

# 환경경제학

Lecture – 14

Seungho Jeon

# Chapter 21

## 전 지구적 차원의 환경문제

환경학  
환경학  
환경학  
환경학



# **Section 1. 환경문제에 관한 국제협력의 어려움**



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- 현대 환경문제에서는 미세먼지나 산성비 같은 오염피해가 몇 개의 국가에 걸쳐 나타나는 월경오염물질, 그리고 온실가스와 같은 전 지구적 오염물질의 중요성이 갈수록 커지고 있다.
  - ✓ 전 지구적 오염물질은 여타 오염물질과는 달리 일단 배출되면 지구 전체의 환경오염을 유발하는 인류 공동의 문제가 되기 때문에 국제협력이 필요하다.
- 전 지구적 오염은 인류 역사상 비교적 최근에 발생하는 현상이어서 피해 규모가 불확실하다.
- 오염물질의 저감비용을 분담하는데 있어 국가 간 형평성 문제가 있다.
- 각국은 자국의 이익을 먼저 생각하므로 오염물질 관리에 있어 무임승차 문제가 있다. (Ch.4 무임승차 내용 참고)
- 무임승차 문제가 발생하는 것을 방지하고자, 국제기구나 당사국들은 국제환경협약을 체결하여 국제적 환경문제를 해결하고자 한다.
  - ✓ 협약의 목적은 각국을 협조적으로 행동하도록 유도하여 공동의 환경문제를 해결하는 것이다.
  - ✓ 하지만 협약체결이 반드시 각국의 태도를 협조적으로 변하게 하는 것은 아니다.



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- Ch. 5에서 살펴보았듯이, 아래와 같이 용의자의 딜레마라는 현상이 나타난다.
  - ✓ 각 셀의 첫 번째 숫자는 A국의 이득을, 두 번째 숫자는 B국의 이득을 나타낸다.
  - ✓ 두 국가가 서로 협조하고 오염물질을 관리하는 것이 두 국가 후생의 합을 극대화 한다.
  - ✓ 하지만 상대방이 어떤 선택을 하든 자신은 비협조를 선택하는 것이 더 낫기 때문에 결국 두 국가 모두 비협조를 선택하게 되어, 두 국가 모두 손해를 보게 되는 결과가 나타난다.

		국가 B	
		협조	비협조
국가 A	협조	1, 1	-1, 2
	비협조	2, -1	0, 0

- 위의 표는 단순한 예이지만 환경문제를 국제적 협조체제 기반으로 해결하는 것이 어렵다는 점을 보여준다.
- 예를 들어 A국이 B국의 협조를 끌어내기 위해 자신은 어떤 일이 있어도 협조할 것이라고 공언한다고 해보자.
  - ✓ 그러나 그 공언은 신뢰를 얻지 못한다, 왜냐하면 막상 B가 협조하면 A는 본인도 협조하여 1을 얻기보다는 협조하지 않고, 2를 얻어가려고 하기 때문이다.
  - ✓ 협조행위를 도출해내는 한 가지 방법은 비협조적 행위를 할 때 제재를 하는 것이다.

## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- 이제 비협조를 선택하는 나라는 상대국에게 2만큼의 벌금을 지급해야 한다고 합의했다고 해보자. (아래 표 참고)
  - ✓ 아래의 상황에서는 상대방이 어떤 행위를 하든 협조를 선택하는 것이 더 나으므로 둘 다 협조를 선택한다.
  - ✓ 그러나 두 국가 사이의 이러한 합의는 구속력을 갖기 어렵다. 왜냐하면 협약 위반자를 색출하고 또 제재할 수 있는 강력한 국제기구가 존재하지 않아서, 합의를 위반한 국가로부터 실제로 벌금을 받아내기 어렵기 때문이다.

		국가 B	
		협조	비협조
국가 A	협조	1, 1	1, 0
	비협조	0, 1	0, 0

- 대상국가가 많은 경우를 생각해보면 국제협약을 가입 및 유지하는 것은 더더욱 어렵다는 것을 알 수 있다.
- 결국 협약 자체가 협약 내용을 지키도록 하게끔 동기를 부여하는 속성을 가지고 있어야 한다.



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- 이제  $N$ 개의 국가가 있고, 이 중  $M$ 개의 국가가 국제협약에 가입하고 나머지  $N - M$ 개의 국가는 가입하지 않는다고 하자.
  - ✓ 국가들은 모두 동질적이고, 협약에 가입하는지 안 하는지의 차이만 있을 뿐, 다른 조건은 같다고 하자.
  - ✓ 협약에 가입하지 않는 국가의 저감량을  $a_n$ 이라 하고, 협약에 가입한 국가의 저감량을  $a_c$ 라 하자.
  - ✓ 이 국가들은 두 가지에 대해 의사결정을 해야 한다.
    - 첫째, 저감량을 결정해야 한다.
    - 둘째, 협약에 가입할지 결정해야 한다.
- 각국의 저감비용은  $C(a)$ 이고, 저감편익은  $B(A)$ 이며,  $A = \sum_{i=1}^N a_i$  이라 하자.
  - ✓ 즉 각국은 자국 저감비용만 부담하지만, 배출저감의 편익은 다른 국가의 저감량에 의해서도 영향을 받는다.
  - ✓ 어떤 국가가 협약에 가입하지 않았다면, 이 국가는 자국의 이익만을 극대화하며, 따라서  $B(A) - C(a_n)$ 를 극대화하는  $a_n$ 을 선택한다.
  - ✓ 또 다른 국가는 협약에 가입했다면, 이 국가는 자신을 포함하는 가입국 전체의 이득을 극대화하는 선택을 해야 하므로  $M \times B(A) - C(a_c)$ 를 극대화하는 저감량  $a_c$ 를 결정해야 한다.
  - ✓ 여기서 함수의 형태를  $B(A) = bA$ ,  $C(a) = \frac{ca^2}{2}$  이라고 가정해보자. (여기서,  $b > 0$ ,  $c > 0$ )
  - ✓ (뒷장 계속 >>)



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- ✓ (뒷장에 이어 계속)
- ✓ 이 때 이익 극대화를 위해 협약에 가입하지 않은 국가는  $a_n = \frac{b}{c}$ , 한편 협약에 가입한 국가는  $a_c = \frac{Mb}{c}$ 에서 저감량을 선택한다.

➤  $A = \sum_{i=1}^N a_i$ ,  $B(A) = bA$ ,  $C(a) = \frac{ca^2}{2}$ 으로 주어져 있을 때,  $B(A) - C(a_n)$ 과  $M \times B(A) - C(a_c)$  두개의 각 식을 최대화 해주는 각각의  $a$ 를 구해보면 위의 결과를 얻게 되니, 직접 확인 해보길 바란다.

- ✓ 각 국이 선택하게 되는 저감량을 보면, 협약에 가입한 국가는 가입하지 않은 국가에 비해  $M$ 배만큼 많은 오염물질을 저감해야 한다.
- ✓ 전 세계의 저감량은  $A = (N - M) \times \frac{b}{c} + M \times \frac{Mb}{c} = \frac{b}{c}(N - M + M^2)$ 과 같이 결정되고, 그로 인해 가입국과 미가입국의 이득은 각각  $v_c = \frac{b^2}{c}(N - M + \frac{M^2}{2})$ ,  $v_n = \frac{b^2}{c}(N - M + M^2 - \frac{1}{2})$ 으로 결정된다.
- ✓ 여기서  $v_c < v_n$  이므로 협약에 가입하지 않은 나라가 더 큰 이득을 얻게 된다.



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- 이 때 각국은 국제협약에 가입할지 안 할지를 어떻게 결정할까?
- 다시 말해,  $M$  (가입국의 수)의 크기는 어떻게 되고, 어느 정도 크기의 안정적 국제협약이 존재할 수 있을까?
  - ✓ 현재의 국제협약이 지속되기 위해서는 현재의 협약 가입국은 탈퇴할 의사가 없어야 한다.
    - 가입되어 있는 국가가 탈퇴하게 되면, 저감량이 적어지므로 무임승차 이득을 얻을 수 있다.
    - 그러나 이 때 전 세계의 저감량  $A$ 가 줄어들고 그로 인해 저감편익이 감소하게 된다.
  - ✓ 동시에 현재 가입하지 않은 국가도 의사결정을 바꾸어 협약에 가입할 이유가 없어야 한다.
    - 가입하지 않은 국가가 추가로 협약에 가입하면 전 세계 저감량 증가로 인한 편익이 늘어난다.
    - 그러나 이 때 무임승차자로 행동할 수 없기 때문에 손해를 보게 된다.
- 협약 가입국의 수가  $M$ 일 때, 가입국과 미가입국의 이득을  $v_c(N, M)$ 과  $v_n(N, M)$  이라 하면, 다음 두 조건이 동시에 충족될 때  $M$ 개의 나라가 가입한 현재의 국제협약이 유지되게 된다. (위에 기술한 설명을 수식으로 표현하면 아래와 같다)
  - ✓ 내적 안정성 조건:  $v_c(N, M) \geq v_n(N, M - 1)$ 
    - 현재의 협약 가입국이 협약에서 탈퇴할 유인을 갖지 않을 조건
  - ✓ 외적 안정성 조건:  $v_c(N, M + 1) \leq v_n(N, M)$ 
    - 현재의 미가입국이 입장을 바꾸어 협약에 가입하지 않을 조건

## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- 지금까지 내용을 종합해보면 국제환경협약이 안정적으로 유지되려면 두 가지 안정성 조건과 균형 저감량  $a_c$  및  $a_n$ 이 동시에 충족되어야 한다.
  - 몇 개의 국가가 가입할지는 파라미터( $b$ 와  $c$ ) 값에 따라 결정된다.
  - 예를 들어  $b$ 와  $c$  모두 1이라고 가정하고, 지구에 세 국가만이 있어서  $N$ 은 3이라고 하자. 이 상황은 아래의 표에 정리되어 있다.

$N$	$M$	$a_c$	$a_n$	$v_c(N, M)$	$v_n(N, M)$
3	1	1	1	2.5	2.5
3	2	2	1	3	4.5
3	3	3	1	4.5	8.5

- $v_c(3, 3)$ 과  $v_n(3, 2)$ 이 모두 4.5로 동일하기 때문에 기존의 회원국이 협약을 탈퇴할 인센티브는 갖지 못한다.
- 따라서 세 나라 모두가 참여하는 협약이 유지될 수 있다.



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- ✓ 한편, 지구에 다섯 국가만이 있어서  $N$ 은 5일 때의 상황은 아래와 같다.

$N$	$M$	$a_c$	$a_n$	$v_c(N, M)$	$v_n(N, M)$
5	1	1	1	4.5	4.5
5	2	2	1	5	6.5
5	3	3	1	6.5	10.5
5	4	4	1	9	16.5
5	5	5	1	12.5	24.5

- ✓  $v_c(5, 3)$ 과  $v_n(5, 2)$  가 모두 6.5로 동일하기 때문에 기존 회원이 탈퇴할 인센티브는 없다.
- ✓ 또  $v_n(5, 3)$  은 10.5인 반면,  $v_c(5, 4)$ 는 9이기 때문에 기존의 협약 미가입국이 입장을 바꾸어 협약에 가입할 필요성도 느끼지 못한다.
- ✓ 따라서 다섯 국가가 있을 경우에도 국제협약은 세 국가로 유지된다.
- 지금까지 살펴본 저감편의과 비용구조에서는 전체 국가의 수( $N$ )가 큰 경우라 하더라도, 안정적으로 유지될 수 있는 국제 협약 규모는 세 나라이다.
  - ✓ 이러한 결과가 발생하는 이유는 협약 가입국의 수( $M$ )가 늘어날수록 협약을 탈퇴하여 무임승차자가 되려는 욕구가 더 강해지기 때문이다.



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- 이상에서 살펴 본 대로, 대부분의 이론적 연구는 조약 미가입 시 얻는 무임승차 욕구가 너무 크기 때문에 최대 협약 가입국이 두세 나라에 불과하거나, 아니면 안정적인 협약 자체가 존재하지 않는다는 결론을 내리고 있다.
  - ✓ 이론과는 달리, 현실에서는 약 100개 정도의 환경 및 자원 관련 국제협약이 존재하고, 유지되고 있다.
- 이처럼 이론과 현실 간에 상반된 결과는 현실에서는 조약가입의 이득을 탈퇴 시 잃게 되는 손실보다 더 크게 하는 다른 장치가 있기 때문이라고 간주할 수 있다. 아래와 같은 이유(장치)가 있을 수 있다.
  - ✓ 첫째는 가입국과 비가입국의 역할을 차등화 하는 경우이다.
    - 예를 들면, 가입국이 먼저 의사결정 하는 것을 허용하는 것이다. 여러 나라가 참여하는 국제협약은 개별 미가입국에 비해서는 환경(혹은 자원)에 미치는 정도가 크기 때문에, 주도권을 줄게 된다. 따라서 국제협약기구가 먼저 저감량을 결정할 때 미가입국들의 반응을 예상하고 저감량을 선택할 수 있다.
    - 다만 이 이론은 비가입국이 국제협약으로 하여금 먼저 저감량을 결정하도록 순순히 허용하는지에 대한 설명이 약하다는 문제가 있다.
  - ✓ 둘째는 당사국들의 전략적인 관계가 지속적으로 반복 되는 경우이다.
    - 예를 들면, 당장은 기후변화 협상에 미참여 하는 것이 더 이득을 보지만, 앞으로 진행될 다른 FTA, WTO등의 협상에서 이번 기후변화 참여를 통해 상대국의 협조를 얻을 수 있다면, 협상에 참여하는 것이 더 이득일 수도 있다.



## 환경문제에 관한 국제협력의 어려움

- ✓ 셋째는 협약 서명국들은 회원국의 수에 연계된 환경정책을 사용할 수 있다.
  - 예를 들면, 일정 수준의 가입국 수가 되지 않으면 조약을 해체하여, 기존의 협약에 가입한 국가들도  $a_n = \frac{b}{c}$  만큼만 저감하는 경우이다.
  - 실제로도 대부분이 이러한 전략을 사용하고 있다. 몬트리올의정서의 경우 11개국 이상, 전 세계 소비의 2/3 이상을 차지하는 국가가 가입하여야 한다.
- ✓ 넷째는 협약가입에 대한 대가를 지불할 수 있다.
  - 예를 들면, 협약에 참여하여 큰 이득을 보는 국가가, 손실을 보게 되는 국가에게 자신의 이득 중 일부를 지불하는 경우이다.
  - 이 경우 규모, 지급 방식에 대해 교섭이 진행되어 하고, 회원국의 교섭력에 의해 결정될 것이다.
- ✓ 다섯째는 협약가입 여부를 국제무역과 연계할 수 있다.
  - 예를 들면, 환경협약에 가입하지 않는 국가에 대해서는 관련 제품을 회원국과 거래하는 것을 금지하는 것이다.
  - 현실에서도 많이 사용되며, 다만 무역자유화를 추구하는 WTO 등의 방침에 어긋나지 않아야 하는 제약을 가지고 있다.

## Section 2. 오존층 파괴

• • • • •





## 오존층 파괴의 원인과 피해

- 오존과 관련된 환경문제는 크게 두 가지로 볼 수 있다.
  - ✓ 첫째, 국지적 혹은 지상오염 측면에서 살펴보면 오존은 일종의 대기오염물질이다.
    - 오존은 탄화수소가 질소산화물과 태양광 아래에서 결합하여 발생하는데, 건강상의 피해, 농작물 피해를 준다.
  - ✓ 둘째, 전 지구적 차원에서 살펴보면, 오존 문제는 지표로부터 10~50km 상공의 성층권에서 발생한다.
    - 지구상에 존재하는 오존의 대부분은 성층권에 있는데, 지구의 방사선 균형을 유지하는데 결정적인 역할을 한다.
    - 오존은 지구로 유입되는 자외선 복사를 차단하므로, 오존층이 파괴되면 지구를 자외선으로부터 보호 막이 약해지게 되는 것이다.
- 오존층 파괴는 다양한 화학제품으로 배출되는  $\text{CO}_2$ (이산화탄소),  $\text{CH}_4$ (메테인),  $\text{N}_2\text{O}$ (아산화질소)와 같은 염소계 가스 때문에 발생하며, 오존층 파괴의 가장 큰 원인물질은 CFC (염화불화탄소) 이다.
  - ✓ CFC는 1930년대에 기존 냉매제의 대체물질로 개발된 화학물질로서 냉장고와 에어컨의 냉매제, 헤어스프레이, 살충제의 분무 촉진제로 사용하고 있다. (프레온 가스 혹은 스타이로폼 가스라고 불리기도 한다.)
  - ✓ 오존층 파괴에 두번째로 영향이 큰 물질은 할론가스이다. 주로 소화용제로 사용하며, CFC만큼 광범위하게 이용되고 있지 않지만, 일단 방출된 CFC보다 더 강한 오존 파괴 효과를 가지는 것으로 알려져 있다.



## :: 오존층 보존을 위한 노력

- 오존층을 보존하기 위해 다양한 노력들을 해왔다.
  - ✓ 1978년, 미국과 몇몇 유럽 국가들은 분무 촉진제로 CFC를 사용하는 것을 금지한 바 있다.
  - ✓ 1980년대 들어와서 본격적인 국제협력이 나타났는데, 1987년에는 전 세계 24개국이 서명한 몬트리올의정서가 채택되었다.
    - 몬트리올 의정서가 채택된 후 오존층 파괴로 인한 피해가 당초 예상보다 훨씬 심각하다는 사실이 밝혀졌다.
    - 선진국의 경우 CFC(염화불화탄소) 배출량을 1996년부터, 할론가스는 1994년부터 생산 및 소비를 금지하였다.
    - 개발도상국의 경우 2010년부터 생산 및 소비를 금지하였다.
    - 오존층 파괴 방지를 위한 국제적 노력은 비교적 성공적이라고 평가받고 있다.
    - CFC 배출국 대부분이 회원국이며, UN 역사상 가장 많은 국가가 참여하고 있는 조약이다.

## Section 3. 생물다양성



## 생물다양성

- 생물다양성이란 지구상에 존재하는 생물종의 다양성, 유전학적 다양성, 생물이 살아가는 생태계의 다양성을 의미한다.
  - ✓ 생태계 내의 생물종이 줄어들고 유전적 측면에서 획일화가 이루어지면 생태계가 다양한 주변 환경변화에 적응할 수 있는 유연성을 상실하게 된다.
  - ✓ 생물종은 자연환경에 적응하는 과정에서 자연적으로 감소할 수도 있지만, 현재 생물종 감소 속도는 전 지구적 재앙으로 공통이 멸종했던 시절 아래 가장 빠른 속도이다.
- 생물다양성 감소는 단순히 생태계의 파괴로 끝나지 않고, 인류 복지에 직접적인 영향을 미친다.
  - ✓ 인류가 사용하는 의약품의 25%는 식물로부터 추출한 것이다.
    - 현재는 유용한 식물이 아니라 할지라도, 미래에는 어떤 새로운 유용한 물질을 제공할지도 모른다.
  - ✓ 야생 동식물을 이용하여 농작물의 신품종을 만들거나, 해충의 천적을 양성하는 경우는 흔히 볼 수 있다.
- 생물은 오염물질에 대한 노출이나 인간의 수렵 및 채취 등에 의해 직접적으로 위협받는다.
  - ✓ 그러나 생물종의 유지를 위협하는 더 중요한 원인은 농업 및 도시개발로 인해 생물 서식지가 사라지는 것이다.
    - 실례로는 개발로 인해 아마존강 유역의 밀림이 급격히 줄어들면서 이곳에 서식하는 생물종의 수도 격감하고 있다.
    - 아울러 기후변화도 서식 환경을 바꾸어 생물종을 대규모로 감소시키는 심각한 요인이다.



## 생물다양성을 보존하기 위한 조치

- 생물다양성 감소를 방지하기 위한 1차적인 대응은 생물종의 보존을 위해 필요한 지역을 보호지구로 정하여 개발을 금지하는 것이다.
  - ✓ 서식지 보호라는 차원에서는 유용한 제도가 될 수 있지만, 경제적 유인을 사용하는 것이 아니므로 효율적인 방식이 아니다.
- 생물다양성 보존을 위해 경제적 유인제도를 사용하려면 생물종이 갖는 경제적 가치가 적절히 평가되도록 하여야 한다.
  - ✓ 유전공학적 과정을 거친 동식물의 종이나 새로운 의약품 등에 대해서는 그 지적 소유권이 국제적으로 인정되고 있다. 하지만 그러한 지적인 산물의 원료가 되는 야생 생물종 자체에 대한 소유권은 인정받지 못하고 있다.
    - 희귀 동식물의 서식지를 갖고 있는 국가가 자국이 보유한 생물종의 가치를 국제적으로 인정받을 수 있다면, 그 국가는 서식지를 보존하려는 노력을 하게 될 것이며, 결국 생물종 감소를 방지할 수 있다.
- 생물다양성에 관한 국제협약으로는 1992년의 리우정상회담에서 채택된 생물다양성협약이 있다.
  - ✓ 생물다양성 보존, 생물다양성의 지속가능한 이용, 유전자원이용 편의의 공정하고 균등한 배분을 추구한다.
- 또, 생물종 보호와 관련된 또 다른 협약으로는 1971년 이란의 람사르에서 채택되어 람사르 협약이 있다.
  - ✓ 회원국으로 하여금 최소한 1개 이상의 습지를 협약등록습지로 등재하여 보호하도록 하고 있다.
    - 한국의 경우, 강원도 인제군의 대암산 용늪, 경남 창녕의 우포늪, 전남 신안군 장도 및 순천만 등 다수의 습지를 등재하였다.

# Chapter 22

## 기후변화의 경제학

기후변화의 경제학



# Section 1. 지구온난화 과학

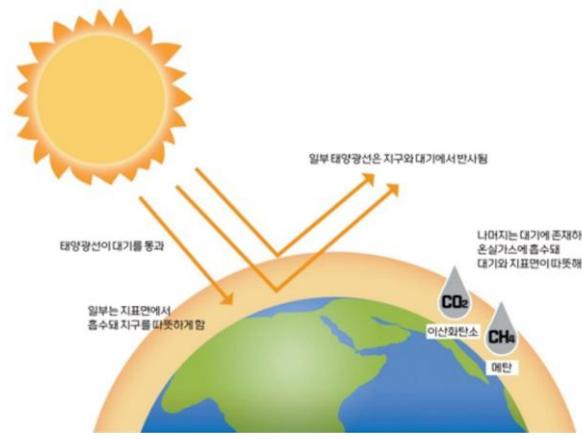
## 온실가스와 기온, 기온상승의 영향

- 지구온난화 유발 원인으로 지목되는 온실가스로는 20여 종이 있지만, 아래의 표에 제시된 7종류의 온실가스가 대표적이다.
  - 각 종류의 가스가 지구의 온실효과에 미치는 영향은 달라서, 온실효과를 유발하는 정도에 따라 이산화탄소로 환산된 양으로 측정한다. (아래의 표에서 이산화탄소의 GWP가 1인 것을 확인하길 바란다.)
  - 각 가스별 온실가스를 통일된 단위로 환산하기 위해 GWP (Global Warming Potential)라는 계수를 활용한다.
  - 각 가스의 질량(kg, tonne 등)에 GWP를 곱하면  $CO_2\text{eq.}$ 라는 단위가 된다.
  - 1톤의 메테인은 28톤의 이산화탄소와 온실효과에 미치는 영향이 같다.
    - $28tCO_2 \times 1 = 28tCO_2\text{eq.}$
    - $1tCH_4 \times 28 = 28tCO_2\text{eq.}$

온실가스의 종류	설명	GWP
이산화탄소 ( $CO_2$ )	가장 대표적인 온실가스로 화석연료의 연소에서 대량으로 배출	1
메테인 ( $CH_4$ )	가축의 소화과정, 쓰레기 매립지 등에서 배출	28
아산화질소 ( $N_2O$ )	농업용 비료, 가축 배설물, 폐수처리 등에서 발생	273
수소불화탄소 (HFCs)	냉장고, 에어컨의 냉매에서 사용되는 인공가스	$\sim 1,430$
과불화탄소 (PFCs)	전자산업 및 반도체 생산에 사용	$\sim 12,400$
육불화황 ( $SF_6$ )	전력 절연가스, 변압기에 사용	23,500
질소삼불화물 ( $NF_3$ )	반도체, 디스플레이 제조과정에서 발생	17,400

## 온실효과

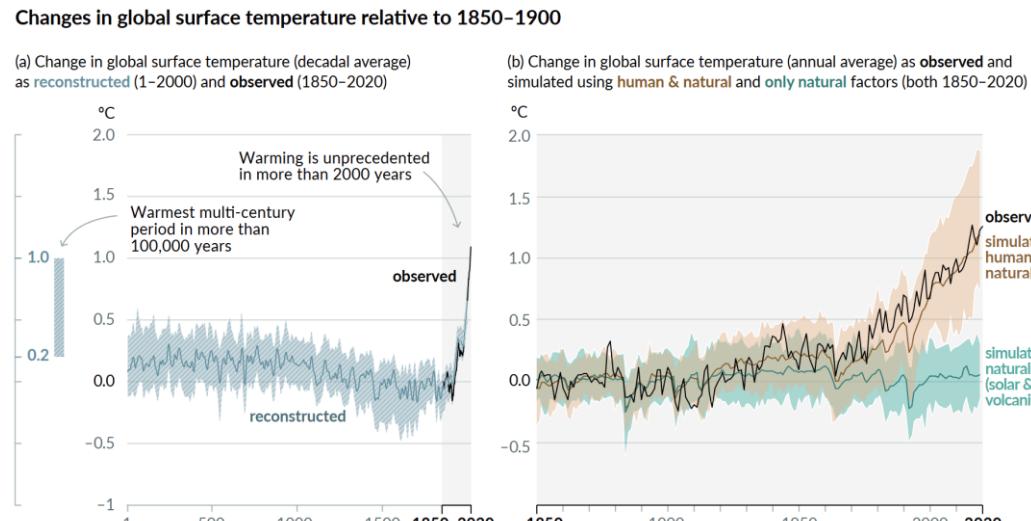
- 태양에서 나오는 태양 복사에너지 (쉽게 말해 빛) 이 지구로 도달하기까지 과정은 아래와 같다.
  - ✓ 태양 복사에너지의 30% 정도는 대기의 구름, 먼지 등에 의해 반사된다.
  - ✓ 태양 복사에너지의 20% 정도는 대기에 존재하는 오존, 수증기에 의해 흡수 된다.
    - 온실가스는 태양 복사에너지는 흡수를 못한다. (태양 복사에너지는 단파)
  - ✓ 태양 복사에너지의 50% 정도는 대기 표면에 직접 흡수 된다.
- 위처럼 지구는 태양으로 부터 받은 에너지를 지구 스스로 다시 우주로 방출한다. 이를 지구 복사에너지라고 한다.
  - ✓ 지구 복사에너지는 우주로 방출되는 과정에서 온실가스에 의해 쉽게 흡수되는 성질이 있다.
    - 온실가스는 지구 복사에너지는 흡수를 잘한다. (지구 복사에너지는 장파)
  - ✓ 온실가스가 지구 복사에너지를 흡수하는 과정에서 열이 발생하고, 그 결과 온도가 상승한다.



출처: <https://www.kunews.ac.kr/news/articleView.html?idxno=25468>

## 온실효과

- 산업혁명이 발생하기 이전에는 지구의 온실가스 양이 일종의 균형을 유지하고 있었다.
  - ✓ 온실가스는 주로 동식물의 사체로부터 발생하였고, 다시 삼림과 바다로 흡수되었다.
  - ✓ 산업혁명 이후 화석연료 사용과 이로 인한 급속한 이산화탄소 배출 증가로 인해, 그 균형이 무너지기 시작했다.
- 복사강제력이란 온실가스 축적이 온실효과를 유발하는 정도를 지수로 나타내는 것이다.
  - ✓ 단위 면적당 지구로 유입되는 에너지와 지구에서 방출되는 에너지의 차이를 뜻한다. (단위:  $\text{W}/\text{m}^2$ )
  - ✓ 1750년을 0으로 할 때, 2019년은  $2.72 \text{ W}/\text{m}^2$ 로 알려져 있다.
- 복사강제력 증가로 인해 현재 지구의 지표면 평균기온은 산업혁명 이전 대비  $1.2\text{~}1.5^\circ\text{C}$  상승한 것으로 알려져 있다.





## :: 기후변화의 영향

- 온도상승과 그로 인한 해수면상승은 인류를 포함한 자연생태계에 상당한 영향을 미치고 있다.
  - ✓ 강우 패턴이 바뀌고, 눈이 녹으면서 수자원의 양과 질이 바뀌고 있다.
  - ✓ 육상과 담수 및 해양 생물의 지리적 생존 범위와 계절 활동, 이동 형태, 개체수 등이 변화하고 있다.
  - ✓ 말라리아와 같은 질병의 발생패턴도 변하고, 작물의 경우 생산성이 낮아지는 경우가 더 많이 관찰되고 있다.
  - ✓ 홍수, 가뭄 등의 자연재해와 용수 부족, 산불 피해가 발생할 가능성이 높아지고 있다.
  - ✓ 해수면상승은 해안침식과 그로 인한 재산상의 피해를 유발하고 있다.
  - ✓ 해양 산성화는 바다생물의 생존을 위협하고 있다.
  - ✓ 이상기후가 나타나고 있으며, 극단적인 고온 발생, 높은 강우량 등이 빈번히 관측되고 있다.
- 위와 같은 기후변화의 영향은 지역 편차가 크게 나타나고, 국가별 경제 발전 수준에 의해서도 크게 달라진다.
  - ✓ 일반적으로 지구의 저위도 지역에 위치한 개발도상국의 피해가 고위도 지역 선진국에 비해 더 큰 피해를 입고 있는 것으로 알려져 있다.



## :: 미래 전망 및 Kaya 항등식

- 온실가스 배출량을  $E$ , 인구를  $L$ , GDP를  $Y$ , 에너지사용량을  $N$ 이라 하면, 다음의 항등식을 구성할 수 있다.
  - ✓ 처음 이론을 고안한 일본 학자 이름을 붙여 Kaya 항등식이라고 부르기도 한다.

$$E = L \times \frac{Y}{L} \times \frac{N}{Y} \times \frac{E}{N}$$

- 위 식은 총 배출량( $E$ )은 인구( $L$ ), 1인당 GDP( $Y/L$ ), 에너지 집약도( $N/Y$ ),  $\text{CO}_2$  집약도( $E/N$ )의 곱으로 구성된다.
  - 에너지 집약도는 GDP 단위당 에너지 사용량을 뜻한다.
  - $\text{CO}_2$  집약도는 에너지 소비 단위당  $\text{CO}_2$  배출량을 뜻한다.
- 위 식을 변화율로 전환하면 간편하게 사용할 수 있다.

# :: 미래 전망 및 Kaya 항등식

- 왼쪽의 항등식이 변화율의 합으로 전환되는 과정은 다음과 같다.

$$E = L \times \frac{Y}{L} \times \frac{N}{Y} \times \frac{E}{N} \longrightarrow \text{CO}_2 \text{ 배출 증가율}(2.1\%) = \text{인구증가율}(1.6\%) + \text{1인당 GDP 증가율}(1.7\%) + \text{에너지} \\ \text{집약도 증가율}(-0.9\%) + \text{CO}_2 \text{ 집약도 증가율}(-0.3\%) \quad (\text{괄호 수치는 단순 예시})$$

- 우선 분석의 편의상,  $\frac{Y}{L}$  를  $G$ 로 치환 하고,  $\frac{N}{Y}$  를  $EI$ 로 치환 하고,  $\frac{E}{N}$  를  $CI$ 로 치환 하자.
- 각 변수의 시점을 표기하기 위해 하첨자  $t$ 를 표기하자.
- 그리고 자연로그를 취하고,  $t$ 기의 식과  $t - 1$  기의 식을 빼보자.

$$\ln E_t = \ln L_t + \ln G_t + \ln EI_t + \ln CI_t$$

$$\ln E_{t-1} = \ln L_{t-1} + \ln G_{t-1} + \ln EI_{t-1} + \ln CI_{t-1}$$

$$\rightarrow \ln E_t - \ln E_{t-1} = (\ln L_t - \ln L_{t-1}) + (\ln G_t - \ln G_{t-1}) + (\ln EI_t - \ln EI_{t-1}) + (\ln CI_t - \ln CI_{t-1})$$

①

②

③

④

⑤

①: CO<sub>2</sub> 배출 증가율

②: 인구증가율

③: 1인당 GDP 증가율

④: 에너지 집약도 증가율

⑤: CO<sub>2</sub> 집약도 증가율

$$\frac{\Delta \ln x}{\Delta x} = \frac{1}{x}$$

$$\Delta \ln x = \frac{\Delta x}{x}$$

지난 학기(t-1)의 내 성적은 4.0, 이번 학기(t)의 내 성적 4.1 이다.

내 성적은 지난학기 대비 몇 퍼센트 상승했을까?

왼쪽에 제시된 원리에 따라 아래 중 어떻게 계산해도 비슷하다.

첫 번째 방법:  $\frac{4.1-4.0}{4.0} = \frac{\Delta x}{x} = 0.025$

두 번째 방법:  $\ln 4.1 - \ln 4.0 = \Delta \ln x = 0.02469$

# 미래 전망 및 Kaya 항등식

- 앞서 살펴본 항등식을 간단한 예제를 통해 살펴보자.

$t$ (연도)	$E$ (배출량)	$L$ (인구)	$Y$ (GDP)	$N$ (에너지사용량)
2000년	100	10	50	1,000,000
2025년	110	15	50	1,500,000



$t$ (연도)	$E$ (배출량)	$L$ (인구)	$\frac{Y}{L}$ (1인당 GDP)	$\frac{N}{Y}$ (에너지 집약도)	$\frac{E}{N}$ ( $\text{CO}_2$ 집약도)
2000년	100	10	5	20,000	0.00010
2025년	110	15	3.3	30,000	0.00007



$t$ (연도)	$\ln E$	$\ln L$	$\ln \frac{Y}{L}$	$\ln \frac{N}{Y}$	$\ln \frac{E}{N}$
2000년	4.61	2.30	1.61	9.90	-9.21
2025년	4.70	2.71	1.20	10.31	-9.52
2025년-2000년	0.10 (10%)	0.41 (41%)	-0.41 (-41%)	0.41 (41%)	-0.31 (-31%)

배출 증가율(10%) = 인구증가율(41%) + 1인당 GDP 증가율(-41%) + 에너지 집약도 증가율(41%) +  $\text{CO}_2$  집약도 증가율(-31%)

- ✓ 배출량 증가율이 10%로 작기 때문에,  $\ln(110) - \ln(100)$  값은 실제 증가율과 매우 유사하다.
- ✓ 인구처럼 증가율이 50%로 큰 경우,  $\ln(10) - \ln(15)$  값은 실제 증가율과의 차이가 커진다.
  - 로그의 차분 값은 증가율이 작을 경우에, 실제 증가율을 잘 근사하게 된다.



· 요인분해 분석 (LMDI, Logarithmic Mean Divisia Index)

- 증가율이 아니라 변화'량'으로도 구분을 할 수 있을까? 아래와 같은 과정을 거치면 변화량으로 구분할 수도 있다.

$$\begin{aligned}\ln E_t &= \ln L_t + \ln G_t + \ln EI_t + \ln CI_t \\ \ln E_{t-1} &= \ln L_{t-1} + \ln G_{t-1} + \ln EI_{t-1} + \ln CI_{t-1} \\ \rightarrow \ln E_t - \ln E_{t-1} &= (\ln L_t - \ln L_{t-1}) + (\ln G_t - \ln G_{t-1}) + (\ln EI_t - \ln EI_{t-1}) + (\ln CI_t - \ln CI_{t-1})\end{aligned}$$

- 양변에  $E_t$ 와  $E_{t-1}$ 의 로그평균인  $\frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}}$  을 곱하고,  $\frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}}$ 을  $L(E_t, E_{t-1})$  라고 치환하자

$$\frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}} \times (\ln E_t - \ln E_{t-1}) = \frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}} \times (\ln L_t - \ln L_{t-1}) + \frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}} \times (\ln G_t - \ln G_{t-1}) + \frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}} \times (\ln EI_t - \ln EI_{t-1}) + \frac{E_t - E_{t-1}}{\ln E_t - \ln E_{t-1}} \times (\ln CI_t - \ln CI_{t-1})$$

- 최종적으로 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

### ①: 배출량 변화량

## ②: 인구증가 효과에 의한 온실가스 배출량 변화량

### ③: 1인당 GDP증가 효과에 의한 온실가스 배출량 변화량

#### ④: 에너지 집약도 효과에 의한 온실가스 배출량 변화량

(5): CO<sub>2</sub> 집약도 효과에 의한 온실가스 배출량 변화량

- ✓ 각 효과에 의한 배출량(②~⑤)을 모두 더하면 전체 배출량 변화량 (①)이 된다.

## :: 요인분해 분석 (LMDI, Logarithmic Mean Divisia Index)

- 최종적으로 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$E_t - E_{t-1} = L(E_t, E_{t-1}) \times (\ln L_t - \ln L_{t-1}) + L(E_t, E_{t-1}) \times (\ln G_t - \ln G_{t-1}) + L(E_t, E_{t-1}) \times (\ln EI_t - \ln EI_{t-1}) + L(E_t, E_{t-1}) \times (\ln CI_t - \ln CI_{t-1})$$

배출량의 변화량

해당기간의 로그평균 배출량 X 인구의 변화율  
= 인구 변화가 배출량 변화에 기여한 양

- 해당기간의 총 배출량 변화를 인구변화로 인해 배출량이 변화한 양 + 1인당 GDP변화로 인해 배출량이 변화한 양 + 에너지집약도 변화로 인해 배출량이 변화한 양 + 배출집약도 변화로 인해 배출량이 변화한 양으로 분해하여 분석하는 방법이다.

## :: 공통사회경제경로 (SSP, Shared Socioeconomic Pathway)

- SSP 시나리오는 기후변화 대응과 영향 평가를 위해 미래의 사회·경제적 발전 경로를 다섯 가지로 설정한 글로벌 기후변화 시나리오 체계이다. 보통  $SSP_{x-y}$  로 표현이 된다.
  - ✓ 여기서 x는 미래에 사회경제적 변수들이 어떻게 변할지에 대한 시나리오를 의미한다.
  - ✓ Y는 해당 시나리오에서의 2100년의 복사강제력( $W/m^2$ ) 을 의미한다.
  - ✓ 따라서  $SSP_{x-y}$  는 x의 사회경제적 경로에서 y의 복사강제력을 2100년에 달성을 의미한다.
- 사회경제적 경로(x)는 아래와 같이 다섯가지로 나뉜다.

SSP 시나리오	설명	
SSP 1	지속가능 경로	낮은 불평등, 높은 교육·보건, 빠른 기술보급, 친환경 에너지 전환을 통해 지속가능한 발전의 조건을 갖춤
SSP 2	중간적 경로	인류가 밟아온 기존 경로와 유사. 성장이 어느 정도 불균등하고 지속가능성 달성을 위해 노력하나 성과는 크지 않음
SSP 3	지역간 경쟁의 경로	국가 간, 국제 지역간 경쟁이 심한 경로. 인구 증가율이 높고 교육·보건·기술 확산이 매우 느림. 역내의 식량과 에너지 안보에만 치중하며, 환경문제의 우선순위가 낮음.
SSP 4	불평등 경로	선진국(혹은 엘리트계층)은 신기술·저탄소 인프라를 누리고, 후진국(혹은 대중)은 고탄소 기술에 의존하게 되는 이중구조. 인적자본 투자, 경제적 기회와 정치적 힘 측면에서 불균형이 심화되는 경로.
SSP 5	화석연료 중심 발전 경로	글로벌 시장이 통합되고 경쟁과 혁신, 사회참여가 강조됨. 교육과 건강에 대한 투자도 늘어나며, 글로벌 경제가 크게 성장하지만 화석연료에 많이 의존하는 발전경로.

## 대표농도경로 (RCP, Representative Concentration Pathways)

- 앞서 살펴본 SSP<sub>x-y</sub> 표기에서 y에 해당하는 시나리오를 RCP 시나리오라고도 부른다.
- RCP 시나리오는 미래의 온실가스 농도와 이에 따른 복사강제력 경로를 수치로 제시하는 기후변화 시나리오이다.
  - 앞선 SSP 1~5 시나리오의 스토리를 양적지표 (인구 및 경제성장 등)로 전환한 뒤, 이로부터 향후의 에너지 소비량과 온실가스 배출량 전망치를 생성한다.
  - 또한 다섯가지 SSP시나리오별로 달성하려는 2100년의 복사강제력 수치를 얻을 수 있다.
  - 주로 SSP1-2.6, SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5 의 다섯가지 시나리오를 적용한다.
    - 국제사회에서 목표로 하는 2100년의 1.5°C 혹은 2.0°C 이하의 기온상승을 위해서는 SSP1-1.9 혹은 SSP1-2.6의 경로를 취해야 한다.

< 1850~1900년 대비 기온상승 전망치 (단위: °C) >

SSPx-y 시나리오	2021-2040		2041-2060		2081-2100	
	대표 추정치	가능 범위	대표 추정치	가능 범위	대표 추정치	가능 범위
SSP1-1.9	1.5	1.2~1.7	1.6	1.2~2.0	1.4	1.0~1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2~1.8	1.7	1.3~2.2	1.8	1.3~2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2~1.8	2.0	1.6~2.5	2.7	2.1~3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2~1.8	2.1	1.7~2.6	3.6	2.8~4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3~1.9	2.4	1.9~3.0	4.4	3.3~5.7



## :: 기후시스템 전망

- IPCC는 온실가스 농도 증가가 초래하는 기후시스템 변화를 다수의 GCM(Global Climate Model)이라는 분석모형을 가동해 도출한다.
  - ✓ GCM은 지구의 3차원 그리드 모형으로서, 복사열, 바람 이동, 구름 형성과 증발 및 강우, 해류에 의한 열전달 등을 수리적으로 분석하는 모형이다.
  - ✓ 4°C의 온난화 수준에서 21세기 남은 기간의 바닷물 온난화는 1971~2018년간 변화의 4~8배에 달하여, 바닷물의 산성화가 발생할 것으로 나타난다.
  - ✓ 산과 극지방의 빙하가 녹고, 영구 동토층이 해빙되면서 탄소가 유출되며, 그린란드와 남극 빙상이 녹는 현상이 지속될 것으로 나타난다.
- 1850~2019년간 인간 활동으로  $2,390 \pm 240 \text{ GtCO}_2$  가 배출되었다고 추정하고 있다.
  - ✓  $\text{CO}_2$  는 오랜 기간 대기에 머물러 있기 때문에, 미래의 기온변화에는 이미 과거에 배출된  $\text{CO}_2$  도 영향을 미치고 있다.
  - ✓ 따라서 미래의 기온 수준을 어느 정도로 끓어두려면 앞으로 어느 정도의  $\text{CO}_2$  를 배출할 수 있는지를 추정해야 한다.

## 탄소예산

- 탄소예산은 지구 평균기온 상승을 특정수준 ( $1.5^{\circ}\text{C}$  혹은  $2.0^{\circ}\text{C}$ ) 이하로 제한하기 위해 앞으로 인류가 배출할 수 있는 이산화 탄소의 총량을 의미한다. 아래는 IPCC가 추정하는 탄소예산이다.
- ✓ (표의 윗부분) 1850~2019년간 인간의 활동에 의해 총  $2,390 \pm 240 \text{ GtCO}_2$  가 배출되었고, 그로 인해 현재(2010~2019년)는 산업혁명 대비 (1850~1900년)  $1.07^{\circ}\text{C}$  상승하였다.
- ✓ (표의 아랫부분) 예를 들면  $1.5^{\circ}\text{C}$  온난화를 83% 이상의 확률로 달성하려면 앞으로 남아 있는 배출량은  $300\text{GtCO}_2$  이고, 이는 이미 지금까지 배출된 양의 1/8 정도에 불과하다.

< 탄소 예산 >

2010~2019년 온난화 (1850~1990년 대비)		1850~2019년 누적 $\text{CO}_2$ 배출량				
1.07°C		$2,390 \pm 240 \text{ GtCO}_2$				
목표 온난화 (°C)	2020년 기준 남아 있는 탄소 예산 추정치 (목표 온난화 달성을 가능성, GtCO <sub>2</sub> )					
	17%	33%	50%	67%	83%	
1.5°C	900	650	500	400	300	
1.7°C	1,450	1,050	850	700	550	
2.0°C	2,300	1,700	1,350	1,150	900	



## 탄소 배출저감 로드맵

- 앞서 살펴본 목표 온난화를 2100년에 실제로 달성하기 위해서는 아래의 표와 같이 2100년까지 배출할 CO<sub>2</sub>양을 세부 기간 별로 산정하여야 한다.
  - 예를 들면 2100년에 1.5°C 목표를 안정적으로 달성하려면 (확률 50%로, 1.3°C 상승), 2050년에 탄소중립, 즉 순배출량이 0이 되도록 하여야 한다.

< 1850~1900년 대비 기온상승 전망치 (단위: °C) >

2019년 대비 감축률(%)			탄소중립 달성 연도	2100년 예상 기온상승 (50%, 1850~1900년 대비)
2030년	2040년	2050년		
43	69	84	2050~2055	1.3°C
21	46	64	2070~2075	1.6°C
2	3	5	탄소중립 없음	2.7°C
-20	-35	-46	탄소중립 없음	2.7°C

## Section 2. 기후변화 대응

## :: 기후변화 대응

- 기후변화에 대한 대응은 온실가스의 배출저감 혹은 감축 (mitigation)과 기후위기에 대한 적응(adaptation)으로 나뉜다.

### 감축

- 감축은 기후변화를 일으키는 원인 그 자체를 줄이는 것, 즉 온실가스 배출을 줄여 지구 온난화를 억제하는 모든 활동.
- 앞서 26쪽 슬라이드에서 보았듯이, 온실가스 배출량은 인구, 1인당 소득, 소득 당 에너지사용량(에너지 집약도), 사용한 에너지 단위당 온실가스 배출량 (배출 집약도)이라는 요소들로 분해될 수 있음을 배웠다.
  - ✓ 인구와 1인당 소득을 줄이는 선택은 하기 어렵기 때문에, 에너지의 효율성을 높이고, 에너지 단위당 배출량이 적어지도록 에너지 전환과 기술개발이 배출감축의 수단이 되어야 한다.
  - ✓ 또한 산림 면적을 늘리고, 토지이용을 지속가능하게 하여 비에너지 부문의 배출감소 혹은 흡수 촉진도 추진해야 한다.
- 이러한 감축활동을 추진하는 정책 수단으로서 탄소세, 배출권거래제를 사용하되, 기술개발에 대한 지원과 같은 여러 추가 수단이 필요하다.
  - ✓ 감축수단(정책)은 이미 어느 정도 실행하고 있으며, 만족스럽지는 못한 수준 이지만 아무런 조치를 취하지 않았을 때에 비해서는 상당량의 배출저감을 이룬 것으로 평가하고 있다.

## :: 기후변화 대응

- 감축활동은 여러 부문으로 나누어 살펴 볼 수 있다.
  - ✓ 크게 에너지부문, 산업부문, 도시부문, 수송부문, 농업, 산림, 여타 토지이용 부문 등으로 나누어 볼 수 있다.
- 에너지부문은 전력·열·연료를 생산하고 공급하는 과정에서 발생하는 모든 활동을 포함하는 부문. (발전, 정유, 가스 공급 등)
  - ✓ 에너지시스템을 전기화 해야하며, 전기화가 어려운 부문은 바이오연료, 수소 연료 등을 사용해야 한다.
  - ✓ 사용된 화석연료는 CCS (Carbon Capture and Storage) 기술을 적용해 탄소를 회수하고 저장해야 한다.
  - ✓ 이미 배출된 탄소는 직접공기포집(DAC, Direct Air Capture) 기술을 통해 탄소를 직접 흡수하고나, 바이오매스를 활용하여 흡수 (BECCS, BioEnergy with CCS)하는 방식을 택해야 한다.
- 산업부문은 공정 산업, 자원 생산 등에서 원자재를 가공하거나 제품을 생산하는 활동을 포함하는 부문이다. (제조업 등)
  - ✓ 원자재의 수요관리, 효율성 증대, 자원 순환체계 구축, 신공정 등의 도입을 통해 온실가스 배출을 줄여야 한다.
- 건물부문은 주거 및 상업용 건물에서 난방, 냉방, 가전기기 등 일상적 에너지 소비 활동을 포함하는 부문이다. (집, 상가 등)
  - ✓ 에너지 사용량을 줄이고, 친환경적 도시로의 전환이 필요하다. 탄소흡수와 저장 능력을 강화해야 한다.
- 수송부문은 육상·철도·해상·항공에서 사람과 화물 이동을 위한 에너지 소비활동을 포함하는 부문이다. (승용차, 선박 등)
  - ✓ 친환경자동차 보급이 가장 큰 저감수단이고, 바이오연료의 공급확대도 필요하다.
- 농업, 산림, 토지이용부문은 작물, 축산, 토지전환 등 인간의 토지관리와 생산활동을 포함하는 부문이다. (벌채, 복원 등)
  - ✓ 음(-)의 배출을 달성하여 탄소중립에 기여하여야 한다. 탄소흡수력을 높이는 것이 필요하다.



## :: 기후변화 대응

### 적응

- 적응은 이미 진행중인 기후위기에 대비하여, 사회·경제·생태 시스템의 취약성을 줄이고 대응 능력을 높이는 것.
- 기후위기를 유발하는 위해 요인으로는 생명 손실, 부상, 자산 피해, 생산성 손실, 생태계, 환경자원 등에 미치는 물리적은 사건을 들 수 있다.
- 인류가 기후변화에 적응하기 위해서는 사회, 경제, 생태 시스템이 회복력, 즉 기후위험 요인이 발생하고 증가하는 것에 대응할 수 있는 능력을 갖추도록 해야 한다.
  - ✓ 토지·해양·생태계의 전환은 물 관리, 농업용수 관리, 식품의 가용성과 안정성 확보, 지속가능한 숲 관리, 육지부·담수부·해양·연안의 생태계 보존과 회복 등을 포함한다.
    - 홍수방지를 위한 조기경보시스템 및 제방 건설 습지와 하천 회복
    - 농업의 수자원 관리, 용수 저장, 토양 습도관리와 관개시설 개선
  - ✓ 도시·농촌·기초시설의 전환은 도시, 농촌정주와 기초시설 설계에 기후위기 문제를 반영해야 한다.
  - ✓ 이상 모든 시스템의 전환과 함께 보건 시스템의 회복력 제고가 추진되어야 하고, 특히 취약계층을 우선 배려하는 방식으로 이루어져야 한다.

**Thank you**

I USUK AOR

