



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제안

Major Projects for Carbon Neutrality Based on
Climate and Environmental Information



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제안

Major Projects for Carbon Neutrality Based on
Climate and Environmental Information

연구위원장

하경자 한국과학기술한림원 정회원, 부산대학교 교수

이공주 한국과학기술한림원 정회원, 이화여자대학교 교수

연구위원·간사

김경숙 (전) 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

김용표 이화여자대학교 교수

윤제용 서울대학교 교수

이명인 한국과학기술한림원 준회원, 울산과학기술원 교수

정수종 서울대학교 교수

최미화 (전) 한국전력공사 전력연구원 책임연구원(간사)

허창희 한국과학기술한림원 정회원, 서울대학교 교수

요약문 Summary

1. 기본적인 기후에 대한 이해를 바탕으로 자연적인 기후변동과 온실가스 증가에 의한 기후변화의 원인과 과정을 과학적으로 제시하였으며, 특히 극한기후(폭염, 한파, 집중호우와 극한 강풍 등)의 현황과 기후변화와의 관련성을 이해하고, 이러한 기후변화와 극한기후에 대응하는 전략으로써 국제 협력, 정부와 지자체, 기업과 개인의 역할을 제시하고, 이에 대응하기 위한 현실적인 조치를 제시함.
2. 지구온난화의 영향이 가속화되고 있고, 미래 기후변화 예측에 매우 중요한 북극과 남극의 기후변화 현황과 원인을 과학적으로 이해하고 과학적 불확실성을 극복하기 위한 주요 연구주제와 극 지역 기후변화에 대응하기 위한 국제 협력 등의 정책을 제언함.
3. 기후변화와 탄소중립 달성 과정에서 발생 가능한 환경 문제를 대기환경 변화를 중심으로 제시하였으며, 탄소중립 과정에서 대기오염 물질별 미래 변화를 예측하고 대비하기 위한 단기적, 장기적 과정을 토의하고 필요한 정책들을 제언함.
4. 탄소중립 실현에 필요한 탄소흡수원에 대한 역할을 설명하고, 육상 생태계와 해양 생태계의 자연 탄소흡수원인 산림, 해양, 토양, 농지, 습지 등과 다양한 그린 인프라, 바이오차(Biochar)의 탄소흡수 증진 기술에 대해 설명하고, 탄소흡수원 증진을 통해 탄소중립에 필요한 국내외 탄소흡수원 증진 정책과 계획을 제언함.
5. 탄소중립 엔지니어링의 개념을 정립하고, 이를 통해 화석연료의 질량과 에너지 관련성을 온실가스 배출량과 연계하고, 국내 온실가스 배출 특성을 파악하여 화석연료별 물질 및 에너지 관계표를 만들고 이를 표준화하여 탄소 배출의 특성을 신속하게 파악하여 이에 대한 정책 수립을 수월하게 할 수 있는 방법과 실천방안에 대해 제언함.

목차

I	기후, 기후변화, 극한기후	
	1. 기후의 이해	10
	2. 기후변화의 원인과 과정	13
	3. 극한기후의 이해	17
	4. 지구온난화와 극한기후의 관계	21
	5. 기후변화와 극한기후에 대응하는 전략	26
	6. 극한기후 대응을 위한 현실적 조치	32
II	극 지역의 기후변화	
	1. 북극 증폭 현상과 기후변화	40
	2. 남극 기후변화 특성과 의미	46
	3. 시사점 및 제언	50
III	환경 문제	
	1. 기후변화에 의한 대기환경 영향	58
	2. 탄소중립 실현에 의한 대기환경 영향	60
	3. 시사점 및 제언	69
IV	탄소흡수원 현황 및 증진 방안	
	1. 탄소흡수원의 개념	76
	2. 탄소흡수원의 국내 현황	81
	3. 육상 생태계 기반 탄소흡수 증진 기술	87
	4. 시사점 및 제언	93

목차

V	탄소중립 엔지니어링을 통해서 본 우리나라 온실가스 배출 특성의 이해	
1.	탄소중립 엔지니어링의 개념	98
2.	우리나라의 화석연료 사용 흐름	102
3.	우리나라의 탄소 배출 특성	105
4.	화석연료별 물질 및 에너지 관계표 만들기	107
5.	ME plot; 에너지와 온실가스 측면에서 화석연료의 표준화된 비교	110
6.	화석연료별 온실가스 배출량 분석 방법의 일반적인 적용	113
7.	시사점 및 제언	115
부록	보고서 요약 자료	117

기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

Major Projects for Carbon Neutrality Based on Climate and Environmental Information

표목차

〈표 4.1〉 국립공원 전체 육상 생태계 탄소흡수원 유형별 탄소 저장량	84
〈표 5.1〉 연소 과정에서 발생하는 화석연료별 질량 대비 에너지(열량)값	108
〈표 5.2〉 화석연료별 질량, 에너지, 온실가스(이산화탄소)를 기준으로 한 환산계수	111

그림목차

〈그림 2.1〉 미국 NASA에서 발표한 2022년 기온 이변	41
〈그림 2.2〉 해양의 열 흡수와 방출의 기여를 계절적으로 설명하는 도식도	42
〈그림 2.3〉 북극 온난화 증폭부터 중위도 극한기상 발생까지의 연계 기작 및 한계점	46
〈그림 2.4〉 관측된 남극 해빙과 해수면 온도의 변화 경향	47
〈그림 3.1〉 서울의 초미세먼지 연평균 농도와 농도별 발생빈도 추이, 고농도 발생일수	57
〈그림 3.2〉 대기환경연구소의 초미세먼지와 주요 구성 성분의 연평균 농도 추이	58
〈그림 3.3〉 전 세계 조기 사망자 수와 대기오염물질 배출 추이 예측	61
〈그림 3.4〉 탄소중립을 달성하기 위한 여러 방법이 영국의 대기환경에 미치는 영향	63
〈그림 3.5〉 국내의 2018년 대비 2050년 부문별 에너지 소비량과 에너지원별 예상	64
〈그림 3.6〉 기준연도(2018) 및 기본 시나리오(2030 BL*), 목표 시나리오(2030 NDC**)에 따른 2030년 전체 대기오염 물질별, 부문별 배출량 추산 결과	66
〈그림 3.7〉 기준연도(2018년) 대비 탄소중립 목표 이행에 따른 부문별 초미세먼지 농도 감축 효과	67
〈그림 3.8〉 2018년 대비 탄소중립 전략 이행에 따른 2030년 온실가스 배출 및 초미세먼지 농도 감축량에 대한 부문별 기여도	68
〈그림 3.9〉 효과적인 기후변화와 환경 관리를 위한 정책 수립 과정	71

목차

〈그림 4.1〉 화석연료의 연소와 토지이용 변화에 따른 탄소 배출량(+ve)과 흡수량(-ve)	77
〈그림 4.2〉 인간의 활동으로 인해 배출된 탄소의 전 지구적 탄소순환 변화	77
〈그림 4.3〉 육상 생태계 내 탄소순환 주요 과정	78
〈그림 4.4〉 전 세계에 분포하는 산림 지역에서의 연간 탄소 배출량과 흡수량	80
〈그림 4.5〉 해양 생태계에서 일어나는 대표적인 탄소흡수 과정	81
〈그림 4.6〉 우리나라 국립공원의 분포	83
〈그림 4.7〉 바다숲 사업의 결과	86
〈그림 4.8〉 습지 내 탄소 순환	88
〈그림 4.9〉 바이오차를 활용한 유기물의 탄소 저장 과정	90
〈그림 4.10〉 IPCC 이산화탄소 저감 기술의 비용 및 저감 잠재력 비교	91
〈그림 5.1〉 탄소중립 엔지니어링(a)과 화석연료 중심 엔지니어링(b) 비교	99
〈그림 5.2〉 화석연료(톤), 에너지 생산(TOE), 그리고 온실가스(이산화탄소, tCO ₂) 관계	100
〈그림 5.3〉 국내(a)와 전 세계(b)의 온실가스 배출량	101
〈그림 5.4〉 국내 화석연료 수입(2018년)과 에너지 생산과의 관계	102
〈그림 5.5〉 국내 화석연료 수입, 에너지 생산, 온실가스 배출(2018년)과의 관계	104
〈그림 5.6〉 국내 화석연료별 온실가스 배출 특성(2018년)	105
〈그림 5.7〉 화석연료의 Mass-Energy Plot	110
〈그림 5.8〉 에너지(TOE), 이산화탄소(tCO ₂)를 기준으로 보여준 ME Plot	112
〈그림 5.9〉 국내 화석연료별 이산화탄소 예측값과 측정값 비교	113
〈그림 5.10〉 전 세계 화석연료별 이산화탄소 예측값과 측정값 비교	114

I

기후, 기후변화, 극한기후

1. 기후의 이해
2. 기후변화의 원인과 과정
3. 극한기후의 이해
4. 지구온난화와 극한기후의 관계
5. 기후변화와 극한기후에 대응하는 전략
6. 극한기후 대응을 위한 현실적 조치

I

기후, 기후변화, 극한기후

01 기후의 이해



기후는 특정한 지역 또는 지구 전체에서 나타나고 있는 평균적인 기상 조건과 일반적인 날씨의 패턴으로 정의된다. 즉, 기후는 어느 특정 지역에 일 년을 주기로 변화하는 온도, 강수량, 습도, 바람 등의 기상 요소들의 장기적인 통계값들로 표현되며, 대개 30년 이상의 장기간 기상 관측 자료에 근거한다. 이 자료들이 기후변화 분석에서 유의미한 기상의 변화를 파악하는 기준이 된다.

가. 기후의 핵심 구성 요소

- 1) 온도: 대기나 토양, 해양 등에 포함된 열에너지를 표현하는 기후 변수로, 지구의 대기순환에 결정적인 영향을 끼친다. 대개 일평균, 일최저, 일최고, 그리고 연평균 온도 등으로 나타낸다.
- 2) 대기압: 대기에 떠 있는 전체 공기의 무게를 나타낸다. 고기압과 저기압 등으로 나뉘며, 대기의 운동과 날씨 패턴의 변화를 주도한다.
- 3) 바람: 공기가 움직이는 속도와 방향을 나타낸다. 풍향과 풍속의 시간과 공간에 따른 분포를 분석해서 대기의 전반적인 움직임을 파악한다.
- 4) 강수량: 대기에서 지표면으로 떨어지는 모든 형태의 수분을 포함한다. 비, 눈, 우박 등의 양을 측정한다. 지역의 습도와 기후 조건 결정에 큰 역할을 한다.
- 5) 습도: 대기 중에 포함된 수증기의 양을 표현하는 값으로, 대개 절대 습도나 상대 습도로 나타낸다.
- 6) 일조량: 지표면에 태양 복사에너지가 도달하는 시간의 양이다. 일일 또는 연간 일조량으로 나타내며, 지구의 온도와 에너지 수급에 중요한 역할을 한다.

나. 기후변동의 자연적 원인

- 1) 자연적 기후변동: 지구 기후 시스템에서 발생하고 있는 주기적 또는 불규칙적인 변동을 나타낸다. 대표적인 몇 가지 예시를 소개하면 다음과 같다.
 - 가) 화산 폭발: 대규모 화산이 폭발하면 대기 중으로 가스상 화학물질과 입자상의 먼지가 다양하게 배출된다. 이들 입자는 지구 대기에 들어오는 태양 복사에너지의 일부 흡수하거나 반사해서 지상의 기온을 일시적으로 낮출 수 있다.
 - 나) 엘니뇨와 라니냐: 열대 태평양 해수면 온도의 주기적 변화를 나타낸다. 열대 동·중태평양 지역의 온도가 평년보다 높아지면 엘니뇨, 낮아지면 라니냐로 정의된다. 열대 태평양 해수면 온도의 변동은 전 세계 기후에 광범위하게 영향을 끼쳐 여러 지역에서 동시다발적으로 가뭄이나 홍수가 발생하기도 한다.
 - 다) 대규모 해류 변동: 대서양의 대규모 해류인 북대서양 해류나 북극해의 바렌츠 해류 등은 저위도의 따뜻한 바닷물을 고위도로 운반하는데, 시간에 따라 주기적으로 변화하며 지구 기후와 온도 분포에 중요한 영향을 준다.
- 2) 태양 활동과 천체 운동의 변화: 태양 내부의 주기적 활동이나 태양을 중심으로 공전하는 지구의 천체 운동 변화는 지구에 도달하는 태양에너지량을 변화시켜 기후에 중요한 영향을 미친다.
 - 가) 태양 활동의 변화: 태양의 흑점 수는 태양 활동의 대표적인 지표 중 하나이며, 대개 11년 주기로 변동한다. 태양 흑점의 증가는 태양에서 방출되는 에너지량의 증가를 나타낸다. 태양 복사량이 증가하면 일반적으로 지구 기온은 상승한다.
 - 나) 지구의 자전축과 공전궤도 변화: 태양을 중심으로 하는 지구의 공전궤도와 지구의 자전축 등은 오랜 시간에 걸쳐 서서히 변화하며 지구 기후의 장기적인 변동을 가져온다.
- 3) 자연재해와 기후의 연관성: 자연재해는 해당 지역의 기후 조건과 밀접하게 관련되어 있어서, 기후변동이나 인간 활동의 증가로 인해 기후가 변화하면 심각한 자연재해가 발생할 수 있다.
 - 가) 태풍: 기후가 변화하면 태풍의 발생빈도와 강도, 진로 등에 큰 영향을 줄 수 있다. 열대 지역 해수면 온도가 높아지면 태풍 강도가 강해지는 경향이 있다.
 - 나) 집중호우: 짧은 시간 동안 매우 많은 양의 강수량(비 또는 눈)이 내릴 때 발생한다. 지구온난화로 인해 대기 중 포화 수증기량이 증가하고, 이로 인해서 강수량이 증가할 수 있다. 미래에는 강우가 더 강하고 그 집중도가 높아질 것으로 예상하며, 기압과 풍향의 극단적인 변화로 집중호우의 위험성이 증가할 수도 있다.
 - 다) 가뭄: 기후변화는 가뭄의 발생과 지속 기간에 영향을 끼칠 수 있다. 여러 지역에서 기후가 불안정해지면 일시적, 혹은 서서히 강수량의 감소와 가뭄이 나타날 수 있다.
 - 라) 산불: 기후변화로 인해 지표면 기온이 높아지고 대기가 건조해지며 산불 발생 가능성이 높아질 수 있다.

다. 인간 활동과 기후변화의 연관성: 인간의 활동에 의해서 현재 기후변화가 발생하고 있다고 여겨진다. 기후변화의 영향을 최소화하고 적절하게 대응하기 위해서 국제 협력에 힘쓰고, 지속 가능한 경제와 사회적 성장 전략을 세울 필요가 있다.

1) 온실가스 배출과 기후변화

- 가) 대기 중의 온실가스는 지구에서 우주로 방출되는 복사에너지를 중간에서 흡수하고 재방출하면서 지표면 온도를 높이는 온실효과를 가져온다. 산업혁명 이래 대기 중의 온실가스는 인간 활동의 증가에 따라 지속적으로 증가하면서 온실효과가 강화되며 지구온난화 현상이 나타나고 있다.
- 나) 주요 온실가스로는 수증기, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등이 있다. 지구온난화는 평균온도 상승과 더불어 극한기상 등 극단적인 날씨 현상을 초래한다.

2) 산업화와 에너지 사용의 역할

- 가) 산업화와 이에 따른 에너지 사용은 대규모 온실가스 배출의 주요 원인 중 하나이다. 공장, 자동차, 항공기 등 산업과 교통 부문에서 화석연료의 사용으로 대기 중 이산화탄소 농도가 증가하고 온실효과가 커진다.
- 나) 이 결과로서 발생하는 지구온난화는 기후 패턴에 커다란 변화를 초래한다.

3) 기후변화가 인간의 생활에 끼치는 영향

- 가) 식량: 기후변화로 인해 폭염, 가뭄, 홍수 등이 빈발하며 농작물 생산성이 떨어지면서 세계 도처에서 식량 안보 위기를 겪을 수 있다.
- 나) 건강: 온난화와 기후변화로 인해서 부수적으로 대기질이 악화되고 전염병과 새로운 질병이 발생하여 우리 건강을 위협할 수 있다. 특히 온난화의 직접적인 결과인 폭염은 노약자의 사망률을 크게 높일 수 있다.
- 다) 경제: 기후변화로 인해 발생하는 자연재해(예: 홍수, 가뭄, 산불)는 특히 농업, 해양, 에너지 부문 등에 심각한 영향을 미쳐 국가 경제에 영향을 끼친다.
- 라) 해양 생태계: 기후변화는 해양 생태계에도 영향을 끼친다. 대표적인 예로서 산호초 파괴, 어종 이동, 해수면 상승 등의 문제를 일으킨다.
- 마) 인구 이동: 기후변화로 인해 일부 지역에서는 가뭄이 발생하고 해수면이 상승하면서 어쩔 수 없이 많은 사람이 다른 지역으로 이동할 수 있다. 이로 인해서 여러 국가 혹은 지역에서 치명적인 사회적, 경제적 문제가 발생할 수 있다.

02 기후변화의 원인과 과정

가. 온실가스와 온실효과

1) 온실가스의 정의와 종류: 온실가스는 지구 대기를 구성하는 소량 기체로서, 대기에 들어오는 태양 복사에너지는 투과시키고 지구에서 방출되는 복사에너지는 흡수하며 지구 온도를 조절하는 역할을 한다.

가) 수증기(H_2O): 가장 중요한 온실가스이다. 시간적·공간적으로 커다란 양의 차이를 보이며, 인간 활동에 따라 직접적으로 조절되지 않는 특징을 갖고 있다.

나) 이산화탄소(CO_2): 화석연료의 연소, 산림 벌채, 산업공정 등을 통해서 발생한다. 인간의 활동으로 인해 증가하고 있으며, 현재 진행되고 있는 기후변화의 발생 시작점이라고 할 수 있다.

다) 메탄(CH_4): 천연가스 추출, 폐기물 처리, 축산 등으로부터 발생하며, 이산화탄소보다 훨씬 강력한 온실가스이다. 대기 중 농도는 이산화탄소에 비해 적다.

라) 아산화질소(N_2O): 화학 비료 사용, 산림 벌채, 산업 활동 등으로부터 발생하며, 메탄보다는 약하지만, 이산화탄소보다는 강력한 온실가스이다.

마) 오존(O_3): 태양 복사에너지와 산소에 의해 성층권에서 자연 발생하는 오존과 인위적으로 배출된 오염물질에 의해 지표면에서 생성되는 오존으로 나뉜다. 오존은 성층권에서 자외선을 차단하는 중요한 역할을 하지만, 한편으로는 지구 복사에너지를 흡수하는 주요한 온실가스 중 하나이다.

2) 온실효과와 기후변화의 관련성

가) 온실가스는 지표면으로부터 우주 공간으로 빠져나가는 지구 복사에너지를 흡수하면서 지표면과 대기의 온도를 상승시키는 역할을 한다. 온실가스가 없을 때와 비교해서 지표면 온도가 $33^{\circ}C$ 정도 오르는데, 이것을 온실효과라고 부른다.

나) 자연적으로 발생하는 온실효과는 지구 생명체가 적절한 온도를 유지하도록 한다. 그러나 인간 활동으로 인해 추가로 온실가스가 대기에 방출되면서 온실효과가 강화된다. 기후변화는 극단적인 기상 조건, 해수면 상승, 생태계 변화 등을 초래하고 있다.

3) 온실가스 농도 증가와 기후 영향

가) 온실가스 농도 증가: 인간 활동으로 인해 시간이 지날수록 온실가스 농도가 크게 증가하고 있다. 화석연료 사용이 근본적인 원인이며, 산림 파괴, 농업과 산업 활동 등 다양한 원인에 의해 추가로 온실가스가 발생하고 있다.

- 나) 기후 영향: 온실가스 농도의 상승은 지구 평균온도 상승, 극한기상 사건 빈도 증가, 해수면 상승, 생태계 변화, 물 부족, 식량 안보 위협 등 다양한 형태로 기후에 영향을 끼치고 있다. 종합해서 기후변화의 형태로 나타나는데, 지구 기후의 전반적인 변화와 모든 생명체에 영향을 끼친다.

나. 기후변화에 영향을 끼치는 인자

1) 대기오염과 오존층 파괴

- 가) 대기오염은 이산화탄소와 메탄 등의 온실가스와 아산화질소 등의 오염물질을 배출시키고 있다. 이들 물질은 온실효과를 강화시키고 있다.
- 나) 오존층은 고도 20~30 km에서 오존이 밀집해 있는 층이다. 오존층은 태양 복사의 자외선 영역(파장이 0.4 μm 이하)을 흡수해서 지구 생명체를 보호하는 역할을 하고 있다. 그런데 인위적으로 생성된 물질인 염소와 브로민이 오존 분자를 파괴해 오존층을 얇게 만든다. 오존층 두께가 얇아지면 지표면에 도달하는 자외선 양이 증가하여 지구 생명체가 치명적인 피해를 입을 수 있다.

2) 지표면 변화와 도시화

- 가) 지표면 변화는 주로 산림을 파괴해서 농경지를 개발하거나 도로와 건물을 건설하는 등 인간 활동의 증가로 발생한다. 토지이용의 증가는 지표면의 특성을 변화시키며, 대기와 지표면 사이의 에너지와 물의 교환 과정을 변화시킨다. 토지이용의 증가는 지구온난화를 가속화하고 기후변화에 영향을 끼칠 수 있다.
- 나) 도시화는 도시의 성장과 확장을 의미하는데, 도시로의 인구집중에 따른 인공구조물의 증가와, 자동차, 산업 활동, 에너지 사용의 증가는 대기오염물질과 온실가스 배출 증가를 초래하며, 그 결과로 도심의 기온이 교외 지역보다 높아지는 열섬 효과를 강화시킨다. 이러한 온도 변화는 기후변화와 더불어 지역적 기후 패턴을 바꾼다.

3) 해양 영향과 해양 산성화

- 가) 지구 표면의 70%를 덮고 있는 해양은 지구의 기후를 조절하는 데 중요한 역할을 한다. 해양은 대기 중에 축적될 수 있는 에너지를 흡수해서 온도를 안정화하고, 대기 중 이산화탄소를 흡수해서 지구온난화를 완화한다. 그러나 과다한 열에너지와 이산화탄소의 흡수는 해수면 온도 상승과 해양 생태계와 기후 패턴에 영향을 미치며, 해수면 고도의 상승은 해안 지역에 심각한 영향을 끼친다.
- 나) 대기 중의 이산화탄소를 해양이 과다하게 흡수하면서 바닷물의 산성도가 높아지는 것을 해양 산성화라고 한다. 해양 산성화는 해양 생태계 전반에 부정적인 영향을 끼치며, 특히 산호와 같은 민감한 해양 생태계에 위협을 주고 있다. 해양 산성화로 인해서 어류 등 해산물의 성장과 생존이 크게 위협을 받는다.

다. 기후모델과 미래 전망

- 1) 기후모델의 개요: 기후모델은 지구의 기후 시스템을 수치로 실험하고 예측하기 위해 사용되는 수학적 모델이다. 기후모델은 지구의 대기, 해양, 빙하, 토지 표면 등 다양한 구성 요소 간의 상호작용 및 기후변화의 원인과 영향을 이해하고 미래 기후를 예측하는 데 유용하다.
 - 가) 기본 원리와 구성 요소: 기후모델은 대기와 해양의 운동, 에너지와 물질의 시공간적 변화를 표현하는 수학적 미분방정식들을 구성하고, 이를 컴퓨터 코드화해서 지구의 물리적, 화학적, 생물학적 변화 과정을 계산한다. 모델은 일반적으로 대기 모델, 해양 모델, 지표면 모델, 해빙 모델, 생태 모델 등 여러 지구 시스템의 구성 요소를 포함한다. 각 구성 요소는 상호작용하면서 전체 기후 시스템의 변화를 모의하고 실험한다.
 - 나) 공간과 시간해상도: 기후모델은 시공간적으로 연속성을 가지는 미분방정식들을 컴퓨터로 계산하기 위하여 3차원 공간을 유한한 격자(그리드)들로 나누고, 시간적 변화에 대해서도 일정한 간격으로 나누어 표현한다. 공간을 나타내는 격자의 간격이 적을수록 공간해상도는 증가하며 상세한 정보를 나타낼 수 있으나, 시간 간격 또한 줄면서 시간해상도가 증가하므로, 결과적으로 미래를 예측하기 위한 계산 시간이 기하급수적으로 증가한다.
 - 다) 초기 조건과 경계 조건: 기후모델은 초기 조건과 경계 조건을 설정해야 한다. 초기 조건은 모델 실험을 시작할 때의 상태를 나타낸다. 또한 지표면과 대기의 여러 관측 자료(온도, 이산화탄소 농도, 태양 복사량 등)를 경계 조건으로 대입해야 한다.
 - 라) 미래 시나리오와 예측: 기후모델은 다양한 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래 기후를 모의실험할 수 있다. 다양한 배출 시나리오에 따라 대기 중의 온실가스 농도는 상이하게 변화하며 미래의 기후변화 양상도 시공간적으로 상이하게 전개된다.
 - 마) 불확실성과 검증: 기후모델은 모델 내 물리적 불확실성과 입력 자료의 불확실성을 고려해야 하며, 모델 결과는 관측 자료와 비교해서 검증되어야 한다.
 - 바) 응용 분야: 기후모델은 기후변화 연구, 기상과 해양 예측, 자연재해 예측, 정책 결정, 그리고 지속 가능한 개발 계획 등 다양한 분야에서 활용된다.

2) 모델 예측의 불확실성

- 가) 입력 자료의 불확실성: 기후모델에 대입되는 초기 조건과 미래의 상황을 가정한 주변 조건에는 커다란 불확실성이 있다. 온실가스와 오염물질의 농도, 지표면과 식생의 변화, 극 주변의 빙하나 해빙 분포 등이 미래에 어떻게 변할지 예측하기 어려우며, 필연적으로 미래 예측에 불확실성이 포함될 수밖에 없다.
- 나) 미래 시나리오의 불확실성: 미래의 기후변화를 예측하려면 다양한 배출 시나리오를 고려해야 한다. 미래 시나리오에 따라 온실가스 배출량이 변하는데, 이에 따라 전혀 다른 기후 예측 결과가 산출된다. 미래 인구 증가율, 에너지 생산 방식, 정책 변화 등을 고려해 다양한 시나리오를 설정하나, 어떤 시나리오가 실제로 발생할지 모를 일이다.

- 다) 모델의 불확실성: 기후모델 자체에도 불확실성이 존재한다. 모델은 지구의 복잡한 기후 시스템을 단순화하여 모사하는데, 일부 물리적 과정이 상대적으로 단순화되거나 근사적으로 표현될 수도 있다. 모델 모수와 방법의 설정, 격자해상도, 수치계산 방법 등의 선택에 따라 미래 예측 결과가 달라질 수 있다.
- 라) 자연적 변동: 기후 시스템은 자연 변동성 요인에 의해 영향을 받는다. 화산 폭발 등 대규모 자연 변동이 전 세계 기후 패턴의 예측을 어렵게 만들 수 있다.
- 마) 경제와 정책의 불확실성: 미래의 기후변화는 인간 활동, 경제 성장, 에너지 정책 등에 크게 영향을 받으며, 인간 활동의 불확실성이 미래의 온실가스 배출 패턴을 예측하기 어렵게 한다.

3) 미래 기후 전망과 시나리오

- 가) 배출 시나리오: 온실가스 배출량은 미래 기후에 큰 영향을 끼친다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제6차 보고서(IPCC, 2021)가 제시하는 미래 전망의 경우, 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)2-4.5 시나리오는 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도를 중간 수준으로 가정하며, SSP5-8.5는 산업 기술의 빠른 발전으로 화석연료 사용이 높고 기후변화 완화 정책이 실패하는 경우를 예상한다.
- 나) 경제와 인구 시나리오: 인구 증가율, 경제 성장, 에너지 생산 방식 등은 배출 시나리오와 관련이 있다. 다양한 경제와 인구 밀도 변화 시나리오는 배출 시나리오와 함께 사용되어 미래 기후변화를 예측한다.
- 다) 기술 발전 시나리오: 기술 발전과 에너지 생산 방식의 변화는 온실가스 배출에 영향을 준다. 재생에너지 기술 발전과 에너지 효율성 향상은 배출량을 줄이는 요인이 된다.
- 라) 정책 시나리오: 정부 정책과 국제 협정의 변화는 배출 시나리오에 영향을 끼친다. 온실가스 감축을 위한 국제적인 노력으로 배출이 줄어들 수 있다.
- 마) 자연 변동성과 임계점: 자연 변동성과 지구 시스템의 임계점을 고려하는 시나리오도 중요하다. 이를 통해 시나리오의 불확실성을 일부 상쇄할 수 있다.

03 극한기후의 이해

극한기후(extreme climate)는 일반적인 기후 상태와 비교해서 매우 높은 또는 낮은 온도, 강수량, 바람, 습도 등의 특이 기상 현상을 의미한다. 극한기후 현상은 일반적으로 특정 지역에서 비정상적으로 발생해서, 그 지역의 일상적인 기후 패턴을 크게 벗어난다. 극한기후는 일상 기후와 비교하여 예측이 어렵고 예기치 못한 영향을 끼치며, 기후변화가 진행되면서 그 강도와 빈도는 더 강해진다. 극한기후 현상은 기후과학자, 정책 결정자, 그리고 지역 사회의 주요 관심사이다.

가. 극한기후의 개념

1) 극한기후의 정의

- 가) 극한기후: 극한기후는 정상 상태의 일상적인 기후 변동 범위를 벗어나 극도로 높거나 낮은 기후 조건을 나타낸다.
- 나) 기간과 빈도: 극한기후 현상은 일반적으로 짧은 기간 동안 발생하며, 일상적인 기상 현상과 비교해서 훨씬 드물다.
- 다) 영향과 위험: 극단적인 현상은 예측하기 어렵고, 사회 인프라, 일상생활, 건강 문제, 작물 수확량 등에 심각한 영향을 초래할 수 있다.

2) 극한기후 대응의 중요성

- 가) 재난 관리와 대응: 극한기후는 자연재해와 관련되어 있어서 체계적이고 종합적인 대응과 관리가 필수적이다. 대응책으로 인명 구조, 피해 복구, 재해 예방, 비상 대응 계획, 시설 보호 등이 포함된다. 기후변화로 인해 극한기후 현상이 예상보다 빈번하게 발생할 수 있으므로 철저한 대비가 요구된다.
- 나) 건강 영향: 극한 폭염과 한파는 인간 건강에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다. 높은 온도로 인해서 열사병, 심장 질환, 호흡기 질환이 늘어나고 갑작스러운 추위로 인해서 동상, 독감, 골절 등의 건강 문제가 발생한다.
- 다) 농업과 식량 안보: 집중호우 또는 가뭄은 농작물에 부정적인 영향을 끼치는데, 농작물 수확량을 감소시키고 식량 공급에 악영향을 끼친다. 농업과 식량 생산에 끼치는 피해를 최소화하기 위한 체계적인 대응이 필요하다.
- 라) 자연환경과 생태계: 극한기후는 생태계와 자연환경에 영향을 끼친다. 폭우와 홍수는 수생 생태계와 물 공급에 문제를 일으킬 수 있으며, 긴 기간의 가뭄은 생태계와 생물다양성을 위협한다.

- 마) 경제 영향: 극한기후는 여러 경제 활동에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 특히 보험, 농업, 에너지 생산, 인프라 분야에 큰 영향을 줄 수 있다.
- 바) 기후 정책 결정: 극한기후 현상을 예측하고 대응하기 위해 기후 정책과 대처 전략을 마련하여 극한기후 현상과 기후변화의 상호작용에 대한 이해가 필요하다.
- 사) 전 세계적인 협력: 극한기후 현상은 국경을 넘어서는 영향을 끼칠 수 있으므로 국제적인 협력이 필요하다. 여러 국가와 지역 간의 정보 공유와 대응 조치를 통해 극한기후 현상에 효과적으로 대처할 수 있다.

나. 극한기후 종류와 예시

1) 극한 폭염과 극한 한파

- 가) 극한 폭염: 특정 지역에서 일평균/일최고 기온이 급격하게 상승해서 상당 기간 지속되는 현상으로, 온열 질환, 물 부족, 작물 손실 등을 초래할 수 있다. 2003년 여름 유럽에서 발생한 역사상 가장 심각했던 폭염을 대표적인 사례로 들 수 있다. 프랑스, 이탈리아, 독일 등 여러 국가에서 고온으로 인해 수십만 명의 사망자가 발생했다. 이 사건은 전 세계적으로 큰 주목을 받았으며, 기후변화에 대한 경각심을 높이는 계기가 되었다.
- 나) 극한 한파: 특정 지역에서 일평균/일최저 기온이 급격하게 낮아져 상당 기간 지속되는 현상이다. 각종 시설물 동파, 도로 결빙, 난방 수요 급증 등을 초래한다.

2) 극한 태풍(허리케인)과 극한 폭풍

- 가) 극한 태풍: 극단적이고 강력한 태풍이나 허리케인 현상으로 매우 강한 바람과 집중호우 등의 기상 현상을 포함한다. 대표적인 예로서, 2017년 9월 20일부터 21일까지 카테고리 4의 강도로 푸에르토리코를 강타한 허리케인 마리아를 들 수 있다. 푸에르토리코에 끼친 인명 및 재산 피해가 엄청나서 인도주의적 이슈를 불러오기까지 했다.
- 나) 극한 폭풍: 2016년 1월에 발생한 요나스 눈보라는 미국 남부와 동북부 지역을 강력한 폭설과 강한 바람으로 강타한 겨울 폭풍이다. 미국 동부 지역에서 교통 혼잡, 항공 운항 취소, 전력 공급 문제, 대중교통 문제 등을 일으켰다.
- 다) 2023년에 발생한 극한 폭풍 사례: 2023년 9월 가장 최근에 발생한 폭풍 다니엘은 리비아 지역에 일 강수량 414.1 mm에 달하는 강한 강우를 내렸다. 기록적인 폭우로 인해 댐이 무너지고 강물이 불어나면서 수천 명에 달하는 사망자가 발생했다.

3) 극한 강풍, 집중호우, 그리고 홍수

- 가) 극한 강풍: 대부분 태풍이나 강력한 폭풍이 접근하거나 상륙할 때, 또한 우리나라 봄철에 동해안 양간지풍 등의 형태로 나타난다. 강한 바람은 시설물 파괴, 전력 공급 차단, 농작물 피해, 산불 확산 등의 피해를 일으키며, 때로는 인명 피해를 초래하기도 한다. 특히 바닷가 지역에서는 해일과 거센 파도를 발생시킨다.
- 나) 집중호우: 짧은 시간 내에 많은 양의 강수가 발생하는 현상으로, 우리나라에서는 몬순과 고온다습한 기후의 영향을 받는 여름과 초가을에 집중호우가 발생하기 쉽다. 하천의 범람으로 홍수가 발생하며, 토양침식, 산사태, 도로 침수, 싱크홀과 같은 자연재해를 유발한다.
- 다) 홍수: 집중호우로 인해, 국지적으로 홍수가 발생할 수 있다. 여름철 장마와 태풍이 상륙할 때 자주 발생한다. 홍수로 인해서 사회 인프라 파괴, 주택 침수, 토지 침식, 인명 피해가 나타날 수 있다.

4) 극한 가뭄

- 가) 극한 가뭄: 긴 기간 강수량이 매우 부족해서 발생하는 장기 가뭄은 수자원 고갈, 작물 손실, 산불 발생 등의 문제를 초래할 수 있다.
- 나) 농업과 식량 생산: 가뭄은 농작물과 가축에 심각한 영향을 끼친다. 강수량이 부족하면 농작물 생산이 감소하고, 가축에게 물 공급이 부족하여 사료 생산에도 영향을 끼친다. 이로 인해 식량 생산 감소와 식량 가격 상승이 나타나기도 한다.
- 다) 수자원 부족: 강, 호수, 지하수, 저수지의 수위가 낮아지면 물 공급에 어려움을 겪을 수 있다. 국가나 지방 정부에서는 국민에게 물 공급을 제한하고 건조 기간 동안 물 사용량을 줄이도록 요구할 수 있다.
- 라) 생태계와 환경: 강과 호수의 수위 하락은 수중 생물에 영향을 끼치며, 장기간 지속되는 건조 조건에서는 산림 화재 발생 가능성도 커진다.
- 마) 경제 영향: 가뭄은 국가와 지역 경제에도 부정적인 영향을 끼친다. 농업 부문에서의 손실뿐만 아니라 물 관련 산업, 에너지 생산, 관광, 수산업 등 다른 부문에도 부정적 경제 영향을 끼친다.
- 바) 사회 인프라와 건강: 가뭄으로 물 공급과 농업 시스템을 위한 인프라가 파괴될 수 있으며, 건조기후가 지속되면 건강과 환경의 악화가 발생할 수 있다.
- 사) 정책과 대응: 가뭄 상황에서는 정책 결정자가 긴급한 조치를 취해야 한다. 물 절약과 관리 정책, 농업 보조금 조정, 하천 정비, 대규모 댐 건설이나 수력발전 프로젝트 등이 고려될 수 있다.

다. 극한기후와 인간의 건강, 경제, 생태계에 끼치는 영향

1) 건강 문제와 극한기후의 연관성

- 가) 폭염과 열사병: 폭염은 온도와 습도가 급격하게 증가할 때 발생하는데, 열사병 등의 온열 질환을 유발할 수 있다. 열사병은 체온 상승과 열 신경계의 기능장애로 특징지어지며, 심각한 경우 사망에 이르게 할 수 있다.
- 나) 호흡기 질환과 미세먼지: 건조한 날씨가 지속되면서 대기질이 악화하고 화재가 발생할 확률이 높아진다. 대기오염은 호흡기 질환을 유발하거나 악화시킬 수 있다. 특히 미세먼지는 인체의 기도에 침착되어, 만성 폐쇄성 폐 질환, 천식, 기타 호흡기 질환을 일으키고 그 증상을 악화시킬 수 있다.
- 다) 특정 물질 중독과 식중독: 단기간 강수량의 집중으로 발생하는 홍수는 특정 물질 중독을 유발할 수 있다. 홍수가 물을 오염시키고 음식과 식품을 오염시킬 가능성을 높이기 때문이다. 또한 홍수는 식중독 원인인 세균과 바이러스의 번식을 촉진할 수 있으며, 음식 안전 문제를 일으킬 수 있다.
- 라) 감염병 전파: 기후변화로 인해 일부 지역에서는 병원체와 박테리아의 생태계가 변해서 감염병의 발병률과 전파를 증가시킬 수 있다. 기온이 상승하면 말라리아와 같은 병원체의 번식을 촉진한다.
- 마) 정신 건강 문제: 극한기후는 정신 건강 문제를 악화시킬 수 있다. 장기 가뭄과 연관된 심각한 작물 손실은 농민과 농촌 지역 주민의 정신 건강에 영향을 끼칠 수 있다. 폭염으로 인한 고열과 수분 부족은 불안과 우울증 등의 정신 건강 문제를 악화시킬 수 있다.

2) 경제적 파급 효과와 손실

- 가) 경제적 여파와 손실: 극한기후에 의한 경제적 파급 효과와 손실이 갈수록 증가해서 사회경제적 안정이 위협을 받고 있다. 그 결과로, 기후변화에 대한 대비와 적응 정책의 중요성이 더욱 강조되며, 기후 위험성을 줄이기 위해 적극적으로 조치하고 지속 가능한 경제 모델을 구축할 필요가 있다.
- 나) 농업과 식량 생산: 가뭄, 폭염, 집중호우로 인한 농작물 손실은 농업 부문에 심각한 영향을 끼친다. 식량 생산의 감소는 식료품 가격 상승을 유발하여 궁극적으로 소비자에게 부담을 주게 된다.
- 다) 수자원 관리와 인프라: 집중호우로 발생하는 홍수는 사회 인프라를 파괴할 수 있다. 도로, 다리, 철도, 전력선, 하수 처리 시설 등의 인프라 손실은 수리와 복구에 막대한 공적 자금을 필요로 한다.
- 라) 에너지 생산과 소비: 극한기후 조건에서는 에너지 생산과 공급에서도 영향을 받는다. 폭염으로 에어컨과 냉방기 사용이 증가해서 국가 혹은 지역 사회에서 전력 수요가 급증할 수 있다.
- 마) 보험과 재보험 업계: 극한기후 현상의 발생은 보험 회사와 재보험 회사에 큰 부담을 줄 수 있다. 자연재해로 인한 보험 청구 금액이 급증하면 보험료가 상승하고, 보험사의 큰 손실로 이어질 수 있다.
- 바) 물류와 공급망: 극한기후로 인해 도로 폐쇄, 항만 운영 중단, 물류 공급망 중단 등이 발생할 수 있다. 물류 공급 지연과 인프라 손실이 나타날 수 있다.

- 사) 건강 유지 비용: 극한기후는 건강관리 부문에도 영향을 끼친다. 폭염으로 인한 열사병, 공기 오염으로 인한 호흡기 질환과 음식 안전 문제 등으로 인해 건강 유지 비용이 증가할 수 있다.
- 아) 농촌 경제와 지역 사회: 농촌 지역에서는 농업 부문의 영향뿐 아니라 지역 사회 전반에서도 영향을 받는다. 특히 농업 지역에서는 농작물 손실로 인한 소득 감소와 실업률 상승이 발생할 수 있다.

3) 생태계 변화와 생태계 서비스에 대한 위협

- 가) 극한기후에 따른 위협: 극한기후 현상이 발생하면 지구 생태계가 심각한 영향을 받을 수 있다. 생태계는 우리 생활의 일부분으로서 거의 모든 사회, 경제 활동에 중요한 역할을 한다. 생태계에 대한 위협을 최소화하기 위한 노력에는 지속 가능한 자원 관리, 생태계 복원과 기후 적응 전략이 포함된다.
- 나) 물 공급과 수자원: 강수량이 급격하게 변하면 하천의 수위가 급상승하거나 급하락해서 물 생태계가 가장 먼저 그리고 가장 크게 영향을 받는다. 나아가 수자원 관리와 물 공급에도 영향을 끼친다.
- 다) 생물다양성: 폭우와 홍수로 인해 서식지 파괴, 생태계 변화와 이동에 영향을 끼칠 수 있으며, 일부 종의 멸종 위험이 증가할 수 있다.
- 라) 식물 성장과 농업: 폭염과 가뭄은 농작물에 스트레스를 유발하고 생산량을 감소시킬 수 있다. 물 부족으로 인해 관개 시스템에 의존하는 농업 지역에서 문제를 야기할 수 있다.
- 마) 해양 생태계: 해수면 온도 상승은 해초, 조류, 어류 등에 영향을 끼치며, 해양 산호와 같은 중요한 해양 생태계에도 영향을 줄 수 있다.
- 바) 산림과 산불: 강한 바람, 가뭄, 폭염으로 인해 산불 발생 가능성이 커질 수 있다. 산불이 발생하면 국지적으로 산림 생태계가 수십 년간 괴멸되는 상황에 이르기기도 한다.
- 사) 대기 중 오염물질: 극한기후는 대기 중 오염물질의 농도와 분포에도 영향을 끼친다. 강수량이 많으면 대기질이 좋아지지만, 가뭄 상황이 지속되면 오염물질이 대기 중에 쌓일 수 있다.

04 지구온난화와 극한기후의 관계

지구온난화와 극한기후의 상호작용은 기후 시스템의 복잡한 특성으로 인해 정확하게 예측하고 이해하기 어렵다. 그러나 이러한 관련성을 이해하고 과학적 근거하에 지구온난화와 극한기후에 대비해야 한다. 그래야 자연재해로부터의 피해를 최소화하고 기후 적응과 대비 조치를 효과적으로 계획할 수 있다.

가. 지구온난화와 극한기후 사이의 연결

1) 온난화와 극한기후의 상호작용

- 가) 폭염과 고온 발생: 지구온난화로 폭염과 고온 사례의 빈도와 강도가 증가할 수 있다. 폭염은 열사병 등의 온열 질환의 위험을 증가시킨다.
- 나) 집중호우와 홍수: 대기 중 수증기량이 많아지면 강수량이 증가할 가능성이 커진다. 이로 인해서 집중호우와 홍수가 자주 발생하는데, 특히 기존에 홍수 위험 지역인 곳에서 심각한 홍수 피해가 발생할 수 있다.
- 다) 가뭄: 높아진 기온은 토양 수분의 증발을 촉진하고 물 부족 문제를 악화시킬 수 있으며, 가뭄의 지속 시간과 심도를 증가시킬 수 있다.
- 라) 태풍과 폭풍: 해수면 온도가 상승하면서 태풍과 폭풍의 강도가 증가할 수 있다. 더 따뜻한 해수면은 태풍의 발달과 강화에 영향을 미치며, 더 강한 폭풍은 침수 피해 가능성을 증가시킬 수 있다.
- 마) 산불: 지구온난화로 건조한 기후환경이 만들어져서 산불 발생 가능성이 높아질 수 있다. 특히, 산림과 초목 지역에서 산불이 빈번하게 발생할 수 있다.
- 바) 해수면 상승과 폭풍해일: 빙하와 빙산이 녹으면 해수면이 상승한다. 그 결과, 폭풍으로 인한 해일이 강해지며 해안 지역에 큰 위험을 초래할 수 있다.

2) 해양 온난화와 해안 지역 영향

- 가) 해양 온난화의 영향: 해양 온난화의 영향으로 해양 온도 상승, 산호초 백화 현상, 해수면 상승, 그리고 해양 산소 농도 감소 등의 현상이 나타날 수 있다. 해안 지역 영향으로 해안 침식, 연안 홍수, 어업, 그리고 인구 이동을 예로 들 수 있다.
- 나) 해양 온도 상승: 해양의 온도 상승은 해양 생태계와 생물다양성에 영향을 끼치며, 일부 해양 생물종의 분포와 이동 경로가 바뀔 수 있다.
- 다) 산호초 백화 현상: 해양 온난화로 인해 상승한 해수 온도는 산호초에 열 스트레스를 유발할 수 있다. 산호 발병과 백화 현상이 발생하며, 산호 생태계가 파괴될 수 있다.
- 라) 해수면 상승: 해수면 상승으로 인해서 해안 지역에 침수, 해변 침식의 위험이 증가하며, 연안 도시와 사회 인프라에 영향을 끼친다.
- 마) 해양 산소 농도 감소: 해양 온난화는 해양에서의 산소 농도 감소를 유발할 수 있다. 이로 인해서 해양 생물이 큰 스트레스를 받는다.
- 바) 해안 침식: 해수면 상승으로 해안 침식 문제가 심각해지고 있다. 해안 지역의 인프라와 주거지의 침식 위험이 해안 보호구조물의 필요성을 증가시킨다.

- 사) 연안 홍수: 집중호우와 강수량의 증가는 연안 지역에서 하천 범람과 홍수 발생빈도를 증가시킬 수 있다. 홍수는 주택과 농지 침수 및 인명 피해 등 큰 손실을 초래한다.
- 아) 어업: 해산물과 해양 생태계에 변화가 발생하면 어업과 음식 공급에 영향을 끼칠 수 있다. 또한 해안 지역의 가뭄 문제는 농업 부문에도 영향을 끼친다.
- 자) 인구 이동: 해안 지역의 침식, 해수면 상승, 극한기후 현상으로 인해 인구 이동이 발생할 수 있다. 결과적으로 사회 인프라, 주택, 경제, 사회 구조가 영향을 받을 수 있다.

나. 최근에 발생한 극한기후의 사례

- 1) 2022년, 2023년에 발생한 극한기후 사례: 지구온난화로 인한 기후변화는 지구 생태계와 인간의 삶에 직접적인 영향을 끼치고 있다. 최근에 발생한 극한기후 현상이 그 영향을 더욱 명확하게 보여준다.
 - 가) 가뭄: 2022년 2월 하순에 우리나라 전남, 경남 지역에서 발생한 가뭄은 5월 초에는 전국적으로 확대되었다. 특히 광주와 전남 지역의 가뭄 지속 기간은 281.3일을 기록하면서 1984년 이후 역대 가장 오래 지속되었다. 이로 인해서 농업용수 공급뿐만 아니라 일부 지역에서는 식수 공급이 제한되기도 했다.
 - 나) 태풍: 2022년 8월 28일 태풍 힌남노가 일본 남동쪽 먼바다에서 발생했다. 발생 후에는 서남, 서진하면서 약해졌다가 대만 남동쪽 먼바다에서 다시 발달하여 진로가 급격히 바뀌는 이례적인 모습을 보였다. 힌남노는 9월 6일 경남 거제시에 상륙하며 시간당 100 mm 이상의 비를 내려 전국에 폭우, 홍수, 산사태 등의 큰 피해를 입혔다. 중위도 근방에서 발생해서 국내에 상륙한 첫 태풍이다.
 - 다) 한파: 2022년 12월 말 폭탄 사이클론에 의한 한파와 눈 폭풍이 미국 전역에서 발생했다. 미국 남동부부터 북동부에 이르는 광범위한 지역에서 최저 기온 영하 40°C, 최대 강설량 89 cm를 기록하면서 170만 가구 가까이 전기 공급이 끊겼다. 특히 뉴욕과 오하이오 주에서는 폭설로 인한 사망자가 다수 발생했다.
 - 라) 폭염: 2023년 7월 이탈리아의 수도 로마에서 최고 기온이 41.8°C로 관측됐다. 프랑스 국경 근처의 저수지는 45°C를 기록했다. 미국 남부에서는 열돔 현상이 한 달 정도 이어져 애리조나주에서 43°C, 캘리포니아주의 데스밸리에서 53.5°C를 기록했다. 이 같은 극심한 폭염으로 열사병 등의 온열 질환 사망자가 다수 발생했다.
- 2) 우리나라의 산불과 호우 사례: 우리나라의 산불과 호우는 시간이 지날수록 그 강도가 증가하고 있다. 지구온난화와 더불어 극한기후 사례는 최근 몇 년 동안 꾸준히 관측되고 있어 이러한 사례를 파악하고 이해하는 노력이 요구된다.
 - 가) 산불: 2022년 3월에 발생한 동해안 대형 산불은 경북 울진군에서부터 동해, 강릉, 삼척 등의 지역으로 확대되어서 큰 피해를 입혔다. 이 산불로 서울 면적의 4분의 1 이상이 잿더미가 되어서 복구와 수리에 막대한 공적 자금이 쓰였다. 아울러, 2023년 4월에는 전국 34곳에서 동시다발적으로 산불이 발생했다.

가장 큰 피해를 입은 지역은 충남 홍성으로, 축구장 2,300여 개에 해당하는 면적이 불탔다. 이러한 산불 사례들의 공통적인 원인은 여러 날 지속된 극한 고온과 건조한 날씨로서 최근의 전 지구적 기온 상승과 함께 빈발하고 있는 세계 도처에서의 산불피해 증가와 무관하다고 할 수 없다.

- 나) 집중호우: 2022년 8월 8일 서울에서는 시간당 141.5 mm의 호우로 기록적인 강수량을 보였다. 오호츠크해 인근의 블로킹 현상으로 인해 우리나라에 비구름이 지속적으로 머물면서 홍수 발생과 인명 피해를 초래했다. 아울러 기후변화에 따라 겨울은 짧아지고 여름은 더 길어지면서 예상치 못한 극단적인 집중호우가 발생하였다. 또한, 2023년 7월에는 우리나라에서 역대 최다 일일 강수량과 최다 누적 강수량의 기록을 경신했다. 이달에는 차고 건조한 티베트 고기압과 따뜻하고 습한 북태평양 고기압이 만나서 형성된 정체전선이 국내의 기상 현상에 큰 영향을 주었다. 미래에는 지구온난화에 따라 정체전선이 상공에 더 오랜 기간 머무르게 되고, 집중호우가 더 자주 그리고 더 오래 발생할 것으로 예상된다.

다. 극한기후의 미래 전망

- 1) 미래 극한기후 예측과 불확실성: 극한기후의 예측은 커다란 불확실성을 포함하고 있어 적절한 대비와 적응 조치를 계획할 필요가 있다. 여러 불확실성을 고려하여 기후모델을 개선하고, 지속적인 자료 수집과 기초 연구가 필요하다.
 - 가) 기후 시스템의 복잡성: 기후 시스템은 본질적으로 복잡하며, 여러 형태의 상호작용을 포함하고 있다. 대기, 해양, 빙하, 토지의 다양한 요소들이 연결되어 있으며, 이들 사이의 관계와 피드백 과정이 복잡하게 얽혀 있다.
 - 나) 미래 기후의 다양성: 미래의 기후는 다양한 요인에 의해 결정되는데, 이들 요인의 조합과 영향을 예측하기 어렵다. 예로서, 온실가스 배출량, 태양 복사에너지, 해류의 장주기 변동 등은 모두 미래 기후에 중요한 영향을 끼친다.
 - 다) 모델의 불확실성: 기후모델이 미래 예측을 수행하는 데 사용되지만, 모델은 여전히 불완전하며 수많은 불확실성을 포함하고 있다. 특히 현재의 기후모델은 극한기후의 빈도와 강도를 정확하게 재현해 내지 못하고 있어, 미래의 극한기후의 변화 양상 또한 예측이 매우 어려운 실정이다. 모델의 정확성은 입력 자료의 품질, 모델의 공간해상도, 성능, 기후 시스템의 복잡성 표현 정도에 따라 달라질 수 있다.
 - 라) 시간 규모: 기후 시스템은 오랜 시간 동안 변화하며, 단기적인 극한기후 현상과 장기적인 기후변화 간의 상호작용이 복잡하게 얽혀 있다.
 - 마) 인위적 영향: 온실가스 배출과 지표면 변화 등의 인간 활동은 기후에 큰 영향을 끼친다. 이들 영향을 정확하게 모델링하고 예측하기 어렵다.
 - 바) 지역 차이: 기후변화의 영향은 지역마다 다를 수 있으며, 특정 지역의 극한기후 현상을 정확하게 예측하는 것은 현재 기술 수준으로 매우 어렵다.

2) 극한기후 사례 연구와 모델링

- 가) 극한기후 연구와 모델링의 역할: 지구온난화와 관련된 극한기후 사례 연구와 모델링은 온난화와 극한기후 발생에 대한 이해를 향상시키고, 기후변화를 대비하는 데 중요한 역할을 한다. 이들 연구 결과는 국가와 지방 정부가 주도하고 있는 기후 정책, 대응 조치를 결정하는 기초 자료로 사용된다.
- 나) 통계와 자료 분석: 관측 자료를 분석해서 특정 극한기후 사례의 빈도, 강도, 지역적 패턴 등을 분석한다. 통계와 자료 분석을 통해 관련된 기후 인자를 확인하고 예측 모델을 개발하는 기반을 마련한다.
- 다) 기후모델: 지구 규모의 대기, 해양, 지면, 빙권의 상호작용을 모의실험하는 기후모델이 사용된다. 이 모델을 이용해서 특정 기후 조건에서의 기후변화와 극한기후 현상의 발생 가능성을 평가한다.
- 라) 미래 시나리오와 예측: 기후모델은 여러 배출 시나리오를 기반으로 미래 기후 조건을 예측한다. 이들 모델을 사용하여 미래 극한기후 사례의 가능성과 영향을 예측하며, 적응, 대비 전략을 개발하는 데 활용된다.

3) 극한기후 사례 종류별 분석 방법

- 가) 극한기후 분석 방법의 필요성: 전 세계에서 극한기후 현상의 발생빈도와 강도가 증가하는 가운데, 이를 정밀하게 포착하고 예측하는 분석 방법의 필요성이 부각되고 있다. 이러한 분석 방법을 통해 극한기후 현상의 발생 원인을 파악하고, 예상되는 피해를 미리 대비하는 일이 가능하다. 아울러 기후변화에 대한 국제 협력과 정책 수립 과정에서 극한기후 사례 분석 결과는 핵심적인 역할을 한다.
- 나) 폭염: 일최고, 일평균 기온 등을 관측하고 연속적으로 높은 기온이 지속되는 기간을 확인하여 폭염을 정의한다. 높은 습도와 함께 발생하면 체감온도가 높아질 수 있으므로 습도도 함께 분석한다.
- 다) 한파: 기온 분포와 북극 진동 등의 대기순환 특징을 분석해서 한파의 발생을 확인한다. 주로 일최저, 일평균 기온 등을 관측해서 한파의 지속 시간과 강도를 파악한다.
- 라) 태풍: 위성 영상과 기상 레이더로 태풍의 규모와 경로를 조사한다. 수치 예보 모델을 활용하면 태풍의 발달 경향과 이동 경로의 사전 예측이 가능하다.
- 마) 집중호우: 기상 레이더를 통해 강수량과 강수 구조를 분석해서 호우의 강도를 파악한다. 위성 영상으로 강수를 발생시키는 구름의 분포와 발달 상태를 관찰하며, 수치 예보 모델로 예상 강수량과 지역을 예측한다.
- 바) 가뭄: 지표면의 상태를 분석하여 가뭄을 진단한다. 평균 강수량, 토양 수분, 지하수 수준, 저수지 수위 등을 참고하여 가뭄의 심각성을 평가한다. 팔머 가뭄 지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 표준 강수 지수(Standardized Precipitation Index, SPI) 등 지표를 활용하여 정확한 가뭄 진단이 필요하다.
- 사) 산불: 위성 영상 및 지상 관측 데이터를 통해 산불의 발생 원인과 확산 경로를 분석한다.

05 기후변화와 극한기후에 대응하는 전략

유엔 기후 협약은 기후변화와 극한기후 상황에 대응하기 위한 국제적 합의를 담고 있다. 1992년 채택된 최초의 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)과 2015년 파리협정(Paris Agreement)을 예로 든다. 국제사회는 서로 합의하에 설정한 협약을 준수해서 지속 가능한 미래를 만들기 위해 노력해야 한다.

가. 국제적 대응 노력과 협약

- 1) 유엔기후변화협약(UNFCCC): 1992년 브라질 리우데자네이루에서 채택되었으며, 기후변화에 대한 국제적 대응을 촉진하는 것을 목표로 한다. 이 협약은 다양한 국가에 대한 환경 보호와 기후변화 대응 의무를 명시하고 있다. 주요 내용은 첫째, 모든 회원 국가는 온실가스 배출량을 줄이기 위해 노력해야 하며, 결과를 정기적으로 보고해야 한다. 둘째, 선진국은 개도국에 대한 지원과 기술 이전을 강화하기 위한 장치를 마련해야 하며, 개도국은 자발적으로 온실가스 감축을 위해 노력할 수 있다. 셋째, 기후변화 관련 정보의 국제적 공유와 협력을 추진한다. 넷째, 기후 변동/변화에 관한 정책을 개발하고 국제적으로 협력한다.
- 2) 파리협정(Paris Agreement): 모든 국가가 온실가스 감축에 참여하는 보편적 기후 체제로, 2015년 파리에서 채택되었다. 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 시대 대비 1.5°C 이하로 억제하기 위해서 전 지구 온실가스 배출을 획기적으로 줄이는 목표를 갖고 있다. 아울러 기후 재정을 확대하고 개도국에 대한 기후 금융 지원을 강화하는 것을 목표로 한다. 주요 내용으로는 첫째, 모든 계약 당사국(국가)은 온실가스 배출을 감축하는 노력을 기울여야 하며, 감축 목표를 수립해야 한다. 둘째, 매년 전 세계 온실가스 배출량을 모니터링하고 이에 대한 보고서를 제출해야 한다. 셋째, 각 국가는 5년마다 자발적으로 감축 목표를 강화하도록 권장한다. 넷째, 개도국에 대한 기후 금융 지원과 기술 이전을 촉진한다. 다섯째, 지구 평균기온 상승을 1.5°C 이하로 유지하기 위한 노력을 강화한다.
- 3) 파리협정과 국제 협력
 - 가) 전 세계적인 참여: 파리협정은 거의 모든 국가가 참여하고 서명하였으며, 현재 200개 이상의 국가와 지역이 이 협정을 비준하였다. 기후 문제에 대한 국제적 합의와 공동 대응의 상징적인 결과이다.
 - 나) 법적 구속력: 파리협정은 법적으로 구속력이 있는 국제협약이다. 각 국가는 자체적으로 온실가스 감축 목표를 설정하고, 그 진행 상황을 정기적으로 보고하며, 이행 상황을 검토받아야 한다.

- 다) 섭씨 1.5도 목표: 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 시대와 비교해서 1.5°C 이하로 억제하겠다는 목표를 제시하고 있다. 이는 더 높은 온도 상승을 피하기 위한 중요한 목표로 인정되며 극한기후 상황을 완화하려는 노력을 반영한다.
- 라) 연속성과 강화: 협정은 5년마다 각 국가들이 자발적으로 강력한 온실가스 감축 목표를 수립하고 발표하도록 권장한다. 이를 통해 감축 노력을 지속적으로 강화할 수 있다.
- 마) 기후 금융과 지원: 파리협정은 개도국에게 필요한 기후 금융 지원을 강화하고 기술 이전을 촉진하는 역할을 할 수 있다. 이들 지원을 통해 개도국이 지속 가능한 개발과 기후 대응을 동시에 추진할 수 있다.
- 바) 민간 부문의 참여 촉진: 협정은 기업과 기타 비정부 기관의 적극적인 참여를 장려한다. 녹색 경제 정책을 채택하고, 친환경 기술을 개발해서 기후변화에 대응하기 위한 해결책을 찾는 데 기여할 수 있다.
- 사) 투명성과 감시: 각 국가는 온실가스 배출과 기후 대응 노력에 대한 정보를 투명하게 보고해야 한다. 이를 통해 국제사회는 각국의 기후 리스크를 줄이려는 노력을 모니터링하고 검증할 수 있다.
- 4) 국제적 협약의 성과와 한계: 국제적 협약은 기후변화와 극한기후 상황에 대응하기 위한 중요한 도구로서 기능하지만, 이를 효과적으로 추진하기 위해서는 국제사회의 더 깊은 협력과 구체적인 노력이 필요하다.
- 가) 주요 성과로서 첫째, 여러 기후 협약은 국제사회의 기후 문제에 대한 의지를 강화하고, 기후변화에 대한 중요성을 인식시켰다. 이를 통해 다양한 국가, 기업, 시민 사회 단체가 기후 대응에 참여하고 노력하게 되었다. 둘째, 여러 국가가 기후 협약에 따라 온실가스 감축 목표를 설정하고 발표하였다. 이러한 노력을 통해 지구 온실가스 배출량의 상당 부분이 줄어들었다. 셋째, 기후 협약은 신재생에너지와 친환경 기술에 대한 투자와 개발을 촉진하여 탄소 배출을 줄이는 데 도움이 되었다. 넷째, 국가 간의 협력이 강화되었다. 이를 통해 기후 문제를 해결하기 위한 노력이 확대되고, 기후 금융 지원이 증가했다.
- 나) 아울러 몇 가지 한계에 다다랐다. 첫째, 현재까지의 감축 노력은 여전히 지구 평균기온 상승을 1.5°C 미만으로 제어하기에 부족하다. 국가 간의 차이와 불균형이 존재하며, 온실가스 감축 목표를 달성하기 위한 실질적인 노력이 필요하다. 둘째, 개도국에 대한 기후 금융 지원 부족이 여전히 문제로 남아 있다. 특히 개도국이 기후변화로부터 적응하고 기후 대응을 위한 노력을 지속적으로 추진하기 위한 자금이 부족한 실정이다. 셋째, 일부 국가는 감축 목표 설정과 이행에서 미흡한 성과를 보이며, 다른 국가와의 협력도 일부 부족하다. 넷째, 일부 국제 기후 협약은 법적 구속력이 부족하거나, 구속력 있는 사항과 제재가 충분하지 않을 수 있다. 이로 인해 이행을 감시하고 징벌 조치를 시행하기 어렵다. 다섯째, 국제 협상에서 정치적 이해 차이와 이해 관계자의 이익 충돌 등이 항상 존재하며, 협상과 협약의 체결에 어려움을 초래할 수 있다.

나. 정부와 지자체의 대응 정책

1) 정부 차원의 기후변화 대응 정책

- 가) 제도와 법률 강화: 기후 관련 법률과 규정을 강화하고, 탄소 배출을 제한하거나 감축을 요구하는 법률을 시행한다.
- 나) 온실가스 감축 정책 수립: 정부는 국제협약에 따른 온실가스 감축 목표를 설정하고 이를 이행하도록 노력해야 한다. 목표는 파리협정에 따라 설정되며, 기후변화의 영향을 최소화하기 위한 목표로 설정된다.
- 다) 탄소 가격 설정: 정부는 탄소 배출에 가격을 설정하고, 탄소 배출을 줄이는 데 동기를 부여하기 위해 시장 기반의 기후 정책을 시행한다. 탄소 세금, 탄소 배출권 거래제도 등의 메커니즘을 활용한다.
- 라) 신재생에너지와 친환경 기술 촉진: 정부는 재생 가능한 에너지 원천을 개발하고 보급하여 화석연료 의존도를 줄이는 데 주력할 필요가 있다. 원자력과 태양광, 풍력, 수력, 생물질 등의 재생 가능한 에너지원을 찾으려는 정책을 시행해야 한다.
- 마) 에너지 효율 향상 및 규제: 건물, 운송 수단, 산업, 농업 부문에서 에너지 효율을 향상시키기 위한 측정, 규제, 장려책을 도입할 필요가 있다. 건물, 자동차, 산업 부문 등에서 에너지 효율을 높이기 위한 규제와 표준 모델을 도입한다. 에너지 효율 규제를 통해서 에너지 사용을 줄이고 온실가스 배출을 감소시킬 수 있다.
- 바) 기후변화 위험성 평가: 기후변화로 인해 산업, 농수산업 등의 여러 경제 부문에 발생할 수 있는 잠재적 위험성을 평가한다. 이에 대한 대응 전략을 개발하여 기후변화에 효과적으로 대응할 수 있다.
- 사) 과학적 연구 강화: 극한기후 현상의 발생 원인과 영향을 더 잘 이해하기 위해 과학적 연구를 지속적으로 강화해야 한다. 이를 통해 정확한 예측과 체계적인 대응을 위한 정보를 얻을 수 있다.
- 아) 기후 적응과 재난 관리: 극한기후 발생에 대한 대비와 대응 능력을 강화하여 재난 관리를 개선해야 한다. 기후변화에 취약한 인프라 설계, 첨단 예측 시스템 구축, 비상 대응 계획 수립 등의 노력을 통해 강화할 수 있다.
- 자) 기후변화에 적응하는 인프라 개발: 기후 위험에 대비하고 적응할 수 있는 인프라를 개발하고 강화해야 한다. 홍수, 가뭄, 폭염 등의 극한기후 상황에서도 안전할 수 있도록 설계된 도로, 다리, 수력발전소, 방수 시설 등이 포함된다.
- 차) 물 가용성과 관리의 개선: 기후변화로 인해 물 부족 문제가 더욱 심화될 수 있으므로 물 자원의 지속 가능한 관리와 보전이 필요하다. 폐수 처리 시설 설치, 누수 탐지와 보수, 농업 관수 시스템 도입 등이 있다.
- 카) 생태계 보전과 복원: 자연 생태계의 보전과 복원은 기후변화 대응의 중요한 한 부분이다. 숲을 보호하고 습지를 복원하며, 지표면 특성 변화를 최소화해서 생태계 기능을 유지하고 탄소 저장 능력을 증가시켜야 한다. 이를 위해 산림 보호와 조림 정책의 지속적인 시행이 중요하다.

- 타) 기후 관련 정보 제공과 교육: 정부는 국민에게 기후변화에 대한 정보와 교육을 제공하여 극한 기후변화가 지구에 미치는 영향에 대한 인식을 높이고, 개인과 기업의 기후 대응 노력을 촉진한다. 이를 위해 다양한 교육 기회와 필요한 정보를 공개해야 한다.
- 파) 국제 협력: 기후변화는 국경을 초월하는 문제이므로 국제 협력이 필수적이다. 파리협정과 같은 다국가 간 국제 협력을 강화하여 기후 대응에 있어 공동 노력을 강화하고, 국가 간 기술과 정보 교류, 공동 연구 개발 활성화, 기후 금융 지원을 확대한다. 정부는 개도국에 대한 기후 금융과 기술 이전을 지원하기 위한 자금을 조달하고 관리한다.
- 하) 기술 혁신과 연구 개발: 기후변화 대응을 위해 기술 혁신과 연구 개발을 지원한다. 탄소중립 기술, 에너지 저장 기술, 친환경 에너지 기술 등의 개발과 보급을 촉진한다.
- 거) 투자와 자금 조달: 기후변화 대응을 위한 자금을 조달하고 투자를 유치하는 노력이 필요하다. 정부 특별 예산 확보, 기후변화 펀드 설립, 녹색 채권 발행, 친환경 세금 도입 등의 방법을 활용할 수 있다.
- 너) 지속 가능한 국가 발전: 기후 대응 정책은 지속 가능한 국가 발전을 강조한다. 이와 함께 환경 보존과 경제 성장, 사회 공정성을 고려하는 환경, 사회, 경제 측면에서 균형 있는 접근 방식을 채택한다. 녹색 경제 전환, 친환경 기술의 도입과 보급, 국민의 기후 의식 향상을 위한 다양한 교육과 홍보 활동이 이에 포함된다.

2) 지자체 수준의 대응 노력

- 가) 기후변화 관련 자료 수집과 분석: 지방 정부는 기후 관련 자료를 수집하고 분석하여 지역의 기후변화와 관련된 패턴과 방향을 파악한다. 이를 토대로 잠재적 위험 요소를 예측하고 향후 대응 전략을 계획할 수 있다.
- 나) 기후변화 취약성 평가: 기후변화에 대한 지역별 취약성 평가를 수행하여 위험에 노출된 지역과 부문의 우선순위를 확인하고, 이를 고려해서 적응 대책을 수립한다.
- 다) 지역적 대응 전략 개발: 지자체는 지역별로 맞춤형 기후변화 대응 전략을 개발한다. 이때 지역의 특성과 우선순위에 맞춰 탄소 감축, 적응, 재난 관리 등의 계획을 수립해야 한다.
- 라) 친환경 에너지와 교통 정책: 지자체는 친환경 에너지 사용과 대중교통 이용을 권장하고, 지역 내에서의 에너지 효율을 개선하기 위한 정책을 채택한다. 전기버스 도입, 자전거 도로 확장, 친환경 에너지 시설 설치 등이 이에 해당한다.
- 마) 도시 계획과 건축 규제: 지방 정부는 친환경 도시 계획을 통해 건물 에너지 효율과 녹지 공간을 증가시키는 등 도시 환경을 개선한다.
- 바) 교육과 홍보: 기후변화에 대한 교육과 홍보 캠페인을 통해 지역 주민들의 인식을 높이고, 지속 가능한 생활 방식을 촉진한다.
- 사) 지속 가능한 농업과 산업 지원: 농업과 산업 부문에서 지속 가능한 생산 방식을 촉진하고, 친환경 농업과 산업 활동을 지원한다.

- 아) 재생에너지 보급과 지원: 태양광, 풍력, 지열, 바이오매스 등의 재생 가능한 에너지 프로젝트를 지원하고, 재생에너지 인프라를 확충한다.
- 자) 재난 관리와 비상 대응 계획: 지자체는 극한기후 발생에 대비하고 대응하기 위한 비상 대응 체계를 구축하고, 재난 관리 능력을 향상시킨다.
- 차) 협력 네트워크: 지자체는 다른 지역 사회와 협력을 강화하고, 기후변화 대응에 관한 정보와 경험을 공유한다.

다. 기업과 국민의 역할

1) 기업의 지속 가능한 경영 전략

- 가) 환경친화적 경영: 에너지 효율성을 향상시키고 온실가스 배출을 줄이는 등의 환경적 목표를 달성하기 위한 경영 전략이다. 이를 위해 친환경 제품과 서비스 개발, 재활용, 폐기물 관리 개선, 녹색 에너지 사용과 에너지 효율 개선, 그리고 친환경 공급망 관리가 필요하다.
- 나) 사회적 책임: 기업은 사회적 가치 창출과 사회 문제에 대한 책임에 대해 집중해야 한다. 사회 책임 프로젝트와 기부 활동, 고객과 노동자의 권리 존중, 다양성과 포용을 촉진하는 인사 정책, 공정한 비즈니스 관행 채택 등이 필요하다.
- 다) 금융적 지속 가능성: 기업은 재무적인 측면에서도 지속 가능성을 고려해야 한다. 이를 위해 기업의 금융 성과 평가와 환경, 사회, 기업 지배구조(Environmental, Social and Governance, ESG) 지표 도입, 지속 가능한 투자/금융 전략 개발, 그리고 친환경과 사회적 위험 관리가 필요하다.
- 라) 혁신과 기술 활용: 지속 가능한 경영은 혁신과 기술을 활용하여 새로운 비즈니스 기회를 창출한다. 이를 위해 친환경 기술과 제품 개발, 디지털화와 자동화 기술 도입, 그리고 지능형 에너지와 자원 관리 시스템을 구축하여야 한다.
- 마) 공급망의 지속 가능성: 기업은 공급망에서 지속 가능성을 유지하고 촉진하는 데 중요한 역할을 한다. 이를 위해 공급망의 평가와 최적화, 공급망에서 사회와 환경적 영향 분석, 그리고 지속 가능한 제품과 재료 공급이 필요하다.
- 바) 보고와 투명성: 기업은 지속 가능한 경영 결과와 성과를 외부에 보고하고 투명하게 소통해야 한다. 이를 통해 ESG 보고서 작성, 사회와 환경적 영향을 추적하고 평가해야 하며, 이 과정에서 이해관계자와의 대화와 협력이 중요하다.
- 사) 규제 준수: 환경 관련 규제와 규칙을 준수하고 지속 가능한 경영을 위한 규제를 따르는 것이 중요하다.

2) 개인과 커뮤니티 참여의 중요성

- 가) 기업과 정부의 보완적 역할: 개인과 커뮤니티 참여는 기업과 정부의 노력을 보완하고 균형을 유지하는 데 도움을 준다. 시민과 지역 사회는 기업과 정부가 미흡하거나 무시하는 문제를 지적하고 개선 방향을 제시하는 역할을 한다.
- 나) 이해 관계자 참여: 커뮤니티 참여는 다양한 이해 관계자들의 목소리를 듣고, 그들의 의견과 관점을 반영하는 것이 중요하다. 이렇게 함으로써 프로젝트나 정책의 성공과 지속 가능성을 향상시킬 수 있다.
- 다) 새로운 아이디어와 혁신: 다양한 배경과 관점을 가진 개인과 커뮤니티 구성원은 새로운 시각과 아이디어를 제시할 수 있다. 결과적으로 문제 해결과 지속 가능한 발전을 촉진한다.
- 라) 사회적 연대감 강화: 커뮤니티 참여는 사회적 연대감을 높이고, 다양한 개인과 그룹 간의 협력을 촉진한다. 사회의 단결과 공동체 의식을 강화하도록 한다.
- 마) 사회 변화와 개선: 개인과 커뮤니티 참여는 사회적 문제에 대한 개선을 촉진한다. 환경 보호, 교육 개선, 건강 서비스 확대 등의 영역에서 개인과 커뮤니티가 노력해서 사회적 변화를 이끌 수 있다.

3) 교육과 인식 개선을 통한 기여

- 가) 학교 교육: 환경 교육은 학교 교육 과정의 일부로 포함되어야 한다. 학생들에게 환경 문제와 지속 가능한 생활 방식에 대한 지식을 제공하고 환경 보호에 대한 의식을 형성한다.
- 나) 기후변화 과학 교육: 기후과학과 기후변화의 과학적 원리를 이해하기 위한 교육을 강화한다.
- 다) 온실가스 감축 교육: 온실가스 배출과 그 영향에 대한 교육을 통해 사람들에게 개인적인 감축 노력의 중요함을 알린다.
- 라) 공공 정보 캠페인: 정부와 비영리 단체는 환경 보호와 관련된 정보를 광고 캠페인, 웹사이트, 소셜 미디어를 통해 적극적으로 알린다.
- 마) 환경 단체와 협력: 환경 단체와 협력하여 교육 이벤트나 워크숍을 개최하고, 지역 사회에서 환경 문제에 대한 인식을 높이는 데 기여한다.
- 바) 지속 가능한 모범 사례 공유: 지속 가능한 생활 방식과 친환경 기술 사례를 연구하고 결과를 공유한다.

06 극한기후 대응을 위한 현실적 조치

기후변화 적응 전략은 이미 발생한 기후변화의 영향을 최소화하고 적응하는 데 중점을 두고, 기후변화 완화 전략은 미래의 기후변화를 제한하기 위해 온실가스 배출을 줄이는 데 중점을 둔다. 지속 가능한 기후변화 대응을 위해서는 두 가지 전략이 필요하다.

가. 기후변화 적응과 완화

1) 적응 전략과 완화 전략의 차이

- 가) 기후변화 적응: 기후변화의 불가피한 영향에 대비하고, 이에 적응하여 사회와 생태계의 취약성을 줄이는 것을 목표로 한다. 현재와 미래의 기후변화에 대한 취약한 지역과 시스템을 식별하고, 취약성을 줄이기 위한 전략을 개발하는 데 중점을 둔다. 과거의 기후 패턴과 미래의 기후 시나리오를 고려하여 건물, 농업, 수자원, 보건 등 다양한 부문에서 적응할 방법을 찾는다. 해수면 상승에 대비하여 해안 지역에 방파제를 건설하거나, 농업 생산성을 높이기 위해 가뭄과 홍수에 대비한 농업 기술을 도입한다.
- 나) 기후변화 완화: 기후변화의 근본적인 원인인 온실가스 배출을 감소시켜, 미래의 기후변화를 제한하는 것을 목표로 한다. 기후변화를 완화시키는 방안으로 에너지, 산업, 교통 등의 부문에서 온실가스 배출을 줄이는 데 중점을 둔다. 재생에너지 사용 촉진, 더 효율적인 에너지 소비, 친환경 교통수단 촉진 등의 조치를 취한다.

2) 적응과 완화 프로젝트 사례

- 가) 기후변화 적응 프로젝트 4가지 사례: 기후변화 적응 프로젝트 사례로서 네 가지 예를 들면, 첫째, 네덜란드는 해수면 상승을 대비해서 방파제와 해안 보호 시스템을 새롭게 구축하였다. 이를 이용해서 홍수와 폭풍 등 자연재해로부터 인명과 재산을 보호할 수 있다. 둘째, 케냐의 ‘기후 스마트 농업’ 프로젝트는 기후변화에 적응하여 농업 생산성을 향상시키는 목표를 갖는다. 장기적 가뭄이나 집중호우, 홍수에 대비해서 농업 기술, 작물 다각화, 물 관리 기술을 농부에게 가르쳐준다. 셋째, 방글라데시는 지속적인 홍수와 기후변화로부터 도시를 보호하기 위해 홍수 관리 프로젝트를 펼치고 있다. 안전한 건축물 설치, 호우 대피 시설 개선 등을 통해 주민을 홍수 위험으로부터 보호한다. 넷째, 호주의 일부 지역에서는 기후변화로 인한 예상치 못한 강수량 변화에 대비하여 물 관리 프로젝트를 시행하고 있다. 지역 사회에 물 보존과 재활용 방법을 가르치고, 물 저장과 분배 시스템을 개선하여 물 부족 문제를 완화한다.

나) 기후변화 완화 프로젝트 3가지 사례: 기후변화 완화 프로젝트 사례로서 세 가지 예를 들면, 첫째, 덴마크는 재생에너지 촉진 프로젝트에 크게 투자해서, 풍력과 태양광 발전소를 건설하고 전력 네트워크를 개량하여 온실가스 배출을 줄이며 친환경 에너지를 생산하고 있다. 둘째, 콜롬비아는 대중교통 시스템을 개선하여 도시 내 자동차 사용을 줄이고 대중교통 이용을 촉진하는 프로젝트를 추진하고 있다. 온실가스 배출뿐만 아니라 대기오염을 감소시킬 수 있다. 셋째, 브라질은 산림 보호와 재생을 위해 '지속 가능한 농촌' 프로젝트를 추진하고 있다. 이를 통해서 산림 파괴에 따른 온실가스 배출을 줄이고 국가의 산림 생태계를 회복하기 위해 노력하고 있다.

3) 고려해야 할 전략 선택 기준

- 가) 지역적 특성: 적용할 지역의 기후, 지형, 인구 밀도, 경제 상황을 고려해야 한다. 우리나라에서도 기후 조건과 취약성이 전혀 다른 제주 지역에서는 내륙과는 상이한 전략이 필요하다.
- 나) 우선순위: 어떤 기후변화 효과가 가장 긴급하거나 심각한 영향을 미칠 것인지 중요성을 평가하고 주요 대응 사항을 파악해야 한다. 우선순위에 근거해서 적응과 완화 전략을 결정할 수 있다.
- 다) 필요 비용과 자원: 전략을 구현하고 지속할 비용과 자원의 가용성을 고려해야 한다. 어떤 전략을 선택하느냐에 따라 필요한 비용과 자원의 양이 다를 수 있기 때문이다.
- 라) 기술과 노하우: 지역 또는 국가의 기술과 노하우 수준을 고려하여 기술적으로 실현 가능한 전략을 선택해야 한다.
- 마) 사회, 정치적 지지: 기후변화 대응을 위해서는 정치적인 결정과 사회적 지지가 필수적이다. 정부, 시민, 비영리 단체는 서로 적극적으로 협력해야 한다.
- 바) 장기적 효과: 기후변화가 장기적으로 유지되는 상황에서도 선택한 전략이 효과적이어야 한다. 당장 큰 비용이 들더라도 장기적으로 효과적인 해답을 찾아야 한다.
- 사) 국제 협력: 기후변화는 국경을 초월하는 문제이기 때문에 국제적 협력과 협약을 고려해서 전략을 수립해야 한다.
- 아) 지속 가능성: 선택한 전략이 지속 가능하며, 환경적, 사회적, 경제적 측면에서 지속 가능한 결과를 도출해야 한다.
- 자) 갈등 관리: 기후변화 대응은 자원과 이익에 관해서 분쟁이 날 수 있으므로 이해 관계자 간의 잠재적인 갈등을 관리하며 추진해야 한다.
- 차) 과학적 지식과 연구: 과학적 연구와 자료를 기반으로 해서 전략을 수립하고, 주기적으로 모니터링하며 필요한 수정과 보완을 해나가야 한다.

나. 극한기후에 대비하는 방안

1) 이상기후에 대비하는 계획

- 가) 위험 평가: 이상기후의 영향을 정확하게 산정하기 위해 위험성을 평가한다. 현재의 기후 상황과 미래의 기후 시나리오에 따른 변화를 고려해야 한다.
- 나) 취약성 평가: 특정 지역이나 계층의 취약성을 세부적으로 평가한다. 어떤 사람, 국가 또는 지역이 특히 이상기후에 민감하거나 취약한지를 확인하고 대응 전략을 세운다.
- 다) 대응 전략 개발: 기후변화 적응 전략과 완화 전략을 활용하여 이상기후 대응 계획을 수립한다. 다만 해당 지역과 상황에 따라 구체적이고 실현 가능한 단계를 포함해야 한다.
- 라) 비상 대책과 대응 계획: 긴급 상황에서 인명과 재산을 보호하고 신속하게 복구하기 위한 비상 대책을 마련한다. 이를 통해 비상시 피해를 최소화한다.
- 마) 교육과 훈련: 지역 주민, 단체와 관리자를 대상으로 교육 프로그램을 운영하고 훈련한다. 기후변화와 관련된 위험성에 대한 인식을 높여서 대응 계획을 실행하는 데 필요한 지식과 능력을 갖추도록 한다.
- 바) 모니터링과 평가: 대응 계획의 효과를 계속해서 모니터링하고 평가한다. 이상기후 이벤트의 발생과 영향을 추적하고, 대응 전략을 조정하거나 개선하는 데 필요한 정보를 제공한다.
- 사) 지속 가능성: 이상기후 대응은 지속 가능해야 하므로 새롭게 나타나는 기후 현상과 위험을 예방하고 대응하기 위해 계획을 지속적으로 수정하고 개선해야 한다.

2) 긴급 대응과 대피 전략

- 가) 경보와 감시 체계의 설정: 기상 예측과 기후모델 시뮬레이션에 근거해서 극한기상을 예측하고 경고할 수 있다.
- 나) 대피 경로와 장소 구분: 대피 경로와 안전한 대피 장소를 구별해서 주민에게 알린다. 특히 홍수, 태풍, 산불 등의 상황에 대비하는 계획을 수립한다.
- 다) 비상 연락처와 통신 수단: 긴급 상황에서 연락을 취하고 정보를 공유할 방법을 마련한다. 휴대전화, 라디오, 텔레비전, 소셜 네트워크 서비스(Social Network Service, SNS) 등을 이용해 최신 정보를 알린다.
- 라) 비상용품과 식량 수급: 긴급한 상황에 대비하여 비상용품과 식량을 보관한다. 음식, 물, 의약품, 손전등, 배터리, 소형 발전기 등을 포함한다.
- 마) 계획 수립과 훈련: 극한기후 대비 계획을 수립하고 연습한다. 대피, 응급 처치, 소방기 사용 등을 훈련하고 연습해서 대비 능력을 향상시킨다.
- 바) 노약자 보호: 어린이, 노인, 장애인 등 취약 계층을 보호하고 대피, 응급 의료, 보호 서비스에 필요한 지원을 제공한다.

사) 재난 상황 대응 계획: 지방 정부와 관련 기관은 극한기후 상황에 대비해서 대응 계획을 수립하고 중앙 정부와 협력한다. 긴급 상황에서 조직, 응급 서비스, 그리고 자원을 할당할 수 있다.

아) 정보 공유와 협력: 중앙 정부와 지방 정부는 정보 공유와 협력을 강화하여 대응을 최적화한다.

3) 극한 상황 관리와 소통 방안

가) 극한 상황 관리: 긴급 상황 관리를 위해 필요한 단계와 역할을 명확하게 정의해야 한다. 이를 통해서 필요한 인력, 장비, 의료용품, 식량 등을 효율적으로 관리할 수 있다. 중앙 정부와 지방 정부, 비영리 단체, 응급 서비스, 기타 이해 관계자는 서로 협력해야 한다. 지방 정부는 사람들이 쉽게 접근할 수 있는 곳에 대피소, 의료 시설 등을 마련해서 사람을 대피시키고 보호해야 할 의무를 갖는다.

나) 소통 방안: 사람들에게 긴급 상황을 업데이트하고 방송 매체를 이용해서 안전 조치를 전달한다. 텔레비전, 라디오, 소셜 미디어, 문자 메시지, 웹사이트를 활용할 수 있다. 나아가 긴급 상황이 종료된 후에도 사람들에게 상황의 변화를 계속 알려줘야 한다. 즉, 피해 평가, 복구 계획, 자원 지원에 대한 정보를 공유해서 복구 과정을 효율적으로 관리할 필요가 있다.

다. 지속 가능한 개발과 미래를 위한 전략

1) 지속 가능한 에너지와 자원 활용

가) 재생에너지의 사용: 화석연료를 대신하는 재생 가능한 에너지를 적극적으로 사용한다. 원자력, 태양광, 풍력, 수력, 지열 등 재생 가능한 에너지를 사용해서 에너지 공급을 안정화할 뿐 아니라 온실가스 배출을 최소화한다.

나) 에너지 효율 증대: 건물, 교통, 산업, 농업 부문에서 에너지 소비를 최소화하는 기술과 방법을 적용해서 불필요한 낭비를 줄인다.

다) 전력 네트워크의 혁신: 스마트 그리드와 최첨단 에너지 저장 기술을 도입하여 전력 네트워크를 효율적으로 관리한다.

라) 수자원 관리: 물 사용을 절약할 수 있는 기술로써 물의 재활용과 강수 수집 시스템을 개발하고 이용한다.

마) 자원의 효율적 활용: 재활용 공정을 개선하여 신규 자원 소비를 줄이고 환경 피해를 최소화한다.

바) 지속 가능한 교통수단: 대중교통, 자전거, 친환경 교통수단을 적극적으로 도입해서 도로 교통으로 인한 온실가스 배출을 줄인다.

사) 정책과 규제 개선: 지속 가능한 에너지를 사용하고 자원을 효율적으로 활용하기 위한 정부 정책을 수립하고 불필요한 규제를 개선한다. 궁극적으로 생산자와 소비자 모두에게 긍정적 인센티브를 제공한다.

- 아) 커뮤니티 참여와 교육: 지역 커뮤니티를 활용해서 에너지와 자원 효율에 대한 교육과 정보를 제공하고 지속 가능한 생활 방식을 유지하도록 한다.
- 자) 연구와 혁신: 신기술과 혁신적인 솔루션을 연구하고 개발하여 지속 가능한 에너지를 확보하고 자원을 효율적으로 활용하도록 한다.

2) 친환경 기술과 혁신의 역할

- 가) 원자력과 재생에너지: 원자력과 여러 재생에너지(태양광, 풍력, 지열, 수력 등)는 화석연료를 대신해서 깨끗하고 지속 가능한 에너지를 공급할 수 있다.
- 나) 에너지 저장 기술: 배터리 기술의 혁신을 통한 에너지 저장 기술의 발전이 재생에너지를 효과적으로 활용할 수 있도록 한다.
- 다) 지능형 그리드 시스템: 스마트 그리드와 에너지 관리 시스템은 전력 네트워크를 효율적으로 관리하고 에너지 공급과 수요를 조절할 수 있게 한다.
- 라) 농업과 식량의 혁신: 기후변화로 인한 농작물 손실을 감소시키고 식량 생산을 안정화하기 위한 혁신적인 농업 기술을 개발한다. 드론, 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 센서, 정밀 농업 기술을 활용해 농업 생산성을 향상시키고 기후변화에 적극적으로 대응할 수 있다.
- 마) 물 관리 기술: 물 절약 및 재활용 기술 그리고 스마트 물 관리 시스템은 물을 효율적으로 사용할 수 있도록 한다.
- 바) 환경 모니터링과 예측: 센서 네트워크, 위성 활용, 인공지능을 적용한 환경 모니터링, 그리고 기후 예측 기술은 극한기후 상황을 사전에 감지하고 대응 전략을 최적화할 수 있도록 한다.
- 사) 재생 재료의 사용과 텀블러 용품: 환경친화적인 재료를 사용하고 제품을 효율적으로 디자인해서 자원의 소비와 폐기물 배출을 최소화한다.

3) 미래를 위한 기후-경제 전략

- 가) 친환경 경제로의 전환: 탄소중립을 달성하기 위해 노력하고 친환경 제품과 서비스를 개발한다. 이는 온실가스 배출을 줄이는 것뿐만 아니라 새로운 산업 기회의 창출로 이어진다.
- 나) 녹색 에너지와 인프라 투자: 원자력과 태양광 발전소, 풍력터빈, 고속철도, 효율적인 대중교통 시스템 등의 친환경 인프라를 확대한다.
- 다) 기후변화 위험 관리: 기후변화로 인한 재해 및 손실을 줄이기 위한 종합적인 전략을 포함한다. 이를 위해 기후변화에 따른 위험성을 평가하고 보험과 금융 상품을 개발하는 등 기후변화에 따른 손실을 최소화하도록 노력한다.
- 라) 기술 혁신: 인공지능, 빅 데이터 분석, 자동화 기술을 활용하여 기후변화에 적극적으로 대응한다. 이들 기술은 온실가스 감축, 에너지 효율화, 환경 모니터링, 자연재해 예측 등에 활용될 수 있다.

- 마) 제로 탄소 경제로 전환: 탄소중립을 목표로 산업 전 부문에서 탄소 배출을 줄인다. 탄소 포집과 저장 기술을 활용해서 탄소 배출을 제로로 만드는 방법을 연구하고 개발한다.
- 바) 재교육과 인재 개발: 미래 직업을 위한 교육과 재교육 프로그램을 개발하여 새로운 친환경 경제에서 일할 수 있는 인재를 양성한다. 이는 미래 노동 시장의 요구를 충족시키고 인구의 기술과 지식을 향상시키는 데 도움이 된다.
- 사) 사회적 불평등 해소: 기후변화에 가장 취약한 사회 그룹을 보호하고 불평등을 해소하는 노력을 한다. 궁극적으로 기후 정의와 기후 공정성을 목표로 한다.

기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제안

Major Projects for Carbon Neutrality Based on
Climate and Environmental Information



II

극 지역의 기후변화

1. 북극 증폭 현상과 기후변화
2. 남극 기후변화 특성과 의미
3. 시사점 및 제언

II

극 지역의 기후변화

우리의 생존을 위협하는 기후위기, 그 시작은 북극으로 지목된다. 많은 지구 환경학자들은 북극과 남극이 지구 기후변화의 ‘등대’라고 보고, ‘북극은 지구의 심장’, ‘북극의 경고’ 등을 주장하고 있다. 특히 북극의 기후변화가 가장 크게 나타나며, 전 지구적으로 영향을 미치기 때문이다. 이 장에서는 북극과 남극의 기후변화 현상과 그 의미를 찾아보고자 한다. 전 지구 평균보다 3배나 빠른 북극의 온난화로 인해 눈과 얼음이 사라지면서 지구의 기후를 조절하는 극 지역을 연구하는 일은 더욱 중요해졌다. 북극 상공을 돌던 강한 바람인 제트기류가 약해지고 정체되면서 제트기류가 남북으로 강하게 사행하여 전 지구적으로 이상기후가 찾아지고 있다.

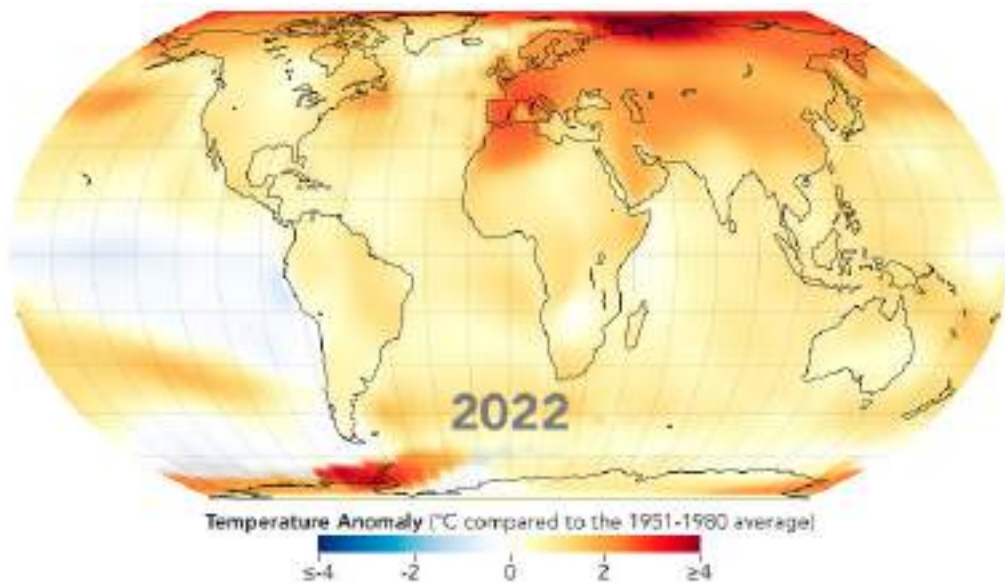
01 북극 증폭 현상과 기후변화

가. 북극 증폭 현상

- 1) IPCC 제6차 보고서와 최근 연구 결과(Ballinger et al., 2023)에 의하면 현재 지구 평균기온은 산업혁명 이전 대비 1.1°C 상승하였고, 1950년대 이후 증가율은 더 빨라지고 있다. 극 지역의 온난화는 전 지구 평균보다 더 빨리 진행되는데, 특히 북극의 경우 전 지구 평균에 비해 2~4배 빠르게 온도가 상승하고 있는 것으로 나타난다(〈그림 2.1〉 참조). 이는 지난 10,000년 동안 유례가 없이 빠른 온난화이다.
- 2) 북극의 온난화가 다른 곳보다 빠르게 진행되는 현상을 ‘북극 온난화 증폭(arctic amplification)’이라 한다. 북극 온난화 증폭은 다른 계절보다 겨울에 더 크게 나타나는데, 북극 온난화 증폭이 여름보다 겨울에 더 큰 이유는 여름에는 입사된 태양에너지가 해빙을 녹이는 데 이용되고, 남은 에너지는 해양의 혼합층을 데우는 데 이용되기 때문이다. 여름철 북극해의 혼합층에 저장된 열은 가을과 겨울에 대기로 방출되어 북극 온난화에 기여한다. 또한 온도가 올라가면서 북극의 육빙과 해빙이 더 많이 녹고, 이에 따라 태양에너지를 더 적게 반사하면서 기온 상승이 더욱 증폭되는 양의(얼음-알베도) 피드백 과정이 북극 온난화 증폭에 관여하고 있다.

- 3) 북극의 온난화는 주변의 빙하를 빠르게 녹이는 데 기여할 뿐 아니라 중위도에도 원격상관(teleconnection) 과정을 거쳐 각종 자연재해를 유발하므로 북극의 온난화가 왜 빨리 일어나는지를 이해하고, 중위도와의 원격상관 과정을 과학적으로 이해하는 것이 중요하다.

<그림 2.1> 미국 NASA에서 발표한 2022년 기온 이변



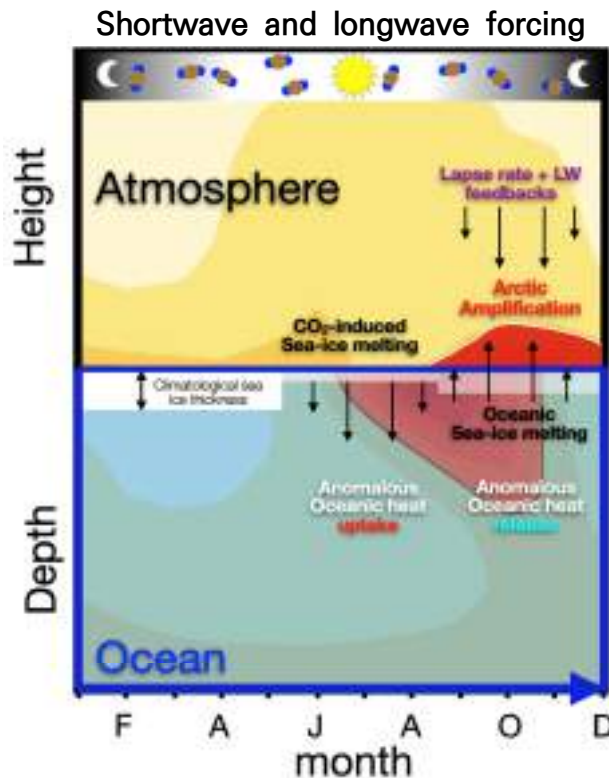
주: 1951~1980년에 평균으로부터 증가된 기온 편차를 나타냄.

나. 북극 증폭 현상에 대한 기작 연구들

- 1) 북극의 온난화가 중·저위도에 비해 더 크게 나타나는 이유는 여러 복합적인 원인에 의한 것으로 보고되고 있는데, 가장 많이 거론되는 것이 얼음-알베도(입사하는 태양에너지 대비 대기와 지표면에 의해 산란되거나 반사되는 비율) 피드백이다. 북극은 태양에너지의 반사율이 높은 해빙/육빙(보통 70% 이상)과 눈(80% 이상)으로 덮여 있는데, 대기의 온실가스 농도 증가에 따라 일부 지역의 눈과 얼음이 녹으면 알베도가 낮은 해양(10%)이나, 토양, 식생(30~40%)으로 바뀌기 때문에 더 많은 양의 태양에너지가 흡수되어 온난화가 증폭되기 때문이다.
- 2) 연구 초기에는 얼음-알베도 피드백이 북극 온난화 증폭의 가장 중요한 원인으로 여겨졌지만, 이후 연구에서는 온난화에 따라 대기를 통한 극 지역의 열 수송량 증가로 북극 온난화 증폭을 설명하기도 하였다. 최근의 연구에서는 북극의 낮은 기온에 의한 상향 장파 복사량의 상대적인 감소(일명 플랑크 피드백)가 북극 온난화 증폭에 중요한 역할을 한다는 주장도 있고, 저위도의 대기 안정도가 고위도보다 낮기 때문에 온난화에 따라 더 많은 수증기가 표면에서 대류권으로 증발하면서 고위도보다 열손실이 더 많이 일어나는 기온감률(lapse rate) 피드백도 북극 온난화 증폭에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었다(Stuecker et al., 2018).

- 3) 이외에도 지구온난화에 따른 북극 지역 수증기량 및 구름의 증가와 관련된 피드백 과정도 북극 온난화 증폭의 원인으로 제시된다. 하지만 앞에 설명한 요소들은 계절에 따라 크게 차이가 날 수 있다. 예로, 겨울철은 단파 복사에너지의 양이 제한적이기 때문에 얼음-알베도 피드백이 작동하기가 쉽지 않아, 겨울은 주로 대기온도 연직분포의 변화, 대기 수증기량 증가 혹은 구름의 양 변화에 따른 장파 복사량의 영향이 지배적이며, 알베도 피드백은 봄철부터 가을까지 지배적인 영향을 미치는 것으로 파악된다.
- 4) 주로 여름철에 지배적인 얼음-알베도(반사도) 피드백뿐만 아니라 기온감률 피드백 등 다른 과정들도 중요하게 다루어지는데, 기후모델에 의한 미래 예측 결과에 따르면 북극 지역의 해빙이 전반적으로 감소함에 따라 북극 증폭이 점차 악화된다는 일관된 결과를 보여주고 있다. 이는 해빙의 알베도 피드백이 중요한 역할을 한다는 것을 보이며, 이러한 모순에 대한 답을 논문에서 밝힌 바 있다(Chung et al., 2021). 대기-해양 재분석 자료와 다양한 기후모형 결과를 사용한 매우 포괄적인 연구수행으로부터 북극 해양이 여름 동안에의 해빙 손실에서 발생하는 열을 저장하는 열저장 장치 역할을 함으로써, 나중에 이 열이 가을과 겨울에 대기로 방출됨을 알 수 있다. 결국 가을과 겨울에 해빙 후퇴 지역에서 강력한 기온-해양 열 플럭스와 안정된 대기 구조는 표면에서 강화된 가열과 기습화를 유도하여 장파 피드백을 더욱 강화시킨다는 것이다. 이 기작은 여름에서 겨울까지의 대기-해양-얼음의 상호작용의 결과로 따뜻한 계절에 해양의 열 재충전과 추운 계절에 열 방출의 중요성을 입증하게 되었다(〈그림 2.2〉 참조).

〈그림 2.2〉 해양의 열 흡수와 방출의 기여를 계절적으로 설명하는 도식도



주: 가을/겨울철 북극 증폭 현상에 대한 해양의 비정상적인 열 흡수와 방출의 기여를 계절적으로 설명한다.

다. 급격한 얼음의 감소

- 1) 북극 온난화 증폭과 더불어 북극 해빙은 급격한 감소 경향을 보이고 있는데, 1979년부터 2018년까지 북극 지역 해빙 농도의 장기적인 변화를 살펴보면, 봄철 바렌츠-카라해의 해빙 농도 감소가 가장 뚜렷하고, 시계열 변화에 의하면 이 지역의 해빙 감소는 1998년 이후 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 그린란드 동부의 프람스트레이트와 배핀만에서는 해빙의 농도가 약간 증가 추세를 보이는데, 이는 북극해에서 얼음이 녹기 시작하면서 해류에 의해 많은 해빙이 대서양으로 수송되기 때문으로 여겨진다(김성중, 2023).
- 2) 1988년까지는 여름철 북극 해빙 면적이 약 8백만 km^2 로 감소했다가 겨울에는 약 1천6백만 km^2 까지 증가하는 계절적 변화를 보였다. 하지만 지구온난화에 의해 거의 모든 계절에 걸쳐 해빙 면적이 꾸준히 감소하고 있다. 특히 2012년 여름에 해빙 면적이 350만 km^2 까지 감소하여 인공위성 관측 사상 최솟값을 기록하였고 이 기록은 아직까지 갱신되지 않고 있다. 북극의 여름철 해빙은 이후 약간 회복하여 2023년 9월 15일 현재는 약 423만 km^2 를 기록하고 있다(National Snow and Ice Data Center). 그럼에도 여름철 해빙 감소는 상당히 빠른 수준이라 할 수 있다.
- 3) 9월 말부터는 다시 결빙이 시작되기 때문에 겨울에는 북극해 대부분 지역이 해빙으로 덮이게 되고 가을과 겨울에는 북대서양의 따뜻한 해류가 유입되는 바렌츠-카라해에서만 해빙 감소 경향이 뚜렷하다(Kim et al., 2022)(〈그림 2.1〉 참조). 가을철 해빙 농도의 감소율은 여름보다 더 크고 특히 동시베리아와 축치해의 감소 경향이 뚜렷하다. 바렌츠-카라해의 해빙 농도 감소는 1990년대 후반부터 본격적으로 시작되었고 2000년대 이후는 감소 경향이 매우 뚜렷하며, 이는 뒤에서 다시 다루어질 예정이며, 북반구 중위도 냉각화와 연관이 있다.
- 4) 북극에는 바다의 얼음뿐 아니라 눈이 켜켜이 쌓여 만들어진 육빙이 그린란드를 중심으로 분포해 있다. 참고로 그린란드 빙하가 모두 녹을 경우, 전 지구 해수면이 약 7.4 m 상승할 정도의 부피다. 북극의 빠른 온난화로 인해 그린란드 빙하도 빠르게 녹고 있기 때문이다. 인공위성 관측 자료를 바탕으로 추산한 그린란드 빙하의 부피는 1992년부터 2020년까지 약 4,890 Gton 감소했으며 이러한 감소는 13.5 mm의 전 지구 해수면 상승과 일치한다(IPCC, 2021). 빙하의 감소율은 각각 1992년부터 1999년까지는 35 ± 83 Gton, 2000년부터 2009년까지는 175 ± 89 Gton, 그리고 2010년부터 2019년까지는 243 ± 93 Gton으로 관측되었으며, 최근으로 오면서 감소율이 증가하고 있다(IPCC, 2021).
- 5) 온실가스 증가에 의해 눈의 양도 감소하고 있다. 2022년 북반구 전체 눈의 양은 24.9백만 km^2 인데 이는 1967~2022년 평균 대비 23만 km^2 그리고 1967년 대비 약 3백만 km^2 가 줄어든 값이다(Robinson & Estilow, 2023). 특히 봄과 여름철 눈의 감소가 빠르게 진행 중인데, 1967년부터 2018년까지 6월의 눈은 10년당 약 13.4% 감소하였다(IPCC, 2019). 봄과 여름 북반구 눈의 양이 감소하는 데 반해 가을과 겨울의 눈의 양은 크게 차이가 나지 않으며, 특히 시베리아의 강설량은 2000년대 이후 증가하는 추세를 보인다. 이는 최근 들어 시베리아 고기압이 겨울에 강화되는 경향과 일치한다. 일부 연구에 의하면 가을철 시베리아 강설량의 증가는 북극 해빙의 감소와 연관이 있다는 결과도 보고되고 있다(Cohen et al., 2021). 좀 더 상세하게 살펴보면, 북극의 평균기온은 봄과 가을에 영하 10°C 이하이며, 여름에는 지역에

따라 0°C 이상까지 올라가지만 겨울에는 그린란드 부근과 동시베리아에서 영하 30°C 이하까지 내려가기도 한다(Kim et al., 2022).

라. 중위도에 미치는 영향

- 1) 기후변화에 의해 한파와 같은 극한기후 현상이 자주 보도되고 있는데, 이는 중위도와 무관할 것 같은 극지에서 시작된다. 이것은 북극 기온 증폭 현상으로 인해 중위도의 제트기류가 약화되면서 발생하는 이상기상 현상이다. 중위도의 제트기류는 북극발 한파를 막아주는 장벽 역할을 하지만 극 온난화로 인하여 이 장벽이 무너져서 한파가 남쪽으로 남하하게 된다. 이에 대해 자세히 알아보고자 한다.
- 2) 온난화가 가파르게 일어나고 있는 북극과는 달리 북반구 중위도 지역에서 2000년대 이후 한파가 1990년대보다 더 빈번히 발생하고, 한번 발생하면 더 오래 지속되며 때로는 눈 폭풍을 동반하여 많은 피해를 입히고 있다. 일례로, 2009년 12월, 2010년 2월, 그리고 지난해 겨울에는 이와 유사한 한파가 북반구 전체에 발생하여 사회, 경제적으로 많은 영향을 끼친 적이 있는데, 특히 한국의 수도권이 폭설을 동반한 한파로 인해 일주일 이상 마비되었다. 2016년 1월 중하순에도 한반도를 포함한 동아시아, 북미, 유럽을 중심으로 북반구 전체가 한파의 영향을 받았는데, 특히 폭설로 인해 제주공항이 마비되어 많은 관광객의 발이 묶이기도 하였다. 2021년 1월과 2023년 1월에는 우리나라를 포함한 동아시아에 갑작스러운 한파가 발생했는데, 2021년 1월 8일 서울 기온이 영하 18.6°C까지(평년기온 영하 0.9°C) 떨어졌으며 이는 1986년 관측 이래 가장 낮은 기록이었으며, 2023년 1월 24일 서울은 영하 16.7°C를 기록하였다. 북미 지역도 지난 수년 동안 거의 매년 반복되는 눈 폭풍을 동반한 겨울철 한파의 발생에 의해 많은 사회, 경제적 피해를 입고 있다. 일례로 2021년 겨울 미국 중부 지역의 기온이 영하 30°C 이하로 떨어지는 극한 한파가 발생하였다.
- 3) 그렇다면 전 지구적인 온난화에도 불구하고 북반구에 겨울철 한파가 강해지고 또 더 빈번히 발생하는 원인은 무엇일까? 역설적으로, 2000년대 이후 겨울철 북반구에 더욱 자주 발생하는 한파는 북극의 급격한 온난화에 기인한다는 연구 결과들이 다수 제시되고 있다. 북극 해빙은 9월 중순부터 열기 시작하는데 북극의 온난화에 의해 늦가을과 초겨울 북극의 바렌츠-카라해의 결빙이 지연되면 대기는 이미 냉각되어 있어 많은 양의 열과 수증기가 열린 해양에서 대기로 방출된다. 바렌츠-카라해에서 방출된 열은 1차적으로는 북극 기온을 증가시키고 궁극적으로 북극의 기압을 올려 이는 중위도와 북극의 기압 차이를 감소시키게 되어 제트기류의 약화로 이어진다. 2차적으로는 성층권으로 전파되는 행성파의 활동을 강화시켜 극소용돌이(polar vortex)를 약화시키는 역할을 한다. 약화된 중위도의 제트기류는 중심이 이전보다 더 중위도로 사행하여 차가운 북극의 공기가 중위도까지 남하할 수 있는 조건을 만들어 한파를 유발하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2014).
- 4) 시베리아 강설량 증가도 중위도 한파의 원인으로 지목되고 있다(Cohen et al., 2021). 위에서 설명한 늦가을 해빙의 결빙이 지연되면서 다량의 수분이 공급되어 북극해 인근에 많은 눈이 올 수 있다. 10월, 시베리아에 평년보다 많은 눈이 오면 눈은 지표면보다 알베도가 높기 때문에 태양 반사의 증가에 의해 단파 복사에너지의 감소가 나타나고, 이는 기존에 대기 냉각에 의해 성장하고 있는 시베리아 고기압을

강화시키며 동아시아에 한파를 가져온다. 시베리아의 강설량 증가는 시베리아 고기압의 강화를 통한 종관 규모의 반응도 일으키지만, 성층권으로의 행성과 전파를 활성화시키고, 이는 나아가 성층권 온난화 혹은 돌연승온을 일으켜 극소용돌이와 중위도 제트기류를 약화시키는 것으로 알려져 있다.

- 5) 늦가을과 초겨울 바렌츠-카라해 해빙의 결빙 지연과 시베리아의 강설량 증가에 의한 성층권 돌연승온에 의해 북반구 고위도의 기압 증가는 수개월 이상 지속되는데 겨울부터는 북극 성층권의 고기압 편차가 지면으로 하강하며 대류권에도 극소용돌이의 약화를 야기하면서 한파를 유발한다. 따라서, 북극 온난화 증폭에서부터 어떤 기작을 통해 극소용돌이의 약화가 연결되는지 이해하는 것이 중요하다.

마. 향후 주요 연구과제들

- 1) 일부 연구에서는 북극의 온난화와 중위도 겨울철 한파 발생과의 연관성은 없다고 보는 결과도 보고되고 있다. 외부 강제력 변화, 즉 온실가스 증가에 의한 북극 해빙 감소나 시베리아 강설량 증가보다는 기후계 내의 자연 변동성에 의해 중위도 한파가 발생한 것으로 보는 견해도 있기 때문이다. 이와 같이 북극의 영향을 회의적으로 보는 이유는 대부분의 분석 결과에서 북반구 겨울철 한파와 북극 온난화 증폭 간의 통계적 유의성이 낮기 때문이다. 또한 많은 기후모델에서는 해빙 감소에 대한 중위도 냉각화 반응이 제대로 재현되지 못하고 있는데, 이는 기후모델의 한계(공간해상도, 성능, 지구 시스템 복잡성 표현 한계 등)와 기작에 대한 서로 다른 해석 때문이다(Overland et al., 2015).
- 2) 북극의 온난화가 중위도 한파에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 첫째, 제트기류의 변동, 블로킹, 북극 진동의 위상 변화, 로스비 파동을 통한 원격상관, 성층권-대류권 상호작용, 행성 파동의 상층 전파 등과 같은 대기순환의 근본적인 이해가 필요하고, 둘째, 눈과 해빙의 감소, 해양과 육상의 열용량 변화, 바람과 해류의 변화에 따른 일련의 양의 피드백 작용 등 북극 온난화 증폭의 원인에 대한 이해가 필요하다(Overland et al., 2016)(〈그림 2.3〉 참조).
- 3) 당분간은 북극의 온난화가 지속될 것으로 예측되기 때문에 북극의 온난화가 중위도에 어떤 과정을 통해 영향을 미치는지 파악할 필요가 있다. 비록 아직 관측 기간이 짧고 현상들의 물리적인 복잡성 때문에 과학자들 사이에서 상반된 결과들이 나오고 있지만, 북극의 지속적인 변화는 중위도의 계절 규모 예측에 중요한 역할을 할 것이기 때문에 세계기상기구(WMO)의 극지예측 프로젝트(Polar Prediction Project), 세계 기후 연구 프로그램(WCRP)의 기후와 빙권(Climate and Cryosphere, CliC), 국제 북극 과학 위원회(IASC)의 대기 워킹그룹과 같은 국제 프로그램에서 북극과 중위도의 연계성 주제를 최우선으로 풀어야 할 주제로 선정한 바 있다.

<그림 2.3> 북극 온난화 증폭부터 중위도 극한기상 발생까지의 연계 기작 및 한계점



자료: Overland et al., 2016

02 남극 기후변화 특성과 의미

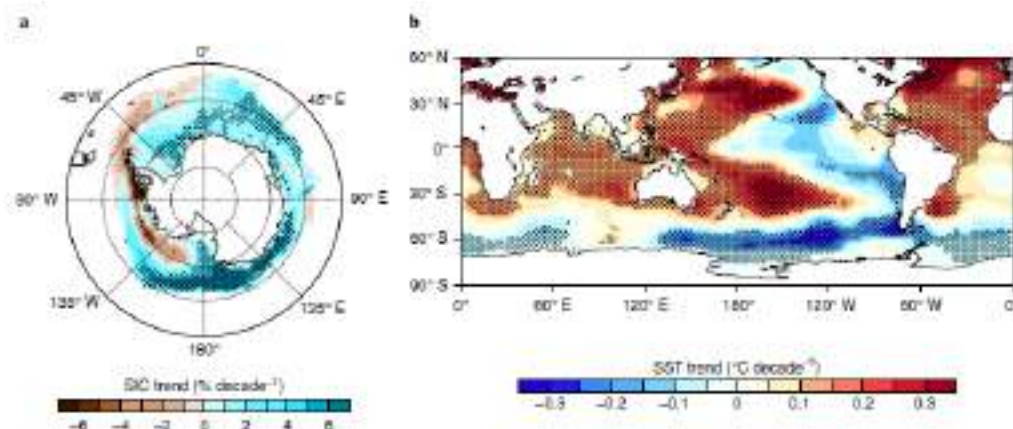
지구온난화에 따른 북극 온난화 증폭, 점차 가속화되는 북극 해빙의 감소 경향과는 달리 남극 대륙을 둘러싸고 있는 남빙양(대략 남위 50도 이남 지역)에서는 연속적인 위성 관측이 시작된 1970년대 말 이후로 해수면 온도가 지속적으로 감소하고 있으며, 해빙 면적이 증가하여 지구온난화에 역설적인 양상을 보이고 있다.

가. 남극 기후변화의 특성

- 1) 북극 해빙과는 달리 남극 해빙 면적의 증가 경향을 설명하기 위해(〈그림 2.4〉 참조) 여러 가지 가설들이 제시되었지만 관측 자료의 부족, 기후변화 연구에 사용되고 있는 기후모델의 문제점, 그리고 남반구 고위도 지역 기후 시스템에 대한 이해 부족으로 남극 해빙의 변화는 여전히 수수께끼로 남아 있다.
- 2) 자료에(Chung et al., 2022)(〈그림 2.4〉 참조) 의하면 남극의 해빙은 지역에 따라 차이는 있지만 1979년과 비교해 2014년 5~6% 증가한 것으로 분석된다. 지구온난화 영향으로 해빙이 줄어들 것이란

예측을 빚나간 현상이다. 국내 연구팀이 이런 현상의 원인을 밝히는 데 성공하였으며, 해빙의 증가가 '자연적 변동성'과 관련이 있다는 분석을 국제 공동 연구로 이루어 냈다. 여기서 자연 변동성은 인간 활동과 직접적인 관련 없이 자연적인 과정에서 발생하는 변화를 뜻한다. 남극에서 해빙이 만들어질 정도의 수온 하락이 발생한다고 분석한 것이다. 동태평양의 수온 감소와 남태평양, 열대 대서양의 수온 상승이 남극해의 수온을 떨어뜨리고 해빙 생성을 유도하는 현상이 주기적으로 나타난다는 분석이다. 해빙은 남극과 북극의 바다를 덮고 있는 거대한 얼음판으로 태양에너지를 반사해 지구의 온도를 조절하는 역할을 한다. 기후나 기상변화와 직접적으로 관련돼 1970년대 말부터 인공위성을 활용한 관측과 기후모델 시뮬레이션 등을 통한 예측 연구를 진행해 왔는데, 남극 해빙 예측은 실제 관측값과 차이를 보였다. 2014년 해빙이 1979년과 비교해 1~3% 감소할 것으로 분석됐지만 오히려 5~6% 늘어난 것이다. 복잡한 변화로 해빙 예측의 난이도가 높아지고 있는 가운데, 우리나라는 서남극과 동남극에서 연구를 활발히 수행하고 있으며, 국제적으로 인지도가 높다.

<그림 2.4> 관측된 남극 해빙과 해수면 온도의 변화 경향



주: (a): 남극 해빙, (b): 해수면 온도, 관측 기간: 1979~2014년

자료: Chung et al., 2022

나. 남극에서의 기후변화 현상

- 1) 태양으로부터 입사하는 단파 복사에너지의 상당량을 반사시키는 것 이외에도 해빙이 해양과 대기 사이의 열교환, 대규모 해양 순환, 탄소 순환 그리고 생태계 등에 중대한 영향을 미치고 있다는 점을 고려할 때 북극과 남극의 해빙이 미래에 어떠한 변화를 보일지 그리고 해빙의 변화로 인해 중위도와 저위도 지역에서 어떠한 변화가 유발될지 기후모델을 이용하여 예측하는 일이 중요하다.
- 2) 기후모델로부터 예측된 미래 해빙 변화의 신뢰성을 높이기 위해서는 우선 관측된 해빙의 평균 상태와 과거에서부터 현재까지의 시간적 변화 특성을 충실히 재현해야 할 것이다. 완벽하지는 않지만, 대부분의 기후모델들은 위성으로부터 관측된 북극 해빙 면적의 감소를 비교적 잘 재현하고 있는 데 반해 남극 해빙의 변화는 잘 모의하지 못하고 있다. 특히 1979년에서 2014년 기간 동안 온실가스의 증가에도

불구하고 남극 해빙 면적의 증가하는 관측 결과와는 달리, 대부분의 기후모델들은 감소 경향을 나타내고 있다. 이와 더불어 대부분의 기후모델들이 관측에 상반된 남빙양 해수면 온도의 변화를 보이고 있다.

- 3) 위성 관측의 오차가 크지 않다는 가정하에 다음과 같은 요인들로 인해 위성 관측과 기후모델 사이에 차이가 발생할 수 있다. 첫 번째 요인은 기후모델들이 지구온난화에 따른 남극 해빙 면적의 감소를 과도하게 모의하거나, 온실가스 또는 다른 외부 요인들에 기인하는 해빙 변화의 부호에 있어서 관측과 기후모델이 서로 일치하지 않는 경우이다. 두 번째 요인은 온실가스 증가와 같은 외부적인 요인이 아니라 기후 시스템 내의 자연적인 변동성이 위성으로부터 관측된 남극 해빙 면적 증가 경향의 주된 원인인 경우이다. 자연 변동성은 인간 활동과 무관하게 다양한 시간과 공간 규모로 대기와 해양의 상태를 변화시킨다. 자연 변동성의 대표적인 예로 적도 태평양에서 발생하는 수년 단위 시간 규모의 엘니뇨-라니냐 현상을 들 수 있다. 또한 두 가지 요인이 복합적으로 작용해서 관측과 모델 간 차이가 발생할 수 있다.
- 4) 남극의 기후변화에 성층권 오존 감소의 영향이 중요하다는 연구가 있다. 남극 성층권의 오존층 파괴는 냉장고의 냉매나 헤어스프레이 등에 사용된 프레온가스와 같은 오존 파괴 물질의 사용에 따른 것이며, 그 결과 오존홀(ozone hole)이 발생했다. 성층권의 오존은 태양으로부터 지구로 입사하는 자외선 영역의 복사에너지를 흡수하는 성질을 가지고 있는데 남극 성층권 오존층의 파괴로 남반구 고위도 지역의 성층권과 대류권의 온도가 감소하였다.
- 5) 열대 지역과 고위도의 온도 차이로 남반구 중위도 상공에 서풍 계열의 제트기류가 존재하는데 남극 성층권 오존층의 파괴로 인한 남반구 고위도 지역 기온 감소는 열대 지역과의 온도 차이를 증가시키며 남위 60도 지역에서 서풍의 강화 경향이 관측되었다.
- 6) 남반구에서 서풍은 해양 표층의 해류를 북쪽(저위도 방향)으로 수송하는 특성을 가지고 있어 강화된 서풍으로 인해 남극 대륙 근처의 차가운 표층 바닷물이 저위도 쪽으로 더 많이 수송되어 남빙양 해수면 온도가 감소하고 그 결과 해빙의 면적이 증가하게 된다. 이러한 논리를 바탕으로 남극 성층권 오존의 감소가 남극 해빙 면적 증가 경향을 일으키는 주요한 원인으로 작용했다는 가설이 제시되었다.
- 7) 남극 성층권 오존의 감소로 인한 서풍의 강화 경향이 장기간 지속될 경우 저위도 방향으로 수송된 표층수를 보충하기 위해 해양 심층으로부터 표층으로 바닷물이 이동하는 용승(upwelling) 현상이 발생하게 된다.
- 8) 일반적으로 해수 표층으로부터 수심이 깊어짐에 따라 해수의 온도가 감소하는 데 반해 남빙양에서는 염분의 연직분포와 해양 순환의 특성으로 인해 해양 표층보다는 심층이 온도가 더 높은 연직분포를 보이고 있다. 이러한 해수 온도의 연직분포를 고려할 때 용승이 발생할 경우, 상대적으로 온도가 높은 심층의 해수가 표층으로 수송되어 해수면 온도가 상승하게 되고 그 결과 해빙의 두께와 면적이 감소하게 된다. 따라서 관측된 남극 해빙 면적 증가 경향의 주된 원인을 남극 성층권 오존의 감소로 설명하는 데에는 한계가 있다.
- 9) 시간 규모에 따라 남극 성층권 오존의 감소가 남극 해빙의 변화에 미치는 영향이 달라질 수 있다는 점과 함께 고려해야 할 중요한 사항은 오존층 파괴물질의 규제에 관한 국제협약인 몬트리올 의정서(Montreal Protocol) 체결에 따라 성층권 오존 파괴 물질의 사용이 제한되면서 2000년 이후 남극 성층권 오존 농도의 증가 경향이 관측되고 있다는 점이다.

- 10) 이에 따라 남반구 고위도 지역의 대기순환이 남극 성층권 오존 감소기와 반대되는 양상을 보이고 있다. 1979년 이후, 특히 2000년 이후부터 2014년 동안 남극 해빙 면적이 크게 증가했다는 사실을 고려할 때 남극 해빙 면적 증가 경향을 전적으로 남극 성층권 오존의 감소에 결부시키기에는 어려움이 있다.
- 11) 한편, 지구온난화에 따라 남극 대륙 빙하의 두께와 면적은 감소하고 있다. 남극 대륙의 얼음이 녹음으로 인해 차갑고 염분의 함유량이 낮은 담수가 남극 대륙 주변의 바다로 유입되어 바다 표층의 안정도가 증가하고 그 결과 해수면 온도가 감소할 수 있다고 알려져 있다.
- 12) 온도가 낮은 남빙양 표층의 바닷물과 상대적으로 온도가 높은 심층의 바닷물 사이에 혼합이 활발히 일어날 경우 남극 해빙의 면적과 두께가 줄어드는 데 반해, 해양의 연직 성층 구조가 안정적일 경우 해양 심층과 표층 사이의 열교환이 제한되어 해빙의 면적이 증가할 수 있다. 남극 대륙의 주변 바다로 유입되는 차가운 담수는 염분이 매우 낮기 때문에 염분이 높은 바닷물 위에 위치하게 되고, 해수의 연직 안정도가 더욱 증가하게 된다. 따라서 지구온난화가 심화됨에 따라 남극 해빙(바다 얼음)의 면적이 감소하는 것이 아니라 오히려 증가할 가능성이 있다(Banerjee et al., 2020, Bintanja et al., 2013).
- 13) IPCC 보고서 작성에 활용된 기후모델 실험에 남극 대륙 빙하의 용빙으로 인한 담수 유입의 증가가 고려되어 있지 않다는 점을 고려할 때, 남극 해빙 면적 변화 경향에 대한 위성 관측과 기후모델 간 차이의 상당 부분이 남극 대륙 빙하의 용빙과 관련되어 있을 가능성이 높다.
- 14) 그러나 남극 대륙 주변 바다로 유입되는 담수의 양과 특성에 대한 장기 관측의 부족으로 남극 대륙 빙하 용빙이 남극 해빙 면적의 증가 경향에 미치는 역할에 대해서는 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 또한 남극 대륙 빙하 용빙으로 인한 담수 증가의 영향을 살펴보는 기존의 연구들 사이에 서로 상반되는 결과들이 도출되어 남극 대륙 빙하 용빙의 역할에 대한 논쟁이 계속되고 있다.
- 15) 남극 대륙 빙하의 용빙으로 인한 담수 유입의 증가가 남극 해빙 면적 증가 경향의 주된 원인일 경우 분석 기간이 늘어남에 따라 해빙 면적의 증가 경향이 보다 뚜렷해질 것으로 예상된다. 또한 IPCC 보고서 작성에 활용된 기후모델 실험들에 남극 대륙 빙하의 용빙으로 인한 담수 유입의 증가가 고려되지 않은 점을 고려할 때 분석 기간의 증가에 따라 위성 관측과 기후모델 실험 결과 사이의 차이가 증가하는 양상을 보일 것으로 예상할 수 있다.
- 16) 그러나 이러한 예상과는 달리 2015년 이후의 기간에서는 남극 해빙 면적이 뚜렷한 증가 경향을 보이지 않고 있고 이와 더불어 남빙양 평균 해수면 온도도 감소 경향을 보이고 있지 않다. 또한 분기 간의 증가에 따라 위성 관측과 기후모델 사이의 차이가 증가하는 양상을 보이지 않은 점을 고려할 때 남극 대륙 빙하의 용빙으로 인한 담수의 증가가 남극 해빙 면적의 증가를 일으킨 주된 원인으로 작용했다고 결론짓기에는 현재로서는 불확실성이 매우 크다.

다. 자연적 변동성의 영향

- 1) 온실가스 농도 증가, 남극 성층권 오존의 감소, 에어로졸 농도 변화 등 외부적 요인뿐만 아니라 기후 시스템 내의 자연 변동성이 남극 해빙 면적의 변화에 영향을 미칠 수 있다. 남극 해빙을 포함해서 남반구

고위도 지역의 기후 요소들이 수십 년 이상 긴 시간 규모에서 자연적인 변동을 보일 경우, 현재까지 축적된 약 40년 정도 기간의 위성 관측으로는 이러한 장기 변동성을 파악할 수 없다. 따라서 남극 해빙 면적 증가 경향이 인위적인 외부 요인에 기인하는지 아니면 자연 변동성과 관련되어 있는지 판별하기가 어렵다.

- 2) 위성 관측 기간과 관련된 이러한 제약을 극복하기 위해 최근의 한 연구는 남극 해빙 면적의 증가 경향과 함께 남빙양 해수면 온도의 감소 경향이 관측되었다는 사실(<그림 2.4> 참조)에 주목하여 상대적으로 관측 기간이 긴 해수면 온도의 변화를 다양한 기후모델 실험 결과와 함께 분석하였다.
- 3) 분석 결과, 남빙양 평균 해수면 온도가 1950~1978년 사이의 기간 동안에는 증가 경향을 보이는 등 뚜렷한 장기 변동성을 보인 것으로 나타났다. 또한 1979년 이전의 불연속적인 위성 관측과 육안으로 관측된 남극 해빙 면적 자료의 분석 결과에서도 남극의 해빙 면적이 계속적으로 증가한 것이 아니라 남빙양 해수면 온도 변화에서와 같이 상당한 장기 변동성을 보인 것으로 나타났다.
- 4) 이와 함께 다수의 기후모델 모의실험 결과의 분석을 통해 남빙양 해수면 온도와 남극 해빙 면적의 장기 변동성이 기존 연구들에서 제시된 바와 같이 열대 태평양 및 북대서양 지역의 수십 년 이상 시간 규모의 기후 변동성과 밀접히 관련된 것으로 나타났다.
- 5) 열대 해양 지역 해수면 온도의 변화와 그에 따른 대류 활동 양상의 변화로 인해 대규모 대기순환의 패턴이 변화함으로써 열대 해양 지역 기후 변동성의 영향이 남반구 고위도 지역까지 전달될 수 있는 것으로 알려져 있는데 열대 태평양과 북대서양 지역 기후 변동성의 영향으로 인해 온실가스 농도의 증가에 배치되는 남빙양 해수면 온도의 감소와 그에 따른 남극 해빙 면적의 증가 경향이 발생한 것으로 분석되었다. 이러한 열대 해양-남빙양 간 원격상관(teleconnection) 과정은 기후모델에도 표현되어 있다.
- 6) 그러나 기후모델들이 온실가스 농도의 증가로 인한 지구 평균온도 상승을 과대 모의하는 경향이 있고 또한 온실가스 농도의 증가로 인한 남빙양 해수면 온도의 상승이 열대 해양 지역의 기후 변동성과 관련된 남빙양 해수면 온도의 감소를 압도해서, 그 결과 남극 해빙 면적의 증가 경향을 재현하지 못하는 것으로 분석되었다.

03 시사점 및 제언

- 가. 극 지역의 기후변화가 야기할 수 있는 다양한 영향은 전 지구적이며 그 영향의 정도가 작지 않다. 특히, 북극 온난화가 중위도에 어떤 기작에 의해 한파를 유발하는지 정확히 알 수 있다면 계절 규모의 극단적인 극한기후 예측에 도움을 줄 것으로 사료된다. 따라서 지구 시스템 모델링 기술 향상과 기후모델 예측 성능 개선이 시급하다.

나. 관측된 남빙양 해수면 온도와 남극 해빙 면적의 장기 변화의 부호가 기후모델에서 모의된 인위적인 외부 요인에 기인하는 변화에 상반되는 경향을 보이지 않다는 점을 고려할 때 1979~2014년에 관측된 남극 해빙 면적 증가 경향이 상당 부분 자연 변동성과 관련된 것으로 사료된다. 그러나 남극 대륙 빙상의 융빙으로 인한 담수 유입 그리고 남반구 고위도 지역의 대기와 해양 순환의 변화도 남극 해빙의 변화와 밀접히 관련되기 때문에 보다 장기간의 관측을 해야 한다. 이와 함께 기후모델들의 문제점 파악과 개선을 통한 인위적인 요인에 기인하는 남극 해빙의 변화와 자연 변동성의 특성에 대한 이해 향상이 필요하다.

다. 극 지역 기후변화를 막기 위한 정책을 실행하는 과업이 지금부터 중요하다. 전 세계적으로 협력하여 다양한 수준에서 채택되어야 할 것이며, 궁극적으로 극 지역 기후변화를 완화하고 예방하기 위한 주요 정책 및 조치 사항들을 수립해야 한다.

- 1) 과학 연구 지원: 극 지역 기후변화에 대한 더 많은 연구와 기후변화 모니터링이 필요하며 정부와 연구기관은 이러한 연구를 지원하고 그 결과를 정책 과정에 활용해야 한다.
- 2) 지속 가능한 경제 모델 구축: 극 지역에서 자원 개발 및 경제 활동이 필요하지만 이러한 활동은 환경에 미치는 영향을 고려한 지속 가능한 모델로 전환해야 한다.
- 3) 탄소 배출 감소: 극 지역 기후변화를 막기 위해서는 온실가스 배출을 줄이는 것이 기본이며, 정부와 기업은 에너지 효율 증가, 재생에너지 채용, 교통수단의 친환경화 등을 추구하며 탄소 배출의 감소 정책을 채택해야 한다. IPCC 6차 보고서(IPCC, 2021)에서 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6과 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5의 결과에서 극 지역의 융해에 의하여 두 시나리오의 차이가 크다는 것을 볼 수 있어, 탄소 저감이 얼마나 중요한가를 보이고 있다.
- 4) 산림 보호와 재생: 숲은 이산화탄소 흡수를 통하여 대기 중 이산화탄소를 제거하는 역할을 하므로 극 지역의 산림 보호와 재생이 중요하다. 이러한 녹지 지역을 보호하고 새로운 숲을 만드는 프로그램이 필요하다.
- 5) 빙하 얼음 보호: 극 지역의 얼음을 보전하고 빙하 녹음을 방지하기 위한 노력과 정책이 필요하다.
- 6) 해양 보호와 오염 방지: 극 지역의 해양 환경을 보호하고 오염을 예방하기 위한 규제와 감시 시스템을 강화해야 한다. 선박으로 인한 오염과 얼음의 녹음에 대한 위험을 최소화하기 위해 규제를 강화해야 한다.
- 7) 국제 협력 강화: 극 지역 기후변화는 국제적인 문제이므로 국제 협력이 필수적이며 국가들은 극 지역 기후변화에 대한 정보 교류와 협력을 강화하고 국제 기후 협약에 적극 참여해야 한다.
- 8) 지역 주민 포용과 보호: 극 지역 주민은 기후변화의 영향을 가장 직접적으로 경험하므로 그들을 보호하고 포용하는 일이 중요하며 지역 특수성을 고려한 지역적 협력이 필요하다.
- 9) 극 지역 기후변화를 해결하기 위해서는 국제사회 전체가 인식을 같이하고 고취하여 대응에 적극적으로 참여해야 한다.



<참고문헌>

- 김성중(2023). “북극은 더워지는데 중위도는 한파 겪는 이유”, 집현문서 02-18-2023, (사)집현네트워크.
- Ballinger, T., Overland, J. E., Wang, M., Walsh, J. E., Brettschneider, B., Thoman, R., Bhatt, U. S., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., & Kim S.(2023). “Arctic Surface Air Temperature, in T. A. Moon, R. Thoman, and M. L. Druckenmiller(eds.), State of the Climate in 2022, Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.103 No.8, pp. S279-S281.
- Banerjee, A., Fyfe, J. C., Polvani, L. M., Waugh, D., & Chang & K.(2020). “A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol”, Nature, Vol.579, pp. 544-548, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2120-4>
- Bintanja, R., van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S. S., Wouters, B., & Katsman, C. A.(2013), “Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion”, Nature Geoscience, Vol.6, pp. 376-379, <https://doi.org/10.1038/ngeo1767>.
- Chung, E., Ha, K., Timmermann, A., Stuecker, M. F., Bodai, T., & Lee, S.(2021). “Cold-Season Arctic Amplification Driven by Arctic Ocean-Mediated Seasonal Energy Transfer”, Earth’s Future, Vol.9 Iss.2, <https://doi.org/10.1029/2020EF001898>.
- Chung, E., Kim., S., Timmermann, A., Ha, K., Lee, S., Stuecker, M. F., Rodgers, K. B., Lee., S., & Huang, L.(2022). “Antarctic sea-ice expansion and Southern Ocean cooling linked to tropical variability”, Nature Climate Change, Vol.12, pp. 461-468, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01339-z>
- Cohen, J., Agel, L., Barlow, M., Garfinkel, C., & White, I.(2021). “Linking Arctic variability and change with extreme winter weather in the United States”, Science, Vol.373 Iss.6559, pp. 1116-1121.
- IPCC(2019). “Summary for Policymakers”, in Pörtner, H., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., & Weyer, N. M.(eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Cambridge·NY: Cambridge University Press.
- IPCC(2021). “Summary for Policymakers”, in Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B.,

- Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K., & Caud, N.(eds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Cambridge·NY: Cambridge University Press.
- Kim, B., Son, S., Min, S., Jeong, J., Kim, S., Zhang, X., Shim, T., & Yoon, J.(2014). "Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss", *Nature Communications*, Vol.5, 4646.
- Kim, S., Kim, J., Jun, S., Kim, M., & Lee, S.(2022). "Review on the impact of Arctic Amplification on winter cold surges over east Asia", *The Korea Journal of Quaternary Research*, Vol.33 No. 1-2, pp. 1-23.
- Li, X., Holland, D. M., Gerber, E. P., & Yoo, C.(2014). "Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice", *Nature*, Vol.505, pp. 538-542.
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Bitz, C. M., Chung, C. T., & Teng, H.(2016). "Antarctic sea-ice expansion between 2000 and 2014 driven by tropical Pacific decadal climate variability", *Nature Geoscience*, Vol.9, pp. 590-595, <https://doi.org/10.1038/ngeo2751>
- National Snow and Ice Data Center. <https://nsidc.org/home>
- Overland, J. E., Dethloff, K., Francis, J. A., Hall, R. J., Hanna, E., Kim, S., Screen, J. A., Shepherd, T. G., & Vihma, T.(2016). "Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic", *Nature Climate Change*, Vol.6, pp 992-999.
- Overland, J. E., Francis, J. A., Hall, R., Hanna, E., Kim, S., & Vihma, T.(2015). "The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected?", *Journal of Climate*, Vol.28 Iss.20, pp. 7917-7932.
- Polvani, L. M., Banerjee, A., Chemke, R., Doddridge, E. W., Ferreira, D., Gnanadesikan, A., Holland, M. A., Kostov, Y., Marshall, J., Seviour, W. J. M., Solomon, S., & Waugh D. W.(2021). "Interannual SAM modulation of Antarctic sea ice extent does not account for its long-term trends, pointing to a limited role for ozone depletion", *Geophysical Research Letters*, Vol.48 Iss.21, e2021GL094871, <https://doi.org/10.1029/2021GL094871>
- Robinson, D. A. & Estilow, T. W.(2023). "Northern hemisphere continental snow-cover extent", in R. J. H. Dunn, J. B Miller, K. M. Willett, and N. Gobron(eds.), *State of the Climate in 2022, Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.104 No.9, pp. S47-S48.
- Rye, C. D., Marshall, J., Kelley, M., Russell, G., Nazarenko, L. S., Kostov, Y., Schmidt, G. A., & Hansen, J.(2020) "Antarctic glacial melt as a driver of recent Southern Ocean climate trends", *Geophysical Research Letters*,

Vol.47 Iss.11, e2019GL086892, <https://doi.org/10.1029/2019GL086892>
Stuecker, M. F., Bitz, C. M., Armour, K. C., Proistosescu, C., Kang, S. M., Xie, S.,
Kim, D., McGregor, S., Zhang, W., Zhao, S., Cai, W., Dong, Y., & Jin, F.(2018).
“Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks”, Nature
Climate Change, Vol.8, pp. 1076-1081.



III

환경 문제

1. 기후변화에 의한 대기환경 영향
2. 탄소중립 실현에 의한 대기환경 영향
3. 시사점 및 제언

III

환경 문제

기후변화와 탄소중립 달성 과정에서의 대기환경 변화는 크게 기후변화에 의한 영향과 기후변화를 완화하기 위한 탄소중립 실현 과정에서의 영향으로 구분할 수 있다.

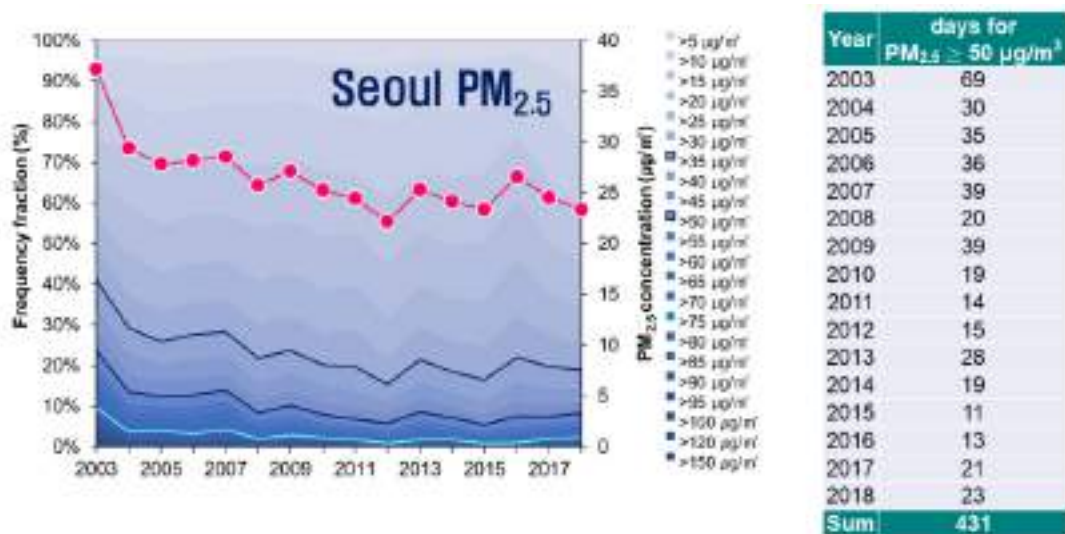
가. 기후변화와 탄소중립 과정에서 환경 문제의 개요

- 1) 탄소중립을 달성하더라도 기후변화는 계속될 것으로 예상되며, 그에 따라 지구 환경도 변할 것으로 보인다.
 - 가) 탄소중립이 2050년에 달성되더라도 기존에 배출된 온실가스에 의한 기후변화 영향은 계속될 것으로 예측된다(IPCC 6차 보고서).
 - 나) 기후변화 영향은 모든 환경 매체에 영향을 줄 것이나 특히 대기환경에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.
 - (1) 기후변화로 온도, 습도, 풍속 등 기상 조건이 변할 것으로 예상된다.
 - (2) 기상조건 변화에 따라 대기로 배출되거나 이차적으로 대기 중에서 생성되는 대기오염물질의 종류와 양이 변화할 것이다.
- 2) 탄소중립을 달성하기 위한 과정에서 대기오염물질의 발생 특성이 변화할 것이다.
 - 가) 화석연료 저감으로 황산화물 등의 대기오염물질 발생은 감소할 것으로 예상된다.
 - 나) 그러나 일부 분야(폐기물 재활용, 탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS))에서 대기오염물질 발생원이 새로 나타날 가능성이 있다.

나. 미세먼지 등 대기환경 개선 및 대기 관리 정책 강화

- 1) 서울을 포함한 전국의 미세먼지, 초미세먼지 농도와 고농도 발생일수는 감소하는 추세이다 (여민주 외, 2019)(〈그림 3.1〉 참조).

<그림 3.1> 서울의 초미세먼지 연평균 농도와 농도별 발생빈도 추이, 고농도 발생일수



주: 기간: 2003~2018년, 빨간색 굵은 선: 초미세먼지(PM 2.5) 연평균 농도, 고농도: $\geq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 자료: 여민주 외, 2019

2) 미세먼지 위주로 대기관리 대책 수립 및 시행(최기철 외, 2022)

가) 고농도 미세먼지 이슈가 본격적으로 불거진 2016년에 ‘미세먼지 관리 특별대책’ 수립, 2018년에는 ‘비상·상시 미세먼지 관리 강화대책’ 수립, 2019년 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」과 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」이 시행되면서 전국적·지역적인 목표 농도 및 배출량 수준을 설정하고 관리하기 시작했다.

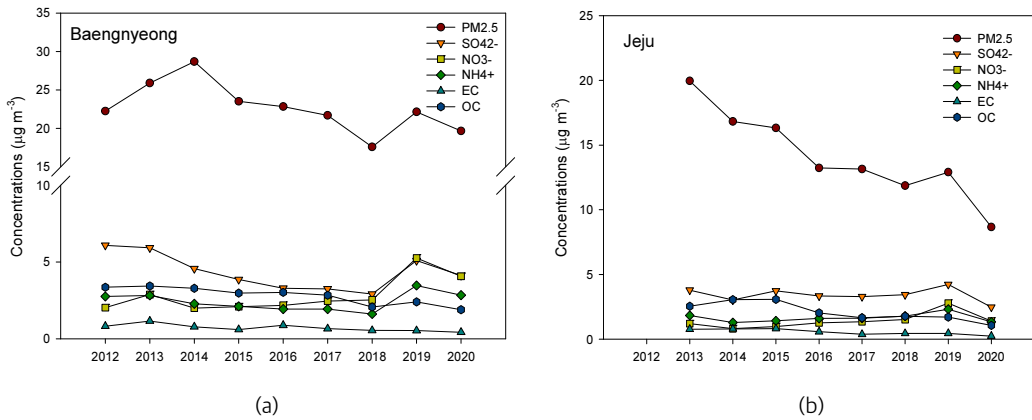
나) 실내 공기질 관리 및 계절관리제 등 미세먼지 배출의 시공간적 특성을 고려한 대기오염 정책들이 개발되었다.

3) 미세먼지 관련 정부 연구개발비 투자는 2016년 612억 원에서 2020년 1,790억 원으로 5년 사이 3배 가까이 증가했다(한국환경연구원, 2021).

4) 외부로부터의 영향도 감소하는 추이임

가) 우리나라 배경 지역인 제주도와 백령도의 초미세먼지와 주요 구성 성분의 농도는 감소하는 추세를 보인다. <그림 3.2>는 제주권과 백령도 대기환경연구소 결과이며, 특히 제주권 대기환경연구소 초미세먼지 농도는 큰 감소 추세를 보이고 있다(국립환경과학원, 2023).

<그림 3.2> 대기환경연구소의 초미세먼지와 주요 구성 성분의 연평균 농도 추이



주: (a) 백령도, (b) 제주권
자료: 국립환경과학원, 2023

다. 이 장에서는 기후변화와 탄소중립 달성 과정에서 대기환경이 어떻게 변화할 것인지 평가하고, 이에 대한 대책을 제안하였다.

- 1) 수질/수자원 등 다른 분야에 비해 대기환경이 기후변화와 탄소중립에 의해 크게 영향을 받기는 하나, 전체적인 환경변화를 파악하지 못한 것은 본 보고서의 한계이다.

01 기후변화에 의한 대기환경 영향

가. 기후변화에 따른 대기환경 변화 예측은 다양하게 이루어지고 있다.

- 1) 기후변화에 의한 폭염 등 극한기후 현상의 빈발은 고령화가 인체에 미치는 영향과 유사하게 사람의 미세먼지 저항력을 감소시켜, 같은 대기오염 정도라도 인체에 대한 악영향이 증가할 것이다.
- 2) 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)에 따르면, 기후변화는 미국에서는 오존 농도를 증가시킬 것으로 보이며 다른 대기오염물질에 대해서는 아직 명확하게 추이를 알 수 없다(US EPA, 2022).

3) 한편 중국 베이징 지역을 대상으로 한 모델링 연구에서는 기후변화에 따라 미세먼지 고농도 사례가 증가할 가능성이 높은 것으로 나타났다(Cai et al., 2017).

가) 오존과 초미세먼지는 단기체류 기후오염물질(Short-Lived Climate Pollutants, SLCP)로서 기후변화를 강화할 수 있다.

나. 영국 왕립연구소의 연구 결과 기후변화는 영국에서 오존과 미세먼지 등의 오염도를 악화시킬 수 있는 것으로 나타났으며(The Royal Society, 2021), 대부분의 결론은 우리나라에도 유효할 것으로 예상된다.

1) 여름철 폭염은 오존과 미세먼지 고농도 사례를 증가시킬 것으로 보인다. 이는 주로 정체된 기상 조건에서 식생이나 토양에서의 국지적 대기오염물질 배출이 축적되어 일어날 것이다.

2) 유럽 전체적으로는 겨울의 정체된 기상 조건이 완화되어 대기오염이 개선될 것으로 보인다.

3) 기후변화에 따른 대기오염도 변화는 지역에 따라 다르지만, 도시와 비도시의 배출과 기상 조건의 차이가 줄어들기 때문에 대기오염도 차이 또한 줄어들 것이다.

4) 암모니아(NH_3), 메탄(CH_4), 자연적 휘발성유기화합물(BVOCs)과 토양의 질소산화물(NO_x) 발생은 기온 증가에 따라 증가할 것으로 예상된다.

5) 강수 증가는 대기오염물질 제거에 효과적이지만 휘발성 유기화합물과 암모니아에 의한 초미세먼지 생성 증가는 대기오염 악화에 기여할 것으로 보인다.

가) 암모니아는 다른 기체 성분과 반응하여 초미세먼지 생성에 기여한다.

6) 메탄 배출 증가는 오존 생성에 큰 영향을 미치므로, 앞으로도 오존 오염 문제는 계속될 것이다.

7) 따라서 메탄과 암모니아 등의 발생을 저감하는 것은 대기환경과 기후변화 완화에 모두 도움이 된다(공동이익, co-benefit effect).

02 탄소중립 실현에 의한 대기환경 영향

가. 대기환경의 전반적인 추이

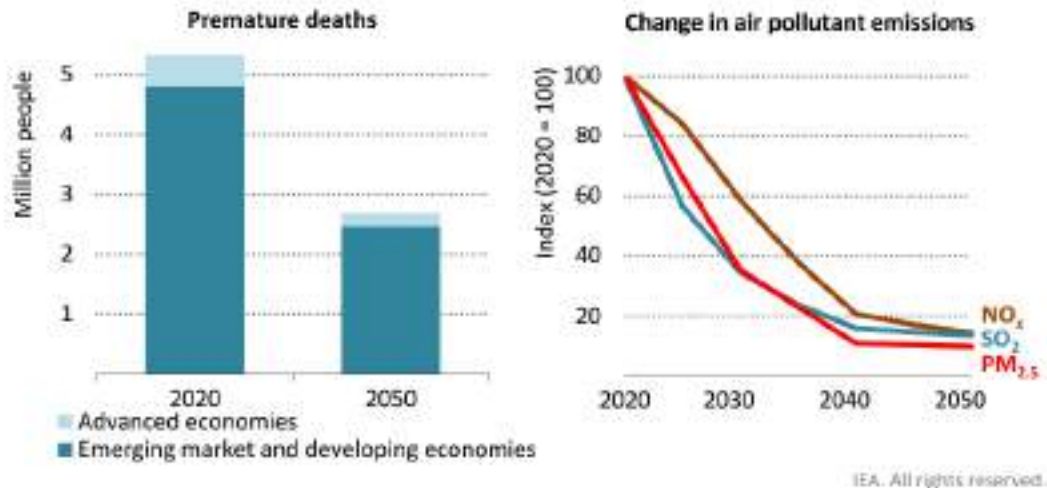
- 1) 대기오염물질 대부분이 발생하는 화석연료 사용을 줄이는 탄소중립을 추진하면 대기오염물질 발생 자체가 줄어들 것이다.
 - 가) 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소 같이 대기농도가 높은 물질은 대부분 화석연료 연소 과정에서 발생한다. 이산화탄소 발생을 줄이기 위해 화석연료 사용이 줄어들면 이들 대기오염물질 발생도 줄어들 것으로 예측된다.
 - 나) 탄소중립이 실현된다면, <그림 3.3>에 제시된 바와 같이 전 세계적으로 황산화물, 질소산화물, 초미세먼지 발생이 2020년 대비 80% 이상 감소하고, 대기오염에 의한 조기 사망자 역시 연간 500만 명 이상에서 200만 명 이상으로 절반 이상 줄 것으로 예측된다(IEA, 2021).
- 2) 그러나 대기오염물질이 계속 발생하는 분야도 있고, 탄소중립 과정에서 새로운 대기오염물질 발생원이 생길 수도 있다.

나. 탄소중립으로 발생이 줄어드는 대기오염물질

- 1) 탄소중립을 위한 이산화탄소 발생 저감 노력은 화석연료 연소 과정에서 직접 발생하는 대기오염물질(1차 대기오염물질, 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소, 휘발성유기화합물, 소량의 미세먼지 포함)의 발생 자체를 줄일 수 있다.
 - 가) 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소 같이 대기농도가 높은 물질은 대부분 화석연료 연소 과정에서 발생한다. 이산화탄소 발생을 줄이기 위해 화석연료 사용이 줄어들면 이들 대기오염물질 발생도 줄어들 것이다(<그림 3.3> 참조).
- 2) 이런 화석연료 전환은 특히 전환 부문(전력 생산, 난방)과 수송 부문(운송, 자동차) 등에서 중요하게 나타날 것이다. 석탄이나 천연가스 같이 화석연료로 발전하던 데에서 대부분 재생에너지(태양광이나 풍력)나, 재생에너지를 사용해 만든 수소로 발전하게 된다. 자동차 연료의 대부분을 차지하던 석유는 대부분 전기로 바뀔 것이다.

- 3) 전환과 수송 분야 못지않게 온실기체를 많이 배출하는 분야는 산업이다. 산업 분야도 에너지 효율화로 에너지 사용량을 줄이고 공정을 변화시키며 재료를 바꿔서 온실기체와 대기오염물질 발생을 줄일 계획이다. 역시 이 과정에서 대기오염물질 발생과 농도는 크게 줄어든 것이다.

<그림 3.3> 전 세계 조기 사망자 수와 대기오염물질 배출 추이 예측



자료: IEA, 2021

다. 탄소중립에도 영향이 없는 대기오염물질

- 1) 반면 온실기체 발생을 줄여도 발생이 크게 줄어들지 않는 대기오염물질이 있는데, 대표적인 물질은 암모니아다. 암모니아는 화석연료 연소 과정보다는 농축산이나 폐기물 분야에서 주로 발생한다. 물론 탄소중립을 달성하기 위해서는 비료 사용이나 가축 사육 방법을 변화시켜야 하지만, 지금까지의 연구로는 암모니아 발생은 탄소중립을 달성하더라도 크게 줄지 않을 가능성이 크다(과학기술정보통신부, 2021; Air Quality Expert Group, 2020). 새로운 오염물질 발생원은 아니지만, 실내 대기환경도 문제가 될 가능성이 있다. 탄소중립 시나리오에서는 에너지 효율을 높이기 위해 실내 공간의 밀폐도를 높이는 방안이 중요한 수단으로 제시되어 있는데, 이로 인해 환기가 잘 이루어지지 않아 실내에서 발생하는 대기오염물질이 제거되지 않고 축적될 가능성이 있어 추가적인 제어가 필요할 수 있다.

라. 탄소중립에 대기오염물질 발생/생성이 증가하는 분야와 물질

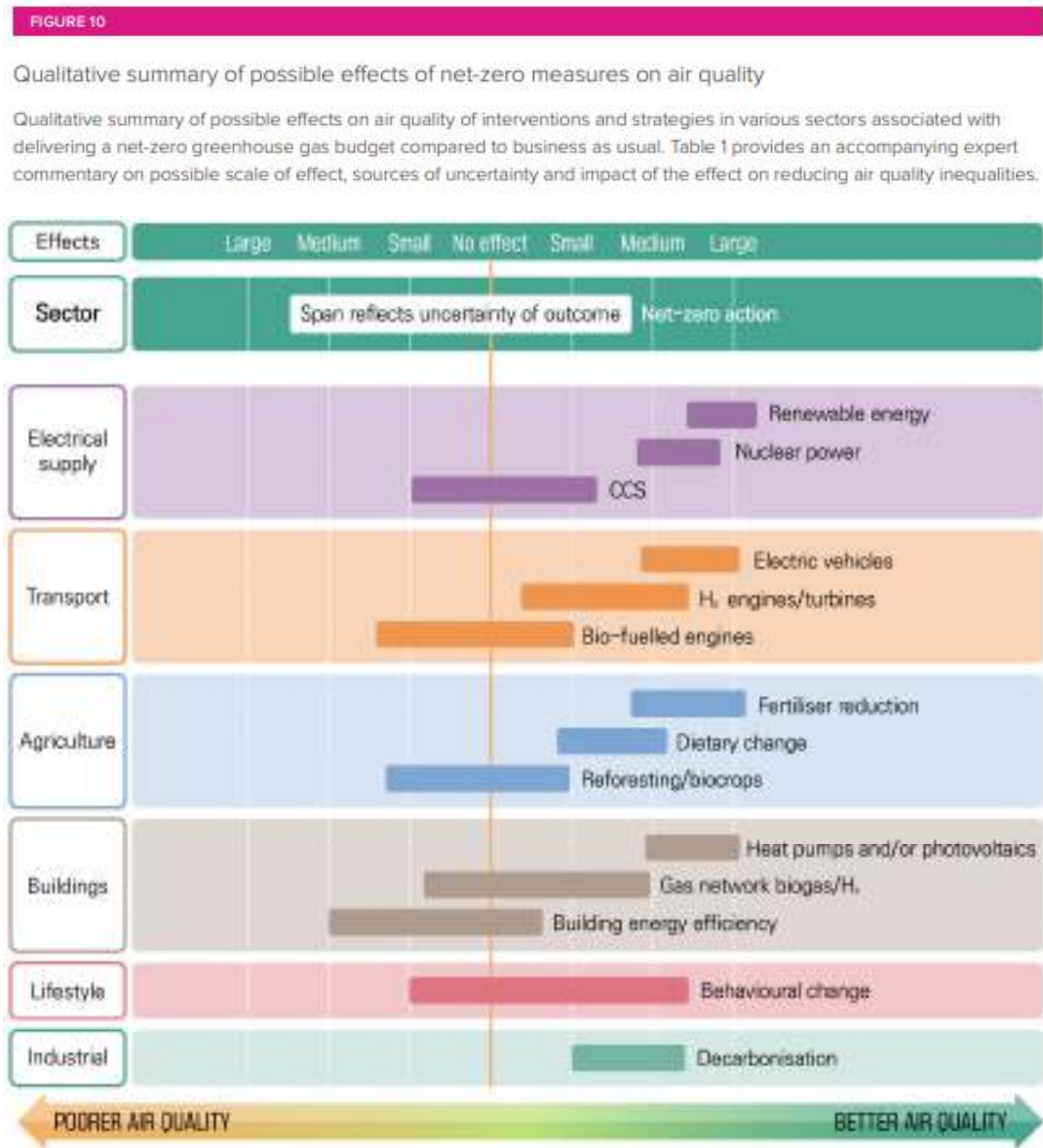
- 1) 탄소중립을 추진하는 과정에서 개발된 새로운 방법들이 새로운 대기오염물질 발생원 역할을 하는 경우가 있다. 예를 들어 발생한 이산화탄소를 포집해 저장하거나, 화학반응을 통해 다른 물질로 전환하는 공정인 탄소 포집·활용·저장(CCUS)이 있다. 현재 상업화 단계까지 개발된 CCUS 공정은 아민계 용매로

이산화탄소를 흡수했다가 다시 분리하는 과정을 반복하는데, 이 과정에서 암모니아, 아민 화합물, 그리고 발암물질인 니트로사민 등이 생성될 수 있다(과학기술정보통신부, 2021; Air Quality Expert Group, 2020). 수소나 그 파생물인 암모니아 연소 과정에서도 질소산화물이 발생할 수 있다. 이것을 현재 사용하는 질소산화물 저감 기술이나 그 변형 기술로 제어할 수 있는지, 아니면 새로운 저감 기술을 개발해야 하는지는 아직 확실하지 않다. 수소는 천연가스보다 높은 온도에서 연소되고, 암모니아는 질소가 많이 포함된 연료여서 두 경우 모두 질소산화물이 천연가스 연소보다 많이 나올 것으로 보인다. 자세한 추이 분석과 화학반응 연구가 진행 중이다.

- 2) 인류가 특히 관심을 갖는 대기 미세먼지와 오존은 대부분 대기에서 화학반응에 의해 2차적으로 생성되는 대기오염물질이다. 미세먼지와 오존을 생성하는 반응물질은 대부분 질소산화물과 휘발성 유기화합물이고, 황산화물과 암모니아도 중요하게 관여한다. 이 화학반응들은 비선형성이 커서, 반응물질 농도가 어느 정도 줄더라도 미세먼지나 오존 생성이 크게 줄지 않을 수 있다. 심지어 반응물질 농도를 줄였는데 미세먼지나 오존 생성이 오히려 증가할 수도 있다.

가) <그림 3.4>는 탄소중립이 대기환경에 미치는 영향을 평가한 영국의 연구 결과를 정리한 것이다(The Royal Society, 2021). 대부분의 방법은 대기환경에 긍정적인 영향을 끼치지만, CCUS 등은 부정적인 영향을 보이는 것으로 나타났다. 또 탄소중립이 달성되면 대부분의 대기오염물질은 발생이 줄어들지만 암모니아 발생은 2020년 현재보다 오히려 조금 늘고, 대기오염물질 농도도 대부분 줄어들지만 오존 농도는 현재와 거의 같을 것으로 예측된다(The Royal Society, 2021).

<그림 3.4> 탄소중립을 달성하기 위한 여러 방법이 영국의 대기환경에 미치는 영향



주: 가운데 선을 중심으로 왼쪽은 부정적인 영향, 오른쪽은 긍정적인 영향이며, 막대 길이가 길수록 영향이 큰 것을 의미한다.

자료: The Royal Society, 2021

마. 탄소중립이 우리나라 대기환경에 미칠 영향

- 1) 우리나라도 탄소중립을 달성하면 화석연료 사용이 크게 줄어 이에 따른 대기오염물질 발생 역시 크게 줄어들 것이다. 그러나 암모니아 발생은 크게 줄지 않고, CCUS나 폐합성수지 활용 등에서 새로운 대기오염물질 발생원이 생길 것으로 예상된다. 이에 대비해 정부에서도 새로운 오염원 제어를 위한 연구를 시작했다(과학기술정보통신부, 2021).
- 2) 그러나 한국의 탄소중립 시나리오는 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)나 다른 선진국과 다른 점이 있다. 2050년 예상 에너지 소비량에 있어서, 다른 나라는 최종에너지 소비량이 2020년에 비교해 상당히 줄어들고 있다. 국제에너지기구는 전 세계적으로 16.5% 줄 것으로 예상하고 있고(IEA, 2021), 다른 기관의 예상도 전체적으로 감소로 예상하고 있다(박년배, 2021). 한국은 2020년과 동일한 수준으로 2018년 기준으로는 <그림 3.5>에서 보듯 5.0% 감소한다(탄소중립녹색성장위원회, 2021). 유럽 여러 나라가 1990년대부터 최종에너지 소비량을 줄여온 것까지 고려하면 차이는 더 크다.

<그림 3.5> 국내의 2018년 대비 2050년 부문별 에너지 소비량과 에너지원별 예상

2018년 대비 2050년 부문별 에너지 수요



2018년 대비 2050년 최종에너지원별 에너지 수요



자료: 탄소중립녹색성장위원회, 2021

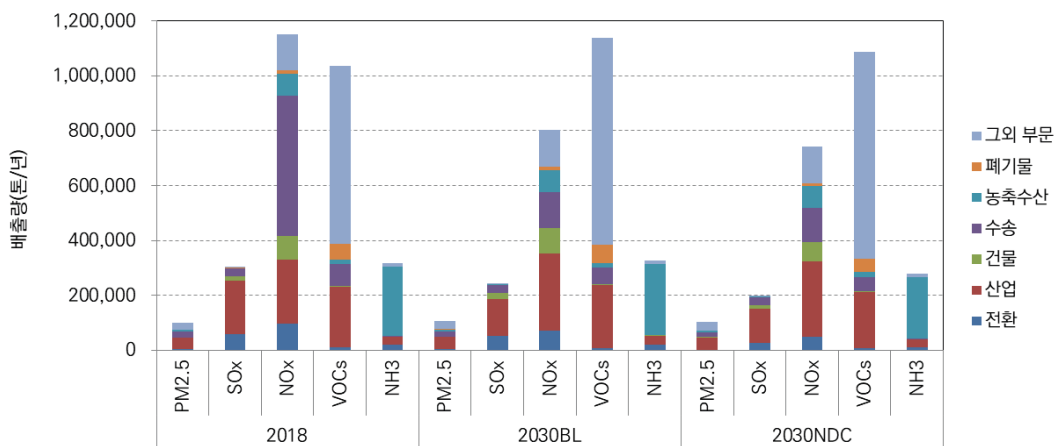
- 3) 다른 선진국은 에너지 사용량을 줄이는 것이 탄소중립으로 가는 과정의 첫 번째이자 가장 중요한 전략이지만(박상철, 2021; 손정락, 2023), 한국은 에너지 사용량은 줄이지 않고 탄소중립으로 가겠다는 전략을 채택한 것이다.
 - 가) 에너지 사용량을 줄이지 않는 시나리오는 에너지 원단위(같은 가치의 재화를 생산하는 데 들어가는 에너지양)를 높여 가격 경쟁력을 낮출 뿐만 아니라, 대기오염물질 발생량에 대한 예측을 어렵게 한다.
 - 나) 예를 들어 2050년에 국내 다른 에너지원 사용량이 <그림 3.4>와 같다면, 수소 사용량에 해당하는 양을 다른 나라에 비해 추가로 사용하는 셈이 된다. 수소는 여러 용도로 사용되지만, 주로 수소 자체와 수소 기반 연료로 사용될 것으로 보인다. 이 경우, 그만큼 연소 과정에서 질소산화물 발생이 증가할 것이다. 앞에서 설명한 것처럼, 탄소중립을 달성하더라도 오존 농도는 그다지 감소하지 않을 수 있는데, 한국은 거기에 더해 다른 나라보다 질소산화물이 더 많이 발생할 수 있다. 이 경우 암모니아와 반응해 미세먼지 생성량이 증가할 가능성이 있다.
- 4) 탄소중립이 우리나라 환경 등에 미치는 영향을 파악하고, 기술, 전략에 대해 논의하는 연구가 증가하고 있으나(이상엽 외, 2022; 한국과학기술연구원, 2022; Yeo & Koo, 2023), 보다 상세하고 신뢰성 있는 과학 자료를 생산하고, 그에 바탕을 둔 분석과 전략을 수립할 필요가 있다.

바. 탄소중립으로 가는 경로의 대기환경(2030년) 예측(최기철 외, 2022)

- 1) 2030 국가 온실가스 감축목표(Nationally-Determined Contribution, NDC)는 탄소중립의 중간 목표로서의 의미를 갖게 되었으며, 우리나라도 탄소중립 달성을 위한 선형 감축 추세에 맞추어 목표를 대폭 상향했다.
- 2) NDC 시나리오의 경우 NO_x , SO_x 등의 대기오염물질이 크게 감소할 것으로 추정되나 감소된 석탄발전의 비중을 재생에너지는 물론 LNG 발전이 대체하는 구조상 NH_3 는 오히려 미세하게 증가하는 것으로 추정된다.
 - 가) 탄소중립 목표 이행에 따른 2030년 전국 연평균 초미세먼지 농도는 약 $18.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정되었으며, 국내의 탄소중립을 위한 노력이 이행된 결과이다. 탄소중립 이행만으로는 현재의 대기환경 기준(연평균 초미세먼지 농도 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 2030년에 달성하기 어려울 것으로 추정된다.
- 3) 부문별로 배출량 변화는 큰 차이를 보인다(<그림 3.6> 참조).
 - 가) 전반적으로 전환 부문과 수송 부문에서 대기오염물질 배출량은 기본 시나리오, 목표 시나리오 모두 미래 대기오염물질 배출량 감소를 주도하는 수준으로 크게 감소하였으며, 이에 따라 총 배출에 대한 기여 역시 감소하였다.

- 나) 가장 큰 변화를 나타낸 부문은 수송과 그 외 부문으로, 기준연도(2018년)는 각각 약 29%, 21% 수준에서 기여하였으나, 2030년 탄소중립 이행 시나리오 도출 결과는 각각 약 19%, 31%로 크게 변화했다. 향후 미세먼지 관리에서 수송 부문의 중요성은 낮아지고 그 외 부문의 중요성은 높아짐을 의미한다.
- 다) 가장 크게 증가하는 부문은 그 외 부문이다. 그 외 부문은 정부 탄소중립 정책에서 다루지 않는 영역이며, 대기 정책에서도 현재 중요하게 다루지 않는 영역으로, 향후 대기오염 저감을 위한 중요한 관리 대상으로 부각할 것이 예상되며, 온실가스 추가 감축 역시 유도할 수 있을 것으로 추정된다.

<그림 3.6> 기준연도(2018) 및 기본 시나리오(2030 BL*), 목표 시나리오(2030 NDC**)에 따른 2030년 전체 대기오염 물질별, 부문별 배출량 추산 결과



자료: 최기철 외, 2022

*BL: Baseline, 탄소중립 계획이 이행되지 않았을 경우 전망

**NDC: Nationally Determined Contribution, 각국이 자국의 상황과 역량을 감안하여 자체적으로 정한 온실가스 감축 및 적응에 대한 목표, 절차, 방법론

4) 2018년 대비 2030년 초미세먼지 농도 변화에 미치는 부문별 영향 평가

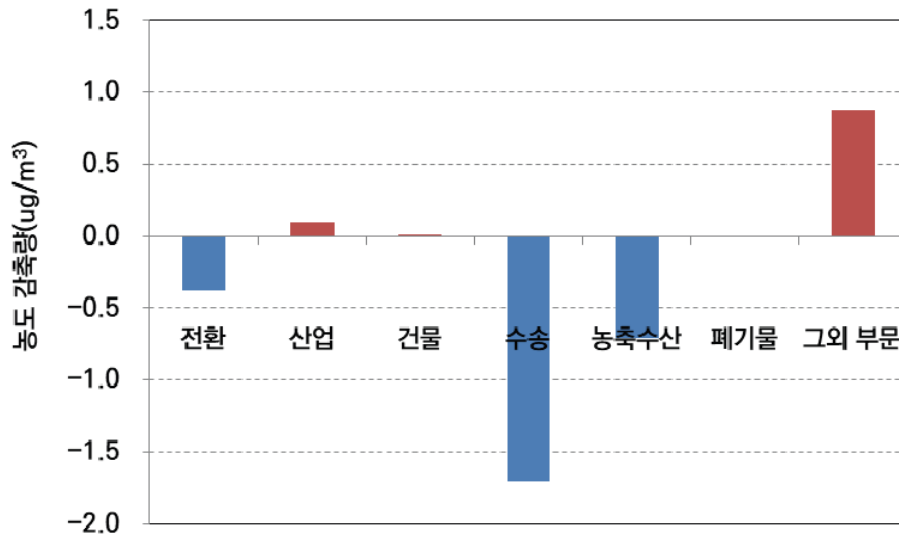
- 가) 초미세먼지 농도 변화에 미치는 영향은 수송 부문 감축 효과가 가장 큰 것으로 확인된다(<그림 3.7> 참조).

- (1) 탄소중립 목표 이행에 따른 효과의 기본 전망에서 노후 차량 자연 감소 및 신차 대체 효과가 추가로 반영되었기 때문인 것으로 보인다.

- 나) 농축수산 부문의 농도 감축량은 큰 변화가 없으며, 산업 및 건물 부문, 그 외 부문의 농도 기여는 2018년 대비 모두 증가했다.

- (1) 해당 부문 모두 기본 전망에 따른 배출량 증가에 비해 탄소중립 전략 이행에 따른 대기오염물질 감축 효과가 미진하거나, 탄소중립 전략에서 다루어지지 않기 때문인 것으로 확인된다.

<그림 3.7> 기준연도(2018년) 대비 탄소중립 목표 이행에 따른 부문별 초미세먼지 농도 감축 효과



자료: 최기철 외, 2022

5) 2018년 대비 2030년 초미세먼지 농도 변화에 대한 부문별 영향 평가(<그림 3.8> 참조)

가) 초미세먼지 농도 변화에 미치는 영향은 수송 부문 감축 효과가 가장 큰 것으로 확인된다.

(1) 탄소중립 전략 이행에 따른 효과뿐만 아니라, 배출 수준이 높은 노후차의 자연 퇴출과 제작차 배출허용기준이 높은 신차 도입, 친환경차 대체 등으로 기본 전망에서의 배출 수준이 함께 낮아진 것으로 풀이된다.

나) 전환 부문은 높은 온실가스 감축 효과와는 달리 대기오염물질의 경우 상대적으로 높지 않은 오염물질 감축 수준을 보인다.

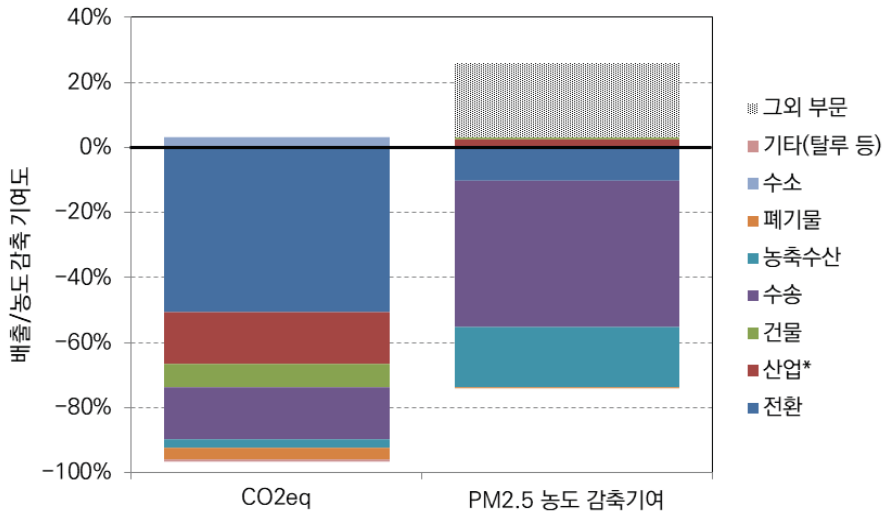
다) 산업 부문의 경우 초미세먼지와 질소산화물(NO_x) 배출량이 오히려 증가했다.

(1) 본 연구에서 산업 부문의 대책을 모두 반영하지 않은 점을 고려하면, 산업 부문의 지속적인 성장 전망에 따른 것으로 보인다.

라) 수소 및 탈루 등 기타 부문의 경우 온실가스 배출량이 도출된 것과 달리 대기오염물질이 발생하지 않는 것으로 확인된다.

마) 초미세먼지 증가는 그 외 부문에서 크게 나타나, 이 부문의 대기환경 관리가 필요하다.

<그림 3.8> 2018년 대비 탄소중립 전략 이행에 따른
2030년 온실가스 배출 및 초미세먼지 농도 감축량에 대한 부문별 기여도



자료: 최기철 외, 2022

6) 온실가스, 대기오염물질 동시 감축을 위한 정책 방향

가) 대기오염물질 감축 측면에서 가장 효과가 큰 부문은 농축수산과 전환 및 수송 부문으로, 이는 탄소중립 전략 이행에 따른 효과도 적지 않을 뿐만 아니라 기본 전망에서도 배출 수준이 높은 설비 및 차량이 단계적으로 퇴출되면서 가중된 효과로 판단된다.

나) 전환 및 수송 부문의 빠른 배출 개선으로 인해, 미래에는 해당 부문의 배출 기여가 큰 폭으로 떨어지면서 상대적으로 미진했던 산업 부문과 건물, 농축수산 및 폐기물 등 다른 영역에 대한 개선 전략으로의 전환이 필요할 것으로 추정된다.

(1) 폐기물 부문은 탄소중립 전략 이행에 따라 대기오염물질 배출 감축 효과는 분명히 존재하나, 기준연도 대비 유의미한 변화가 없는 것으로 분석된다.

(2) 이는 폐기물 부문의 성장 전망에 따른 기본 전망 배출량이 탄소중립 전략의 효과를 상쇄할 정도로 증가하였기 때문으로, 폐기물 부문의 경우 온실가스 및 대기오염물질 감축을 위해서는 발생량 자체를 줄이기 위한 강도 높은 대책이 필요할 것으로 판단된다.

다) 정부의 탄소중립 전략에서 다루고 있지 않은 부문으로는 유기용제 사용, 건설장비, 철도, 비산먼지, 생물성 연소 및 기타 면오염원이 있다. 탄소중립 전략에서 주도하지 못하는 이러한 배출원들은 대기 정책에서 보완될 필요가 있으며, 이를 통해 대기오염 개선 외 추가적인 온실가스 감축 효과도 도출하리라 기대된다.

(1) 온실가스 저감과 직접적인 관련성은 없으나 대기오염과 관련하여 암모니아와 휘발성유기화합물(VOCs)은 각각 미세먼지 및 오존의 전구물질로서 대기오염에 미치는 영향이 적지 않음을

고려할 때, 온실가스-대기오염물질 동시 감축 효과는 없지만 대기질 개선을 위한 독자적인 감축 계획이 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

- (2) 시범적으로 도출한 CCUS 도입에 의한 대기오염 영향은, 현실화된 계획과 구체적인 정보의 부재로 여러 한계가 있음에도 불구하고, 상당한 에너지가 소모되며 설비 구축에 소요되는 것까지 포함하여 적지 않은 비용 투자와 대기오염 증가 등의 문제가 있음을 확인하였다. 향후 지속적인 기술 발전을 통해 대기오염에 대한 문제와 경제성을 갖추기 위한 개선 작업이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

03 시사점 및 제언

탄소중립을 달성하는 과정에서, 그리고 달성한 이후의 대기환경은 전 세계적으로 크게 개선될 것이며, 우리나라도 마찬가지일 것이다. 그러나 탄소중립이 달성되더라도 기후변화는 계속될 것이고, 이에 따라 일부 대기오염물질 발생이나 농도는 줄어들지 않을 가능성이 크다.

가. 탄소중립과 관련된 대기환경의 변화

- 1) 탄소중립 달성 과정과 달성 이후 화석연료 사용에 따른 대기오염물질 발생은 크게 줄어들 것이며, 이에 따른 건강 편익도 크게 증가할 것이다.
- 2) 탄소중립이 달성되더라도 기존 배출된 온실가스에 의한 기후변화는 계속될 것이며, 이는 폭염 등을 야기하여 오존 등의 대기오염물질 농도를 증가시킬 것으로 예상된다.
- 3) 탄소중립 달성 이후에도 암모니아 발생은 줄지 않을 것으로 예상된다. 우리나라는 최종에너지 소비량을 줄이지 않는다는 탄소중립 시나리오를 채택하고 있어, 미세먼지 농도가 줄어들지 않을 가능성도 있으며, 이는 추가적으로 확인이 필요한 상황이다.
- 4) 우리나라의 탄소중립 이행 과정인 2030 NDC에 바탕을 둔 대기환경 예상은 부문별로 상반된 결과가 나왔으며, 보다 정밀하고 과학에 기반한 정책 수립이 필요함을 보여준다.

나. 탄소중립 시대의 변화

- 1) 탄소중립은 우리가 선택할 수 있는 문제가 아니라 받아들여야 하는 위기 상황이다. 이 위기를 우리에게 유리한 기회로 만드는 방법은 현황을 잘 파악하고 전략을 잘 세우는 것이다. 최근 현황 파악, 기술, 전략에 대해 논의한 결과가 나오고는 있으나 보다 상세한 분석이 필요하다(이상엽 외, 2022,

한국과학기술연구원, 2022; Yeo & Koo, 2023). 무엇보다 과학 자료를 생산하고, 그에 바탕을 둔 분석과 전략을 수립하는 일이 중요하다.

다. 탄소중립 시대의 사회 구조와 우리 인식의 변화

- 1) 기후변화에 잘 대응하기 위해서는 전체적인 사회 구조와 우리의 인식이 변화하는 것이 필수적이다.
- 2) 로마 클럽(The Club of Rome)은 인류 문명이 계속 지속하기 위해서는 빈곤 종식, 심한 불평등 해결, 여성에 대한 권한 부여, 인간과 생태계를 위한 건강한 식량 시스템 조성, 청정에너지로 전환 등 5가지 특별한 전환이 필요하다고 주장하였다(Dixson-Declève et al., 2022).

*진한 글씨는 번역본 원문에서 강조

- 3) 앞으로의 사회 구조는 예측하기 힘들지만, 전반적으로 갈등이 더 심해지고, 계속해서 새로운 위험이 발생할 것으로 예상된다.
 - 가) 한국과학기술기획평가원은 2045년까지 미래사회를 전망해 이슈를 1) 디지털 세상, 2) 사회 구조의 변화, 3) 지구 환경변화와 자원개척, 4) 세계 질서의 변화, 5) 위험의 일상화와 같이 도출했다(정의진 외, 2021).
 - 나) 미국 국가정보위원회(National Intelligence Council)는 2040년 미래 예측에서 기후변화 등의 세계적 도전에 대응하는 어려움으로 공동체, 국가, 국제사회 내의 균열이 증가할 것으로 예측했다. 이는 기존 체제와 구조의 역량을 초과해 불균형이 확대되고 공동체, 국가, 국제사회 내의 다툼이 확대될 것으로 예상된다(National Intelligence Council, 2021).
 - (1) 국가 간, 지역 간, 계층 간 갈등이 심화되면 탄소중립이나 대기환경 정책 수립 및 시행 과정이 점점 더 힘들어질 것으로 보인다. 일례로, 충청남도의 석탄화력발전소를 들 수 있다. 충청남도에서는 이 발전소들이 수도권 전기 수요를 위한 것으로, 충청남도 미세먼지에 대해 수도권 책임을 져야 한다는 책임론이 제기되고 있다.

라. 우리나라에서 탄소중립과 대기환경에 관련한 대책을 수립하기 위해서는 단기간, 장기간을 구분하여 정책을 수립하는 것이 필요하다.

- 1) 3개 한림원(한국공학한림원·한국과학기술한림원·대한민국의학한림원)에서 발간한 ‘석화정책제언’ 보고서에 따르면 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 단기적으로 대기오염물질 발생을 저감하기 위한 노력을 수행하며, 장기적으로는 탄소중립과 환경 문제를 고려하는 통합적 접근이 필요함을 지적했다(한국공학한림원 외, 2018).

마. 성공적인 사회 구조 변화 및 탄소중립과 대기환경 개선을 위해서는 참여하는 정책 협의, 수립 체계 수립, 이행이 필수적이다.

- 1) 국가기후환경회의(2020)는 미세먼지 문제 해결을 위해서는 정책 수립, 시행 과정을 근본적으로 개편하여야 함을 지적했다.

<그림 3.9> 효과적인 기후변화와 환경 관리를 위한 정책 수립 과정



주: 위 그림은 현재 미세먼지 대책 수립 과정이며, 아래 그림은 효과적인 미세먼지 관리를 위한 정책 수립 과정을 제안한 것이다.

자료: 국가기후환경회의, 2020 재구성

바. 본 보고서는 기후변화와 탄소중립 이행 과정에서 영향이 가장 클 것으로 예상되는 대기환경에 중점을 두어 작성하였으며, 수질, 수자원 등은 추가로 파악해야 한다.



<참고문헌>

- 과학기술정보통신부(2022). Net-zero 시대 미세먼지 저감 기술개발사업 기획보고서.
- 국가기후환경회의(2020). 미세먼지 현황 분석 및 개선보고서 요약본, 발간등록번호 12-1790213-000006-01, 국가기후환경회의.
- 국립환경과학원(2023). “대기환경연구소 관측자료 기반 권역별 대기오염특성 종합분석 연구(I)”, 최종보고서.
- 박년배(2021). “세계 및 주요국의 탄소중립 시나리오 수립 동향 및 시사점”, 에너지기후 변화학회지, 제16권 제1호, pp. 51-68.
- 박상철(2021). 유럽연합 탄소중립 경제체제 및 에너지전환정책, 박영사.
- 손정락(2023). “탄소중립의 지름길: 에너지 소비를 줄여야한다”, 집현문서 03-02-2023, (사)집현네트워크.
- 여민주·임윤석·유승성·전은미·김용표(2019). “서울의 초미세먼지 농도 추이”, 한국대기환경 학회지, 제35권 제4호, pp. 438-450.
- 이상엽·김남일·김연중·김용건·문진영·박수진·신서경·예충열·오상봉·우청원·윤여창·임형우·정은미·정은혜·정재현·채수미·최형식·허한결(2022). “탄소중립 정책연구”, 경제·인문 사회연구회 협동연구총서 22-40-01, 경제·인문사회연구회.
- 정의진·임현·박노연·박창현·지수영(2021). “2045년을 향한 미래사회 전망과 핵심이슈 심층분석”, KISTEP Issue Paper 2021-08, 한국과학기술기획평가원.
- 최기철·정예민·정은혜·전호철·김윤하(2022). “탄소중립 전략 이행에 따른 2030 미세먼지 대기질 전망 및 동시 감축 정책 방향 연구(I)”, KEI 기후환경 정책연구 2202-05, 한국환경연구원.
- 탄소중립녹색성장위원회(2021). 2050 탄소중립 시나리오.
- 한국과학기술연구원(2022). 탄소중립, 문학과 지성사.
- 한국환경연구원(2021). 미세먼지 관리 종합계획(‘20~’24) 2020년 추진실적 평가.
- 한국공항공립원·한국과학기술한림원·대한민국의학한림원(2018). “미세먼지 문제의 본질과 해결방안 ② 미세먼지 어떻게 해결할 것인가?”, 석학 정책제안, 이슈페이퍼 2017-08, https://www.naek.or.kr/home_kr/content.asp?page_no=050101&Lang_type=K&VIDX=620
- Air Quality Expert Group(2020). Impacts of Net Zero pathways on future air quality in the UK, Department for Environment, Food & Rural Affairs.
- Cai, W., Li, K., Liao, H., Wang, H., & Wu, L.(2017). “Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change”, Nature Climate Change, Vol.7, pp. 257-263.
- Dixon-Declève, S., Gaffney, O., Ghosh, J., Randers, J., Rockström J., & Stoknes, P. E.(2022). Earth for All, A Report to the Club of Rome, 추선영·김미정 역(2023), 모두를 위한 지구, 착한책가게.

- IEA(2021). Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector.
- The Royal Society(2021). Effects of net-zero policies and climate change on air quality.
- National Intelligence Council(2021). Global Trends 2040 A More Contested World, 박동철·박삼주·박행웅·정승욱 역(2021), 글로벌 트렌드 2040: 더 다투는 세계, 한울.
- US EPA(2022). "Air Quality and Climate Change Research", https://19january2021snapshot.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research_.html (Accessed on 22 Oct. 2022).
- Yeo, M. J. & Koo, J.(2023). "The estimation of urban air quality change in South Korea under the carbon net-zero scenario", Urban Climate, Vol.49, 101438, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101438>.



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

Major Projects for Carbon Neutrality Based on
Climate and Environmental Information



IV

탄소흡수원 현황 및 증진 방안

1. 탄소흡수원의 개념
2. 탄소흡수원의 국내 현황
3. 육상 생태계 기반 탄소흡수 증진 기술
4. 시사점 및 제언

IV

탄소흡수원 현황 및
증진 방안

01 탄소흡수원의 개념

탄소중립이란 인간이 배출한 이산화탄소(이하 탄소)량이 지구 시스템이 흡수하는 탄소의 양과 같은 상태를 의미한다. 실질적으로 탄소의 배출량을 '0'으로 만드는 것은 불가능하기 때문에 탄소 배출을 줄이는 노력과 동시에 배출된 탄소를 상쇄시킬 수 있어야 하며, 탄소중립을 실현하기 위해 탄소흡수원의 역할의 중요성이 대두되고 있다.

가. 탄소중립을 위한 탄소흡수원의 역할

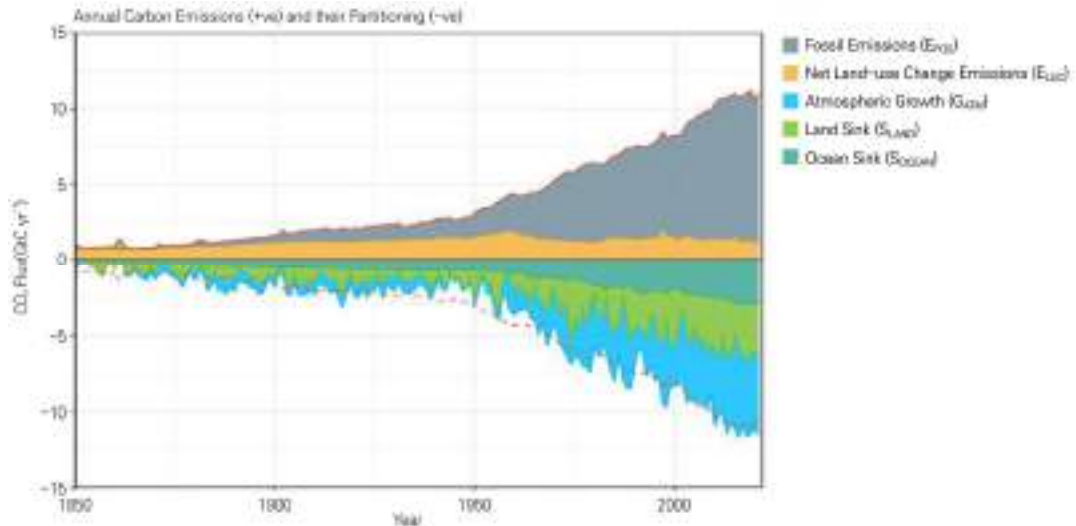
1) 탄소중립을 위한 탄소 배출량의 감소

- 가) 2022년 인간 활동으로 인한 전 지구 이산화탄소 배출량은 화석연료의 연소 부문에서 36.6 GtC, 토지이용 부문에서 3.9 GtC으로, 총 40 GtC에 육박하는 것으로 분석된다(Liu et al., 2023).
- 나) 자연에서의 생지화학적 과정(biogeochemical processes)을 통해서도 탄소가 배출될 수 있으나, 전 지구적으로 인간이 배출하는 탄소의 양이 자연적인 과정을 통해 배출되는 탄소의 양을 1:0.8의 비율로 능가한다(Yue & Gao, 2018).
- 다) 탄소중립을 달성하기 위해서는 인간의 활동으로 인한 배출량을 절반으로 줄이거나, 지구 생태계가 2배 이상의 탄소를 더 흡수해주어야 한다.

- 2) 지구 시스템의 탄소순환 과정을 통해 육상 생태계는 모든 인위적 탄소 배출량의 약 29%를 흡수하고, 해양 생태계는 약 26%를 흡수한다(〈그림 4.1〉 참조). 따라서, 인간의 활동으로 배출된 탄소의 절반은 지구 시스템이 흡수해 주지만 잔존하는 나머지 절반의 탄소는 다시 대기로 방출된다(Freidlingstein et al., 2022).

가) 지구 시스템의 탄소순환 과정은 어느 정도의 자연 변동성을 지니는데 인간의 활동으로 인한 탄소 배출량의 증가는 이러한 자연 변동성을 변화시키고 있다(그림 4.2) 참조). 그러나 다행히 탄소 배출량의 증가에 따라, 육상 생태계와 해양 생태계의 흡수량도 증가하였다.

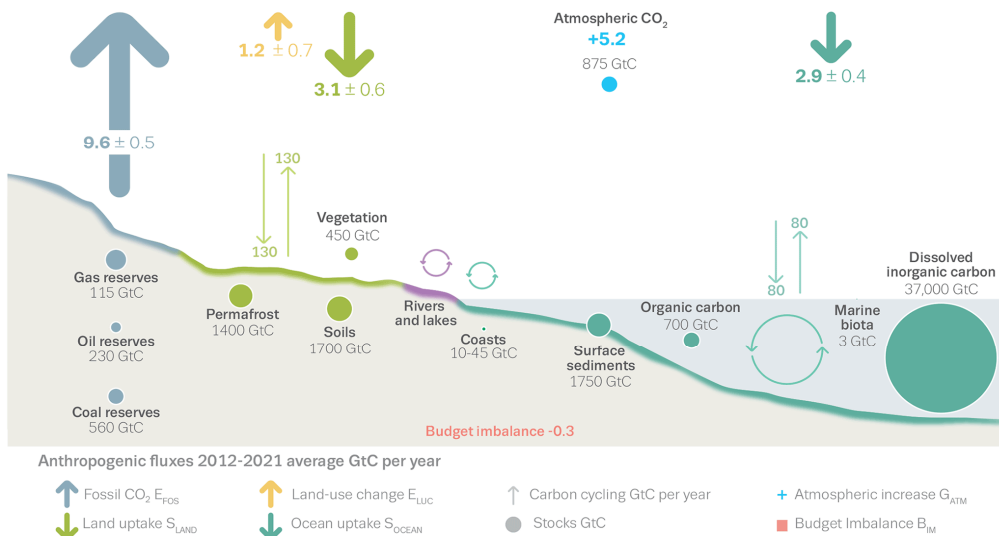
<그림 4.1> 화석연료의 연소와 토지이용 변화에 따른 탄소 배출량(+ve)과 흡수량(-ve)



자료: Freidlingstein et al., 2022

<그림 4.2> 인간의 활동으로 인해 배출된 탄소의 전 지구적 탄소순환 변화

The global carbon cycle



주: 2012년과 2021년 사이에 인간 활동으로 인해 배출된 탄소가 기존의 전 지구적 탄소순환 배경값을 얼마나 변화시켰는지를 나타내고 있다.

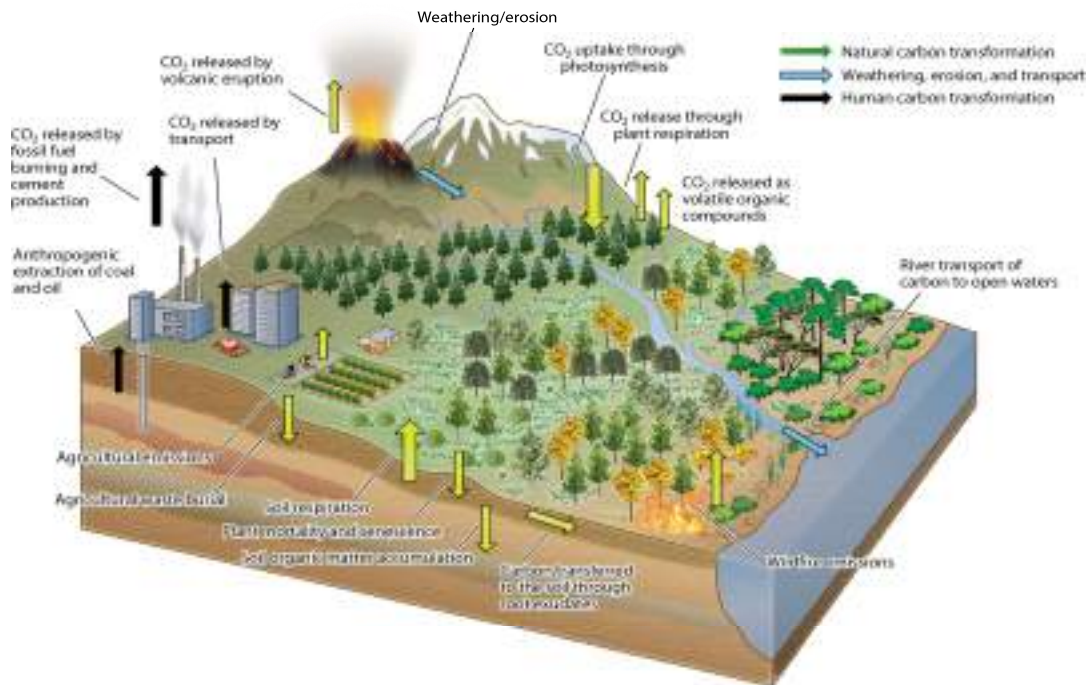
자료: Freidlingstein et al., 2022

- 3) 육상 생태계와 해양 생태계에서의 자연 탄소흡수원은 일반적으로 산림, 해양(수계), 토양, 농지, 습지 등이며, 도시에서의 탄소흡수원은 도시숲, 토양, 공원 등과 같이 자연에서의 흡수원과 동일한 형태를 갖는 그린 인프라 및 시설물 등을 포함하고 있다(강영은, 2021).
- 4) 탄소흡수원은 대기 중 탄소를 격리하고 저장하는 기후변화 완화 및 적응 차원에서의 역할뿐만 아니라 다양한 생물종에게 서식지를 제공하고 종 다양성을 높이는 등 생태계 생물다양성 보전의 차원에서도 매우 중요한 역할을 수행한다.

나. 탄소흡수원으로서의 육상 생태계

- 1) 탄소 배출의 대부분이 육상에서 일어나고 있으므로 육상 생태계 내 탄소순환(〈그림 4.3〉 참조)을 이해하는 일이 탄소흡수의 주요 기작을 이해하는 것이라고 할 수 있다(Keenan & Williams, 2018). 1850년부터 축적된 육상 생태계의 총 탄소 흡수량은 210 ± 45 GtC로 추정된다. 2012년부터 2021년까지의 기간 동안, 대기 중 탄소 증가에 따라 육상 생태계의 탄소 흡수량도 증가했으나 큰 연간 변동성을 보인다. 해당 기간 동안의 육상 생태계의 탄소 흡수량은 연간 3.1 ± 0.6 GtC이었으며, 이전 10년 동안의 기간(2000~2009년)보다 0.4 GtC/y의 증가율을 보였다.

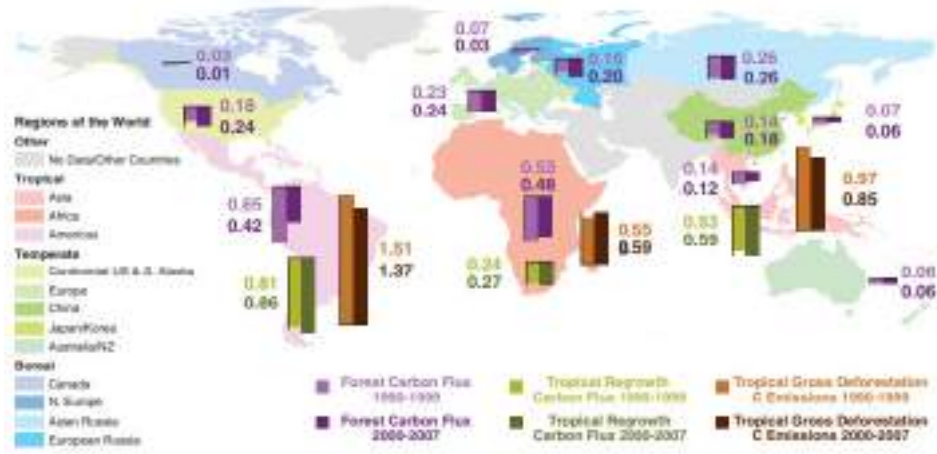
〈그림 4.3〉 육상 생태계 내 탄소순환 주요 과정



자료: Keenan & Williams, 2018.

- 2) 산림 생태계의 탄소 저장량은 전체 육상 생태계 탄소 저장량의 절반을 차지한다(Mayer et al., 2020). 육상 생태계의 식생에 의한 탄소 흡수량은 연간 112~169 GtC에 달하는 것으로 추정된다(Sha et al., 2022).
 - 가) 산림 탄소흡수는 산림이 식물 광합성을 이용하는 과정, 활동 또는 그 기작을 통해 탄소가 흡수되는 것을 말한다. 탄소 흡수량은 식생의 생물량과 산림의 면적에 유의한 양의 상관을 갖기 때문에 산림 면적의 감소는 육상 생태계의 흡수 용량의 손실을 의미한다.
 - 나) 육상 생태계에서 가장 큰 탄소 저장고인 산림에서 식생에 합성된 탄소 저장량이 높을 뿐만 아니라 산림 토양의 탄소 저장 능력도 다른 토양보다 훨씬 높다. 실제 식생의 호흡, 토양에서의 미생물의 분해 활동으로 탄소가 배출되기도 하지만 탄소 흡수량이 이를 능가한다. 현재 전 세계 산림에서 저장된 탄소량의 44%는 토양에, 42%는 식생을 비롯한 생물에, 그리고 나머지는 고사목과 낙엽에 저장하는 것으로 추정된다(Pan et al., 2011).
- 3) 산림자원인 목재는 수확 이후에도 목재제품의 형태로 탄소를(제품 수명이 다할 때까지) 계속 저장하기 때문에 매우 지속 가능한 탄소흡수원이다. 또한, 콘크리트나 철, 알루미늄 등의 소재와 비교할 때 생산 시에 더 적은 에너지가 필요하여 탄소 배출을 줄이는 강력한 이점이 있다.
- 4) 다른 탄소흡수원과 비교하여 산림에서의 탄소흡수가 갖는 뛰어난 장점 및 부가적 이익(co-benefit)이 있고 이를 요약하자면 아래와 같다(Chen et al., 2021).
 - 가) 지구의 산림은 육상 생태계 면적의 30% 이상으로, 이 안에서 식생은 광합성을 통해 탄소를 흡수함과 동시에 활발한 증산작용을 통해 대기의 기온을 낮춘다.
 - 나) 썩거나 연소되지 않는 한 산림 내 식생의 탄소흡수는 지속적이다. 산림 별채로 목재를 생산하는 과정에서도 목재 자체로서는 저장된 탄소를 다시 방출하지 않는다. 목재를 수확한 자리에 다시 나무를 심어 탄소흡수 능력을 증대시키는 것이 가능한 이유이다.
 - 다) 산업에서의 탄소 포집 기술과 비교하면, 산림에서의 탄소흡수는 저비용이다.
 - 라) 산림은 육상 생태계의 가장 큰 탄소 저장고이자, 자원의 보고 및 각종 생물종의 유전자 저장소, 그리고 여기서 파생되는 생물다양성과 생태계 기능들의 저장소 역할을 하고 있다. 이처럼 산림에는 사회·경제적, 생태학적인 종합적 이익이 막대하다.
- 5) 물량의 관점에서는 전 지구적으로 산림 내 탄소의 3분의 2는 열대 지역 원시림에 저장되어 있다. 그러나 일부 열대림은 개발로 인한 산림 손실로 막대한 양의 탄소를 배출하기도 한다(〈그림 4.4〉 참조).

<그림 4.4> 전 세계에 분포하는 산림 지역에서의 연간 탄소 배출량과 흡수량



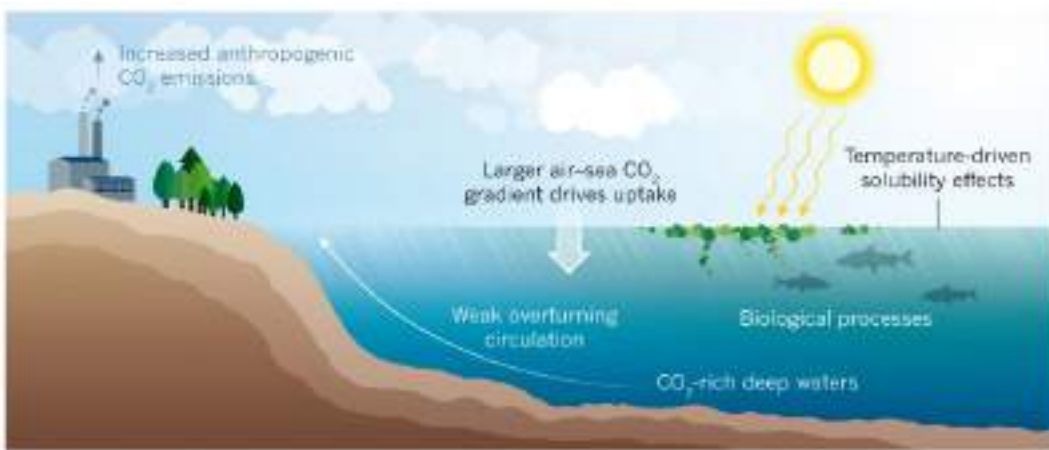
주: 아래로 향하는 막대는 흡수량을, 위로 향하는 막대는 배출량을 표현한다.

자료: Pan et al., 2021

다. 탄소흡수원으로서의 해양 생태계

- 1) 1850년 이후, 해양 생태계는 인간 활동 기원의 전체 탄소 배출량의 약 26%를 제거해 주었다. 과거 기간(1991~2002년) 동안 해양 생태계의 탄소흡수 정도에 대한 성장이 둔화하거나 거의 없었던 이후로, 지난 20년간 해양 생태계의 탄소 흡수량은 빠르게 증가했다. 2012년부터 2021년까지 10년 동안 해양 탄소 흡수량은 연간 2.9 ± 0.4 GtC이다(Freidlingstein et al., 2022).
- 2) 대기 중 탄소가 심해까지 수송되는 데에는 두 가지 펌프가 작용하는데, 이는 각각 용해도(solubility)와 생물(biological) 펌프이다. 이는 이산화탄소가 바닷물에서 높은 용해도를 갖는 기체이기에 가능하다(<그림 4.5> 참조).
 - 가) 용해도 펌프는 극지방의 밀도 높은 바닷물의 수온이 감소하면서 심해수를 형성할 때 이 과정에서 바닷물이 대기 중 탄소를 심해로 끌고 가는 과정을 일컫는데, 이는 탄소가 낮은 수온의 해수에서 더 잘 녹는 특성 때문에 가능하다. 극지방에서만 작용하는 과정이기 때문에 이러한 용해도 펌프가 가능한 해양 면적은 전 지구 해양 면적의 약 20%이다.
 - 나) 생물펌프는 해양에 서식하는 생물들의 광합성, 먹이 섭취를 통한 소화, 분해 및 배설을 통해 대기 중 탄소가 해저로 가라앉아 저장 및 격리되는 과정을 일컫는다.
 - 다) 심해수의 형성은 해양의 순환에 의해 결정되기 때문에, 대기 중 이산화탄소가 해양으로 흡수되는 것은 해양 순환에 매우 의존적이다(Fletcher, 2017).
 - 라) 인간 활동으로 인한 탄소 배출량의 증가가 대기-해양 간 탄소 농도의 차이를 만들어내고, 여기서 대기 중 탄소는 해양으로 흡수된다.

<그림 4.5> 해양 생태계에서 일어나는 대표적인 탄소흡수 과정



자료: Fletcher, 2017

라. 연안 생태계와 습지

- 1) 대양이 아닌 연안의 맹그로브, 해초층, 염습지 또한 중요한 탄소흡수원이다. 이들은 갈습 골격에 탄소를 합성하여 육상 생태계의 산림보다 최소 10배 더 많은 탄소를 저장할 수 있다. 또한, 습지는 육지 표면적의 5~8% 정도를 차지하지만 생물권 내 가장 높은 탄소 저장량을 갖고 있는 효율적인 탄소흡수원의 하나이다(Nahlik & Fennessy, 2016).

02 탄소흡수원의 국내 현황

가. 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」을 중심으로 국내 탄소 흡수량 증대 계획

- 1) 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」(약칭: 탄소흡수원법)이 2013년부터 시행 중이다.
- 2) 우리나라 정부는 <2050 탄소중립 추진전략>에서 탄소흡수원을 비롯한 총 7개의 부문별 추진전략을 제시하였다(탄소중립녹색성장위원회, 2021a).
- 3) 현재 우리나라 탄소 배출량은 약 7억 톤이며, 흡수량은 약 4,500만 톤으로 발생량과 흡수량 간에 큰 차이가 있다. 우리나라의 2050년 탄소중립 시나리오에 따르면 감축 이후 잔존하는 탄소량은 약 8,000~1억 2천만 톤으로 추정되며, 이 잔존량은 전량 흡수 또는 제거의 과정을 통해 해결해야만 한다. 제거를 통한 해결 방법에서 언급되는 각종 기술 및 수단들은 아직 실험 단계에 있고, 고비용이다.

- 4) 산림청, 해양수산부, 해양환경공단 등 정부 부처는 육상 생태계의 산림과 해양 생태계 중 특히 연안 생태계를 중심으로, 자연기반해법¹⁾을 통해 우리 생태계 내 탄소흡수를 증대시키는 계획들을 발표하고 일부 실행하는 중이다.

나. 탄소흡수원의 국내 현황 - 육상 생태계

- 1) 우리나라 「탄소흡수원법」에서 정의한 탄소흡수원은 '탄소를 흡수하고 저장하는 임목, 죽, 고사유기물, 토양, 목제품 및 산림바이오매스 에너지'이다(Sung et al., 2022). 또한 <2050 탄소중립 추진전략>의 탄소흡수원 부문에서도 추진전략은 산림을 중점적으로 고려하고 있다.

가) 흡수원 부문 추진과제에는 ① 산림순환경영으로 탄소흡수 저장기능 증진, ② 산림 및 해양 흡수원의 체계적 복원·관리, ③ 흡수원별 고유계수 개발 등 흡수원 산정·보고·검증 체계 고도화가 포함되어 있다.

나) 산림 흡수원에 의한 탄소흡수는 우리나라 탄소중립 목표 달성에 있어 매우 중요한 수단이다.

- 2) 우리나라 산림 면적은 약 629만 ha로 전 국토 면적의 약 63%를 차지하고 있다. 탄소중립 시나리오에 따르면 국내 산림은 약 2천4백만 톤의 탄소흡수 잠재력을 갖는다.

- 3) 산림청(2022)은 <2050 탄소중립 산림부문 추진전략>을 발표하였고, 이 전략은 2050년까지의 신규조림(나무 30억 그루) 및 산림 내 흡수원 보전 및 복원 등을 포함하고 있다.

가) 국립산림과학원(2022)의 추정에 따르면 우리나라 산림은 현재 51년생 이상 산림 면적이 약 10% 수준이나, 2050년에는 이의 7배에 달한다. 따라서 산림 1 ha당 연간 성장하는 임목의 평균성장량도 현재 대비 50% 이상 줄어든 것으로 예상된다. 탄소 흡수량에의 영향은, 2019년 약 4천3백만 톤의 탄소흡수에서 2050년에는 1천4백만 톤으로 감소할 것으로 예측된다.

- 4) 해당 추진전략에서 신규조림과 기존의 산림 보전, 복원 및 순환 경영을 통해 흡수원을 확충하고 흡수 능력을 강화(전략① 유휴 토지 조림, 도시숲, 생활숲 확대를 통한 신규 흡수원 확충, 전략② 산림순환경영을 통한 흡수 능력 강화)할 뿐만 아니라 목재 이용을 통한 산림자원 관리로 산림의 탄소흡수를 증가(전략③ 국산 목재제품 이용을 통한 탄소의 저장량 확대) 시키고자 한다. 또한 산림의 무분별한 개발과 훼손을 방지하는 계획(전략④ 적극적 생태복원, 재해관리)을 추진한다.

가) 산림이 산불로부터 탄소흡수원의 기능을 잃는 것을 방지하기 위해 생태복원을 통해 재해피해 면적을 현재의 약 2천4백만 ha에서 약 640 ha로 줄여야 한다.

1) 자연 본연의 회복력에 근거해 환경 문제를 해결하는 방식을 의미한다.

다. 국립공원의 탄소흡수

- 1) 우리나라 국립공원의 산림 생태계는 국토 산림 면적의 약 6%에 불과하지만, 탄소 저장 및 흡수 효과는 그 이상일 것으로 추정된다. 특히 국립공원의 토양은 일반 산림과 비교하여 낙엽층이 높고 토심이 깊기 때문에 토양 내 탄소 저장량 역시 일반 산림에 비해 높을 것으로 추정된다(국립공원공단 국립공원연구원, 2021).
- 2) 우리나라 22개의 국립공원(〈그림 4.6〉 참조) 내 다양한 군락을 조사 분석한 결과, 전 국립공원 토양권에 저장된 탄소량은 3억 4천7백만 tonC으로 분석되었다. 이 값은 같은 단위 면적당 산림의 탄소 저장량의 약 2배에 달하는 값이다.
 - 가) 국내 국립공원이 흡수하는 탄소량은 연간 320만 tonC임(〈표 4.1〉 참조)
- 3) 토양권 탄소 저장량이 높을수록 식물종의 다양성이 높은 것으로 분석되었다.

〈그림 4.6〉 우리나라 국립공원의 분포



자료: 국립공원공단

<표 4.1> 국립공원 전체 육상 생태계 탄소흡수원 유형별 탄소 저장량

단위: 천, CO₂-ton

구분	활엽수 군락 (230,408 ha)	침엽수군락 (81,315 ha)	침관혼효군락 (54,090 ha)	인공조림지 (일본잎갈나무) (11,530 ha)	아고산대 침엽수군락 (5,488 ha)	산지습지 (97 ha)	초지 (2,723 ha)	합계 (385,650 ha)
탄소 저장량 합계	214,325	66,889	48,585	12,383	3,199	38	1,198	346,6418
수 목	216,185	46,339	30,584	7,810	1,334	-	-	212,252
고사목	3,662	1,111	1,059	61	360	-	-	6,253
초본층	-	-	-	-	-	3	57	60
유기물층	4,481	2,294	1,447	346	98	-	8	8,673
토양층	79,997	17,145	15,496	4,167	1,408	35	1,133	119,380

※ 각 합계는 천 단위 미만 반올림으로 일치하지 않을 수 있음

자료: 국립공원공단 국립공원연구원, 2022.

4) 따라서 탄소흡수원으로서 국립공원을 보호·보전하는 것은 생물다양성의 측면에서 매우 큰 부가적 이익이 창출됨을 의미한다.

가) 보호지역의 면적을 늘리는 일은 탄소 흡수량과 생물다양성 모두에서 이득이 되기 때문에 보호지역 확대 노력이 필요하다. 아직 국내 국립공원의 총면적은 국제적 수준과 비교했을 때 부족한 수준이다.

나) 육상 보호지역의 연간 면적 변화(해상 보호지역도 마찬가지)는 미미한 수준이다.

다) 국립공원의 경우 국내 생물종의 42%(2만 3,016종), 멸종위기종의 66%(176종)가 서식하고 있다 (국립공원공단 국립공원연구원, 2021).

라. 도시숲의 탄소흡수

1) 육상 생태계의 탄소흡수원으로서 녹지의 보전 및 관리는 도시로 확대되고 있으며(박은진, 2009), 도시 녹지의 대기 중 탄소흡수 효과는 과거부터 인정받아 왔다(Nowak, 1993).

2) 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률」(약칭: 도시숲법) 제1조에서 법의 목적을 다양한 도시숲 기능과 함께 도시숲의 탄소흡수 기능을 유지 증진하는 것으로 명시하고 있다. 「탄소흡수원법」을 제외하면 「산림기본법」과 함께 거의 유일하게 국내 산림 탄소흡수원 유지 및 증진을 목표로 한다(성준경·윤화영, 2023).

3) <2023 산림탄소 경영전략과 탄소흡수원 증진 종합계획>에서는 탄소흡수원 증진 및 삶의 질 향상을 위한 생활권 도시숲 확대를 목표로 하고 있다. 2015년 3만 8천 ha에서 2030년 6만 ha까지 도시숲 면적을 증가시킬 계획이다. 우리나라 산림이 저장하고 있는 탄소의 양은 늘어났으나, 매년 새롭게 흡수되는 탄소의 양은 지속적으로 감소하고 있다. 이때 도시숲의 신규 조성, 특히 유휴지를 활용한 신규 조성은 탄소흡수 능력을 더욱 증가시킬 수 있다.

- 가) 이 계획에는 생활권 도시숲 등의 탄소흡수 능력을 평가할 수 있는 신규 탄소흡수원의 계수 개발이 포함된다. 이때 탄소흡수 능력이 주요 수종을 구체화한다.
- 4) 도시숲은 중요한 생태 연결 공간으로 생태계 복원 및 산림 기능 증진을 위한 관리의 차원에서도 도시숲 조성이 이루어질 것이다.
- 5) 도시숲은 산림보다 산불, 병해충 발생 등으로부터의 피해를 더 빠르게 예방할 수 있어 재해 발생 시 탄소배출원으로 탈바꿈하는 위험이 적다. 또한, 탄소흡수뿐만 아니라 폭염 경감, 미세먼지 흡착 및 저감, 시민에게 정서적 안정감 제공 등 도시숲이 갖는 부가적 이익이 다양하다.
- 6) 탄소흡수원으로서 도시숲의 기능과 효과는 명백하지만, 법적으로 도시숲이 탄소흡수원으로서 명시된 지 불과 1년이 되지 않았다. 실질적인 탄소흡수원 증진을 위해서는 구체적 지원 체계가 필요하다. 지난 몇 년간 일부 도시 지역에서 도시계획시설 결정으로 막대한 면적이 도시공원으로서의 지위를 잃었으며, 이렇게 유흥지가 된 공간은 신규 시설 건축으로 개발되어 기존의 탄소흡수원에서 탄소배출원으로 역할이 바뀌고 있다.

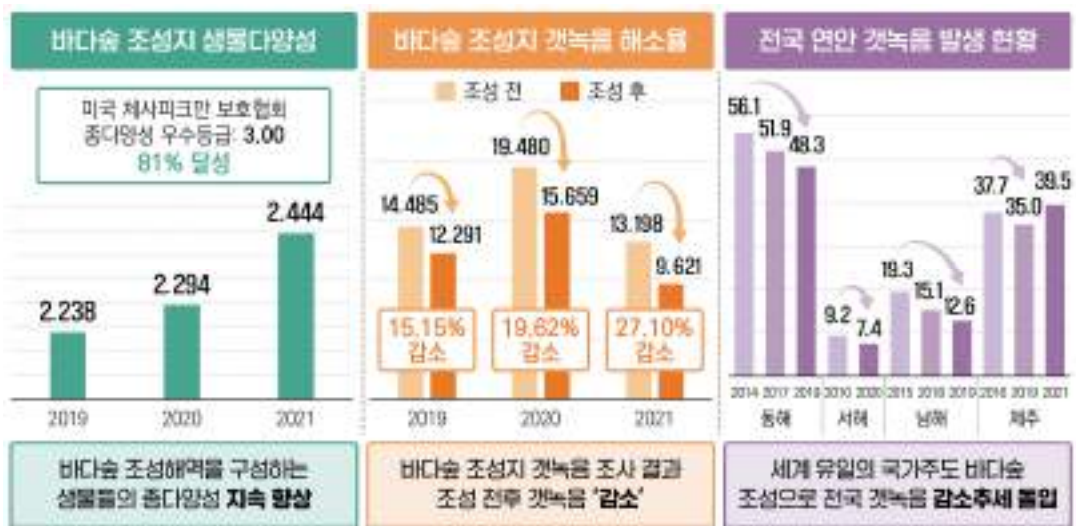
마. 농경지의 탄소흡수

- 1) 앞서 소개된 우리나라의 탄소흡수원 확충을 위한 여러 계획 이외에도 다양한 방법들이 논의되고, 일부 수행되고 있다. 그 가운데 하나가 초지 및 농경지의 탄소흡수 능력 향상을 위한 토지이용 및 토지관리 체계의 구축이다.
- 2) 농업 분야의 탄소 배출량은 우리나라 전체 온실가스 배출량의 약 2.9%를 차지한다. 농업 분야에서의 탄소 배출은 소비량과 직결되어 있어 감축이 어려운 실정이기 때문에 탄소흡수원으로서 농경지에 대한 획기적인 인식 전환과 기술 개발이 필요하다(최우정 외, 2021).
- 3) 농경지의 탄소흡수 능력 증대의 가장 확실한 방법은 토지 전환으로 혼농임업의 도입에 대한 적극적 논의가 필요하다. 많은 벼농사 지대가 간척지 토양 위에 있기 때문에 간척지 토양에서의 탄소흡수 연구가 필요하다.
- 4) 추진 전략화 되어 있지는 않지만, 정부는 농업에 있어 농식품의 생산 과정에서 발생하는 탄소를 흡수하기 위해 토양 탄소저류를 확대할 방침이다. 예컨대, 비료로 인한 토양의 영양 과잉은 작물의 효과적인 탄소흡수를 방해하기 때문에 비료 사용량 감축 등을 논의 중이다.

바. 탄소흡수원의 국내 현황 - 해양 생태계

- 1) 우리나라 정부는 <2050 탄소중립 추진전략>에서 블루카본에 대한 추진전략은 '산림 외 추가 흡수원'으로 분류하였고, '장기저탄소발전전략에서 산림, 갯벌, 습지 등 자연생태 기반 솔루션 강화로 탄소흡수 능력을 높여 우리나라 탄소중립 달성에 기여한다'라고 명시했다.
 - 2) 해양수산부는 '2030 국가 온실가스 감축목표' 및 '2050 탄소중립 목표'를 달성하기 위해 해양 생태계의 탄소흡수원인 '블루카본' 확대 전략을 마련했다(탄소중립녹색성장위원회, 2021a; 2021b; 해양수산부, 2021). 이 <블루카본 추진전략>을 통해 2050년까지 블루카본을 통한 흡수량을 약 136만 톤까지 증가시키는 것을 목표로 하고 있다.
- 가) 특히 연안에 서식하는 식물과 퇴적물을 활용하여 대기 중 탄소의 빠른 흡수를 도모한다. 기존의 흡수원(염생식물, 해조류)을 보존하고 확대함과 동시에 새로운 흡수원(갯벌 등)의 복원을 계획 중이다.
- 나) 일례로, 2023년 1월, 해양수산부는 연안 해역 생태계 복원을 위해 우리나라 연안 생태계 15곳에 해조류를 식재하고 바다숲을 조성할 것임을 밝혔다. 이러한 바다숲은 해조류뿐만 아니라 기타 수산 자원의 산란 및 서식지로 활용될 수 있다. 이미 한국수산자원공단의 바다숲 사업이 연안 생태계 건강성을 증진시키는 등 연안 생태계의 탄소흡수원으로서 역할 이외의 부가적 이익이 창출되고 있다(그림 4.7) 참조).

<그림 4.7> 바다숲 사업의 결과



주: 연안 생태계의 생물다양성이 증가하며 생태계 건강성이 증가하는 등 탄소흡수 이외의 부가적 이익이 발생하고 있다.

자료: 한국수자원공단

- 3) <국가 블루카본 정보시스템 구축 및 평가관리기술 개발>의 연구 결과에 따르면 우리나라 연안 습지의 연간 이산화탄소 흡수량은 갯벌에서 약 48만 톤, 염습지에서 약 8천 톤, 갈피림에서 약 7천 톤으로 추정된다. 갯벌에서의 탄소흡수가 IPCC에서 인정하는 국가 온실가스 흡수원에는 현재 반영되고 있지 않지만, 이에 포함될 수 있도록 국내 갯벌을 대상으로 연구 결과를 계속 축적하고 있다.
- 가) 갈피란 바닷속에서 꽃을 피우고 열매를 맺는 현화 해초류를 일컬으며, 해호말, 새우말, 왕거머리말 등이 포함된다. 국내 거의 모든 연안에 분포하고 있으며 거머리말이 가장 압도적인 종이다(최경란 외, 2022).
- 나) 거머리말(*Zostera marina*)은 2007년에 해양보호생물로 지정되었다. 거머리말은 해양 생태계 건강 유지에 있어 여러 기능을 수행하는데, 육지로부터의 오염물질을 흡수 제거하며, 해양의 부영양화를 방지함과 동시에 적조 및 녹조의 발생을 감소시켜 해양 수질을 개선하는 등 탄소흡수 이외의 부가적 이익이 상당하다.

03 육상 생태계 기반 탄소흡수 증진 기술

가. 습지의 활용 현황 및 방향

1) 탄소중립 달성을 위한 습지 관리의 중요성

- 가) ‘람사르 협약’에서 습지란 ‘천연 또는 인공이든, 영구적 또는 일시적이든, 물이 정체되어 있든 또는 흐르고 있든, 담수, 기수 또는 염수든지, 간조 6 m를 초과하지 않는 깊이의 해수 지역을 포함하는 늪, 습원, 이탄지 또는 물로 된 지역’으로 규정하고 있다.
- 나) 일부 유형의 습지는 매우 높은 일차생산성을 가지고 있으며, 특히 이탄습지는 전 지구적 탄소순환 측면에서 탄소흡수원으로서의 중요한 역할을 한다(Nichols & Peteet, 2019).
- 다) 습지는 이산화탄소를 흡수하는 동시에 이산화탄소와 이산화탄소보다 온실효과가 큰 메탄을 방출하기도 하기 때문에 습지에 대기 중 탄소를 안정적으로 보관하는 탄소 저장소로 활용하기 위해 면밀한 모니터링 및 관리가 필요하다.

2) 전 지구 습지 현황

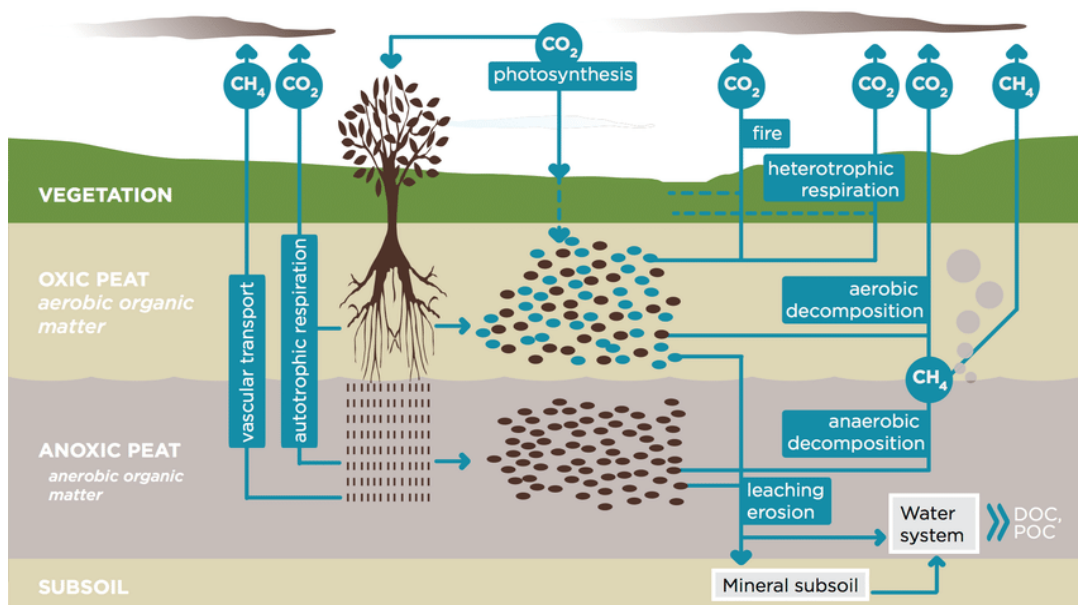
- 가) 전 지구적으로 습지는 북위 60도 부근과 강수량이 많은 적도 부근에 주로 위치하나, 이외에도 물이 고일 수 있는 환경이 조성된 세계 곳곳에 습지가 분포하고 있다.
- (1) 일반적으로 습지는 내륙습지(freshwater wetlands)와 연안습지(coastal wetlands)로 구분한다.

- (2) 내륙습지는 고위도, 고지대에서 발견되는 이탄습지(peatland), 열대 지방의 나무가 우거진 지역에 위치한 소택지(swamp), 우리나라와 같은 중위도 지방의 내륙습지로는 주로 호수 주변이나 하천 주변에서 관찰되는 늪원(marsh)이 있다.
- (3) 앞서 살펴본 바와 같이 탄소흡수원으로서의 연안 생태계의 중요성도 대두되고 있는데, 연안습지는 적도 부근의 홍수림(mangrove)이 대표적이다. 이외에도 식생이 있는 염습지(salt marsh), 식생이 없는 갯벌(mud flat), 해수에 적응한 종자식물인 잘피(sea grass)가 있다.

3) 습지의 탄소흡수 및 저장 과정

가) 습지의 식물은 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하여 유기물로 동화한다. 이 중 일부는 식물 자체의 호흡 및 토양 미생물의 분해 작용으로 다시 대기 중으로 방출되거나, 분해되지 않은 채 용존 유기탄소의 형태로 수계에 일부 유출되기도 한다. 그러나 습지는 주로 침수 상태로 습지 내 산소 농도가 낮아, 호기성 미생물에 의한 유기물 분해가 활발하게 일어나기 어려운 환경이다. 따라서 분해되지 않은 유기물이 수체 아래의 저토나 토양에 쌓여, 이탄(peat)이라는 탄소 덩어리를 형성하여 저장된다(그림 4.8) 참조).

<그림 4.8> 습지 내 탄소 순환



자료: Abrams et al., 2016

나) 특히 기온이 낮은 고위도 지역은 미생물의 활동이 매우 저조하여 식생에 의해 흡수된 탄소의 많은 부분이 대기로 재방출되지 않고 이탄으로 저장된다. 고위도 이탄습지에 저장된 탄소의 양은 현재까지 정확히 알려져 있지 않으나, 적어도 세계 토양 탄소량의 3분의 1 이상일 것으로 추정된다(Nichols & Peteet, 2019).

4) 습지에서 배출되는 강력한 온실가스 메탄

가) 메탄은 이산화탄소에 이어 지구온난화 기여도가 두 번째로 큰 온실가스이며, 이산화탄소의 평균 수명인 100년을 기준으로 봤을 때, 동일한 양의 이산화탄소 대비 온실효과가 약 20배 이상 크다(Lee & Romero, 2023).

나) 습지와 같은 혐기성 환경은 메탄생성균(methanogen)이 쉽게 유기물을 분해하여 메탄 생성이 잘 일어날 수 있는 조건이다.

(1) 전 지구 메탄 발생 총량의 약 30%는 습지와 같은 혐기성 환경에서 미생물의 작용에 의해 발생한다(Saunio et al., 2020).

다) 습지 토양에서 발생된 메탄 중 일부는 토양에서 대기로 이동하는 중 메탄 산화 세균(methanotrophic bacteria)에 의해 산화되어 제거될 수 있으므로, 실제 습지에서 발생하는 메탄의 양은 수위, 온도, 탄소질에 따른 메탄 발생 세균과 메탄 산화 세균의 상대적인 활동 정도에 따라 결정된다.

(1) 수위가 내려가면 메탄의 발생이 감소할 수 있어, 이탄습지의 수위에 따른 이산화탄소와 메탄의 발생량을 예측하기 위한 연구가 진행되고 있다(Evans et al., 2021).

5) 습지의 탄소 저장 능력 확대

가) 최근 파괴된 이탄습지를 복원하여 탄소를 흡수 및 저장하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

(1) 캐나다, 북구 유럽 등은 습지의 물을 빼 건조한 이탄을 채취하여 연료로 사용해 왔다. 해당 지역에서는 소규모 댐이나 수문을 만들어, 다시 습지를 복원하고 습지 내 생태계를 복원하여 탄소를 흡수하고, 토양의 유기물 분해속도를 늦추는 방법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.

나) 이외에 이탄습지가 파괴된 지역의 탄소 저장량을 늘리기 위한 기술적인 시도도 이루어지고 있다.

(1) 이탄을 캐낸 지역에 바이오차(Biochar)와 같은 물질을 투입하여 토양의 유기물 분해속도를 늦추고, 탄소 저장량을 늘릴 수 있다.

(2) 폐놀 계열의 물질을 이탄습지에 가해 미생물의 활성도를 억제하여 유기물 분해속도를 낮추고 이탄습지에 저장된 탄소가 대기 중으로 방출되지 않도록 안정화시킬 수 있다.

나. 바이오차 활용 현황 및 방향

1) 바이오차를 활용한 탄소 지중 저장

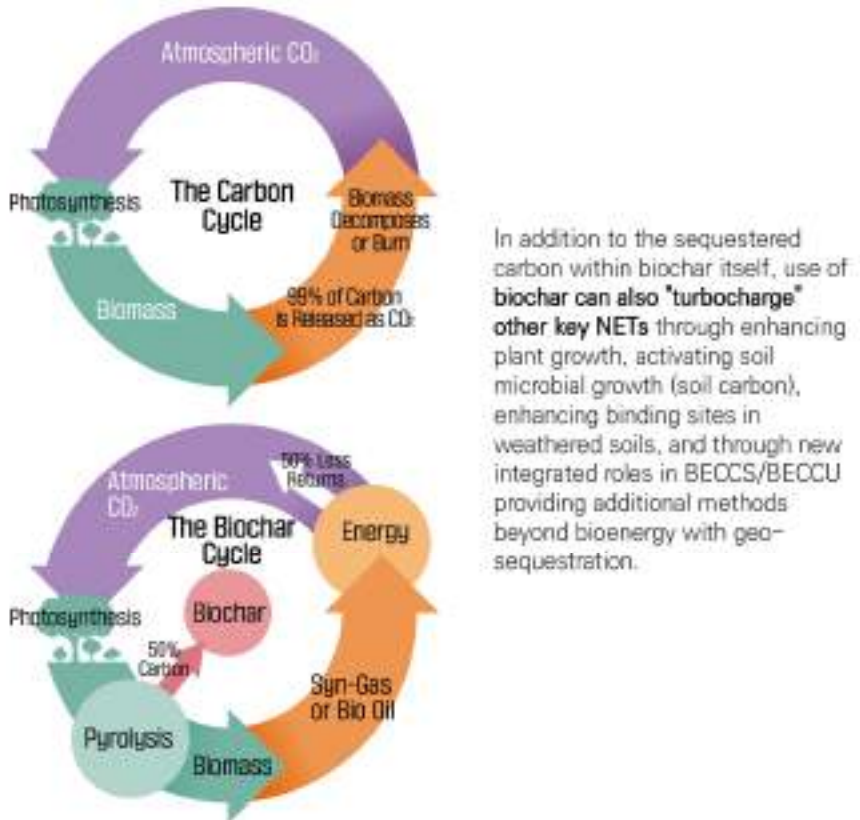
가) 바이오차(Biochar)는 산소 공급을 제한한 상태에서 유기물을 고열로 분해하는 열분해 과정에서 만들어지는 숯이다.

(1) 숯은 화학적으로 매우 안정하며, 미생물에 의한 분해가 이루어지지 않는다.

(2) 따라서 식물이 식물체 내에 유기물로 저장한 탄소를 숯으로 바꾸면 탄소를 높은 함량으로 숯 내부에 안정적으로 저장할 수 있다.

나) 숲을 에너지원으로 사용하지 않고, 토양에 묻어 탄소를 저장하기 위한 용도로 사용하는 경우 이를 바이오차라고 부른다(그림 4.9) 참조).

<그림 4.9> 바이오차를 활용한 유기물의 탄소 저장 과정



자료: ANZ Biochar Industry Group, 2020

2) 바이오차를 활용한 식물의 생산성 증대

가) 바이오차를 토양에 투입 시 토질(토양의 양분 상태, 물리적 구조, 미생물 활성도 등)이 개선되어 식물의 생산성이 증대될 수 있다(Adekiya et al., 2020).

- (1) 다공성인 바이오차는 토양으로의 공기 유입을 용이하게 하며, 토양 내 공극을 발달시켜, 토양의 수분 보유량을 증대시킨다.
- (2) 상대적으로 표면적이 넓은 다공성 매체는 양이온 및 음이온 치환 능력이 뛰어나 영양 염류를 흡착할 수 있으며, 미생물의 서식처를 제공하여 미생물의 활성도 또한 높일 수 있다.

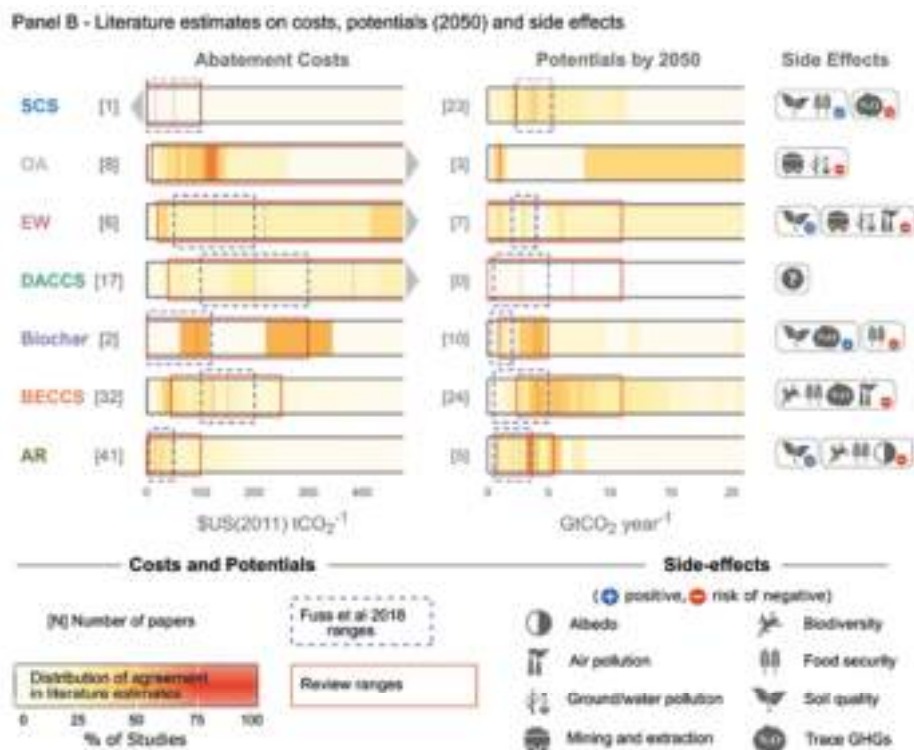
나) 위와 같은 바이오차는 IPCC에서 인정하는 이산화탄소 저감 기술 중 하나다(Masson-Delmotte et al., 2018).

3) 바이오차의 이산화탄소 저감 잠재량

가) 전 지구 바이오차 탄소 잠재량은 연간 약 7억 톤 수준으로 예상된다.

- (1) 다른 이산화탄소 저감 기술과 비교할 때, 에너지와 물 등의 자원을 상대적으로 적게 사용하여 환경 영향이 작고 토양탄소격리(Soil Carbon Sequestration, SCS) 효과와 비슷한 수준의 저감 효과가 있다(그림 4.10) 참조).

<그림 4.10> IPCC 이산화탄소 저감 기술의 비용 및 저감 잠재력 비교



자료: Masson-Delmotte et al., 2018

4) 바이오차 국가 온실가스 인벤토리 활용 현황 및 향후 활용 가능성

가) 농업 분야 자발적 온실가스 감축 방법으로 탄소 인센티브 부여

- (1) 「IPCC 국가 온실가스 인벤토리 작성 지침 2019 개정판」의 산림과 농업 등 토지 이용(Agriculture, Forestry, and Other Land Use, AFOLU) 부문에서 제시한 바이오차의 대기 중 이산화탄소 흡수량 계산식은 아래와 같다.

$$\Delta BC_{\text{mineral}} = \sum_{p=1}^n (BC_{TOTp} \cdot F_{c_p} \cdot F_{perm_p})$$

- BC_{TOT} : 바이오차 생산 타입별 투입 바이오차 양
- F_c : 바이오차 무게당 포함된 탄소 양
- F_{perm} : 100년 후 잔존 바이오차 탄소 비율
- n : 바이오차 종류

- (2) 우리나라에서는 한국농업기술진흥원에서 바이오차 기술을 활용 시 tCO₂당 10,000원의 인센티브를 부여한다.

나) 바이오차의 도시 녹지 토양 적용 가능성

- (1) 도시 토양의 토질 개선 및 토양 탄소 저장을 위해 가로수 및 공원 녹지 토양에 바이오차를 적용할 수 있다.
- (2) 스웨덴 스톡홀름에서는 도시 가로수 교체 시 바이오차를 투입하여 2020년까지 도시 전체에 총 25,000 tCO₂를 저장했다고 보고했다.
- (3) 현재 수원 지역에서 시범적으로 가로수 식재 시 토양에 바이오차를 함께 투입하여 토질 개선 및 토양 탄소 저장을 시도하고 있으며, 수원시 가로수 전체에 확대 적용 시 총 17,000 tCO₂를 저장할 수 있을 것으로 기대한다.

다) 바이오차의 건축자재 활용 가능성

- (1) 스위스에서는 바이오차를 건축자재로 활용하여 이타카연구소(Ithaka Institute)라는 건물을 준공한 바 있다.
- (2) 오스트리아에서는 바이오차와 자갈을 섞어 30 m의 도로를 건설했다.
- (3) 현재 국내 기업에서도 도로 및 아파트 시공 시 바이오차를 활용할 수 있는 방안을 탐색 중이다.

04 시사점 및 제언

- 가. 이제까지 지구의 주요 탄소흡수원은 인위적 토지이용 및 개발 활동과 같은 인간 활동으로 훼손되어 왔다. 탄소흡수원의 보전과 능력 증진, 복원 등의 노력은 단순히 탄소흡수의 차원을 넘어 생태계 생물다양성 보존을 포함하는 생태계 건강성 향상의 가치가 높다는 점을 인지해야 한다.
- 나. 중요한 것은 탄소흡수원이 배출원이 되지 않게 노력하는 일이다. 실제 자연에서도 탄소가 배출될 수 있으나 자연 변동성을 넘은 배출량은 인간 활동의 영향이다. 산불, 영구동토층의 소실과 같은 원인으로 탄소흡수에 기여하던 생태계가 배출원이 되지 않도록 지속적인 생태계 모니터링이 필요하다.
- 다. 우리나라 「탄소흡수원법」은 육상 생태계 중 산림에 의한 탄소흡수에 초점을 맞추고 있으나, 육상 생태계, 해양 생태계 모두에서 잠재적 탄소흡수원을 발굴·연구하여 더욱 합리적이고 객관적인 법령의 보완이 필요하다.
- 라. 특히 하위 계획인 <탄소흡수원 증진 종합계획>에서도 계획 기간을 5년마다 수립하도록 규정하고 있다. 하지만 육상 및 해양 생태계가 가지는 특수성을 고려한다면 5년의 계획 기간이 짧을 수 있다. 또한, 이 계획에 따르면 지자체별 지역계획을 수립하도록 하는 규정이 없다. 토지이용에 따른 지역별 환경과 특성이 매우 다르기 때문에 지역의 여건을 충분히 고려한 지역별 탄소흡수원 증진계획을 수립하는 것이 중요하다.
- 마. 우리나라 주요 흡수원인 산림에서 임목 축적량 증가에도 불구하고 매년 산불의 규모가 커짐에 따라 이제 탄소흡수원 기능 유지에 있어 산불은 중요한 문제가 되었다. 산불은 토양 및 종다양성의 보존에 있어서도 큰 손실이다. 「재난 및 안전관리 기본법」에서 산불을 사회재난으로 분류하고 있으나, 앞으로 산림을 탄소흡수원으로 보는 법령의 보완 및 산불 발생 시 산림 탄소흡수원의 소실과 복구에 대한 대책이 법제화되어야 할 것이다.
- 바. 산림의 수령과 관련하여 탄소흡수 기능에 대한 상반된 연구 결과와 논의들이 있다(홍석환, 2022). 다양한 관련 연구 자료 및 국내·국의 실증 결과를 확보하고 비교하여 과학적 근거에 기반한 전략들이 제시되어야 한다.
- 사. 온실가스 배출량의 대부분을 배출하는 도시 지역의 탄소 흡수량 증대 방안으로는 도시숲 면적 확대, 수종 전환 및 토질 개선을 통한 도시숲의 생산성 향상, 도시 토양에 적용 가능한 바이오차와 같은 탄소흡수 증진 기술 도입 등이 우선적으로 고려될 수 있다.



<참고문헌>

- 강영은(2021). “탄소중립을 위한 도시 탄소흡수원의 활용”, 국토, 제479호, pp. 28-34.
- 강호정(2022). “탄소 저장고 습지가 ‘폭탄’ 되지 않으려면”, 집현문서 02-05-2022, (사)집현네트워크
- 국립공원공단 <https://www.knps.or.kr/portal/main/contents.do?menuNo=8000665>.
- 국립공원공단 국립공원연구원(2021). “국립공원 생태계부문 탄소저장량 평가(육상생태계)”, NPRI 2021-24.
- 국립공원공단 국립공원연구원(2022). “국립공원 육상생태계 탄소저장·흡수량 평가 체계구축”, NPRI 2022-25.
- 국립산림과학원(2022). “산림과 탄소 이야기”, 산림과학속보 22-07.
- 박은진(2009). “도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안”, 기본연구 2009-09, 경기개발연구원.
- 산림청(2021). 2050 탄소중립 산림부문 추진전략.
- 성준경·윤화영(2023). “탄소중립을 위한 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」의 보완 및 향후 과제”, 환경법연구, 제45권 제2호, pp. 179-201.
- 최경란·김주희·유승훈(2022). “해양보호생물인 거머리말의 보전에 대한 대중의 지불의사액 - 조건부 가치측정법의 적용”, 해양환경안전학회지, 제28권 제5호, pp. 681-691.
- 최우정·임상선·곽진협·이선일·박현진·양혜인·서보성·정영재(2021). “탄소중립을 위한 농경지 탄소격리”, 2021 한국환경농학회 정기총회 및 학술발표대회, 한국환경농학회.
- 탄소중립녹색성장위원회(2021a). 2030 국가 온실가스 감축목표.
- 탄소중립녹색성장위원회(2021b). 2050 탄소중립 목표.
- 한국수산자원공단 https://www.fira.or.kr/fira/fira_030302_new.jsp
- 해양수산부(2021). 블루카본 정보시스템 구축 및 평가관리기술개발 연구(2017-2021).
- 홍석환(2022). “탄소중립 관점에서 본 산림경영의 문제와 자연기반해법”, 환경법과 정책, 제29권, pp. 21-48.
- Abrams, J. F., Hohn, S., Rixen, T., Baum, A., & Merico, A.(2016). “The impact of Indonesian peatland degradation on downstream marine ecosystems and the global carbon cycle”, Global Change Biology, Vol.22 Iss.1, pp. 325-337.
- Adekiya, A. O., Agbede, T. M., Olayanju, A., Ejue, W. S., Adekanye, T. A., Adenusi, T. T., & Ayeni, J. F.(2020). “Effect of Biochar on Soil Properties, Soil Loss, and Cocoyam Yield on a Tropical Sandy Loam Alfisol”, The Scientific World Journal, Vol.2020, 9391630, <https://doi.org/10.1155/2020/9391630>
- ANZ Biochar Industry Group(2020). ANZBIG Submission: EMISSIONS REDUCTION FUND - METHOD SCOPING PAPER (CCS / CCUS),

- https://anzbig.org/wp-content/uploads/2020/08/ANZBIG-Submission_CCS_CCUS-Methods-Scoping-Paper-Comments_August-2020_Fnl.pdf (Accessed on 22 Oct. 2023).
- Chen, K., Cai, Q., Zheng, N., Li, Y., Lin, C., & Li, Y.(2021). "Forest carbon sink evaluation – an important contribution for carbon neutrality", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol.811, DOI 10.1088/1755-1315/811/1/012009
- Evans CD, Peacock, M, Baird AJ and others (2021) Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 593: 548-552.
- Fletcher, S. E. M.(2017). "Ocean circulation drove increase in CO₂ uptake", *Nature*, Vol.542, pp. 169-170.
- Freidlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., et al.(2022). "Global carbon budget 2022", *Earth System Science Data*, Vol.14 Iss.11, pp. 4811-4900.
- Keenan, T. F. & Williams, C. A.(2018). "The terrestrial carbon sink", *Annual Review of Environment and Resources*, Vol.43, pp. 219-243.
- Lee, H., & Romero, J.(2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva: IPCC, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S., & Ciais, P.(2023). "Monitoring global carbon emissions in 2022", *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol.4, pp. 205-206.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T.(2018). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Cambridge·NY: Cambridge University Press.

- Mayer, M., Prescott, C. E., Abaker, W. E. A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G. W. D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J. A., Vanguelova, E. I., & Vesterdal, L.(2020). "Tamm review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis", *Forest Ecology and Management*, Vol.466, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Nahlik, A. M. & Fennessy, M. S.(2016). "Carbon storage in US wetlands", *Nature Communications*, Vol.7, 13835, <https://doi.org/10.1038/ncomms13835>
- Nichols J. E. & Peteet, D. M.(2019). "Rapid expansion of northern peatlands and doubled estimate of carbon storage", *Nature Geoscience*, Vol.12, pp. 917-921.
- Nowak, D. J.(1993). "Atmospheric carbon reduction by urban trees", *Journal of Environmental Management*, Vol.37 Iss.3, pp. 207-217.
- Pan, Y., Birdsey, Rd A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D.(2011). "A large and persistent carbon sink in the world's forests", *Science*, Vol.333 Iss.6045, pp. 988-993.
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P. M., Covey, K., Curry, C. L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M. I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., et al.(2020). "The global methane budget 2000-2017". *Earth System Science Data*, Vol.12, pp. 1561-1623.
- Sha, Z., Bai, Y., Li, R., Lan, H., Zhang, X., Li, J., Liu, X., Chang, S., & Xie, Y.(2022). "The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management", *Communications Earth & Environment*, Vol.3, 8.
- Sung, J. K., Yun, H., Yang, B. S., Byeon, J., & Kang, K.(2022). "A study on the reinforcement of forest carbon sinks through the improvement of reforestation acts for forest fire damaged areas", *한국위기관리논문집, 제18권 제12호*, pp. 49-60.
- Yue, X. & Gao, Q.(2018). "Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions", *Advances in Climate Change Research*, Vol.9 Iss.4, pp. 243-252.

V

탄소중립 엔지니어링을 통해서 본 우리나라 온실가스 배출 특성의 이해

1. 탄소중립 엔지니어링의 개념
2. 우리나라의 화석연료 사용 흐름
3. 우리나라의 탄소 배출 특성
4. 화석연료별 물질 및 에너지 관계표 만들기
5. ME plot; 에너지와 온실가스 측면에서 화석연료의 표준화된 비교
6. 화석연료별 온실가스 배출량 분석 방법의 일반적인 적용
7. 시사점 및 제언

V

탄소중립 엔지니어링을 통해서 본
우리나라 온실가스 배출
특성의 이해

01 탄소중립 엔지니어링의 개념

가. 화석연료에 기반한 기술 및 사회 체계

- 1) 현재의 기후위기 원인 물질은 온실가스다. 인류 사회는 이를 해결하기 위해 탄소중립이라는 공동 목표를 설정하였다. 탄소중립을 위해서는 온실가스 배출량을 줄여야 하고, 온실가스 감축을 위해서는 화석연료 사용을 줄여야만 한다. 그렇지 않으면 탄소중립은 실현될 수 없다. 그런데 화석연료는 산업혁명 이후 인류 사회가 사용해 온 오랫동안 익숙해져 있는 에너지원이어서, 이에 대한 의존을 줄이기란 매우 어려운 일이다.
- 2) 화석연료를 사용하는 각종 기술에 기반한 사회 체계는 현대 물질문명의 토대를 이루고 있다. 현대 문명을 뒷받침해 주는 핵심적인 물질의 토대는 유무기 재료와 전기다. 지구촌 사회의 80억 명 이상의 거대한 인구를 부양하는 식량과 농업 생산품도 빠질 수 없다. 주요 재료로는 시멘트, 철강, 알루미늄, 화학섬유와 플라스틱 같은 화학제품 등이고 농업 생산성을 크게 증대시키는 비료 등도 빼놓을 수 없다. 이들을 생산하는 공정에 바로 화석연료가 사용된다. 이들을 사용하여 현대인의 의식주와 관련된 각종 편의 및 생산 시설과 제품을 만들고, 건물을 짓고, 자동차와 가전제품과 생산 기계 등을 만들고, 식량을 생산한다.
- 3) 전기 없는 도시 생활이나 산업공정은 상상할 수 없다. 전기의 경우 최근에는 재생 전기에너지 비중이 증가하고는 있지만 대부분 화력발전소에서 생산된다. 농업 생산력을 높이기 위해서는 각종 농기계와 비료, 농약 등을 필요로 하고 이들을 생산하는 과정에서도 화석연료를 기반한 많은 기술에 의존한다.

나. 탄소중립 엔지니어링의 정의

- 1) 기후위기가 해결될 것으로 생각하는 탄소중립 사회에는 화석연료가 아닌, 새로운 기술에 기반한 사회 체계가 필요할 것이고 이를 탄소중립 엔지니어링이라고 한다(윤제용, 2023). 즉, 탄소중립 엔지니어링이란 탄소중립 달성을 목적으로 하는 각종 공학 분야의 이론, 기술, 생산 체계를 포함하는 공학 체계 전반을 일컫는다고 할 수 있다. 탄소중립 엔지니어링의 가장 큰 특징은, 기존 엔지니어링에서는 고려하지 않았던 온실가스 배출량을 고려하는 공학 체계라는 것이다.

다. 탄소중립 엔지니어링과 화석연료 중심 엔지니어링의 비교

- 1) <그림 5.1>은 탄소중립 엔지니어링(a)과 기존 화석연료 중심 엔지니어링(b)과의 물질 수지(mass balance)와 에너지 수지(energy balance)를 보는 관점의 차이를 나타낸 것이다. 기존 방식의 엔지니어링(b)에서는 화석연료를 기반으로 하고 물질 또는 에너지가 얼마만큼 투입되고 사용되고 생산되는지가 공학의 주요 관심사이다.
- 2) 기존 방식의 엔지니어링(b)에서는 물질 수지와 에너지 수지가 비교적 독립적인 반면, 탄소중립 엔지니어링(a)에서는 두 수지의 공통분모로 묶이는 탄소 수지(carbon balance)가 있다. 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등의 다양한 온실가스의 배출량과 온실효과를 표준화하여 탄소로 대표해서 표현하기 때문이다. 여기서 탄소 수지는 온실가스 배출 수지의 다른 표현이다. 이제는 온실가스 배출을 고려하지 않은 공정 설계는 불가하며 공정 운영에도 온실가스가 얼마나 발생하는지 고려하지 않을 수 없다.

<그림 5.1> 탄소중립 엔지니어링(a)과 화석연료 중심 엔지니어링(b) 비교

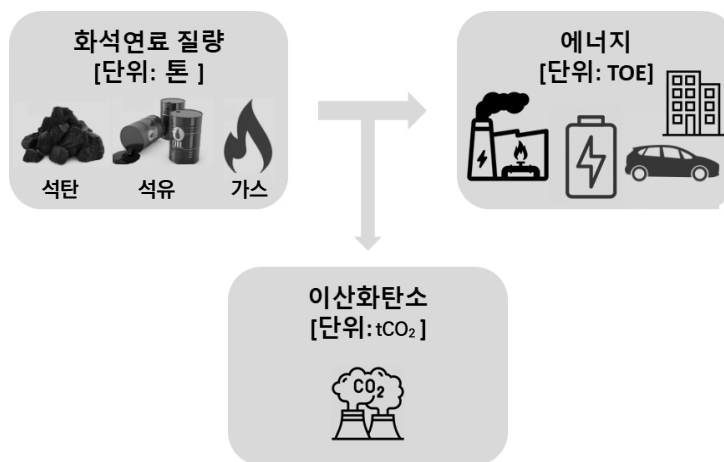


자료: 주화주&윤제용, 2022; 윤제용, 2023

라. 화석연료, 에너지, 온실가스(이산화탄소)의 관계

- 탄소중립 엔지니어링이라는 개념은 <그림 5.2>에서 보다 잘 표현된다. <그림 5.2>에서 보듯이, 핵심 온실가스인 이산화탄소 배출은 화석연료에서부터 시작된다. 화석연료 사용은 단기간 소비 후 아직 소각되지 않은 플라스틱 등 일부 원료로 사용되는 부문을 제외한다면 에너지를 얻기 위함이고 이 과정에서 온실가스가 발생한다. 그렇지만 플라스틱과 같은 원료나 제품에 사용되는 화석연료도 시간적 차이를 두면서 연소 과정을 거쳐 궁극적으로 온실가스를 발생시킨다(환경부 녹색기술개발과, 2021).

<그림 5.2> 화석연료(톤), 에너지 생산(TOE), 그리고 온실가스(이산화탄소, tCO₂) 관계



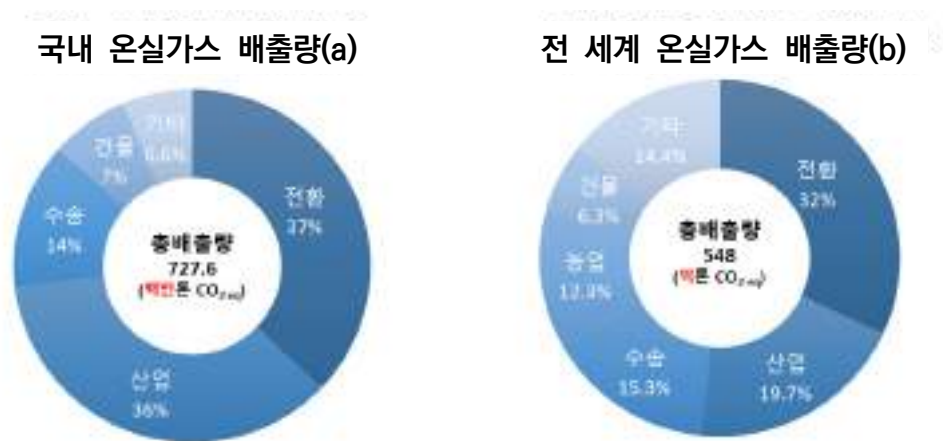
- 탄소중립 사회로 가기 위해서는 화석연료의 의존을 줄여야 하는데 의존을 줄이기 위해서는 화석연료가 어떤 식으로 사용되는지를 이해하는 일이 필요하다. 석탄 광산을 개발하여 석탄을 캐고 석유와 가스 유전을 개발하여 시추하는 일은 이로부터 확보되는 화석연료를 사용하기 위함이다. 개발과 최종적인 사용에 시간적 차이가 존재할지는 모르지만 대부분 결국 사용이 되는 것이다. 우리나라와 같이 자원이 없는 나라는 이와 같은 화석연료를 수입하여 사회경제 활동에 이용하려는 것이지 이를 무한정 저장하여 보관하기 위한 목적은 아닐 것이다.

마. 화석연료의 물질 수지와 에너지 수지

- 화석연료의 흐름을 따라가면 화석연료가 소모되는 최종 사용처를 알 수 있으며 온실가스 배출의 특성도 알 수 있다. 최근에 국가 온실가스 통계와 실제 온실가스 배출과의 간극을 보완하기 위하여 온실가스의 시공간적 변화를 측정하려는 연구 개발은 국내 온실가스 배출의 특성을 보다 정확하게 이해하기 위한 것이다.

- 2) 온실가스 배출의 특성을 이해하면 이들이 사용되는 용도와 기술들에 맞닥뜨리게 된다. 따라서 이를 대체하는 기술이 개발되거나, 기술이 있다 하여도 시장에서 활용되지 않으면 화석연료 사용을 현실적으로 줄이기는 어렵다. 먼저 이를 위해 구체적으로, 화석연료의 소비 흐름을 중심으로 화석연료의 물질 수지와 에너지 수지를 살펴보고자 한다.
- 3) <그림 5.3>은 국내(a)와 전 세계(b)의 전환, 산업, 수송, 건물 등 부문별로 배출되는 온실가스의 양(2018년)을 나타낸다. 2018년 데이터를 이용한 이유는 국내에서 가장 많은 탄소 배출을 한 해가 2018년도이고 국내 탄소중립 정책의 기준점이 되기 때문이다. 2018년 국내 온실가스 배출 특성을 보면 37%(2.7억 톤)는 전환 부문에서, 36%(2.61억 톤)는 산업 부문에서, 14%(0.98억 톤)는 수송 부문에서, 7%(0.52억 톤)는 건물 부문에서 배출된다. 여기에서 전환 부문이란 전력을 생산하는 부분을 지칭한다. 같은 방식으로 전 세계 온실가스 배출 특성(2019년)을 보면 전환 부문은 32%, 산업 부문은 19.7%, 수송 부문은 15.3%, 건물 부문은 6.3%이다. 산업에서 제조업 비중이 큰 한국의 경우 산업의 온실가스 배출 기여도가 크다.

<그림 5.3> 국내(a)와 전 세계(b)의 온실가스 배출량



자료: 환경부 온실가스종합정보센터, 2020; IEA, 2020

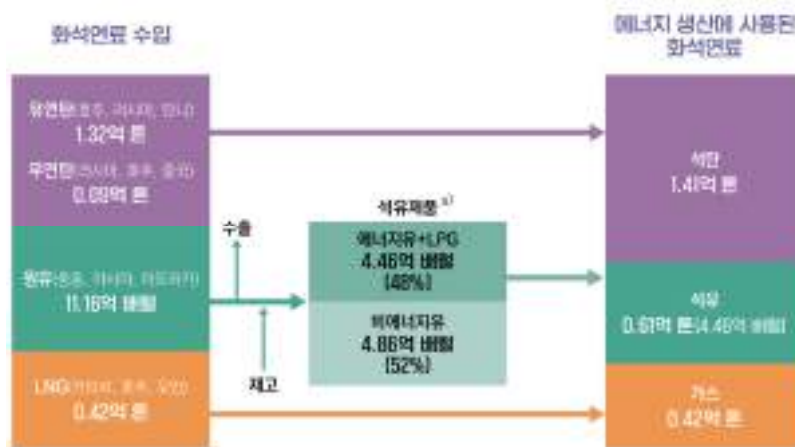
- 4) 이런 방식의 통계는 탄소중립을 위해서 전환 부문과 산업 부문이 매우 중요하다는 점을 부각시킨다. 이는 전환, 산업, 수송, 건물식으로 분야별 온실가스 배출량이 얼마이고, 분야별로 온실가스 감축을 얼마만큼 하여야 하는지 등의 정부 정책을 세우고 탄소중립 시나리오를 만드는 데 큰 도움이 된다. 즉, 어느 부문에서 얼마만큼의 온실가스가 배출되는지를 한눈에 확인할 수 있다는 장점이 있다.
- 5) 그렇지만 이런 방식은 온실가스의 근원이 되는 특정 화석연료의 흐름을 파악하기는 어려운 점이 있다. 화석연료를 많이 사용하여 생산한 전기는 화력발전소에서 사용하려고 생산하는 것은 아니다.
- 6) 결국 판매를 위해 생산된 전기의 반 이상은 산업 부문에 사용되고 나머지는 건물 등 분야에 사용된다. 관련 전문가가 아니라면 결국 얼마만큼의 화석연료가 어떤 용도로 사용되었는지를 알기는 어렵다. 국민들은 더욱 이해하기 어렵고 따라서 탄소중립의 의미가 전달되기 어려운 구조가 된다.

02 우리나라의 화석연료 사용 흐름

가. 국내 화석연료 수입 및 사용 현황

- 1) <그림 5.4>는 국내 화석연료의 생산 또는 수입한 화석 연료량을 보여주는 생명주기(life cycle)의 일부로 「2019 에너지통계연보」의 자료를 재구성한 것이다.

<그림 5.4> 국내 화석연료 수입(2018년)과 에너지 생산과의 관계



주: a) 석유제품의 에너지유와 비에너지유 구분

자료: 에너지경제연구원, 2019

- 2) 생명주기라는 용어는 주로 상품 생산에 사용되지만 국내에서 사용되는 대부분의 화석연료가 수입되는 우리의 경우 화석연료 종류별로 화석연료의 수입, 가공, 사용 등의 흐름을 나타낸다고 볼 수 있다.
- 3) 국내에서 수입하는 화석연료는 대부분 석탄, 석유, 가스이다. 2018년 국내에서 수입한 화석연료는 석탄의 경우는 대부분 유연탄으로 1.32억 톤이고, 약간의 무연탄 0.09억 톤이 있다. 반면 원유는 11.16억 배럴, 천연가스인 LNG는 0.42억 톤이다. 여기서, 유연탄과 무연탄은 석탄으로 수입한 양이 모두 에너지 공급에 사용되고, LNG는 모두 에너지 공급에 사용되지만 석유의 경우는 조금 다르다. 그리고 LNG의 경우 부피 단위를 사용하는 경우도 있다. 예를 들면 가정에서 사용하는 LNG 사용을 보면 m^3 단위이다.
- 4) <그림 5.2>에서 언급하였듯이 화석연료의 질량 단위는 에너지를 생산하고 이를 생산하는 과정에서 온실가스가 발생한다. 그런데 대표 화석연료 사용량은 질량과 특정 부피 단위로 사용되고 있어 이들 간의 관계를 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 가정에서 주로 사용하는 전기와 가스가 얼마만큼의 온실가스를 배출하는지 가늠하기는 매우 어렵다. 이후에 본 보고서에서 제시하는 방법론을 통해 이를 보다 쉽게 이해할 수 있다.

나. 석유제품의 에너지 및 비에너지 사용 현황

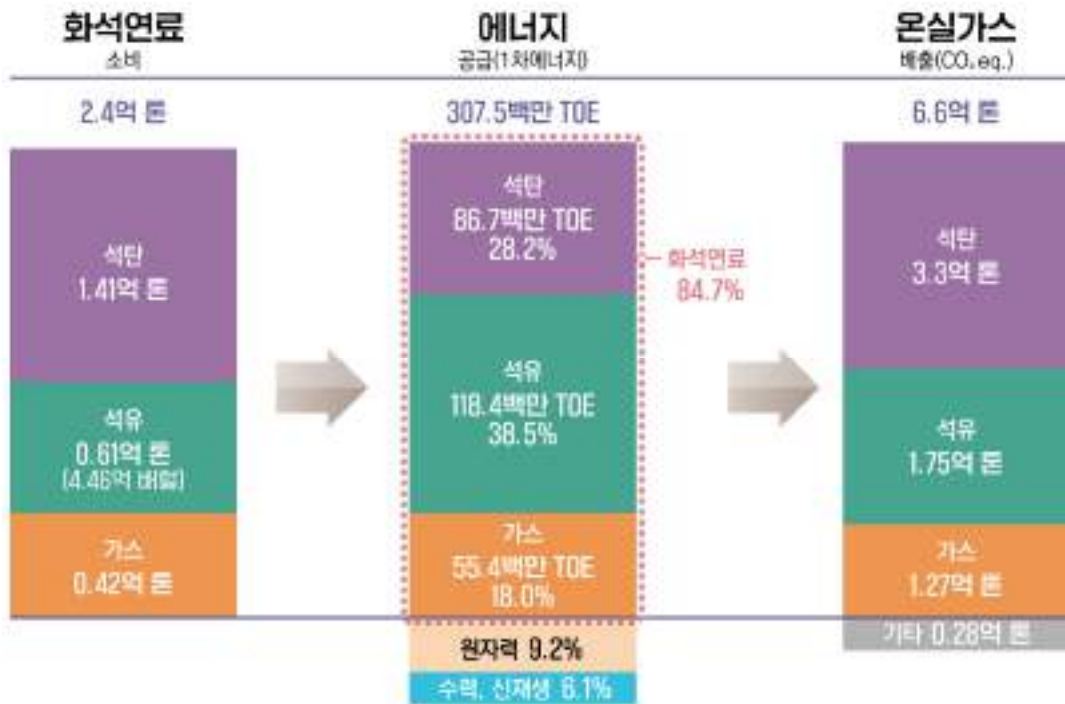
- 1) 석유의 경우를 살펴보면, 2018년 원유 수입량은 11.16억 배럴인데 이 수입한 원유와 기존에 남아 있던 재고 그리고 일부의 국내 생산량과 수출량을 고려하여 이를 석유제품이라고 한다. 여기서 말하는 석유제품이란 처리를 거친 원유로서 자동차의 연료, 각 산업공정에 쓰이는 원료, 기타 석유화학 제품을 모두 포함한다. 생산된 석유제품을 수출하기도 하고, 원유가 아닌 처리된 석유제품을 수입하기도 하여 석유제품에 대한 수지를 계산해 보면 최종적으로 1차에너지 소비량에 사용된 석유제품은 9.32억 배럴이 된다(에너지경제연구원, 2019).
- 2) 이 석유제품은 에너지 생산에 사용된 석유제품과 비에너지 생산에 사용된 석유제품으로 다시 구분할 수 있다. 에너지 생산에 사용된 석유제품이란 휘발유, 등유, 경유, 항공유 등을 포함하는 에너지유와 프로판, 부탄을 포함한 LPG를 의미한다. 주로 기름류는 수송 부분의 자동차, 선박, 항공류에 사용되고 LPG는 도시가스가 공급되지 않는 지역에 난방 취사용 연료로 공급된다. 또한, 비에너지 생산에 사용된 비에너지유는 나프타, 아스팔트, 용제 등을 의미한다. 2018년 기준으로 한국에서 석유제품 9.32억 배럴 중, 에너지 생산에 사용되는 석유량은 4.46억 배럴이고, 비에너지 생산에 사용되는 석유제품이 4.86억 배럴이라는 것을 확인할 수 있다. 이 4.46억 배럴을 질량 단위로 환산하면 <그림 5.5>의 왼쪽에 나와 있는 에너지 생산에 사용된 석유 0.61억 톤이 된다(1배럴=0.136톤)(에너지경제연구원, 2019).
- 3) <그림 5.5>를 요약하면 우리나라가 한 해에 수입하는 화석연료량을 알 수 있고, 이 중 에너지 공급에 사용된 석탄, 석유, 가스를 질량 단위로 환산하면 석탄 1.41억 톤, 석유 0.61억 톤, 가스 0.42억 톤이 나오게 된다. 이러한 화석연료의 양이 한 해에 모두 사용된다면 대한민국이 필요로 하는 에너지가 생산되는 것이고 이런 과정에서 온실가스가 발생하는 것이다.

다. 국내 화석연료 종류별 소비에 따른 온실가스 배출량의 관계

- 1) <그림 5.5>는 2018년 국내 화석연료의 흐름인 소비된 화석연료, 전환된 에너지양, 에너지 사용으로 인한 온실가스 배출량을 나타낸다. 화석연료 생명주기는 (1) 생산 또는 수입으로 얻은 화석연료, (2) 화석연료 소비를 통해 사회에 공급된 에너지, (3) 화석연료 사용량에 따라 배출되는 온실가스 배출량을 뜻한다.
- 2) 에너지 공급에 석탄, 석유, 가스의 질량 단위 환산값을 그림의 왼쪽 그래프에 나타내었다. 가운데 그래프는 대한민국에 공급된 총 1차에너지 값을 원료별로 제시하는데, 총 1차에너지 307.5백만 TOE(ton of oil equivalent)(약 3억 TOE) 중 대부분이 화석연료를 통해서 공급되었음을 알 수 있다. 1.41억 톤의 석탄으로부터 86.7백만 TOE, 0.61억 톤의 석유로부터 118.4백만 TOE, 그리고 0.42억 톤의 가스로부터 55.4백만 TOE의 에너지를 공급한 것이다. 이는 전체의 84.7%에 해당하는 값으로 이외의 원자력과 수력 및 신재생을 통해서 공급된 값을 제외하면 대부분의 에너지를 생산할 때 이러한 화석연료가 사용됨을 알 수 있다. 화석연료를 연소해 에너지를 생산할 때 배출된 온실가스량은 오른쪽 그래프에서 확인할 수 있다.

- 3) 오른쪽 그래프의 온실가스 배출량은 환경부의 국가 온실가스 인벤토리 값을 재구성한 것이다. 2018년 한국의 에너지 부문에서 배출된 총 온실가스를 이산화탄소로 환산하면 6.6억 톤이고, 이 중에서 석탄으로부터 나온 양은 총 온실가스 배출의 50% 정도인 3.3억 톤, 석유는 27%인 1.75억 톤, 가스는 19%인 1.27억 톤으로 구성된다. 2018년 한국 온실가스 총량은 7.3억 톤(환경부 온실가스종합정보센터, 2020)인데 6.6억 톤이 나온 이유는 산림 흡수원 4천만 톤과 이산화탄소가 아닌 온실가스 등을 포함한 값이다.
- 4) 석탄의 경우는 화석연료 소비량의 60%에 달하지만, 에너지 생산량의 33%를 차지하여 에너지 생산에는 적게 기여하고, 온실가스 발생은 52%로 크게 기여하는 특성을 볼 수 있다. 즉, 한국의 탄소중립은 석탄 연료의 전환 없이는 쉽지가 않다. 현재 석탄이 어느 분야에 사용되고 있고, 이를 대체할 만한 기술이 있는가 하는 여부가 한국의 탄소중립 및 탄소중립 기술 정책의 중요한 주제가 될 수 있다. 따라서 석탄의 말단 사용처 부문의 필요를 대체하는 기술과 기술 체계가 탄소중립 엔지니어링이 되는 것이다.

<그림 5.5> 국내 화석연료 수입, 에너지 생산, 온실가스 배출(2018년)과의 관계



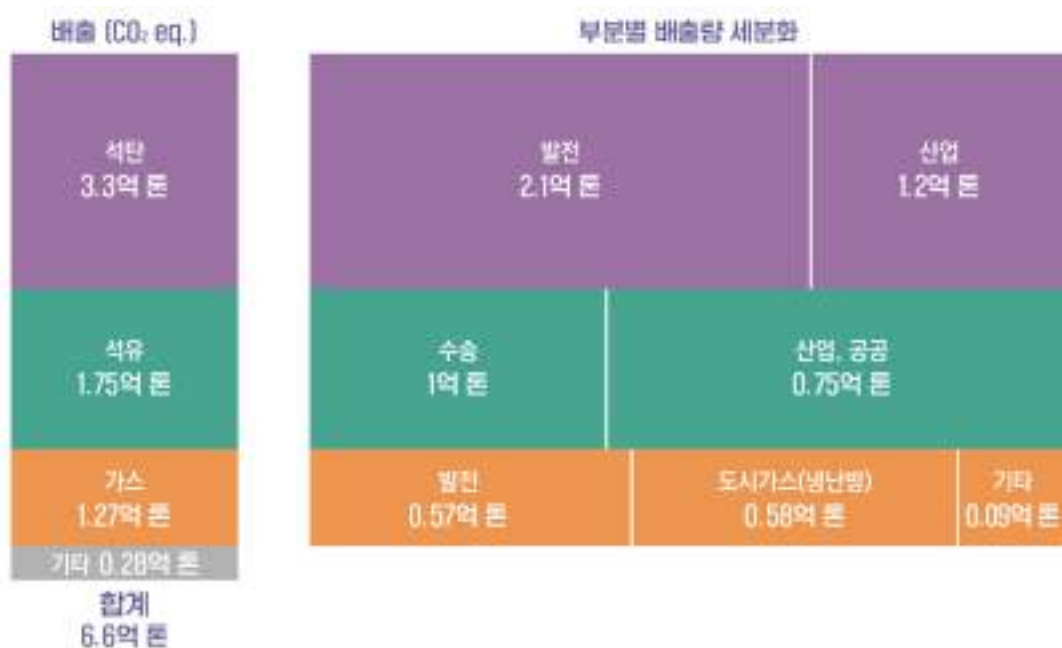
자료: a) & b) 에너지경제연구원, 2019; c) 환경부 온실가스종합정보센터, 2020.

03 우리나라의 탄소 배출 특성

가. 국내 화석연료별 온실가스 배출 특성

- 1) <그림 5.6>은 국내의 온실가스 배출량을 화석연료별, 사용 부문별로 세분화한 자료이다. 먼저 석탄 부분을 보면, 석탄 사용으로부터 나온 온실가스 3.3억 톤 중에서 2.1억 톤은 발전, 1.2억 톤은 산업 부문을 통해 배출되었다. 여기서 발전 부문이란 전기를 생산하는 발전소에서 사용된 석탄을 의미하고, 산업 부문의 대부분은 철강 산업이 주를 이루며 시멘트 산업이 다음으로 비중이 크다.
- 2) 한편 석유의 용도는 크게 두 가지이다. 첫째로 수송 부문에서 약 1억 톤이 배출되고, 나머지는 석유화학 등과 같은 산업공정에서 반응온도를 올리는 용도 등과 도시가스가 공급되지 않는 각종 분야에 LPG 형태로 사용된다. 수송 분야는 내연기관에 기반한 자동차, 화물차 등을 의미하며 이를 대체하는 기술은 전기차 기술이다. 일부이기는 하지만 항공, 선박 등이 있다.
- 3) 가스의 경우도 사용처는 두 가지인데 하나는 가스발전 부문에서 0.57억 톤, 냉난방에 사용되는 도시가스 부문에서 0.58억 톤이 배출된다. 가스발전은 석탄발전의 과도기적 기술이며 수소 등의 연료에 기반한 무탄소 발전으로 한다. 가정용 도시가스는 전기 난방 또는 취사 기술 등으로 대체된다.

<그림 5.6> 국내 화석연료별 온실가스 배출 특성(2018년)



자료: 환경부 온실가스종합정보센터, 2020

- 4) <그림 5.6>을 통해 우리는 한국에서 화석연료별로 얼마만큼 온실가스가 배출되고, 각 화석연료 내의 어느 부문에서 얼마만큼의 온실가스가 배출되는지 알 수 있다. 이를 통해, 탄소 배출을 줄이기 위해 어느 부문의 대체 기술이 얼마만큼 중요한지, 그리고 어떻게 집중해야 하는지 등에 대한 기술 개발의 방향성을 얻을 수 있다. 예를 들면, 먼저 전체 6.6억 톤 탄소 배출 중 2.1억 톤으로 약 1/3을 차지하는 석탄발전 부문을 줄여야 한다.
- 5) 그런데 전기는 필수적이기 때문에 효율적인 전기 사용은 필요하지만 절대량을 감축하는 일은 쉽지 않다. 오히려 2050년 탄소중립 시나리오에 의하면 전기 사용량은 2배 이상 증가하는 것으로 계획되어 있다.
- 6) 그렇다면 탄소 배출을 하지 않는 에너지 생산이 필요하고, 재생에너지를 이용한 발전으로 이를 점차 대체해 가야 한다. 이러한 과정은 장기간에 걸쳐 이루어지는 것이기 때문에 과도기적으로 같은 에너지를 생산하는 데 필요한 연료량이 적더라도 탄소를 석탄보다 적게 배출하는 가스발전으로 전환해야 한다. 같은 에너지를 생산하는 데 드는 연료량과 탄소 배출량에 대한 부분은 뒤에서 더 자세히 다루겠다.
- 7) 또한, 석탄 부문 산업의 대부분인 철강 산업은 석탄을 열원과 원료로 사용하는 기존 공정에서 수소 환원 제철 공정으로의 전환을 통해 탄소 배출량을 저감해야 한다. 석유의 수송 부문은 내연기관 기반의 자동차를 줄이고, 전기 수소차의 확대를 통하면 석유의 직접적인 사용과 이로 인한 탄소 배출을 줄일 수 있다.

04 화석연료별 물질 및 에너지 관계표 만들기

가. 화석연료별 에너지 수지 및 온실가스 수지

- 1) 지금까지 2018년 국내 자료를 예시로 화석연료의 흐름을 따라가며 화석연료별 온실가스 배출량이라는 새로운 분석 방법을 통해 화석연료, 에너지, 온실가스 배출량의 관계를 알 수 있다. 이 방법은 글로벌 및 국가 단위 분석에 적용할 수 있다. 뿐만 아니라 화석연료를 기반으로 하는 어떠한 산업공정, 공단, 도시, 지역 단위에도 간단하게 적용할 수 있다.
- 2) 전술한 바와 같이 대표적인 화석연료에 따라 물질 수지와 에너지 수지 그리고 온실가스 수지 관계를 보다 알기 쉽게 계량적으로 파악할 수 있다. 화석연료는 연소를 통해 에너지를 얻기 위해 사용하는 것이므로 연소 과정을 나타내는 화학식을 통하여 질량 대비 얼마만큼의 에너지(열량)를 내는지 파악할 수 있다. 또한 연소 과정의 생성물이 이산화탄소이므로 온실가스의 배출량을 파악할 수 있다. 화석연료별로 어느 정도의 에너지를 낼 수 있는지는 화석연료의 질량 대비 열량값을 통해서 알 수 있다.
- 3) <표 5.1>은 연소 과정에서 발생하는 화석연료별 질량 대비 열량값을 보여준다. 이 값들은 OECD의 IEA Electricity Information Statistics, 국제가스연맹(International Gas Union)의 「Natural Gas Conversion Guide」와 NIST의 「NIST Chemistry WebBook」으로부터 얻은 값을 재구성한 것이다.
- 4) 이미 언급한 바와 같이 대표적인 화석연료는 석탄, 석유, 가스이다. 그런데 화석연료에 따라 한 종류의 화석연료 내에서도 성분비에 따라 종류가 다양하고 화석연료의 열량값이 하나의 값으로 고정된 것이 아니라 성분비, 발전 방법 등에 따라 달라지기 때문에 열량값이 범위로 주어진다.
- 5) 석탄의 경우 연료탄, 갈탄, 역청탄, 아탄 등 용도와 탄분에 따라 구성이 다양하다(Grammel et al., 2016). 석유는 가솔린, 디젤 등의 종류가 다양하며, 가스 또한 천연가스, 메탄 등으로 구성된다. 따라서 열량값의 경우는 차이를 모두 고려하지 않고 해당 화석연료의 대표 구성분과 어떠한 관계를 나타내는 것에 한정하고자 한다. 예를 들면 <표 5.1>에 붉은색 표시와 같이 석탄은 발전에 주로 쓰이는 역청탄, 석유는 가솔린, 가스는 메탄을 고려하여 관계식을 설명할 수 있다.

<표 5.1> 연소 과정에서 발생하는 화석연료별 질량 대비 에너지(열량)값

분류	종류	열량값 (MJ/kg)	열량값 (kWh/kg)
석탄	무연탄 (anthracite)	> 23.6	
	갈탄 (brown coal)	< 23.6	
	역청탄 (bituminous coal)	23.6	6.57
	아탄 (lignite)	20	
석유	가솔린 (gasoline)	42.2	11.74
	디젤 (diesel fuel)	42.2~46	
	원유 (crude oil)	42.2~47	
가스	천연가스 (natural gas)	42.2~55	
	메탄 (methane)	50	13.84

주: 전환 계수 3.6 MJ/kWh 적용

자료: OECD, 2023; International Gas Union, 2012; NIST, 2023 재구성

나. 화석연료의 질량당 생산되는 에너지

- 1) 화석연료의 질량당 생산되는 에너지를 계산하기 위해, <표 5.1>에 MJ/kg 단위로 제시된 열량값을 kWh/kg으로 환산하면(전환계수 3.61 MJ/kWh) 석탄의 질량 대비 열량은 6.57 kWh/kg, 석유는 11.74 kWh/kg, 가스는 13.84 kWh/kg이다. 여기서 kWh 단위를 흔히 화석연료와 에너지 전환 값을 볼 때 사용하는 단위인 TOE(ton of oil equivalent)와 질량(톤) 기준으로 환산하면 1톤의 화석연료를 통해 석탄은 0.57 TOE, 석유는 1.01 TOE, 가스는 1.19 TOE 에너지를 생산할 수 있다는 뜻이다.

$$\text{석탄} \quad \frac{6.57 \text{ kWh}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ TOE}}{11628 \text{ kWh}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 0.57 \text{ TOE/ton} \quad (1)$$

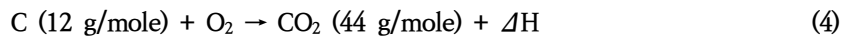
$$\text{석유} \quad \frac{11.74 \text{ kWh}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ TOE}}{11628 \text{ kWh}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 1.01 \text{ TOE/ton} \quad (2)$$

$$\text{가스} \quad \frac{13.84 \text{ kWh}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ TOE}}{11628 \text{ kWh}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 1.19 \text{ TOE/ton} \quad (3)$$

다. 이산화탄소 배출량 계산

1) 에너지 생산 과정에서 질량당 배출되는 이산화탄소를 계산하기 위해서는 화석연료의 연소식을 통한 계산 과정이 필요하다. 석탄의 화학식을 알면 석탄의 연소식을 화학 당량적으로 계산할 수 있다.

2) 석탄의 경우는 복잡한 탄화수소 복합물로서 단일 화학식으로 표현할 수 없다. 대신 석탄의 평균적인 탄소 비율을 알 수 있으면 연소 과정에서 발생하는 이산화탄소 생성량을 계산 할 수 있다. 즉, 석탄의 탄소가 연소하면 이산화탄소가 발생하고 이 과정에서 연소열이 생성된다(식 (4)).

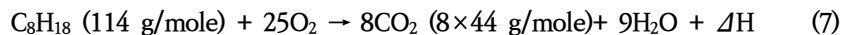


3) 석탄 중 연료탄의 탄소 질량 비율은 조성에 따라 범위를 가지지만, 60% 정도로 간주한다(대한석탄공사, 2001). 탄소 1몰당 이산화탄소(CO_2) 1몰이 생성되므로, 몰 질량비를 통해 연소 과정 시 석탄 연료에서 생성된 이산화탄소 비율은 2.2로 계산된다(식 (5), (6)). 즉, 1톤의 석탄을 통해 2.2톤의 CO_2 가 배출된다는 뜻이다.

$$\text{석탄의 탄소 비율} \frac{nC(n \times 12 \text{ g/mole})}{Coal} : 0.6 \quad (5)$$

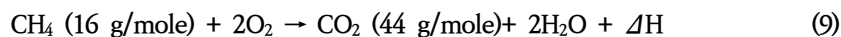
$$0.6 \times \frac{CO_2 (44 \text{ g/mole})}{C (12 \text{ g/mole})} = 2.2 \text{ } CO_2 / Coal \quad (6)$$

4) 석유의 경우에는, 원유 용도에 따라 열분해 공정을 거쳐 등유, 경유, 윤활유, 가솔린 등으로 분리된다. 수요가 제일 많은 가솔린의 연소 과정을 살펴보면 식 (7)과 같다. 석유 연료에서 생성된 이산화탄소의 비율은 3.09로 계산된다(식 (8)). 즉, 1톤의 석유를 통해 3.09톤의 CO_2 가 배출된다는 뜻이다.



$$\frac{8CO_2 (8 \times 44 \text{ g/mole})}{C_8H_{18} (114 \text{ g/mole})} = 3.09CO_2 / Oil \quad (8)$$

5) 가스의 경우에는, 천연가스로 메탄, 에탄, 프로판, 부탄과 같은 C_1 - C_4 알칸 혼합물로 구성된다. 이 중에서 60~90%를 차지하는 메테인의 경우를 살펴보면, 가스 연소 과정은 식 (9)에 있고, 이 과정에서 생성된 이산화탄소 비율은 2.75이다(식 (10)). 즉, 1톤의 석유를 통해 2.75톤의 CO_2 가 배출된다는 뜻이다.



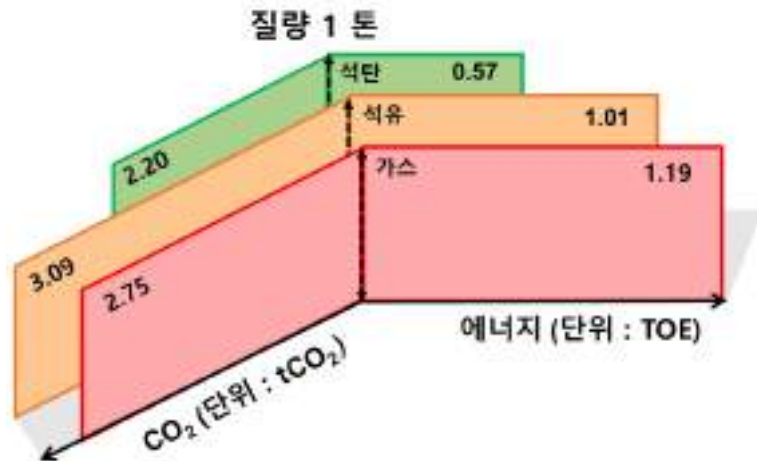
$$\frac{CO_2 (44 \text{ g/mole})}{CH_4 (16 \text{ g/mole})} = 2.75CO_2 / Gas \quad (10)$$

05 ME plot; 에너지와 온실가스 측면에서 화석연료의 표준화된 비교

가. 화석연료의 매스-에너지 플롯

- 1) 화석연료의 물질 및 에너지 수치를 통해 화석연료별로 얼마만큼의 에너지를 내는지(질량 대비 열량), 화석연료별로 얼마만큼의 이산화탄소를 배출하는지(질량 대비 이산화탄소 발생량)를 설명하였다. 이제 이 두 값을 통해서 에너지 발생 과정에서의 화석연료를 표준화하여 비교할 수 있다.
- 2) 계산 과정(식 (1)~(10))에서 화석연료 질량 1 톤당 생산되는 에너지는 석탄의 경우 0.57 TOE, 석유의 경우 1.01 TOE, 가스의 경우 1.19 TOE이고, 배출되는 이산화탄소량은 석탄의 경우 2.20 톤, 석유의 경우 3.09 톤, 가스의 경우 2.75 톤임을 알 수 있었다.
- 3) 이 화석연료 질량 1톤을 기준으로 하여 생산하는 에너지와 배출되는 이산화탄소 계수를 비교하여 한번에 표현한 것이 <그림 5.7>과 같고 매스-에너지 플롯(Mass-Energy plot, ME plot)이라고 보고하였다(윤제용, 2023). 표준화된 관계, 즉 에너지와 발생한 온실가스가 화석연료를 기반으로 어떻게 연관돼 있는지를 ME plot을 통해 한눈에 파악할 수 있다.

<그림 5.7> 화석연료의 Mass-Energy Plot



주: 화석연료별 에너지 발생(TOE)과 온실가스 배출량(tCO₂)의 관계를 보여주는 관계도
 자료: 윤제용, 2023

나. 에너지와 이산화탄소로 재구성한 매스-에너지 플롯

- 1) 기준을 화석연료 질량으로 하는 것이 아니라, 발생한 에너지 혹은 배출되는 이산화탄소로 하여 ME plot을 재구성할 수도 있다.
- 2) 이를 위해, 앞서 계산된 질량당 에너지 발생량과 이산화탄소 배출량을 이용하여 에너지 발생량당 이산화탄소 배출량을 구할 수 있다(식 (11)~(13)). 이러한 환산 과정을 거쳐 계산된 질량, 에너지, 이산화탄소를 각각 기준으로 전체 환산계수를 비교하면 아래 <표 5.2>와 같다.
- 3) 표에 나타난 환산계수를 사용하면 ME plot은 기준 z 축을 에너지, 화석연료, 이산화탄소 배출량 중 무엇으로 설정하느냐에 따라 얼마든지 변형될 수 있고 이 변형된 ME plot이 <그림 5.8>에 나타나 있다.

$$\text{석탄} \quad \frac{2.20 \text{ tCO}_2}{\text{톤}} \div \frac{0.57 \text{ TOE}}{\text{톤}} = 3.86 \text{ tCO}_2 / \text{TOE} \quad (11)$$

$$\text{석유} \quad \frac{3.09 \text{ tCO}_2}{\text{톤}} \div \frac{1.01 \text{ TOE}}{\text{톤}} = 3.06 \text{ tCO}_2 / \text{TOE} \quad (12)$$

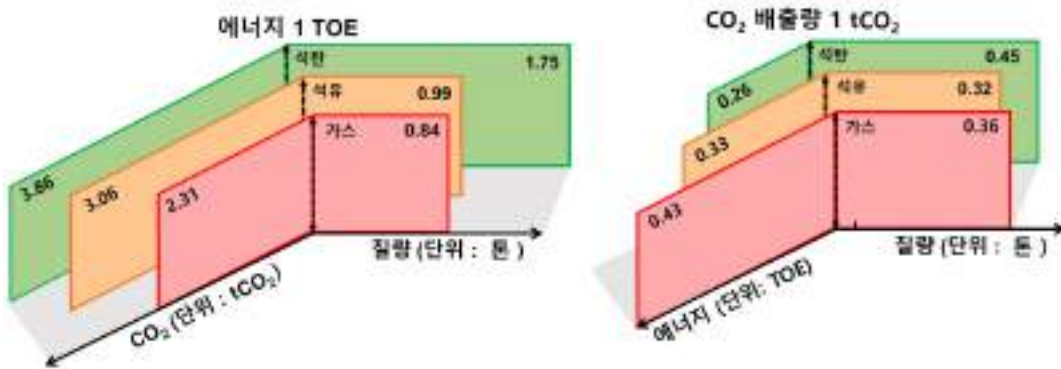
$$\text{가스} \quad \frac{2.75 \text{ tCO}_2}{\text{톤}} \div \frac{1.19 \text{ TOE}}{\text{톤}} = 2.31 \text{ tCO}_2 / \text{TOE} \quad (13)$$

<표 5.2> 화석연료별 질량, 에너지, 온실가스(이산화탄소)를 기준으로 한 환산계수

구분	톤(질량)	TOE(에너지)	tCO ₂ (이산화탄소)
톤(질량)	1 톤	0.57 TOE(석탄)	2.20 tCO ₂ (석탄)
		1.01 TOE(석유)	3.09 tCO ₂ (석유)
		1.19 TOE(가스)	2.75 tCO ₂ (가스)
TOE(에너지)	1.75 톤(석탄)	1 TOE	3.86 tCO ₂ (석탄)
	0.99 톤(석유)		3.06 tCO ₂ (석유)
	0.84 톤(가스)		2.31 tCO ₂ (가스)
tCO ₂ (이산화탄소)	1 tCO ₂	0.26 TOE(석탄)	1 tCO ₂
		3.06 TOE(석유)	
		2.31 TOE(가스)	

주: 예시) 1톤 질량의 석탄에서 발생하는 에너지 0.57 TOE

<그림 5.8> 에너지(1TOE), 이산화탄소(tCO₂)를 기준으로 보여준 ME Plot



- 4) ME plot을 활용하면 화석연료별 특징에 대해 많은 부분을 직관적으로 이해할 수 있다. 예를 들어 <그림 5.8>의 왼쪽 ME plot에서 보면, 가스는 동일한 1 TOE의 에너지를 생산하는 데 드는 화석연료의 양이 0.84 톤으로, 석유와 석탄에 비해 적게 발생하며, 이산화탄소의 배출량도 2.31 톤으로 가장 적다는 것을 알 수 있다. 즉, 상대적으로 많은 양의 가스를 사용해도 이산화탄소 발생량이 적으므로 온실가스 배출을 줄이려면 가스로 인한 발전을 늘려야 한다는 방향성 또한 확인할 수 있다.

06 화석연료별 온실가스 배출량 분석 방법의 일반적인 적용

가. 화석연료별 이산화탄소 예측 및 측정

- 1) <그림 5.9>에 화석연료 소비량과 ME plot 환산계수를 통해 계산된 온실가스 배출량 예측값을 나타내었다. ME plot을 활용하여, 화석연료의 흐름을 따라가면 화석연료별 온실가스 배출량을 분석하는 방법을 일반적으로 적용할 수 있다.

<그림 5.9> 국내 화석연료별 이산화탄소 예측값과 측정값 비교



주: a)는 「2019 에너지통계연보」, b)는 「2020 국가 온실가스인벤토리 보고서」, 이산화탄소 예측값은 ME plot 환산계수를 이용하였다.
자료: 에너지경제연구원, 2019; 환경부 온실가스종합정보센터, 2020

- 2) <그림 5.8>의 ME plot을 통해 1 톤 석탄으로부터 2.2 톤의 이산화탄소가 배출되고, 석유로부터는 3.09 톤의 이산화탄소, 가스로부터는 2.75 톤의 이산화탄소가 배출된다는 환산계수를 얻을 수 있다. 다시 2018년 대한민국의 예시로 돌아가 보면, 2018년 화석연료 소비량은 석탄 1.41억 톤, 석유 0.61억 톤, 가스 0.42억 톤이다. 이 값에 각각 환산계수를 곱하면 이산화탄소 배출량이 나오므로 화석연료 소비량을 알고 있으면 환산계수를 통해 이산화탄소 배출량을 추정할 수 있다.
- 3) 이 예측값과 실제 통계의 측정값은 약 5~10%의 오차를 보이는데, 그 이유는 ME plot 환산계수가 화석연료의 종류(석탄 내에서 무연탄·유연탄, 석유 내에서 휘발유·등유·경유, 가스 내에서 프로판·부탄 등)에서 나오는 발열량 차이 등을 고려하지 않았고, 수입한 화석연료의 사용이 당해 연도에 사용되지

않고 이월되거나 환산계수를 얻는 과정에 많은 가정이 들어가 있기 때문이다.

- 4) 하지만 오차가 총량의 규모에 비해 크지 않고, 화석연료별 성격을 한눈에 보여주기에 ME plot의 환산계수는 편리함과 직관성의 측면에서 활용도가 높다.
- 5) ME plot의 환산계수를 전 세계 화석연료 흐름에 적용할 수 있다. 2018년 한국에서 계산된 방식을 동일하게 2019년 전 세계에 적용한 결과는 <그림 5.10>과 같다.

<그림 5.10> 전 세계 화석연료별 이산화탄소 예측값과 측정값 비교



주: a)는 「World Energy Outlook 2019」, b)는 「Global CO₂ emissions in 2019」, 이산화탄소 예측값은 ME plot 환산계수를 이용하였다.

자료: IEA, 2019b; 2020

- 6) IEA에서 제시한 2019년 전 세계의 화석연료 소비량은 석탄 62.6억 톤, 석유 42.9억 톤, 가스 25.9억 톤이다. 이 양에 ME plot 환산계수를 곱하면 석탄으로부터 138억 톤, 석유로부터 132억 톤, 가스로부터 71억 톤의 이산화탄소 배출을 추산할 수 있다. 이는 실제 통계의 측정값과 비교해 보면 약 8~12%의 오차를 보임을 알 수 있다. 한국과 전 세계 두 가지의 예시를 통해 우리는 화석연료 흐름, 즉 화석연료를 기반으로 에너지와 온실가스 배출량이 어떻게 연관되어 있는지 확인해 볼 수 있다.

07 시사점 및 제언

- 가. 본 장에서는 화석연료에 기반한 기술 체계에서 비화석연료에 기반한 기술 체계로 전환하기 위한 공학 체계 전반을 탄소중립 엔지니어링으로 정의하고 이와 같은 기술 체계를 갖추기 위해 화석연료의 생산(또는 수입), 가공, 소비의 흐름을 통하여 우리나라 탄소중립의 특성을 이해하고자 하였다. 화석연료의 양과 에너지 생산 그리고 온실가스의 발생은 항상 동시에 고려해야 하는 지표이며 이를 손쉽게 표현하는 Mass-Energy plot을 제시하고 이와 같은 관계가 어떻게 도출되는지를 설명하였다. ME plot은 화석연료에 기반한 우리 사회를 직관적이고 이해하기 쉽게 설명하는 지표이며 에너지를 생산을 위해 화석연료를 사용하는 한국과 글로벌 사회의 온실가스 특성을 방대한 측정 자료에 의하지 않고 전체적인 성격을 간단히 파악할 수 있도록 소개하였다.
- 나. 이러한 방법론은 글로벌 또는 국가 단위에 한정되는 것은 아니며 산업공정과 단지 또는 마을, 도시 지역 단위의 탄소 배출의 특성을 손쉽게 파악할 수 있게 한다. 또한 대학 캠퍼스의 탄소중립 전환 성격을 분석하거나 각 가정의 온실가스 배출 특성을 파악하는 데도 활용할 수 있다. 더 나아가서 온실가스 배출을 줄이는 탄소중립을 위한 직관적 대책이 무엇인가 하는 아이디어를 손쉽게 떠올릴 수 있을 뿐만 아니라 이에 맞는 탄소중립 엔지니어링 방향을 제시할 수 있다.
- 다. 기후위기 극복을 위한 탄소중립 전환은 국민적 이해에 바탕을 둔 지속적인 지지에 의존하지 않으면 안 된다. 그렇지만 국가 정책에 의한 하향식 탄소중립 정책 입안이나 홍보는 일반 국민이 기후위기의 본질을 이해하는 데 어려움을 준다. 탄소중립 엔지니어링에 입각한 분석 방법은 전문적 지식이 없는 일반 국민도 탄소중립 전환에 무엇이 필요한지를 이해하는 데 도움을 준다. 이런 과정에서 여러 종류의 화석연료량, 에너지 생산, 온실가스의 생성 등을 나타내는 화석연료의 수입, 가공, 사용을 포함하는 라이프 사이클로 우리나라 탄소중립을 설명하면 국가 정책을 이해하고 수립하는 데 도움이 된다. 뿐만 아니라 국민들의 탄소중립 전환에 홍보와 참여를 유인하는 데도 도움이 될 것이다. 분야별 특성과 전통에 기인한 다양한 단위들의 통일성과 일관성을 유지하는 일은 향후 과제이다.



<참고문헌>

- 대한석탄공사(2001). “석탄과 연탄”, 대한석탄공사 50년사.
- 에너지경제연구원(2019). 2019 에너지통계연보,
- 윤재용(2023). “이전의 공학은 잊어라, 새로운 ‘탄소중립 엔지니어링’”, 집현문서 03-05-2023, (사)집현네트워크.
- 주화주·윤재용(2022). “기후위기 극복을 위한 화학산업 분야 탄소중립 엔지니어링에 대한 제언”, 공업화학전망, 제25권 제2호, pp. 34-39.
- 환경부 녹색기술개발과(2021). 2020 환경통계연감. 환경부.
- 환경부 온실가스종합정보센터(2020). 2020 국가 온실가스 인벤토리 보고서,
- Grammelis, P., Margaritis, N., & Karampinis, E.(2016). “2 - Solid fuel types for energy generation: Coal and fossil carbon-derivative solid fuels”, Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels. Sawston: Woodhead Publishing, pp. 29-58.
- IEA(2019a). Global Energy & CO2 Status Report 2019, <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- IEA(2019b). World Energy Outlook 2019, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA(2020). Global CO2 emissions in 2019, <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>
- International Gas Union(2012). Natural Gas Conversion Guide,
- NIST(2023). NIST Chemistry WebBook, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>
- OECD(2023). “OECD - Electricity and heat generation”, IEA Electricity Information Statistics (database), <https://doi.org/10.1787/data-00457-en>
- U.S. Energy Information Administration(n.d.). Coal explained, <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/>





부록

*보고서 요약 자료

기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제안

위원장 하경자 부산대 교수
이공주 이화여대 교수

Table of Contents

1. 기후, 기후변화, 극한기후

(지구온난화와 극한기후의 관계, 기후변화와 극한기후에 대응 전략과 현실적 조치)

2. 극 지역의 기후변화와 시사점

(북극 증폭 현상과 기후변화, 남극 기후변화 특성과 의미)

3. 환경문제

(기후변화에 의한 대기환경 영향, 탄소중립 실현에 의한 대기환경 영향)

4. 탄소흡수원 현황 및 증진 방안

(탄소흡수원 개념과 국내 현황, 육상 생태계 기반 탄소흡수 증진 기술)

5. 탄소중립엔지니어링을 통해서 본 대한민국 온실가스

(한국 화석연료 사용트렌드와 탄소 배출 성격, ME Plat: 에너지와 온실가스 측면에서 화석연료의 표준화된 비교, 화석연료별 온실가스 배출량 분석방법)

01. 기후, 기후변화, 극한기후

기후의 이해

- 기후변동의 자연적 원인
- 인간 활동과 기후변화의 연관성

기후변화의 원인과 과정

- 기후변화에 영향을 끼치는 인자
- 기후모델과 미래전망

극한기후의 이해

- 극한기후 종료와 예시
- 극한기후와 인간의 건강, 경제, 생태계에 끼치는 영향

지구온난화 극한기후의 관계

- 지구온난화와 극한기후의 상호작용
- 최근에 발생한 극한기후의 사례
- 극한기후의 미래 전망

기후변화와 극한기후에 대응하는 전략

- 국제적 대응 노력과 협약
- 정부와 지자체의 대응 정책
- 기업과 국민의 역할

극한기후 대응을 위한 현실적 조치

- 기후변화 적응과 완화
- 극한기후에 대비하는 방안
- 지속 가능한 개발과 미래를 위한 전략

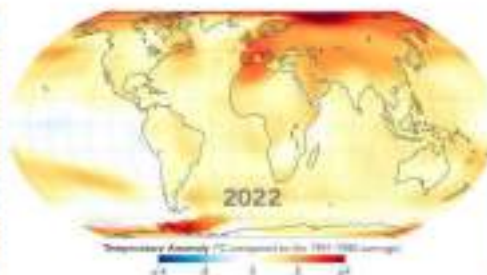
기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

3

02. 극지역의 기후변화와 시사점

- 많은 지구환경학자들은 북극과 남극이 지구 기후변화의 ‘등대’, ‘북극은 지구의 심장’, ‘북극의 경고’ 등을 주장
- 극지역의 기후변화가 야기할 수 있는 다양한 영향은 전 지구적이며 그 영향의 정도가 작지 않음

북극 기후변화



남극 기후변화



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

4

02. 극지역의 기후변화와 시사점

- 북극 온난화가 중위도에 어떤 기작에 의해 한파를 유발하는지 정확히 알 수 있다면 계절 규모의 예측에 도움
- 장기간의 관측과 함께 기후모델들의 문제점 파악과 개선을 통한 인위적인 요인에 기인하는 남극 해빙의 변화와 자연 변동성의 특성에 대한 이해 향상이 필요
- 극 지역 기후변화를 완화하고 예방하기 위한 주요 정책 및 조치 사항들을 수립 필요



03. 환경문제

- 탄소중립을 달성하더라도 기후변화는 계속될 것으로 예상되며, 그에 따라 지구 환경도 변화 예상
 - 탄소중립이 2050년 달성되더라도 기존 배출된 온실가스에 의한 기후변화 영향은 계속될 것으로 예측됨
 - 기후변화 중에서 특히 대기환경에 큰 영향을 줄 것으로 예상
 - 기상조건인 온도, 습도, 풍속 등도 변할 것으로 예상되며 이 변화로 대기에서 배출/생성되는 대기오염물질의 종류와 양의 변화 예상
- 탄소중립을 달성하기 위한 과정에서 대기오염물질의 발생 특성이 변화할 것으로 예상
 - 화석연료 저감으로 황산화물 등의 대기오염물질 발생은 감소할 것으로 예상
 - 일부 분야(폐기물 재활용, CCUS)에서 새로운 대기오염물질 발생원이 발생 가능함

03. 환경문제

- 우리나라에서 탄소중립과 대기환경에 관련한 대책을 수립하기 위해서는 단기간, 장기간을 구분하여 정책을 수립하는 것이 필요
- 성공적인 사회 구조 변화와 탄소중립과 대기환경 개선을 위해서는 참여하는 정책협의, 수립 체계 수립과 이행이 필수적



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

7

04. 탄소흡수원 현황 및 증진 방안

- 지구 시스템의 탄소순환 과정을 통해 육상 생태계는 모든 인위적 탄소 배출량의 약 29%를 흡수하고, 해양 생태계는 약 26%를 흡수
 - 탄소흡수원은 대기 중 탄소를 격리와 저장하며 생태계 생물다양성 보전의 차원에서도 매우 중요한 역할을 수행
 - 탄소배출의 대부분은 육상에서 일어나고 있으며 그중 산림생태계는 전체 육상 생태계 탄소저장량의 절반을 차지



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

8

04. 탄소흡수원 현황 및 증진 방안

□ 육상 생태계 탄소흡수 증진을 위한 바이오차(Biochar) 활용

- 바이오차는 산소 공급을 제한한 상태에서 유기물을 고열로 분해하는 열분해 과정에서 만들어지는 숯
- IPCC에서 인정하는 이산화탄소 저감기술 중 하나로 전지구 탄소 잠재량은 연간 약 7억톤 수준으로 예상

□ 탄소중립에 필요한 국내외 탄소흡수원 증진계획을 수립 및 실천

- 육상 생태계, 해양 생태계 모두에서 잠재적 탄소흡수원을 발굴·연구하여 더욱 합리적이고 객관적인 법령의 보완이 필요
- 지역의 여건을 충분히 고려한 지역별 탄소흡수원 증진계획의 수립이 필요

05. 탄소중립엔지니어링을 통해서 본 한국 온실가스 배출 특성의 간편 이해

- 화석연료에 기반한 기술체계를 비화석연료를 기반한 기술체계로 전환하기 위한 공학체계를 탄소중립 엔지니어링이라고 칭함
- 온실가스 배출량은 온실가스 배출을 한눈에 확인할 수 있으나 온실가스의 근원이 되는 특정 화석연료의 흐름을 파악하기 어려움

탄소중립 엔지니어링과 화석연료 중심 엔지니어링 비교



자료: 윤복용, 2025

온실가스 배출량



자료: 한국 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 전 세계 Emissions, 2019

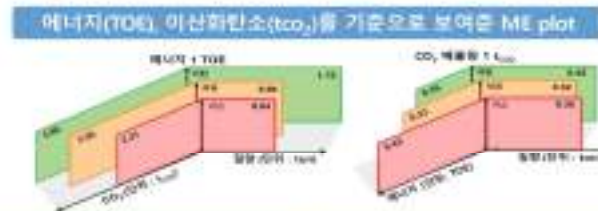
05. 탄소중립엔지니어링을 통해서 본 한국 온실가스 배출 특성의 간편 이해

□ ME plot

- 화석연료에 기반한 우리 사회를 직관적이고 이해하기 쉽게 설명하는 지표
- 에너지와 온실가스 측면에서 화석연료의 표준화된 비교
- ME plot을 활용하면 화석연료별 특징과 특성에 대해 많은 부분을 직관적으로 이해
- 온실가스 특성을 방대한 측정자료에 의하지 않고 전체적인 성격을 알 수 있음

□ ME plot 분석 방법

- 전문적 지식이 없는 국민도 탄소중립 전환에 필요한 것이 무엇인지 이해하는데 도움
- 화석연료의 수입, 가공, 사용을 포함하는 라이프 사이클로 탄소중립을 설명하면 국가 정책을 이해하고 수립하는데 도움



기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

11

Summary

1. 기후변화의 원인과 과정을 이해할 수 있는 기후모델에 대해 설명하고, 극한기후(폭염, 한파, 집중호우, 극한 강풍 등)와 지구온난화와의 관계를 이해함. 이러한 기후변화와 극한기후에 대응하는 전략으로 국제 협력, 정부와 지자체, 기업과 개인의 역할을 제시하고, 이에 대응 하기 위한 현실적인 조치를 제시함
2. 기후에 영향을 주고 있는 북극 증폭 현상과 기후환경, 중위도와 극한기후 변화에 대한 이해, 남극의 기후변화에 대한 이해를 통해 극 지역 기후변화를 막기 위한 국제 협력 등 시사점 및 정책을 제언함
3. 기후변화와 탄소중립 달성과정에서 대기환경 변화는 크게 기후변화에 의한 영향과 탄소중립 실현 과정에서의 영향으로 나눌 수 있고, 이를 다시 단기간, 장기간으로 구분하여 정책을 협의하고 수립 하여, 이를 이행하는 것이 필수적임을 제언함
4. 탄소중립 실현에 필요한 탄소흡수원에 대한 역할을 설명하고, 육상생태계와 해양생태계의 자연 탄소 흡수원으로 산림 해양, 토양, 농지, 습지 등과 다양한 그린 인프라, Biochar의 탄소흡수 증진기술에 대해 설명하고, 이를 위해 탄소흡수원 증진을 통해 탄소중립에 필요한 국내외 탄소흡수원 증진계획을 수립하고 실천을 제언함
5. 새로운 개념인 탄소중립 엔지니어링을 통해 본 화석연료의 질량과 에너지의 상관성, 국내 온실가스 배출 특성을 분석하고 국내 화석연료의 사용 흐름을 파악함. 한국의 탄소배출 성격을 분석하여 화석 연료별 물질 및 에너지 관계표를 만들고, 표준화를 통해 탄소배출의 특성을 쉽게 파악하여 이의 대책을 쉽게 할 수 있는 방법과 실천에 대해 제언함

기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제언

12

KAST Research Report 2023
한림연구보고서 152

기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제안

Major Projects for Carbon Neutrality Based on
Climate and Environmental Information

발 행 일 2023년 12월
발 행 처 한국과학기술한림원
발 행 인 유욱준
전화 031) 726-7900
팩스 031) 726-7909
홈페이지 <http://www.kast.or.kr>
E-mail kast@kast.or.kr
편집/인쇄 경성문화사 02) 786-2999
I S S N 2799-5135
977279951300952 (세트)

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의 없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.

기후환경 자료기반 탄소중립의 주요 과제 제안



이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로
우리나라 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.