수의 유입 효과가 더해진다. 강수량과 증발량은 대부분 대기의 상태에 따라 결정되고, 대기의 상태는 등온선에 의해 거의 같게 되므로 해수면의 염분 분포도 같은 위도선과 거의 평행하게 분포한다. 즉 염분의 분포는 수온의 분포와 같이 위도선과 거의 평행하게 분포하고 있다. 증발량은 해상 대기의 습도에 반비례하고 풍속에 비례하여 커진다.
- 염분이 증가하게 되면 해수의 물리적 성질들도 증가하게 된다. 여기에는 밀도, 분자 점성, 표면장력, 굴절지수, 전기전도도, 열팽창계수, 음속, 삼투압 등이다. 반면 염분이 증가함에 따라 감소하는 해수의 물리적 성질에는 비열, 어는점 온도, 최대 밀도 온도, 증기압, 분자 열전도도 등이다.

[출처: 네이버 지식백과] 염분(기상학백과, 한국기상학회)

### 염분의 장기변동

- 지난 1968~2018년까지 동해는 약 0.18psu, 서해는 약 0.33psu, 남해는 약 0.28psu, 전해역은 약 0.27psu가 감소하였다. 이러한 저염화 경향은 전 세계적인 증발-강수값의 감소에 따른 표층 염분 저염화 경향(Rhein et al., 2013)과 일치한다.



<최근 51년간(1968~2018) 우리나라 전체 및 해역별 연평균 표층염분 변동 경향(단위: psu)>

[출처: 수산분야 기후변화 평가 백서, 국립수산물연구원, 2019]

# 04. 빙권/지권의 기후변화

4.1 빙권의 기후변화

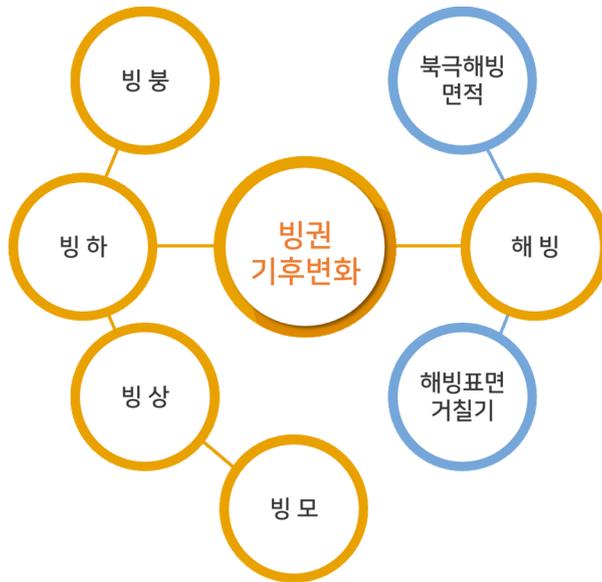
4.2 지권의 기후변화

# 4.1

## 빙권의 기후변화

### 우리나라와 멀리 떨어져 있는 빙하가 우리나라 기후에 영향을 미칠까?

푸른 별 '지구'의 인공위성 사진을 보면 하얗게 빛나는 곳이 있다. 바로 얼음이나 눈으로 덮여 있는 곳이다. 눈이 다져져서 얼음이 된 빙하는 내부의 층이 변형되어 따뜻하고 낮은 고도로 흘러내릴 수 있는데, 이때 빙하는 녹아 내리거나 바다로 깨져 들어가 빙산이 된다. 기후변화에 따른 고산 빙하 감소는 고산지역 사람들의 물 이용에 큰 영향을 미치며, 북극이 해빙이 녹음에 따라 우리나라에도 영향이 미칠 수 있다.



#### 빙권 기후변화 연관어

- 빙하
- 빙상
- 빙모
- 빙봉
- 해빙
- 해빙면적
- 해빙표면 거칠기

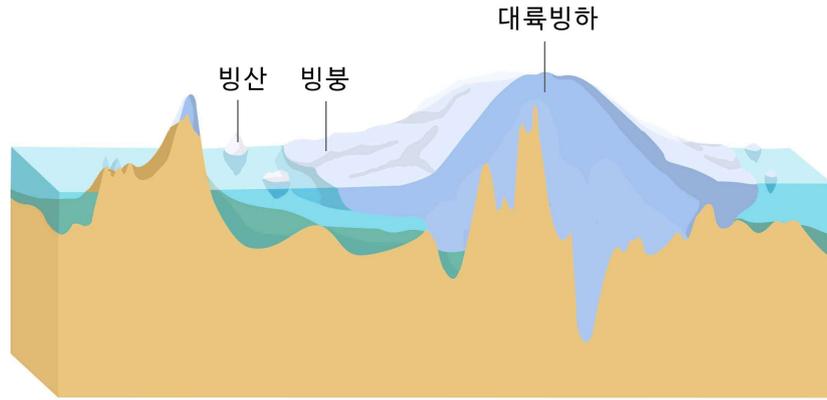
### 빙권의 기후변화

- 빙권은 지구시스템 중 결빙상태에 있는 구성요소를 말한다. 지구의 육지 가운데 약 10%는 빙하 또는 빙상으로 덮여있다. 지난 수십 년 동안, 지구온난화로 인해 빙상 및 빙하의 질량이 손실되었으며, 적설 면적과 극지방의 해빙면적과 두께의 감소로 인해 빙권이 광범위하게 줄었으며, 영구 동토층의 온도도 상승했다.

[출처: 변화하는 기후에서의 해양 및 빙권 보고서, 2019]

#### 빙하

- 압축된 눈이 오랫동안 쌓이고 다져져 육지의 일부를 덮고 있는 얼음층을 말한다. 지구 육지 표면의 약 1/10은 빙하라고 불리는 얼음덩어리로 덮여 있지만 빙하는 기후변화에 따라 축소 또는 확대된다.
- 기온이 내려가고 강설량이 늘면 설선(만년설의 하한선을 나타내는 선)의 위치가 내려가고 빙하가 확대되지만, 기온이 상승하고 강설량이 줄면 설선의 위치가 올라가고 빙하가 축소된다. 기후변화로 인한 빙하의 확대와 축소 때문에 빙하는 나무의 나이테와 같은 층을 갖게 되며, 이러한 얼음층을 뚫어 빙핵(ice core)을 추출하여 얼음 속에 갇힌 공기, 꽃가루, 화학물질, 먼지 등을 통해 과거의 기후변화를 알 수 있다.



### 빙산

- 상당한 두께의 얼음으로 덮이고 면적이 5만 km<sup>2</sup>(19,000 mi<sup>2</sup>)가 넘고 지형에 따라 막히거나 제약되지 않고 광대하게 모든 방향으로 퍼져나가는 빙원을 빙산이라고 한다. 그러므로 현재 지구의 빙산은 남극대륙과 그린란드에만 있다. 빙산은 워낙 광대해서 평탄한 빙원이라고 보면 되며, 학자에 따라서는 바다를 덮은 넓고 두꺼운 얼음도 빙산에 포함시키기도 하나, 대부분의 학자들은 빙산은 대륙을 덮은 얼음에 국한시키기도 한다.
- 빙산의 표면은 온도가 낮아도 바닥은 지열(地熱) 때문에 상당히 높은 곳이 있다. 그러므로 지역에 따라서는 빙산의 바닥이 녹아서 다른 부분보다 빨리 흐를 수 있으며, 이런 경우 그 부분이 빙류(氷流 ice stream)가 된다.



<빙산>

### 대륙빙하

- 빙산이 대륙처럼 광대한 지역을 덮고 아주 천천히 흘러, 대륙빙하(大陸氷河, Continental glacier)라고도 부른다.

### 빙모

- 빙산보다 작은 빙원을 빙모(氷帽 ice cap)라고 한다. 빙모는 남극반도일대 도서지역과 북아메리카 북쪽 도서지방을 포함한 다른 지역에 있는 빙원이다. 빙모는 면적이 좁아서 돔(dome)모양이나 접시모양이다.

## 빙붕

- 빙붕은 얼음(빙하, 빙상)이 바다를 만나 평평하게 얼어붙은 거대한 얼음 덩어리로, 일 년 내내 두꺼운 얼음으로 덮여 있는 곳을 말한다.
- 주로 남극대륙, 그린란드, 캐나다 및 러시아 북극해에서 발견되며, 두께는 보통 100m에서 1,000m 범위를 가짐. 빙붕은 주로 다량의 얼음이 중력에 의해 흘러내리다가 바다를 만나게 되면 밀도 때문에 가라앉지 못하고, 얼음을 빙붕의 말단부(ice front)로 계속적으로 이동시키며 수십 년 동안 점차 성장하게 된다.

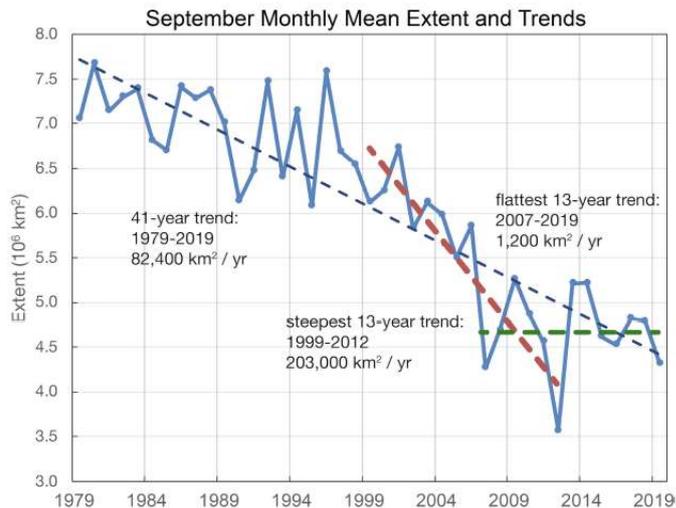
[출처: 네이버 지식백과] 빙붕(지질학백과, 대학지질학회)

## 해빙

- 해빙은 광의의 뜻으로 바다에 떠 있는 얼음을 의미하지만 현상에 관계없이 바닷물이 얼어서 만들어진 얼음 덩어리를 말한다. 북극해빙은 매년 태양고도의 변화에 따라 녹고 얼음을 반복하는 계절변동이 뚜렷하다.
- 태양이 비추지 않는 겨울 동안 해빙은 지속적으로 증가하여 3월에 최대로 증가하였다가 태양이 뜨기 시작하는 봄부터 녹기 시작한다. 여름 동안 감소한 해빙은 9월에 최저 면적에 도달한 후 태양이 지는 시기와 함께 다시 증가하기 시작한다. 최근 지구온난화로 인해 여름철 해빙의 면적 감소가 급격히 진행되고 있다.
- 해빙이나 빙하면적이 줄어들면 태양에너지 반사율이 낮아지면서 주위의 온도가 올라가서 온난화가 빨라지는 얼음-반사도 효과(ice-albedo feedback)가 나타날 수 있다.

## 북극해빙 면적

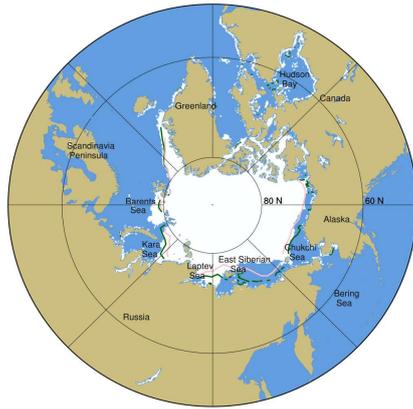
- 북극해빙 면적은 지난 40년간 약 82,400 km<sup>2</sup>/년의 속도로 줄어들고 있다(9월기준).
- 현재 추세대로 온실가스 농도가 높아진다면 2050년 이후 여름철 북극 해빙은 완전히 사라질 수 있을 것으로 전망하고 있다.
- 북극해빙 면적이 최소가 되는 9월 기준으로 버포트, 척치, 동시베리아, 람데프해 지역의 해빙이 감소하였다.



<가을(9월) 북극 해빙면적 변화경향>

[출처: 미국 빙권자료센터([https://nsidc.org/data/seaice\\_index/compare\\_trends](https://nsidc.org/data/seaice_index/compare_trends))]

- ※ 푸른점선: 최근 41년 경향
- ※ 빨간점선: 분석 기간 중 가장 급격한 감소시기(13년 기준)의 경향
- ※ 녹색점선: 감소경향이 가장 작았던시기(13년기준)의 경향



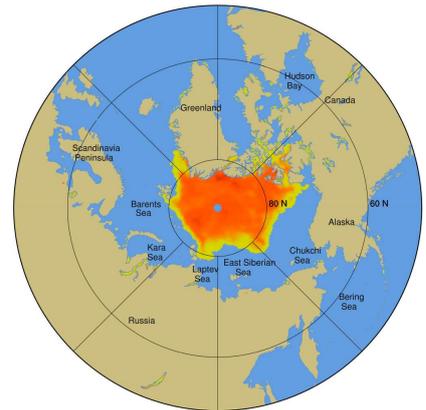
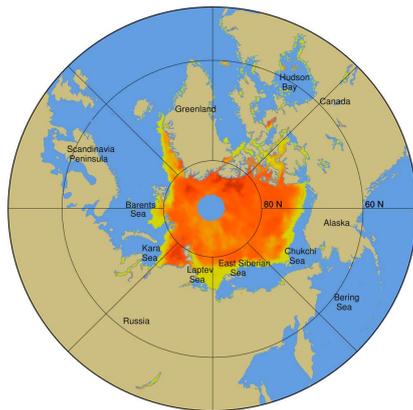
<북극 해빙의 면적 변화(좌 : 1989년 9월, 우 : 2019년 9월)>  
 분홍색선: 30년 평균('90~'19), 녹색선: 10년평균('10~'19)

**해빙표면 거칠기**

- 해빙표면의 거칠기는 해빙표면의 울퉁불퉁한 정도를 지수로 표현한 것으로 해빙표면의 물성(물 또는 얼음)을 의미한다.

※ 물: 표면거칠기<0.2cm, 혼합: 0.2cm≤표면거칠기≤0.4cm, 얼음/눈: 표면거칠기>0.4cm

- 1989년보다 얼음/눈의 비율이 줄고 경계선상에서 대부분 물로 분포되어 있다.



<북극 해빙의 면적 변화(좌 : 1989년 9월, 우 : 2019년 9월)>

# 4.2

## 지권의 기후변화

전세계의 숲도 기후변화로 인한 위협을 받고 있다. 지속된 폭염과 가뭄으로 인한 산불 발생, 무분별한 벌목 등 토지 이용의 변화가 원인 중의 하나이다. 토지의 변화는 생물 다양성에도 영향을 미치게 된다. 모든 생물은 존재하는 이유가 있게 마련이고 서로가 서로에게 중요한 역할을 하게 된다. 그러나, 지구 회복력을 유지시키는 이러한 생물종이 점차 감소하고 있어 기후변화 대응 실천행동이 절실히 필요한 시점이다.



### 지권의 기후변화

- 토지는 온실가스 배출원인 동시에 흡수원이며 지표면과 대기 간 에너지, 물, 에어로졸의 교환에 중요한 역할을 한다. 토지이용 또는 기후변화에 의한 토지 조건의 변화는 극한 현상의 강도와 빈도, 지속기간에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 변화의 규모와 방향은 위치와 계절에 따라 달라진다.

#### 알베도

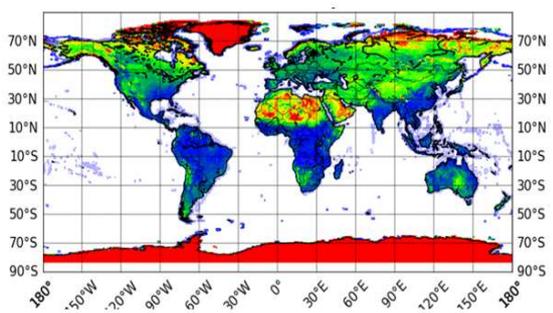
- 표면이나 물체에 입사된 일사에 대한 반사된 일사의 비율을 말하며 퍼센트(%)로 표현한다.
- 눈이 덮인 표면은 높은 알베도를 가지며 흙이 덮인 표면의 알베도는 높은 값에서부터 낮은 값까지 다양하고 초목으로 덮인 표면과 해양은 낮은 값을 보인다. 지구의 알베도는 구름·눈·얼음·나뭇잎으로 덮인 지역 및 토지 피복도의 변화 정도가 변함에 따라 주로 바뀐다.

**지표알베도  
(지표반사도)**

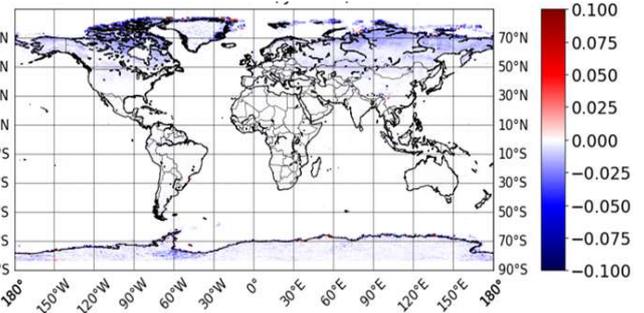
- 지표면의 알베도는 신적설(새로 생성된 적설)의 경우 약 0.9이며 해양의 경우 0.05로 지표의 종류에 따라 다양하게 나타난다. 해양에 비해 육상에서의 알베도가 약 0.1 ~ 0.4 로 더 높게 나타나며 적설을 제외하면 사막 지역이 가장 높은 알베도를 가진다.
- 전 지구의 연평균 알베도는 0.3이며 북반구와 남반구는 유사한 알베도를 나타낸다. 남반구는 북반구에 비해 해양이 차지하는 비율이 크지만 구름의 영향으로 인해 북반구와 유사한 알베도를 보이며 이는 구름이 전 지구의 알베도를 결정하는데 중요하다는 것을 의미한다.

지표의 종류 (Natural Surface types)	지표면 알베도 (Approximated albedo)
신적설(Fresh snow or ice)	0.6 ~ 0.9
용설(Old, meltin snow)	0.4 ~ 0.7
사막(Desert sand)	0.3 ~ 0.5
토양(Soil)	0.05 ~ 0.3
툰드라(Tundra)	0.15 ~ 0.35
초지(Grasslands)	0.15 ~ 0.25
산림(Forest)	0.05 ~ 0.2
물(Water)	0.05 ~ 0.1

<지면에 따른 알베도>

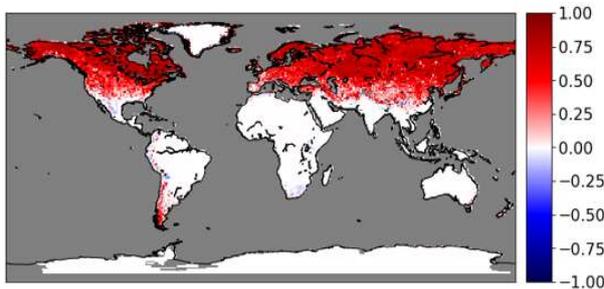


<전지구 평균 지표알베도(2000.2.~2017.5.)>

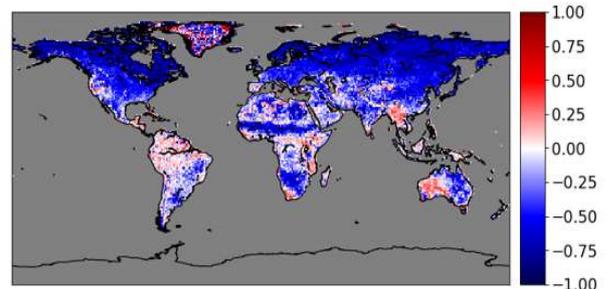


<지표알베도 장기변화 추세(2000.2.~2017.5.)>

- 지표알베도는 북극 및 남극 지역과 사막 지역에서 매우 높고 저위도와 식생이 많은 지역에서는 낮게 나타난다.
- 식생 증가와 지표면 온도 증가로 인하여 툰드라 지역의 지표알베도는 감소 추세를 보인다.



<적설면적에 따른 지표알베도>



<식생에 따른 지표알베도>

- 지표알베도는 적설 면적과 뚜렷한 양의 상관관계를 보이며, 식생 지수와는 뚜렷한 음의 상관관계를 보인다.

### 구름알베도

- 구름알베도는 태양광에 대한 구름의 반사도로 값이 클수록 더 많은 양의 태양복사를 반사한다. 이는 구름의 광학적 두께뿐만 아니라 구름 내 물 입자의 총 질량, 입자 크기, 입자의 모양 및 분포에 따라 달라지며 0.1 ~ 0.7의 값을 나타낸다. 구름은 일반 지표에 비해 높은 알베도를 나타내므로 지구를 냉각시키는 역할을 한다.

### 알베도 효과

- 알베도는 지구의 표면에 흡수되는 태양 에너지의 양을 결정하는 역할을 하기 때문에 지구의 에너지 균형에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 지구의 표면에 흡수된 에너지는 표면 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 물을 증발시키고 눈과 얼음을 승화시킨다. 따라서 알베도는 대기와 지표의 열수분 지수에 영향을 미치며 토양 시스템에 대한 많은 유용한 정보를 제공하고 토양의 에너지 균형을 이해하는데 도움을 준다. 이러한 이유로 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO)에서는 기후변화 메카니즘의 이해와 예측을 위한 필수기후변수 (Essential Climate Variable, ECV)로 중 하나로 알베도를 선정하였다.
- 지구 평균 알베도가 0.01이 변하는 것은 대기 중의 이산화탄소를 두배로 늘린 것의 영향과 비슷한  $3.4W/m^2$ 의 전 지구 복사수지의 변화를 일으킨다.

[네이버 지식백과] 알베도 [Albedo] (기상학백과, 한국기상학회)

### 토양탄소

- 육지의 경우 토양에 저장되는 탄소 뿐만 아니라 식생 및 동물에 존재하는 유기 탄소를 모두 포함한다. 토양의 경우 약 1,500 GtC (GtC이란 Giga ton Carbons를 의미하며, 1 GtC은 탄소의 질량이  $10^9$  톤 혹은  $10^{15}$  그램을 의미)의 양이 저장되어 있고, 식생 및 다른 생물권에 약 500 GtC의 탄소가 저장되어 있다. 육지 생물권에 존재하는 탄소는 대부분 유기 탄소의 형태로 존재하는 반면, 토양 탄소의 경우 탄산 칼슘과 같은 무기 탄소의 형태로 존재한다.
- 육지의 탄소 흡수는 식생과 같은 생물학적 요인에 의해서 결정되기 때문에 계절 주기가 뚜렷하게 나타난다. 그에 따라서 대기 중의 탄소 농도는 식생의 계절 주기처럼 뚜렷한 계절 주기를 나타낸다. 이러한 육지 탄소 흡수의 계절 주기는 상대적으로 육지의 비율이 더 많은 북반구에서 뚜렷하다.
- 육지에 저장되어 있는 탄소는 2가지 방법으로 대기 중으로 배출된다. 식생의 자가호흡으로 인한 배출과 토양 및 미생물의 혐기(嫌氣)호흡으로 인한 배출이 있고, 또한 토양에 저장되어 있는 탄소는 강수로 인하여 물에 용해되어 해양으로 흘러들어가거나 침식에 의해서 해양으로 흘러 들어가기도 한다.

[네이버 지식백과] 탄소순환 [Carbon Cycle] (기상학백과, 한국기상학회)

### 토양수분

- 토양수분이란 불포화된 토양에 포함되어 있는 수증기를 비롯한 수분의 총 양을 의미한다.
- 토양수분은 대기의 수분 공급원으로서 이 수분은 식물의 증산과 땅으로부터의 증발 즉 증발산을 통해 토양으로부터 대기로 전달된다. 증발산은 육지의 물 순환에서 가장 큰 부분을 차지하며, 육지 강수의 약 60%는 이 증발산 과정을 통해서 다시 대기로 전달된다. 또한 증발산은 에너지 전달 차원에서도 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 단위 질량(1g)의 물을 증발시키는 데 필요한 에너지는 동일한 양의 물을 1K 데우는 데 필요한 에너지의 약 600배이며 같은 질량의 공기를 1K 데우는 데 필요한 에너지의 약 2400배이다. 결과적으로 육지에서는 지면에 도달한 태양에너지의 절반 이상이 증발산에 사용되고 있다고 볼 수 있다.
- 토양수분은 식물의 증산과 광합성과의 관계를 통해 생물지구화학 순환 즉 탄소 및 질소 순환과 연결되는 중요한 요소이다.

[네이버 지식백과] 토양수분 [soil moisture] (기상학백과, 한국기상학회)

# 05. 기후 전망

5.1 장기예보

5.2 기후감시

# 5.1

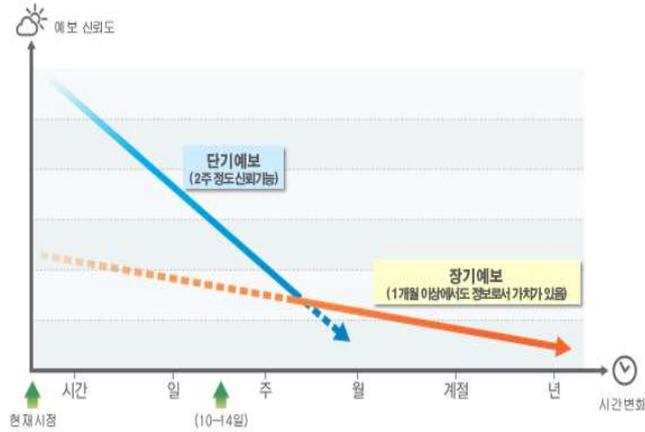
## 장기예보

### 장기예보는 단기예보와 어떻게 다르며, 상세한 예보를 발표할 수는 없을까?

기상청의 예보는 기간에 따라 6시간 이내의 초단기 예보, 3일 이내의 단기 예보, 10일 이내의 중기 예보, 11일 이상의 기간에 대한 장기예보와 기후전망 정보로 나눌 수 있다.

단기예보는 기온, 강수, 하늘 상태 등 12개 기상 요소의 3일 이내 예보를 3시간 간격으로 발표하는데 비해, 장기예보는 가까운 미래가 아닌 먼 미래의 날씨를 예상하는 것으로, 일정기간의 평균상태를 평년과 비교해 높음(많음)/비슷/낮음(적음)의 형태로 예보한다.

장기예보는 다양한 기후시스템의 복잡한 상호작용에 대한 불완전한 이해로 인해 단기예보에 비해 불확실성이 크므로, 발생 가능성에 대해 확률 정보를 제공한다.



<장기예보의 의의와 한계>

#### 기후예측

- 장기예보(1개월, 3개월 전망)와 기후전망을 포함한 포괄적인 의미이다.

예보 종류		내 용
초단기예보		기온, 강수, 낙뢰 등 기상 요소의 현재 상황부터 6시간 이내 예보를 1시간 간격으로 발표
단기(동네)예보		기온, 강수, 하늘 상태 등 12개 기상 요소의 3일 이내 예보를 3시간 간격으로 발표
중기예보		향후 10일까지의 날씨, 기온, 강수확률을 오전, 오후로 나누어(8~10일은 하루 단위) 매일 2회 발표
장기예보	1개월 전망	1개월 전망은 11일 이후부터 4주까지의 기온과 강수량을 주별로 나누어 매주 목요일 발표
	3개월 전망	3개월 전망은 다음 월부터 3개월 동안의 기온과 강수량을 월별로 나누어 매일 23일경 발표
기후전망	계절기후전망	계절 기후전망은 다음다음 계절의 기온, 강수량, 엘니뇨/라니냐 전망을 연 4회 발표
	연 기후전망	연 기후전망은 다음 해에 대한 기온, 강수량 전망을 1년에 한번 발표

#### 장기예보

- 일정기간의 평균상태를 평년과 비교해 높음(많음)/비슷/낮음(적음)의 형태로 예보

- 기상청은 1973년 6월부터 월간예보 서비스를 공식적으로 시작하였으며, 1999년 이전까지는 통계적인 방법으로 장기예보를 생산했으나, 이후부터는 전지구 역학모델을 운영하면서 기존의 통계모델과 함께 장기예보를 시행하고 있다.

**1개월 전망과 3개월 전망**

- 1개월 전망(one-month outlook)은 주별 평균기온과 강수량에 대해, 3개월 전망(three-month outlook)은 월별 평균기온과 강수량에 대해, 평년(1981~2010년)값과 비교해 3분위(평년보다 높을/많을 확률, 비슷할 확률, 낮을/적을 확률)로 구분해 발생 가능성을 확률로 발표한다.

**기후전망**

- 계절 기후전망은 다음다음 계절의 기온, 강수량, 엘니뇨/라니냐 전망을 연 4회 발표  
- 연 기후전망은 다음 해에 대한 기온, 강수량 전망을 1년에 한 번 발표한다.

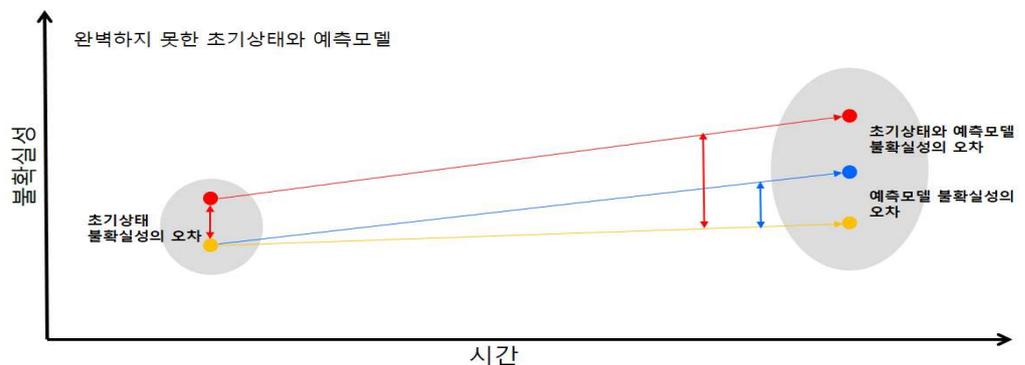
**확률장기예보**

- 장기예보를 확률로 나타낸 것으로 미래 날씨의 평균 상태(기후)를 단정적 예보 방법이 아니라 발생 가능성에 대한 확률로 예보하는 방법이다.



**기후예측의 불확실성과 한계**

- 미래에 발생할 이상기후 현상에 대한 정확한 예보는 오늘날 기후예측 기술의 급속한 발전에도 불구하고 사실상 불가능하다.  
- 이는, 기후예측은 모델 내에서 초기 상태의 작은 오차가 시간이 지남에 따라 기하급수적으로 커지기 때문이다.  
- 따라서 비교적 긴 시간 동안 대기와 상호 작용하는 해양, 해빙, 육빙, 지면상태 등을 고려하여 일정 기간 날씨의 평균상태를 예보하게 된다.



<초기자료와 모델의 불확실성>

**장기예보 운영**

- 장기예보와 기후전망에서 기온의 경우에는, 평년과의 편차(Anomaly)를 이용하여 [평년보다 높음, 비슷, 낮음]의 3분위에 대한 확률로 구분하고, 강수량의 경우에는, 퍼센타일(Percentile, %)을 이용하여 [평년보다 많음, 비슷, 적음]에 대한 확률로 구분하여 발표하고 있다.
- 평년에 대한 충분한 이해를 토대로 편차(anomaly) 분석을 진행해야 한다.
- 평균장이 대기의 흐름 자체를 보여주는 큰 값을 가지는 반면에, 편차(anomaly)는 평균장에 비해 값은 매우 작으나, 편차(anomaly) 패턴을 분석하여 예보한다.

**평년**

- 정해진 기간에 대해 표준으로 인식되는 기상요소의 평균값을 말한다. 기상청의 기후통계지침에 의하면 '평년값(Normals)'은 서기 연도의 끝자리 숫자가 1인 해부터 시작하여 연속된 30년간에 대해 산출한 누년평균값을 표준으로 한다. 다만 이용 가능한 자료가 30년 미만 10년 이상 되는 기간 평균값에 대해서도 평년값에 준하여 사용할 수 있다고 정의되어 있다.
- '기후표준평년값(Climatological Standard Normals)'은 고정된 30년간 관측한 기후학적 자료의 평균값으로 1931~1960년, 1961~1990년, 1991~2020년 등과 같이 고정된 30년간의 누년평균값을 말하며 30년마다 산출한다. 현재 기상청에서는 1981~2010년의 30년 평균값을 평년값으로 사용하고 있으나, 2021년이 되면 1991~2020년 자료로 바뀌게 된다.

요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균기온(°C)	-2.4	0.4	5.7	12.5	17.8	22.2	24.9	25.7	21.2	14.8	7.2	0.4
최고기온(°C)	1.5	4.7	10.4	17.8	23	27.1	28.6	29.6	25.8	19.8	11.6	4.3
최저기온(°C)	-5.9	-3.4	1.6	7.8	13.2	18.2	21.9	22.4	17.2	10.3	3.2	-3.2
강수량(mm)	20.8	25	47.2	64.5	105.9	133.2	394.7	364.2	169.3	51.8	52.5	21.5

<서울의 평년값(1981~2010)>

**편차**

- 주어진 변수에 특정 시점의 값에서 같은 기간 평년에 해당하는 값을 뺀 값으로 정의
- 장기예보에서 대부분의 변수는 편차(Anomaly)로 분석하거나 강수량의 경우는 평년 대비 비율(평년비, %)로 분석한다.

**퍼센타일 (percentile)**

- 일정 기간 내에 발생한 기상요소 값(기온, 강수량 등)을 오름차순으로 나열하여 100등분 하였을 때, 해당 값이 몇 번째인지를 나타내는 백분위수

**이상기후**

- 기온, 강수량 등의 기후요소가 평년(1981~2010년)에 비해 현저히 높거나 낮은 수치를 나타내는 극한 현상으로써, 90퍼센타일 초과 또는 10퍼센타일 미만 범위를 적용한다.



# 기후감시

## 5.2

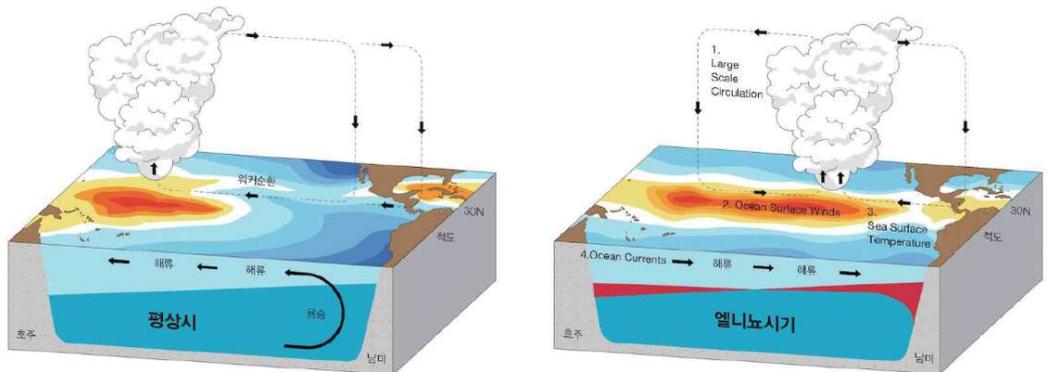
장기예보를 생산하기 위해서는 전 지구적으로 대기의 상황을 실시간으로 감시하고 분석하여 앞으로의 예측에 적용하는 것이 매우 중요하다.

### 기후감시요소

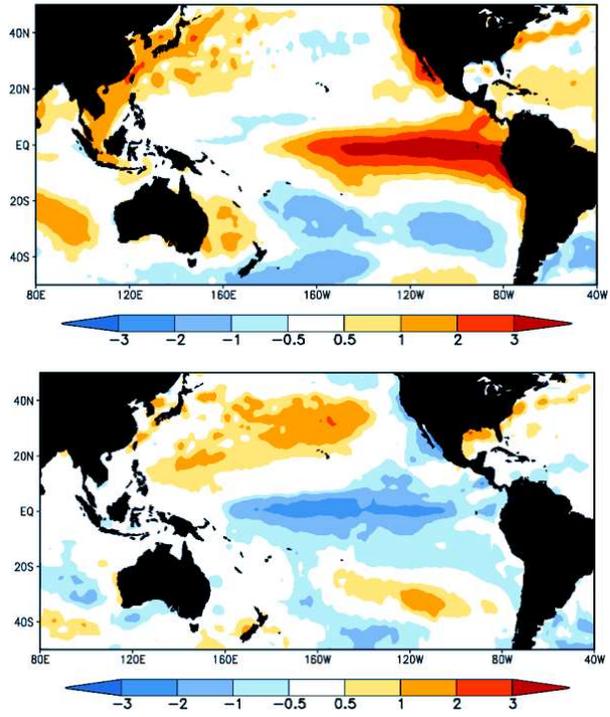
- 주요 감시 요소로는 대기 하층에서 상층에 이르기까지 고기압(기압능)과 저기압(기압골)의 이동 경향, 블로킹, 전 지구 해수면 온도, 북극 해빙, 유라시아지역 눈덮임 등이 있다.
- 이러한 감시 요소는 단기간 우리나라에 직접적인 영향을 주기도 하지만 대기순환에 의해 수주일~3개월 후에 영향을 주기도 한다.
- 이렇게 '특정 지역에 나타나는 기후 현상들이 수천 km 이상 멀리 떨어진 다른 지역의 기상과 서로 관련성을 가지는 기후 편차'를 원격상관이라고 한다.
- 원격상관에는 엘니뇨/라니냐, 북극진동(AO), 눈덮임, 해빙, 매든줄리안진동(MJO) 등이 있다.

### 엘니뇨와 라니냐

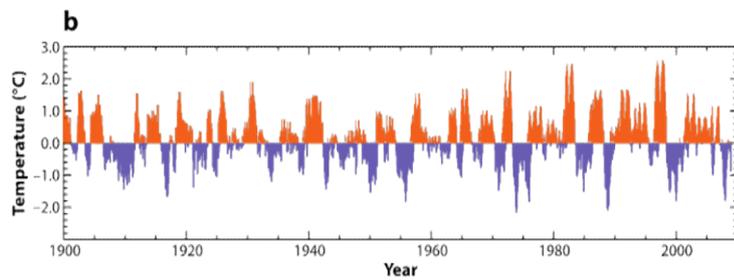
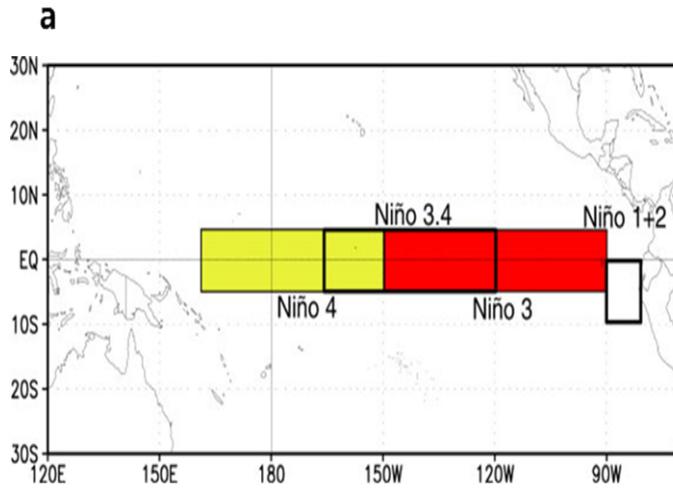
- 엘니뇨(EI Niño)/라니냐(La Niña)란 적도 동태평양의 해수면 온도가 평년에 비해 높아/낮아지는 현상으로, 기상청에서는 엘니뇨·라니냐 감시구역(열대 태평양 Nino3.4 지역: 5°S~5°N, 170°W~120°W)의 3개월 이동 평균한 해수면 온도의 평년편차가 +0.5°C 이상(-0.5°C 이하) 5개월 이상 지속 될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐)의 시작으로 본다.
- 이 특별한 해양 기후 현상은 호주 북부의 다윈 (Darwin)과 태평양의 타히티(Tahiti) 섬의 해면 기압과 함께 결합되어 변동하는데, 이 지역의 해면 기압의 주기적인 변화를 일컬어 남방진동 (Southern Oscillation)이라 한다.
- 엘니뇨-남방진동(EI Niño Southern Oscillation, ENSO)의 발생은 엘니뇨가 실제로 발생하는 열대 태평양지역에 국한되지 않고, 전 지구상의 거의 모든 지역의 기후를 바꿀 수 있을 정도의 큰 영향력을 가진다.



<정상시와 엘니뇨 시기 대기·해양 모식도>



<엘니뇨 해(위)와 라니냐(아래) 해의 해수면 온도 편차(°C)>



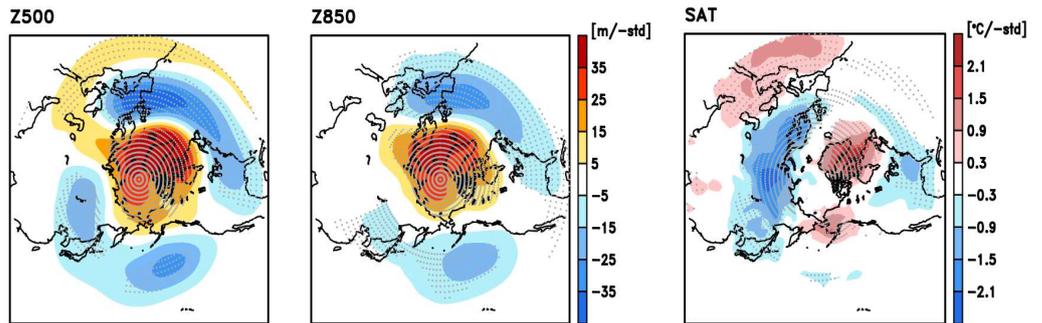
<Nino 지역(위), Nino 3.4 지역의 월평균 해수면 온도 아노말리 지수(아래)>

**북극진동(AO)**

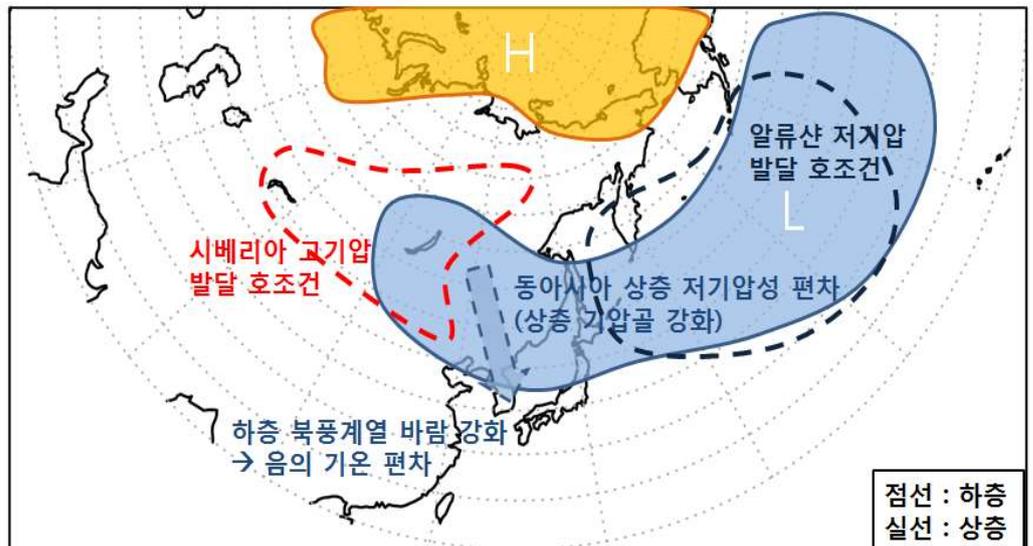
- 북극 주변을 돌고 있는 강한 소용돌이가 수십 일 또는 수십 년 주기로 강약을 되풀이하는 현상으로, 북반구 겨울철 기후를 지배하는 중요한 인자 중의 하나이다.

(Thompson and Wallace 1998).

- 양의 북극진동 : 동아시아 지역 상층 양의 고도 편차 → 동아시아 상층골 약화
  - 하층 시베리아고기압과 알류산 저기압 약화 → 한기 남하 약화
  - 우리나라에서 평년보다 높은 기온 유도
- 음의 북극진동 : 동아시아 지역 상층 음의 고도 편차 → 동아시아 상층골 강화
  - 하층 시베리아고기압과 알류산 저기압 강화 → 한기 남하 강화
  - 우리나라에서 평년보다 낮은 기온 유도



<음의 북극진동 시 북극해와 우리나라 주변 500hPa, 850hPa 지위고도, 지상기온(SAT) 패턴>



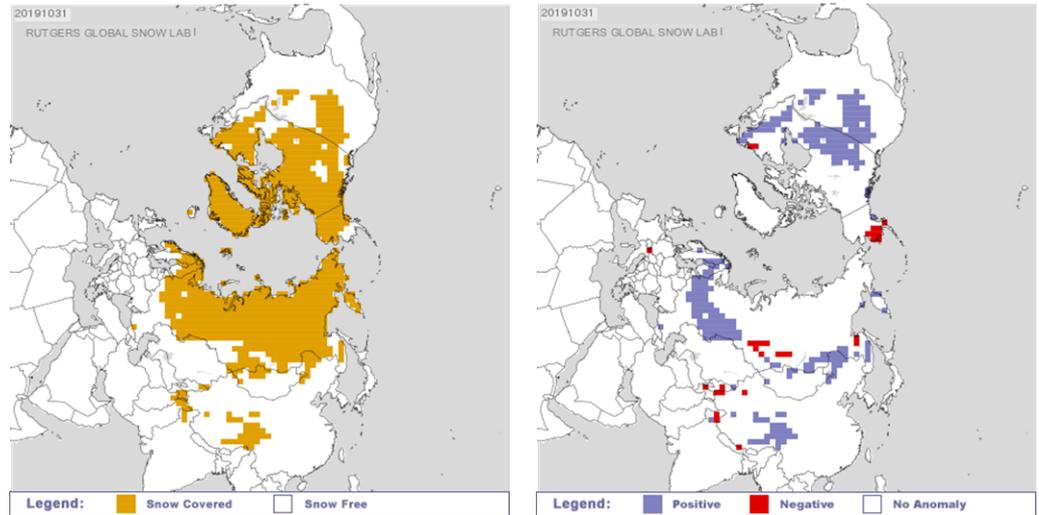
<음의 북극진동일 경우 동아시아 순환장과 한파 발생 모식도>

눈덮임

- 가을에서 겨울로 진행되면서 극 지역으로부터 중·고위도 지역으로 눈덮임이 확장되고, 봄에서 여름으로 갈수록 중위도에서 고위도로 가면서 눈덮임이 사라지는 seasonal cycle이 형성된다.

□ 가을~겨울철 기간의 감시 요인

가을에 유라시아 지역에서 평년보다 빠르게 눈이 덮이면 알베도 효과에 의해 태양에너지가 흡수되지 못하고 방출 효과가 커져, 대륙이 빠르게 냉각되면서 대륙 고기압이 발달하여 우리나라에 영향을 주므로, 가을의 눈덮임 감시가 매우 중요하다.

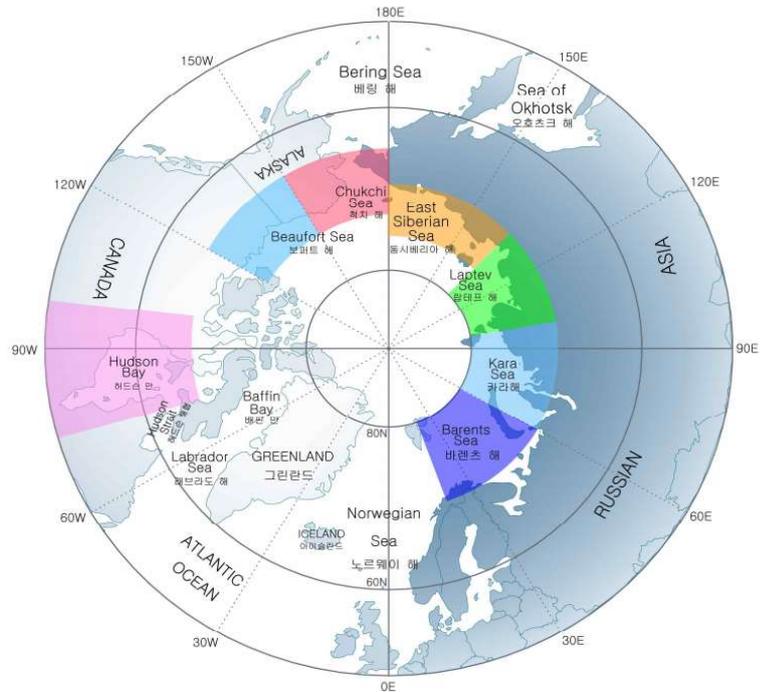


<눈덮임(왼쪽)과 눈덮임 편차(오른쪽) 감시자료 예시>

[출처: Rutgers 대학]

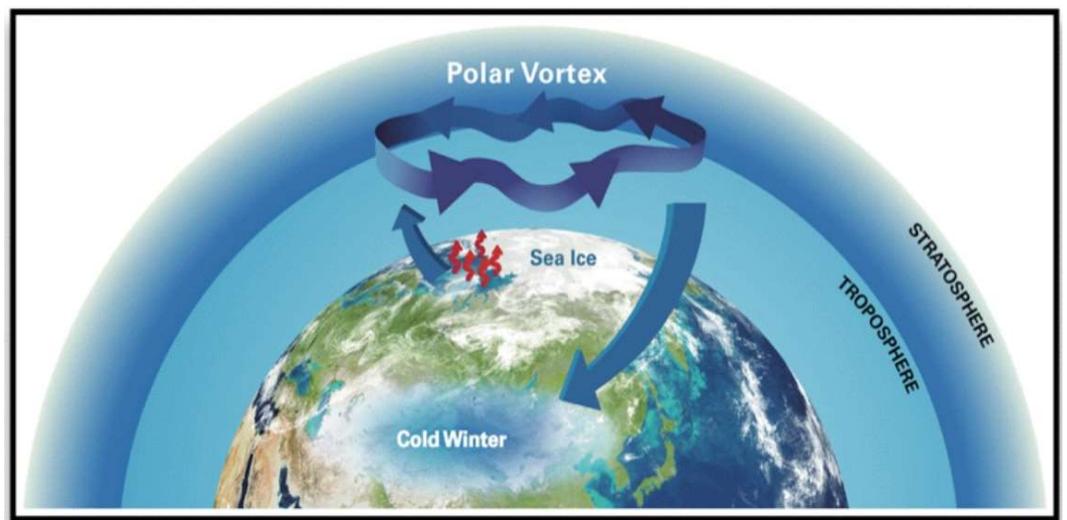
**북극해빙**

- 가을~겨울철 북극 해빙이 평년보다 적으면 북극 주변의 찬 소용돌이가 약해져 북극의 찬 공기가 중위도 지역으로 남하할 가능성이 증가한다.
- 카라해(Kara Sea)와 바렌츠해(Barents Sea) 해빙이 적은 경우 우랄산맥 부근에서 기압능이나 저지고기압이 발달하면서 동아시아 한파 유도
- 척치해(Chukchi Sea) 해빙이 적은 경우 배랑해 부근 기압능이나 저지고기압이 발달하면서 북미 중동부에 한파 유도



<북극해 지도 >

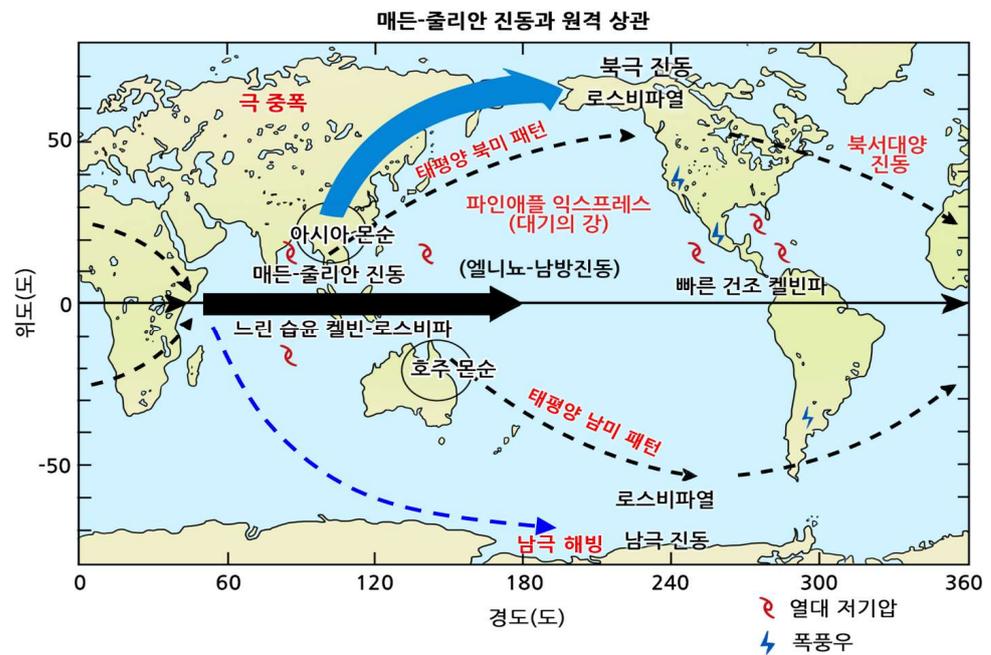
[출처 : 국립기상과학원]



<북극 해빙의 감소에 따른 따뜻한 북극, 추운 대륙(Warm Arctic & Cold Continents) 메커니즘 모식도(Kim et al. 2014)>

**매든-줄리안(MJO)**

- 1971년 미국 국가대기연구센터(NCAR)의 Roland Madden과 Paul Julian은 중앙태평양의 Canton 섬에서의 바람 관측을 통해 처음으로 하층의 동서 바람이 약 40일의 주기로 진동하고 있음을 밝혀냈다.
- 이들의 이름을 딴 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)은 열대지역에서 발생하는 바람 및 대류 구름의 집합체가 30일에서 70일 (또는 30일에서 90일)정도의 주기로 진동하는 현상으로 계절 내 변동 중 30~50 % 정도를 차지하는 중요한 대기의 물리모드이다.
- MJO는 대규모 대기 순환과 심층 대류(Deep Convection)가 결합된 시스템이며 인도양에서 중앙 태평양으로 느리게 동진하는 특성을 가진다.
- 또한 열대에서 발생하는 MJO는 강수와 바람을 동반하며 이동하기 때문에 적도 지역의 날씨·기후에 직접적으로 영향을 준다.
- 뿐만 아니라 강수 현상 시 발생하는 응결 잠열의 방출을 통한 대기에서의 로스비 파동(Rossby wave)으로 원격상관(teleconnection)을 야기하여 훨씬 멀리 떨어져 있는 중·고위도지역의 날씨·기후에도 영향을 준다.



<MJO와 원격상관의 도식화(서경환 등, 기후역학교과서, 2017)>

# 06. 기후변화 전망

6.1 기후변화 시나리오

6.2 전지구 및 한반도  
기후변화 전망

# 6.1

## 기후변화 시나리오

### 50년, 100년 후에 우리나라 기후는 어떨까?

미래에 한반도 지역의 온대 기후가 아열대 기후로 바뀐다는 말이 사실일까?  
 모든 이가 공감하듯이 제주감귤, 대구사과가 다른 지역을 대표하는 작물로 바뀌는 걸까?  
 이러한 막연한 의문과 불안감을 해소하고 우리가 어떻게 미래를 준비해야 하는지에 대한 해답을 제시하고자 전세계의 석학들이 기후변화 시나리오를 만들었다. 기후변화 시나리오란 온실가스, 에어로졸의 변화 등 인위적인 원인에 따른 기후변화를 조사하기 위해 기후변화 모델을 이용하여 계산한 미래 기후(기온, 강수, 습도, 바람 등) 전망정보이다. 이는 기후변화로 인한 미래의 영향을 평가하고 피해를 최소화 하는데 활용할 수 있는 선제적 정보로 자리매김 하고 있다.



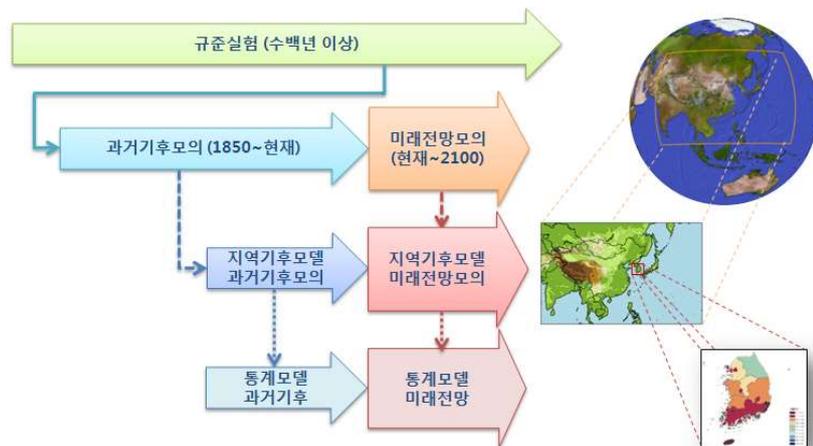
#### 기후변화 시나리오 연관어

- 온실가스 배출 시나리오
- 대표농도경로(RCP)
- 공통사회경제경로(SSP)

### 기후변화 시나리오

- 기후강제력(온실가스 배출량의 변화, 토지이용의 변화, 에어로졸 배출량의 변화 등)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 말한다.
- 이를 전망하기 위하여, 미래 온실가스 농도와 기후시스템을 수치화한 기후변화예측모델(지구시스템모델)을 이용하여 계산한 미래기후(기온, 강수, 습도, 바람 등)에 대한 정보이다.
- 이는 미래 기후변화로 인한 영향을 평가하고 피해를 최소화하는데 활용할 수 있는 선제적인 정보라고 할 수 있다.

※ 기후강제력: 기후시스템에 영향을 미쳐 기후변화를 야기하는 모든 요인들



<기후변화 시나리오(RCP) 생산과정 모식도>

## 기후변화 시나리오 종류

- SRES** - Special Report on Emission Scenarios, 배출시나리오에 관한 특별보고서
- IPCC 3차 평가보고서(2001)에 사용된 미래 배출 시나리오로 예상되는 이산화탄소 배출양에 따라 A1B, A2, B1 등 6개의 시나리오가 있다.

- RCP** - Representative Concentration Pathways, 대표농도경로
- IPCC 5차 평가보고서(2013)에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였다. 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 포함하고 있다.
  - RCP 시나리오는 총 4종(RCP 8.5/6.0/4.5/2.6)으로 나뉘며 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도(온실가스로 인한 추가적인 지구흡수에너지양)를 의미한다.

※ RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당됨

종 류	시나리오 설명	2100년 기준 CO <sub>2</sub> 농도(ppm)
RCP2.6	지금부터 즉시 온실가스 감축 수행	420
RCP4.5	온실가스 감축 정책이 상당히 실현되는 경우	540
RCP6.0	온실가스 감축 정책이 어느 정도 실현되는 경우	670
RCP8.5	현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우	940

<RCP 시나리오별 설명 및 2100년 기준 CO<sub>2</sub> 농도>

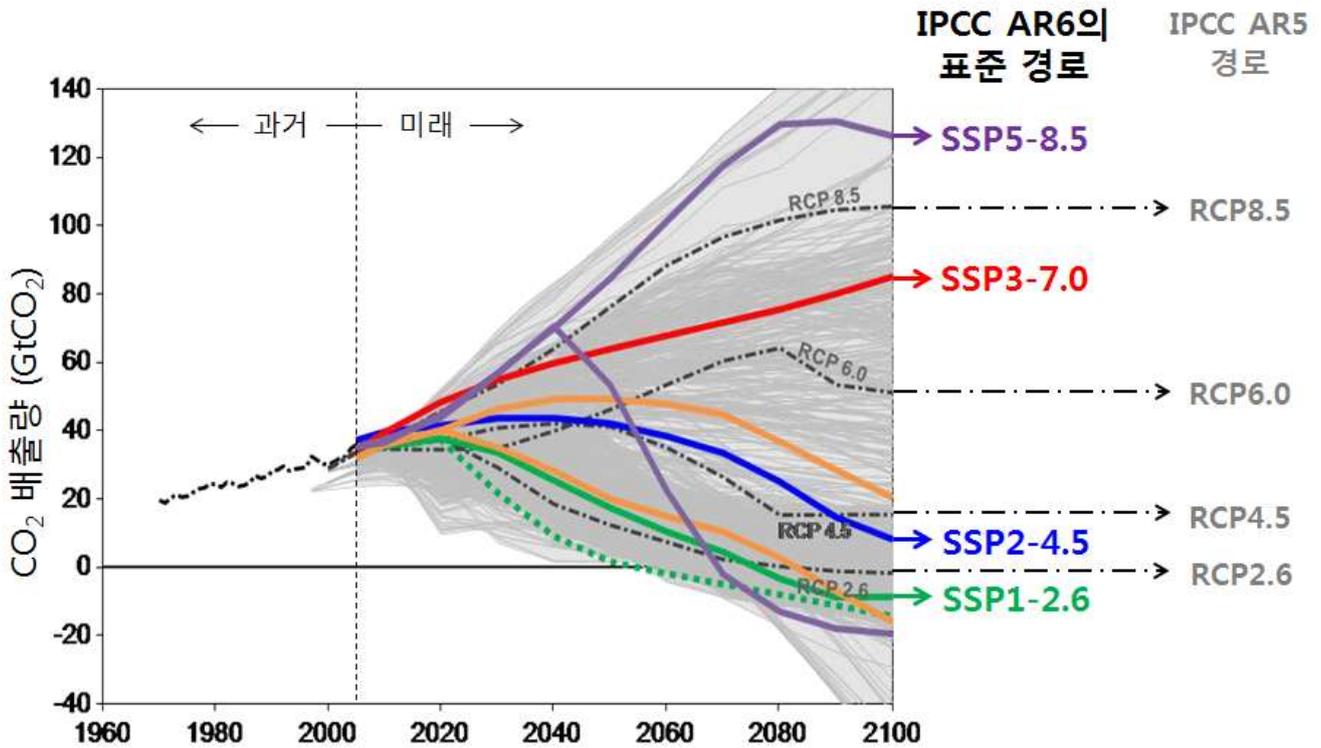
SSP

- Shared Socioeconomic Pathways, 공통사회경제경로
- IPCC가 발간예정인(2021년) 6차 평가보고서 작성을 위해 각 국의 기후변화 예측모델로 온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응대책 수행 여부 등에 따라 미래 상회경제 구조가 어떻게 달라질 것인지 고려한 시나리오이다.
- 2100년 기준 복사강제력 강도(기존 RCP 개념)와 함께 미래 사회경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구별(O'Neil et al. 2014)되며 인구통계, 경제발달, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도, 기술발달, 사회적 인자, 정책을 고려한다.



<기후변화 적응 및 완화 노력에 따른 공통사회경제경로(SSP)의 구분>

종 류	의 미
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 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우



<과거(1970~2014) 및 미래(2015~2100)의 온실가스 배출 경로>

※ IPCC 6차평가보고서의 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 4종임. 그 외에 표기되지 않은 선들은 표준 외에 가능한 배출 경로들을 나타내며 가능한 배출 경로들의 전체 범위를 회색 음영으로 표기함. 과거 IPCC 5차평가보고서는 회색 파선의 4개 RCP 시나리오 (RCP2.6/4.5/6.0/8.5)를 사용함.

# 6.2

# 전지구 및 한반도 기후변화 전망

## 전지구 기후변화 전망

- 온실가스 농도 증가에 따라 전지구 평균기온은 상승할 것으로 전망되며, 기온의 상승은 RCP2.6 시나리오의 경우 21세기 중·후반대에서부터 일정한 상태로 유지되는 경향을 보이며, RCP4.5 시나리오에서는 지속적으로 상승하다가 2070년대 이후 일정한 상태로 유지되는 경향을 보인다. RCP6.0과 RCP8.5 시나리오는 2100년까지 지속적으로 증가하며, RCP8.5 시나리오의 상승폭이 모든 시나리오 중 가장 크게 나타날 것으로 전망된다.

## 한반도 기후변화 전망

- 한반도의 미래 기온은 지난 30년간(1981-2010년)의 관측자료에서 나타나는 온난화 경향이 지속될 것으로 전망한다.
  - ▶ RCP2.6 시나리오에서는 한반도 연평균기온이 현재 대비 21세기 중반기는 1.8℃ 상승할 것으로 전망되며, 중반기 이후 온실가스 농도가 안정됨에 따라 기온이 더 이상 상승하지 않고 유지될 것으로 전망
  - ▶ RCP8.5 시나리오에서는 현재 대비 21세기 후반기에 4.7℃ 상승할 것으로 전망하며, 온난화가 점차 가속화되어 기온 상승폭이 클 것으로 전망
- 연강수량의 경우 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 전반기를 제외한 4종의 시나리오 모든 기간에서 증가할 것으로 전망된다.
- 한반도의 온난화 전망에 따라 폭염일수, 열대야일수, 여름일수와 같은 고온 관련 극한현상은 증가하고, 한파일수, 결빙일수, 서리일수와 같은 저온관련 현상은 감소할 것으로 전망된다.

종 류	기온		강수량		2100년 기준 CO <sub>2</sub> 농도
	전지구	한반도	전지구	한반도	
RCP2.6	+1.3 °C	+1.8 °C	+2.4 %	+5.5 %	420 ppm
RCP4.5	+2.4 °C	+2.9 °C	+4.0 %	+3.3 %	540 ppm
RCP6.0	+2.7 °C	+3.0 °C	+3.6 %	+6.8 %	670 ppm
RCP8.5	+4.0 °C	+4.7 °C	+4.5 %	+13.1 %	940 ppm

<전지구 및 한반도의 21세기 후반기 연평균기온 편차, 연강수량 편차비 전망>

RCP2.6



RCP4.5



RCP6.0



RCP8.5



<RCP 시나리오에 따른 21세기 한반도의 기온 및 강수량 전망>

[출처: 한반도 기후변화 전망분석서(기상청, 2018)]

# 07. 기후변화 영향

7.1 기후변화 영향

7.2 기후변화 응용정보

# 7.1

## 기후변화 영향

기후변화로 인한 영향은 많은 부분에서 이미 명백하게 나타나고 있다.

기후변화는 이미 사회와 대기, 해양, 빙권, 생태계 등 자연계에 영향을 미치고 있다. 이러한 영향은 점차 감소되거나 심화되는 방식으로 다른 환경적 그리고 사회적 요인들과 상호작용을 한다. 영향의 유형과 크기는 전국적으로 그리고 어떤 기간에 걸쳐 변한다.

우리가 생활 속에서 직접 체감하는 것으로 기후변화로 인한 폭염, 호우, 한파 등 기상현상일 것이다. 이러한 변화에 지속적인 관심을 가져야 우리 미래의 삶이 더 지혜로워질 것이다.

### 기후변화가 기상현상에 미치는 영향(극한기후)

- 기후변화 영향이란 자연적이거나 인공적인 원인으로 발생한 기후의 변화가 자연과 사회 시스템에 미치는 영향을 말한다.
- 통계적으로 상위 또는 하위 5%에 해당하는 기후요소에서 나타나는 현상을 의미하며, 전문가들은 그 원인을 자연변동성(엘니뇨 등)과 지구온난화로 보기도 한다.
- 21세기에 들어 극한기후현상이 더 강해지고 빈번히 발생하며 보다 광범위하게 나타나고 있다고 밝힌 바 있다(IPCC, 2013). 앞으로 경제발전과 우리의 지속가능한 삶은 극한기후현상에 관련된 위험을 다루는 우리의 능력에 달려 있다고 할 수 있다.
- 한반도의 온난화 전망에 따라 폭염일수, 열대야일수, 여름일수와 같은 고온 관련 극한지수는 증가하고, 반면에 한파일수, 결빙일수, 서리일수와 같은 저온 관련 극한지수는 감소할 것으로 전망된다.

※ 이상기후 : 기온, 강수량 등의 기후요소가 평년값에 비해 현저히 높거나 낮은 수치를 나타내는 극한 현상



<가뭄>

<홍수>

<폭염>

<한파>

### 가뭄

- 어느 지역에서 일정기간 이상 평균 이하의 강수로 인해 강수량 부족이 장기화되는 현상으로 판단 기준에 의해 기상학적·수문학적·농업적·사회경제학적 가뭄으로 분류한다.
  - (기상학적 가뭄) 일정기간 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 농업·공업·활용수 등의 부족이 지속되는 것

**집중호우**

- 짧은 시간 내에 많은 비가 오는 현상으로 일반적으로 한 시간에 30mm 이상이나 하루에 80mm 이상의 비가 내릴 때, 또는 연강수량의 10%에 상당하는 비가 하루에 내리는 정도를 말함. 지역의 기후에 따라 기준이 달라진다.

**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 피해발생이 예상될 때 '폭염주의보(경보)'를 발표한다.

**극한기후지수**

- 극한기후는 폭염, 한파, 홍수 등 사회에 심각한 영향을 미친다. 극한기후지수는 극한기후를 정량적으로 파악하기 위해 세계기상기구 기준을 반영한 지수로서 열대야일수, 폭염일수, 호우일수 등이 있다.

종 류	극한기후지수별 정의	
기온 관련 극한기후지수 (16종)	폭염일수	일최고기온 33℃ 이상인 날의 연중 일수
	한파일수	일최저기온 -12℃ 이하인 날의 연중 일수
	서리일수	일최저기온이 0℃ 미만인 날의 연중 일수
	결빙일수	일최고기온이 0℃ 미만인 날의 연중 일수
	여름일수	일최고기온이 25℃ 이상인 날의 연중 일수
	열대야일수	일최저기온이 25℃ 이상인 날의 연중 일수
	식물성장기간	일평균기온이 5℃ 보다 높은 날이 6일 이상 지속된 첫 날부터 5℃ 미만인 날이 6일 이상 지속된 첫 날까지 사이의 연중 일수
	일교차	일최고기온과 일최저기온 차이값의 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 기준기간 10퍼센타일 미만인 날의 연중 일수
	한랭야계속기간	일최저기온이 기준기간의 10퍼센타일 미만인 날이 최소 6일 이상 지속된 날의 연중 일수
	최대한랭야계속기간	일최저기온이 기준기간의 10퍼센타일 미만인 날의 연중 최대지속일수
강수 관련 극한기후지수 (4종)	호우일수	일강수량이 80mm 이상인 날의 연중일수
	강수강도	연중 습윤일수(일강수량이 1.0mm이상인 날)로 나누어진 연 총강수량
	5일 최다강수량	연중 5일 연속으로 내린 강수량 중 최대값
	최대무강수지속기간	연중 일강수량이 1mm 미만인 날의 최대 지속일수

**기후구분의 변화  
(자연계절 길이 변화)**

- 기후변화로 인한 한반도의 기후변화 양상은 겨울이 짧아지고 여름이 길어지고 있으며, 봄의 출현시기가 빨라지고 있다.
- 서울의 최근 10년간 여름 계절길이가 126일로 증가하였으며, 온실가스 저감 노력이 없다면 2100년 쯤 여름이 168일로 증가하고, 겨울이 67일로 감소할 것으로 전망한다.

※ 자연계절 길이

- (봄) 일평균 기온이 5°C 이상으로 올라간 후 다시 떨어지지 않은 첫날
- (여름) 일평균 기온이 20°C 이상으로 올라간 후 다시 떨어지지 않은 첫날
- (가을) 일평균 기온이 20°C 미만으로 내려간 후 다시 올라가지 않은 첫날
- (겨울) 일평균 기온이 5°C 미만으로 내려간 후 다시 올라가지 않은 첫날



<우리나라 자연 계절길이 변화 양상>

기후구분의 변화  
(한반도 아열대화)

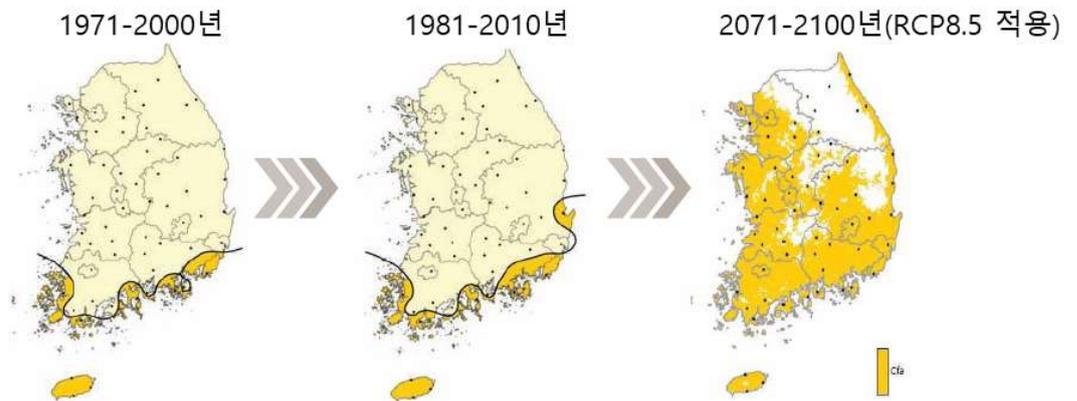
- 아열대 기후: 기후 구분 기준에 따라 정의가 달라지나, 열대와 유사한 여름철 기후 특성을 보이며, 겨울철이 비교적 온난하고, 위도 30°를 중심으로 분포함. 열대와 온대의 중간에 위치하는 기후대로 통칭된다. 아열대 기후를 분류하고 있는 대표적인 기후 구분법에는 쾨펜(Köppen), 트레와다(Trewartha), 크루츠버그(Creutzburg) 등이 있으나, 그 기준은 크게 다르다.

(쾨펜) 최한월 평균기온이 -3~18°C이며, 최한월 평균기온이 10°C 이상인 지역으로 분류되며, 중위도의 많은 지역에서 아열대 기후가 나타남.

(트레와다) 최한월 평균기온이 18°C 이하이며, 월평균기온이 10°C 이상인 월이 8개월 이상인 지역으로 분류되며, 전세계 식생대를 가장 잘 반영한 기후 구분임.

(크루츠버그) 월평균기온이 6°C 이하인 월이 없고, 20°C 이상인 월이 2개월 이상일 때 아열대 기후로 분류

- 트레와다의 기후 구분 방법에 따르면, 1971~2000년과 1981~2010년의 평균값을 비교한 결과 아열대 기후지역이 소폭 확장



< 트레와다 기준을 적용한 아열대 기후지역의 분포 변화 경향 및 전망 >

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

# 7.2

## 기후변화 응용정보

기후가 미치는 영향을 살펴볼 지표가 그 지역의 평균적인 날씨밖에 없는 것일까?

기후는 농업, 보건, 에너지 분야 등 다양한 분야에 영향을 미치고 있다. 막연하게 각 분야에서 기후의 영향을 받고 있다는 생각에서 벗어나 정량화 된 지표가 요구되기 시작했다. 이에 각 분야에서 좀 더 효율적으로 활용할 수 있을지를 고민하게 되었고, 여러 종류의 기후응용정보를 생산하였다. 사람의 건강에 영향을 미치는 정도를 가늠할 수 있는 열지수와 불쾌지수, 작물생육 정도를 가늠할 수 있는 유효적산온도와 생육온도일수 등이 그것이다. 이러한 기후응용정보는 기후정보를 다양한 분야의 정보와 접목시켜 수요자들이 편리하게 사용할 수 있게 했다는 점에서 그 의미가 크다.



**기후응용정보** **연관어**

- 유효적산온도
- 생육온도일수
- 열지수
- 최저기온지수
- 유효강우지수

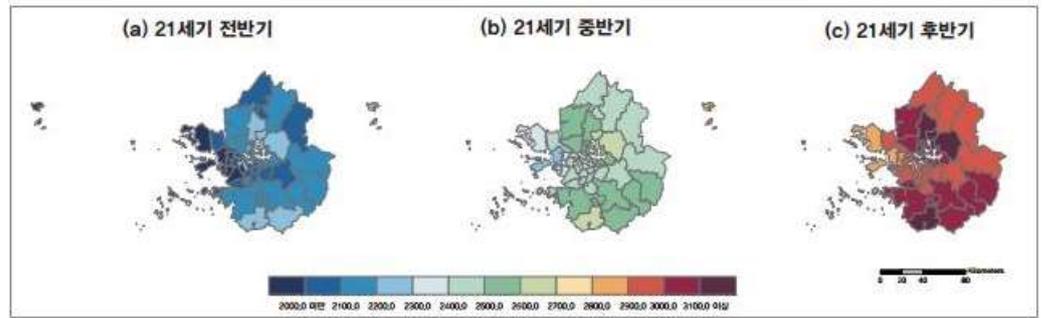
### 기후변화 응용정보

- 기후변화 시나리오 기반의 부문별(농업, 방재, 보건, 수자원, 산림, 동물생태) 기후변화 영향 및 취약성 평가 등에 손쉽게 활용할 수 있는 맞춤형 미래 전망정보이다.

구 분	수자원	보 건	농 업	재 해	산 림	동물생태
대상 시나리오	RCP 4종					
생산요소	중권역별 강수량 유출량 잠재증발산량 유형분석정보	열지수, 불쾌지수, 체감온도(AT), 체감추위지수, 열체감지수, Net Effective Temperature(NET), 열사병발생위험지수, 온열지수(WBGT)	생육온도일수, 유효적산온도, 식물기간, 작물기간, 무상기간, 작물 저온요구도, 온습도지수, 기후생산력지수, 난방도일, 냉방도일, 기준증발산량, 염면수분지속기간	표준강수지수(SPI), 독립호우사상	최저기온지수, 유효강우지수, 건조강도지수	물서류월동 환경지수, 기후변화 심각도지수, 강우열량지수
기간	2000~2100년	1950~2005년 2013~2100년	1971~2100년 2011~2100년	2012~2100년	2011~2100년	2011~2100년
시간 해상도	일/월	월	순(10년 평균)	월	연	연
공간 해상도	중권역(104개), 73개 지점	230개 시군구	230개 시군구, 격자 (12.5km / 1km)	73개 지점	230개 시군구	230개 시군구

**유효적산온도**

- 작물의 생육에 필요한 열량을 나타내기 위한 것으로 일평균기온에서 생육한계온도 (5℃, 10℃, 15℃ 기준)를 뺀 값을 합한 것이다.



<RCP8.5 유효적산온도 분포표(℃)>

**생육온도일수**

- 작물별 기본온도와 일평균온도의 차를 생육기간 동안 합한 값이다(작물의 재배적지 및 품종 선택 지표).

**열지수**

- 건구온도와 상대습도를 이용하여, 일사병, 열경련 등 열적 스트레스의 위험도를 나타낸 지수 (6~9월).

**최저기온지수**

- 최한월 평균 최저기온을 이용하여 식생의 내한성(Cold resistance)을 표현하는 지표
- Neilson(1995)에 따르면 최한월 평균 최저기온은 산림의 생육과 분포, 성장 등과 매우 밀접한 연관이 있는 것으로 밝혀졌다.
- 예를 들어, 최한월 평균 최저기온이 18℃ 이상인 경우 상록활엽수가 존재할 가능성이 높고, -15℃ 이하인 경우 상록침엽수가 존재할 가능성이 높다.
- 월 평균 최저기온이 약 1.5℃인 곳에서는 낙엽활엽수가 존재할 가능성이 높다. (Neilson, 1995)

**유효강우지수**

- 유효강우지수(PEI)는 강수량과 기온의 혼합지수로 Thornthwaite(1948)에 의해 개발되었다.
- 월 강수증발산비율(PE ratio)로부터 도출된 유효강우지수는 식물의 성장과 분포 등과 관계가 있는 것으로 보고되었다.
- 수량에 의한 분포 변화의 측면에서 전 세계적으로 활용되고 있는 대표적인 산림 지수에 해당한다.

## 참고 문헌

1. 기상청 2018 : 한반도 기후변화 전망분석서
2. 기상청 2015 : 오존층에 관한 질문과 답변 20가지 : 2014년판
3. 기상청 2017 : 장기예보 업무 편람
4. 기상청 2020 : 2019 지구대기감시 보고서
5. 기상청 2015 : 전지구기후서비스체제 이행을 위한 국내 기후정보 개발 및 서비스 개선 연구
6. 국립기상과학원 2019 : 전지구 기후변화 전망보고서
7. 국립기상과학원 2018 : 한반도 100년의 기후변화
8. 국가기상위성센터 2019 : 2019년 하반기 북극해빙 분석보고서
9. IPCC 2019 : 기후변화와 토지
10. IPCC 2019 : 변화하는 기후에서의 해양와 빙권
11. IPCC 2014 : IPCC 제5차 평가 종합보고서
12. WMO 2019 : 온실가스 연보 No.15
13. WMO 2020 : 2019년 전지구 기후 현황 No.1248
14. 국립수산과학원 2019 : 수산분야 기후변화 평가 백서
15. 네이버 지식백과, 기상백과, 지질학백과
16. 윌리엄 F. 러디먼 2015 : 지구의 기후변화 과거와 미래
17. Global Carbon Budget 2019 : Earth System Science Data

## 관련 홈페이지

- 기상청 홈페이지 : <http://www.kma.go.kr>  
기후정보포털 : <http://www.climate.go.kr>  
WMO 홈페이지 : <http://www.wmo.int>  
IPCC 홈페이지 : <http://www.ipcc.ch>  
NOAA 홈페이지 : <http://www.climate.gov>  
북극해빙감시시스템 : <http://seaice.kma.go.kr>  
미국 빙권자료센터 : [https://nsidc.org/data/seaice\\_index/compare\\_trends](https://nsidc.org/data/seaice_index/compare_trends)

## 기후변화과학 용어 설명집

---

발행일 : 2020년 11월

자문 : 한국기상학회

발행처 : 기후변화감시과  
서울특별시 동작구 여의대방로16길 61번지

홈페이지 : <http://www.climate.go.kr>

등록번호 : 11-1360000-001468-13

---