

『탄소중립개론』

I. 기후변화의 과학과 경제

제 2장 기후변화의 과학적 매커니즘

목차

01 기후변화의 이해

02 기후 시스템과 에너지 균형

03 온실가스의 종류 및 역할

04 기후변화의 원인과 증거

05 기후변화의 사회경제적 영향

06 기후변화의 미래 예측 및 모델링

1.기후변화의 이해

기후변화의 정의



기후변화란 무엇인가?

- 기후변화: 지구 기후시스템이 통계적으로 유의미하게 변화하는 장기적 현상(수십~수백 년)
- 단순한 날씨 변동이 아닌 장기적 기후 패턴의 변화를 의미

기후변화의 원인

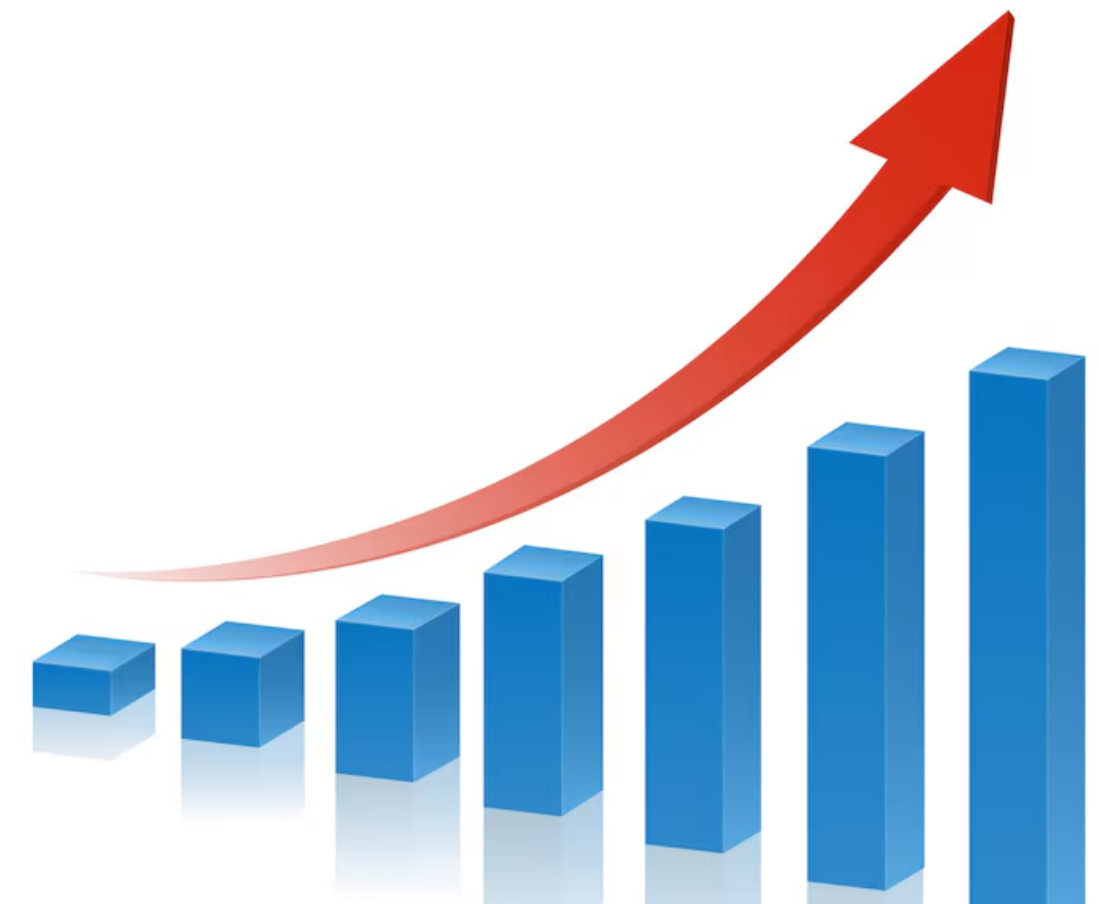
- 자연적 요인: 태양 복사량 변동, 화산활동, 해양순환 변화, 지구 궤도 변화 등
- 인위적 요인: 산업혁명 이후 인간의 화석연료 사용, 도시화, 삼림 파괴로 온실가스 농도 급증

온실가스와 지구온난화



온실가스의 역할

- 온실가스(GHG): 태양 에너지가 지표를 데운 후 우주로 방출 시 일부를 흡수·재방출
- 자연 온실효과 X → 지구 평균기온 -18°C, 생명체 생존 불가
- 주요 온실가스: 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 불소계 가스 등
- 대기 중 적정 농도 유지 시 지구 온도 안정화



온실효과의 강화

- 산업화 이후 GHG 배출 과다 → 온실효과가 비정상적으로 강화
- 에너지 불균형 발생: 흡수 > 방출
- IPCC(AR6): "인간 영향이 지구 온난화를 유발한 것이 명백하다"는 과학적 합의
- 현재 감축 수준: 파리협정 1.5°C 목표 달성 실패 가능성 높음

기후변화의 영향

- 지구온난화는 단순한 기온 상승을 넘어 기후시스템 전반에 광범위한 영향을 미치고 있음
- 대기과 해양의 에너지 흐름이 변화하면서 다양한 기후 현상이 발생하고, 이는 생태계와 인간 사회에 심각한 위협이 됨

극지방과 빙하의 변화

- 극지 빙하·만년설 용해 가속화
- 알베도(반사율) 감소로 온난화 가속화(양의 피드백)
- 영구동토층 용해로 메탄 등 온실가스 추가 방출

해양 환경의 변화

- 해양 열함량 증가: 초과 에너지의 약 91% 해양 흡수
- 해수면 상승: 열팽창과 빙하 용해로 가속화
- 해양 산성화: CO₂ 흡수로 pH 감소, 해양생태계 위협

극한 기상 현상의 증가

- 대기·해양온도 변화 → 허리케인·태풍·집중호우·가뭄 등 증가
- 폭염·열대야 일상화, 건강·노동생산성 저하
- 'New Climate Normal': 극한 기상의 일상화

기후변화의 시공간적 불균형

장기적 추세와 특성

- 기후변화 = 장기적 추세 + 지역별 특성 동시 존재
- 공통 위기이지만 개별적 영향이 다르게 나타남
- 단기 기상 변동과 장기 기후변화 구분 필요
- 전 지구적 현상이지만 지역별 취약성 상이

시간적 특성

- 최소 30년간 평균변화 관찰 필요
- 최근엔 20년 내에도 변화 감지 가능
- 산업화 이후 변화 속도 급격히 가속
- 과거 자연변화보다 현재 인위적 변화가 10배 이상 빠름

지역적 특성

- 고유 기후, 지형, 생태, 사회·경제에 따라 영향 상이
- 아프리카: 고온·강수 감소-사막화·식량안보 위협
- 북극: 지구 평균의 2배 속도 온난화
- 일부 고위도: 일시적 농업증대 가능하나 장기적 위험

대응전략의 필요성

- 장기적 시계 + 지역 맞춤형 대응 병행 필요
- 취약 지역·계층 우선 지원 체계 구축
- 국제협력과 지역별 적응 전략 동시 추진
- 과학적 모니터링과 예측 시스템 강화

2. 기후 시스템과 에너지 균형

기후시스템 개요

대기	복사 조절, 온실가스에 의한 온도 조절, 기상 현상 발생
해양	최대 열 저장소, 에너지 흡수·분산, 해류 및 기상 변동 조절
빙하/극지	태양에너지 반사(알베도), 융해 시 해수면 상승 유발
육지(토지)	복사 흡수·방출, 산림·토양의 탄소 저장 기능
생태계	광합성 통한 이산화탄소 흡수, 탄소·수문 순환에 기여

에너지 흐름



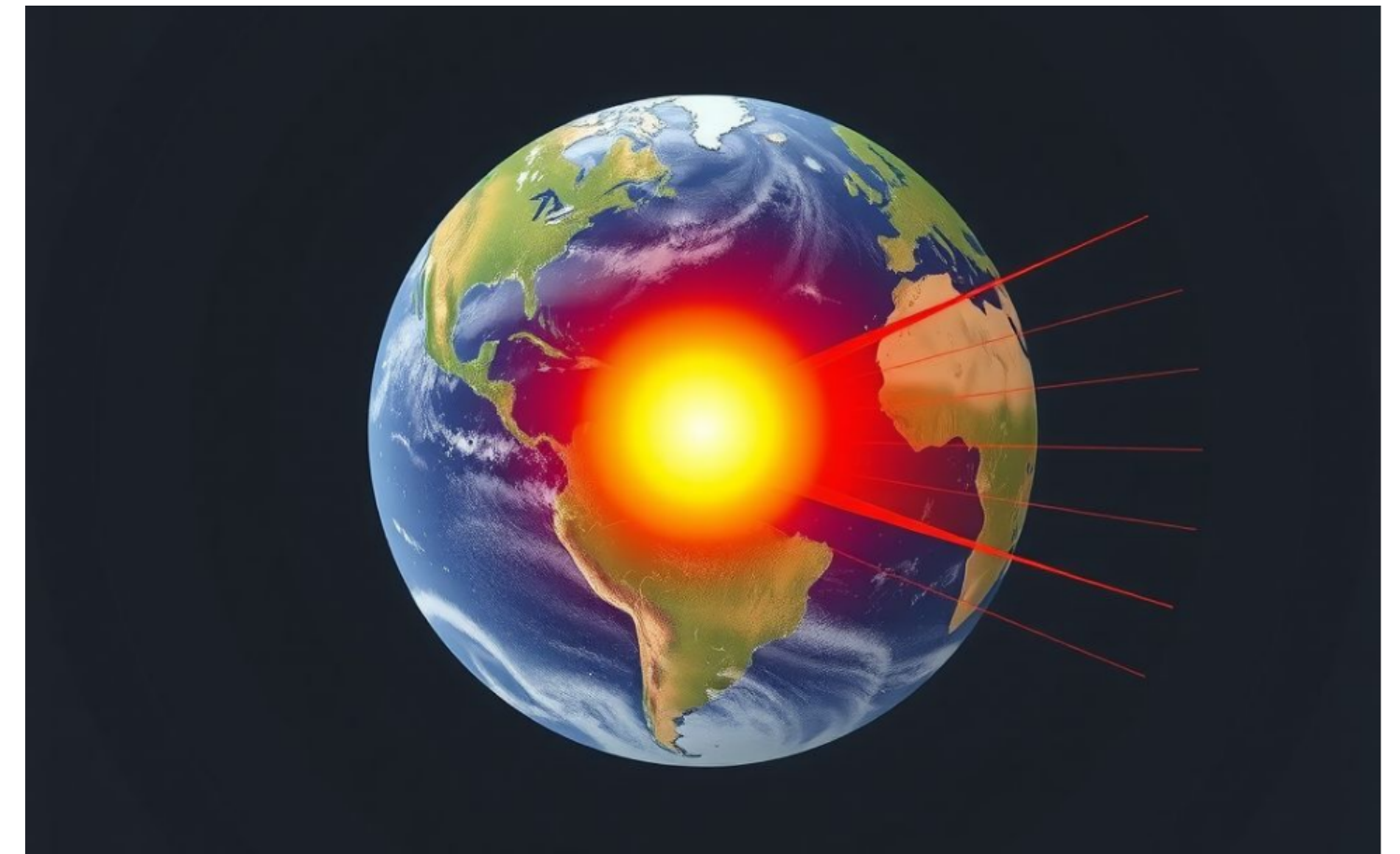
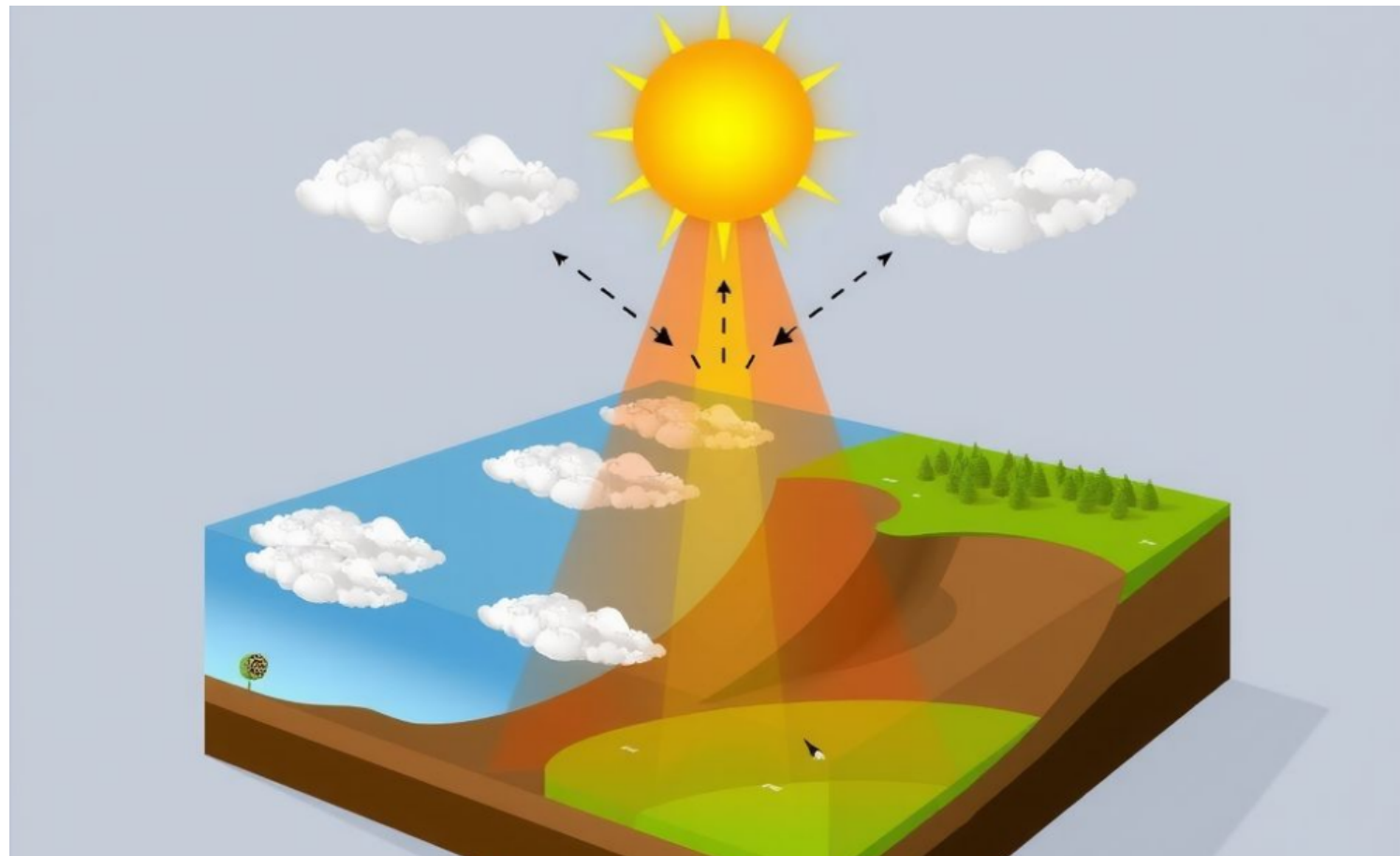
태양에너지 유입과 지구 방출의 균형

- 기후는 태양에너지 유입과 지구에서의 방출(에너지 수지)의 균형으로 조절됨
- 태양복사: 고온($5,500^{\circ}\text{C}$) 태양에서 출발, 짧은 파장으로 지구 도달
- 지구복사: 지구는 흡수한 에너지를 적외선(긴 파장) 형태로 우주로 방출

온실효과의 메커니즘

- 온실가스는 방출된 적외선 일부를 흡수하여 다시 지표로 재방출
- 자연 온실효과 없으면 지구 평균기온 -18°C → 생명체 생존 불가
- 산업혁명 이후 온실가스 증가로 온실효과 강화 → 에너지 균형 붕괴

태양에너지 경로



대기와의 상호작용

- 태양복사는 대기과 상호작용하며 흡수, 반사, 산란 과정 겪음
- 반사(Reflection): 대기·구름·지표에서 약 30% 반사
- 알베도(반사율): 얼음/눈은 반사율 높음, 해빙 감소 → 흡수 증가
- 산란(Scattering): 오존층·에어로졸·구름이 에너지 분포 조절

지표 가열과 방출

- 지표에 도달한 태양에너지는 지표를 가열
- 가열된 지표는 적외선 형태로 에너지 방출
- 방출된 적외선 중 일부는 온실가스에 흡수됨
- 온실가스는 흡수한 에너지를 모든 방향으로 재방출

에너지수지와 기후변화

정상 시스템	에너지 불균형	초과 에너지 분포	기후시스템 영향
- 정상적 기후시스템: - 유입(태양복사) = 방출(지구복사) - 에너지 균형 상태 - 기후 안정 유지	- 온실가스 증가로 방출 감소 - 에너지 축적 발생 - 지구 시스템 내 열 축적	- 초과 에너지 분포: - 해양: 91% - 육지: 5% - 빙하: 3% - 대기: 1%	- 지구온난화 가속 - 해수면 상승 - 빙하 감소 - 극한기상 증가 - 생태계 교란

- 기후변화는 단순한 날씨 변화가 아니라 지구 에너지 균형의 근본적 붕괴 현상
- 온실가스 증가로 지구는 흡수하는 에너지보다 방출하는 에너지가 적어져 초과 에너지가 축적되는중
- 이 에너지의 대부분은 해양에 저장되며, 이로 인한 기후시스템 불안정화는 장기적이고 광범위한 영향 미침

3. 온실가스의 종류 및 역할

온실가스의 정의와 역할

온실가스란?

지구가 방출하는 적외선 복사 에너지를 대기 중에서 흡수·재방출하는 기체

자연적 온실효과

지표 평균기온을 약 15°C로 유지하여 생명체 존립의 기반 제공

인위적 온실효과 강화

화석연료 연소·산림 벌채 등으로 온실가스 급증, 기후 불안정 초래

온실가스의 종류

IPCC·국제협약(교토의정서, 파리협정) 지정 6대 온실가스 중 주요 3가지

이산화탄소(CO₂)

- 주요 배출원: 화석연료 연소, 시멘트 생산, 산림 벌채
- 대기 중 체류기간: 300~1,000년
- 지구온난화지수(GWP): 1 (기준값)

메탄(CH₄)

- 주요 배출원: 축산업, 농업, 폐기물 매립, 화석연료 채굴
- 대기 중 체류기간: 약 12년
- 지구온난화지수(GWP): 27~30배 (CO₂ 대비)

아산화질소(N₂O)

- 주요 배출원: 농업용 비료, 화석연료 연소, 산업공정
- 대기 중 체류기간: 약 114년
- 지구온난화지수(GWP): 273배 (CO₂ 대비)

탄소중립 대상 온실가스의 종류 (2)

수소불화탄소(HFCs)

- 냉매, 에어컨, 냉장고 등에 주로 사용
- 반도체 제조공정에서도 발생
- 온난화지수 100~12,400으로 매우 높음
- 몬트리올 의정서에 따라 단계적 감축 중

과불화탄소(PFCs)

- 알루미늄 제련, 반도체 제조 과정에서 발생
- 화학적으로 매우 안정적이어서 대기 중 장기 체류
- 온난화지수 6,630~11,100으로 CO₂의 수천 배
- 대체물질 개발 및 공정 개선으로 감축 추진

육불화황(SF₆)

- 전기 절연가스, 변압기, 차단기 등에 사용
- 반도체 식각 공정에서도 활용
- 온난화지수 23,500으로 온실가스 중 최고 수준
- 대기 중 체류기간 3,200년으로 매우 길어 관리 중요

온실가스 선정 기준

- 기후영향: 지구온난화에 미치는 영향력 고려
- 대기 체류기간: 장기간 영향을 미치는 가스 우선 관리
- 배출량: 전 세계적으로 상당량 배출되는 가스 선정
- 감축 실효성: 기술적·경제적 감축 가능성 고려

온실가스의 기후시스템 내 주요 역할

지구 온도 유지	온실가스 없으면 지구 평균기온 -18°C로 생명체 생존 불가능
에너지 순환 조절	대기 중 에너지 축적·방출 속도 제어하여 복사 평형 조절
기후 불안정 유발	농도 과다 시 기온 상승, 폭염, 가뭄, 태풍 등 극한 기후 발생
해양 영향	열 흡수 증가로 수온·해류 변화, 해수면 상승, 해양 산성화 초래
생태계 변화	기온 상승과 강수 패턴 변화로 생물 다양성 감소, 서식지 소멸

복사강제력의 개념과 중요성

복사강제력이란?	양/음의 강제력	CO ₂ 의 영향	에어로졸 효과
- 지구 흡수 에너지와 방출 에너지의 차이를 수치화 - 기후변화의 원인을 정량적으로 평가	- 양(+): 더 많이 흡수→기온 상승 - 음(-): 더 많이 방출→기온 하강 - 0: 유입·방출 균형	- 전체 온실가스 중 66% 차지 - 현재 +2.29 W/m² - 농도·흡수력 높고 수명이 김	- 복사강제력 약 -1.1 W/m² - 햇빛 반사로 냉각효과 제공 - 단기 체류 특성

- 복사강제력은 기후변화의 방향성과 속도를 결정하는 핵심 지표
- 온실가스 증가는 양의 복사강제력을, 에어로졸은 음의 복사강제력을 유발
- 이러한 균형이 깨지면서 지구 온난화가 진행되고 있으며, 복사강제력 변화는 기후변화 조기 경고지표이자 감축·적응정책 설계의 과학적 기초

4. 기후변화의 원인과 증거

기후변화의 원인



자연적 요인

태양 복사량 변동, 화산활동, 해양순환(엘니뇨·라니냐), 지구 궤도 변화, 자연적 탄소 순환 등이 있으며, 과거 빙하기와 간빙기 등 장기적 기후변화를 설명

인위적 요인

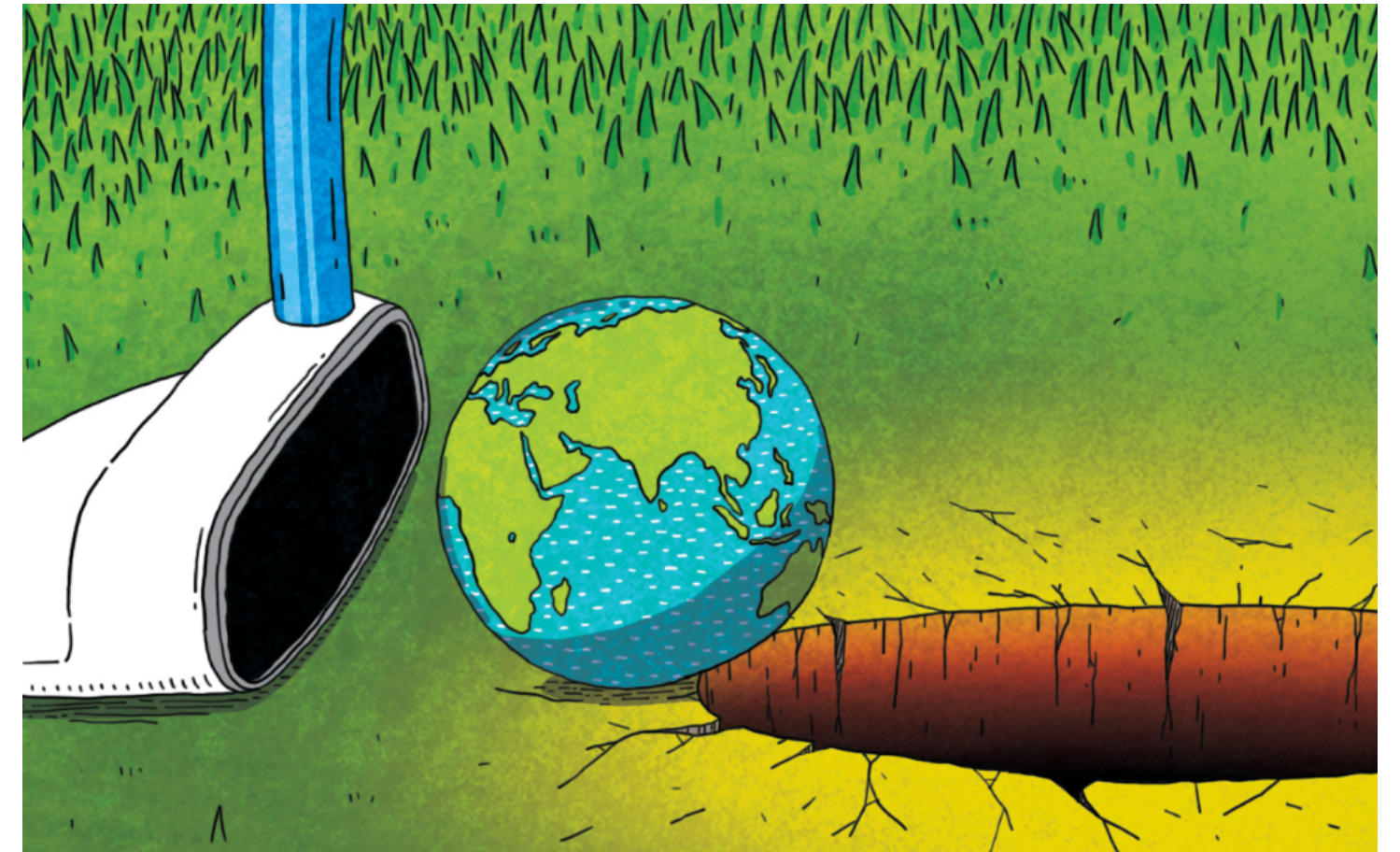
산업혁명 이후 화석연료(석탄, 석유, 가스) 대량 사용, 산업화·도시화, 삼림 벌채, 농업·가축사육 등으로 대기 중 온실가스 농도가 급격히 증가하여 기후시스템 균형을 교란시키는 중

지구 평균기온 상승과 티핑포인트



지구 평균기온 상승

- 2024년 지구 연평균 기온, 산업화 이전 대비 약 1.55°C 상승 (관측 이래 최고치)
- 단기적 요소(엘니뇨, 해양 열 변화)와 장기 온난화 추세가 중첩된 결과
- 파리협정 1.5°C 목표에 근접하거나 초과하는 상황
- 온난화 속도가 가속화되어 기후변화 영향 심화



기후 티핑포인트

- 티핑포인트: 임계값 초과 시 돌이킬 수 없는 급격한 변화 발생 지점
- 주요 위험 사례: 그린란드/서남극 빙상, 영구동토층, 대서양 자오선 순환(AMOC), 열대 산호초
- 임계값은 단일 수치로 고정 X 다양한 변수에 따라 변동
- 최근 다수 시스템에서 임계점 접근 또는 도달 징후 관측

극지방과 빙권의 변화

해빙·빙상·빙하의 빠른 감소

- 북극해 해빙 면적 급감, 여름철 북극 해빙 완전 소멸 가능성 증가

알베도 효과 약화와 온난화 가속화

- 흰색 얼음 감소로 태양에너지 반사율 저하, 더 많은 열 흡수로 온난화 가속

영구동토층 융해와 메탄 방출

- 시베리아 등 동토층 융해로 갇혀있던 메탄 방출, 추가 온난화 유발

해양 열함량 증가와 해수면 상승

- 지구 온난화로 인한 초과 에너지의 대부분은 해양에 흡수되어 해수면 상승과 해양 생태계 변화를 초래
- 이는 기후변화의 가장 명확한 증거 중 하나로, 장기적인 영향이 예상됨

해양 열함량 증가

- 초과 에너지의 약 91%가 해양에 흡수됨(1971~2018 기준)
- 최근 8년 연속 해양 열함량 최고치 경신
- 온난화 속도 과거 대비 3배 수준으로 증가

해수면 상승의 원인과 추세

- 2024년 위성 관측 사상 최고 해수면 기록
- 최근 10년간 상승속도 4.7mm/년(과거 2.1mm/년의 2배)
- 해수면 상승은 단기 변동 존재해도 장기적·지속적 추세

해양 열팽창과 빙하 용해의 영향

- 해수면 상승의 50% 이상은 해양 열팽창에 기인
- 그린란드와 남극 빙하 용해로 담수 유입 증가
- 해안 저지대 침수 위험 및 기후난민 발생 가능성 증가

해양 산성화의 진행

대기 중 CO₂의 해양 흡수

- 산업 활동 증가로 대기 중 CO₂의 약 25~30%가 해양에 흡수됨
- 해양은 중요한 탄소 흡수원 역할 수행
- CO₂가 해수와 결합하여 탄산(H₂CO₃) 형성

해수 pH 감소 추세

- 해수 pH는 1985~2023년간 10년당 -0.017 단위의 속도로 감소
- 약알칼리성 유지이나 산성화 추세 지속
- 산업화 이전보다 약 30% 더 산성화됨

지역별 산성화 속도 차이

- 인도양, 남극해, 동부 적도태평양 등에서 평균보다 더 빠른 산성화 진행
- 해양 산성화 지역 확대(전체의 약 47%)
- 지역별 해류, 수온 차이가 산성화 속도에 영향

해양 생태계에 미치는 영향

- 석회질 껍데기를 가진 생물(산호, 조개류) 성장 저해
- 해양 생물의 면역력과 생식능력 감소
- 해양 생태계 먹이사슬 교란 및 생물다양성 감소
- 해양의 CO₂ 흡수 능력 약화로 기후변화 가속화

극한 기후 현상의 증가

폭염	최근 수십 년간 발생 확률 2배 증가, 강도와 지속기간 증가
폭우와 홍수	강수 패턴 변화로 집중호우 빈도 증가, 홍수 피해 확대
가뭄	고온과 강수량 감소로 심각한 가뭄 증가, 물 부족 심화
허리케인과 태풍	해수면 온도 상승으로 강도 증가, 피해 규모 확대
산불	고온 건조한 환경으로 대형 산불 발생 빈도와 규모 증가

5. 기후변화의 사회경제적 영향

기후변화의 사회경제적 영향



식량 안보 위협

- 이상기후로 인한 작물 생산량 급감: 유럽, 미국, 아프리카 등에서 수천만 명이 식량위기 직면
- 홍수로 인한 농경지 침수 및 생산기반 붕괴(2022 파키스탄 사례)

수자원 부족 심화

- 해수면 상승으로 담수 오염 및 염분화: 2050년까지 일부 도서국 등에서 식수 부족으로 인한 이주민 증가 예상
- 가뭄으로 인한 댐 수위 하락과 전력 생산 저하(2022 중국 양쯔강 유역 사례)

경제적 손실과 금융시스템 영향



자연재해로 인한 경제적 피해

- 허리케인·홍수·산불 등으로 미국에서 1,650억 달러, 유럽에서 600억 유로 규모 피해(2022~2023)
- 해수면 상승·홍수 위험이 해안 도시 부동산 가치 하락
- 플로리다 부동산 2030년까지 15% 하락 전망



금융·보험 산업 리스크 증가

- 보험금 지급 규모 확대, 보험료 인상 및 위험지역 보험사 철수(2023년 미국·유럽)
- 탄소집약 산업 자산의 매몰비용 증가, 투자 시장 불안
- 금융기관의 투자 포트폴리오 재조정과 기후리스크 평가 강화

기후변화와 건강문제

폭염·대기오염으로 인한 건강 피해

- 유럽 2023년 폭염으로 61,000명 초과 사망
- 아시아 일부 지역은 열사병·탈수 등 피해 급증

호흡기·심혈관 질환 악화

- 고온과 미세먼지 증가로 호흡기·심혈관 질환 악화
- 전 세계 대기오염 조기 사망자 연 700만 명 이상(WHO)

감염병 확산 위험 증가

- 기후변화로 모기·진드기 등 매개체 서식지 확대
- 말라리아·뎅기열 등 감염병 발생률 증가

6. 기후변화의 미래 예측 및 모델링

기후 예측 시나리오의 진화

- 기후변화 예측을 위한 과학적 모델링은 지속적으로 발전해왔으며,
- 초기 단순 온실가스 농도 기반에서 사회경제적 요소를 통합한 복합 시나리오로 진화함

RCP 시나리오

- 대표농도경로(RCP): 온실가스 농도에 따른 복사강제력 수준 기반
- 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 W/m² 네 가지 경로로 구분
- 사회경제적 요인 반영 한계, RCP8.5는 과도 예측 비판 존재

SSP 시나리오

- 공통사회경제경로(SSP): 사회·경제적 발전 방향성 반영
- 인구, 경제성장, 기술발전, 국제협력 등 요소 통합
- SSP1~5까지 다양한 미래사회 경로 제시
- RCP와 결합하여 SSP-x.y 형태로 표현

통합적 접근의 중요성

- 기후변화는 단순 물리적 현상이 아닌 사회·경제와 연계된 복합 문제
- 정확한 예측을 위해 자연과학+사회과학 통합 필수
- 정책결정, 국제협상, 금융시스템 대응 등에 과학적 근거 제공

AR6 시나리오 분류(1)

SSP1-1.9

- 지속가능한 녹색성장 경로
- 국제협력 강화, 불평등 감소
- 매우 낮은 온실가스 배출
- 2100년 약 1.4°C 상승(파리협정 1.5°C 목표 유일 달성)

SSP1-2.6

- 지속가능 발전 중시 사회
- 화석연료 의존도 점진적 감소
- 낮은 온실가스 배출 수준
- 2100년 약 1.8°C 상승(상당한 기후피해 감소)

SSP2-4.5

- 현재 정책 유지 시나리오
- 국가별 발전 격차 지속
- 중간 수준 온실가스 배출
- 2100년 약 2.7°C 상승(이상기후 현상 증가)

시나리오 의미

- 각 시나리오는 가능한 미래 경로를 제시
- 온실가스 감축 정도에 따른 기온 상승 차이 명확
- 정책 선택에 따라 기후미래 달라짐
- 조기 감축이 장기적 기후안정에 결정적

AR6 시나리오의 체계적 분류(2)

SSP3-7.0	국가 간 갈등·불균형 심화, 높은 배출, 3.6°C 상승
SSP5-8.5	화석연료 중심 성장, 매우 높은 배출, 4.4°C 상승
정책적 활용	국가·기업의 기후리스크 평가 및 적응전략 수립 기초자료
불확실성 관리	다양한 미래 경로 제시로 정책 불확실성 대응력 강화
시나리오 선택	현실적 감축 목표와 장기 지속가능성 균형 필요

IPCC AR6의 핵심메시지(1)

인간 영향 명확성	극한 기상 증가	1.5°C 목표 위기	탄소예산 한계
- 인간 활동이 기후 변화를 유발했음이 과학적으로 명백함 - 관측된 온난화의 주요 원인은 인위적	- 폭염, 집중호우,가뭄 등 극한 현상 빈도·강도 증가 - 전 세계 인구 절반 이상이 직접 영향	- 현재 추세 지속 시 2030년대 초반 1.5°C 한계 도달 - 파리협정 목표 달성 시간 매우 제한적	- 남은 탄소예산 약 4,000억톤(CO₂) - 현재 배출 속도로 약 10년 내 소진 - 즉각적 감축 필요

- IPCC AR6는 기후변화의 과학적 확실성과 시급성을 강조함
- 인간 활동으로 인한 온실가스 배출이 기후변화의 주요 원인임이 명확하며, 이미 전 지구적 영향이 관측됨
- 1.5°C 목표 달성을 위한 시간이 매우 제한적이며, 즉각적이고 대규모적인 온실가스 감축이 필요

IPCC AR6의 핵심메시지(2)



2030년까지 온실가스 43% 감축 및 2050년 탄소중립 달성 필요

- 모든 부문에서 2030년까지 온실가스 최소 43% 감축 필요
- 2050년까지 탄소중립(Net-Zero) 달성이 기후안정화의 필수 조건

적응역량·복원력 강화 및 기후취약국 지원의 중요성

- 기후변화 적응과 복원력 강화를 위한 시스템적 접근 필요
- 기후취약국·저개발국에 대한 재정·기술 지원 확대 및 국제협력 강화

기후변화 대응을 위한 과제

- 기후변화 대응을 위해서는 과학적 이해를 바탕으로 한 종합적 접근이 필요
- 과학적 이해 기반 정책 수립: 최신 기후과학 연구결과를 정책에 반영하고, 과학-정책 연계 강화
- 국제협력과 공동 대응: 파리협정 이행 강화 및 국가별 차별화된 책임과 능력 인정
- 탄소중립 사회로의 전환: 에너지, 산업, 수송, 건물 등 전 부문의 저탄소화 및 순환경제 구축
- 기후 회복력 강화: 취약계층·지역 보호, 생태계 보전, 적응 인프라 확충으로 기후위기 대응력 향상