



논문

2050 탄소중립에 따른 대기·기후·에너지 통합관리 방향에 관한 탐색적 연구

A Exploratory Study on the Direction of Integrated Management of Atmosphere, Climate and Energy according to the 2050 Carbon Neutrality

이지윤, 유승직¹⁾, 송창근²⁾, 이현진, 양혜영, 장명진, 안영환*

숙명여자대학교 기후환경에너지학과, ¹⁾숙명여자대학교 기후환경융합학과,
²⁾울산과학기술원 도시환경공학과

Ji Yun Lee, Seung Jick Yoo¹⁾, Chang Keun Song²⁾, Hyeon Jin Lee,
Hye Young Yang, Myeong Jin Jang, Young Hwan Ahn

Department of Climate, Environment and Energy Studies, Sookmyung Women's University,
Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Convergence of Climate and Environmental Studies, Sookmyung Women's University,
Seoul, Republic of Korea

²⁾Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Republic of Korea

접수일 2025년 4월 13일
수정일 2025년 6월 10일
채택일 2025년 6월 16일

Received 13 April 2025
Revised 10 June 2025
Accepted 16 June 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-710-9207
E-mail : yh.ahn@sookmyung.ac.kr

Abstract This study categorizes the reduction measures of Korea's carbon neutrality strategy based on a conceptual model that examines the interrelationships between the atmosphere, climate, and energy, and analyzes the co-benefits of reducing air pollutants for each measure from both direct emission and life-cycle perspectives. The analysis results indicate that reduction measures related to energy demand management and energy efficiency improvement have synergy effect on reducing both air pollutants and greenhouse gases in terms of both direct emissions and life-cycle aspects. Among the demand management types, measures such as raw material substitution and certain fuel substitution types, including hydrogen and biofuel, exhibit trade-off effect or require further research to assess their impacts. Based on these findings, this study proposes response directions for integrated management of air, climate, and energy according to the type of co-benefits, and suggests key research directions that should be pursued to advance integrated management.

Key words: Atmosphere, Climate, Energy, Carbon neutrality, Integrated management

1. 서론

IPCC (2018)에서 1.5°C 목표 달성을 위해서 2050년 에 전 지구적으로 탄소중립을 달성해야 한다는 과학적 근거를 제시한 이후 2025년 2월 기준으로 140개국 이상이 중장기 온실가스 감축 목표로 탄소중립을 공표하였다. 우리나라는 2020년 10월에 2050년 넷제로 (net zero)를 선언하고 이듬해에 법제화하였다. 미국, 일본과 영국은 2050년 넷제로, EU는 2050년 기후 중

립 (climate neutral), 중국은 2060년 탄소중립 (carbon neutral)을 달성할 것임을 공표한 바 있다.

탄소중립이 상수가 된 환경에서 온실가스 감축정책의 효과성 및 달성 가능성 제고와 더불어 다른 정책 영역과의 공편익 (co-benefit)을 높이기 위해, 국제사회에서는 대기오염물질과 온실가스를 통합하여 관리할 필요가 있음을 강조한다. 유엔기후변화협약 (United nations framework convention on climate change, UN FCCC)에서는 지속 가능한 발전의 측면에서 기후변화

대응을 강조하며, 동일한 맥락에서 녹색기후기금과 관련한 프로젝트 진행 시, 기후변화 대응과 동시에 대기질 개선 등 환경 공동 이익을 유발할 수 있는 프로젝트를 진행할 것을 권고한다(GCF, 2020). 기후 및 청정 대기 연합(Climate and clean air coalition, CCAC)에서는 메탄, 블랙카본 등 단기체류성 기후오염물질(short-lived climate pollutant, SLCP)이 가진 대기오염 영향에 주목하여, 기후 안정화와 대기질 개선을 위한 SLCP의 관리 방안을 제시한다.

다수의 국가·지역에서는 대기·기후, 나아가 대기오염물질과 온실가스 배출의 원인이 되는 에너지까지 포괄적으로 통합관리하기 위한 정책적 수단을 강구하고 있다. 소위 대기·기후·에너지(air·climate·energy, ACE) 통합관리이다. 프랑스와 벨기에의 브뤼셀 수도권 지역은 지역·지방 수준에서 기후·대기·에너지 통합 정책을 수립하였다. 특히 캐나다 벤쿠버 광역도시권은 정책 수단별 온실가스 및 대기오염물질 감축의 공편익을 정성 분석한 결과를 기반으로 대기·온실가스를 통합관리하기 위한 정책을 수립하였다(Metrovancouver, 2021). 한편 US EPA (Environmental protection agency)에서는 대기오염물질, 기후변화, 에너지 생산 및 소비의 상호관계에 관한 연구를 수행하고 있으며(US EPA 2022, 2020, 2015), 독일 연방환경부 산하의 환경청에서는 대기·기후·에너지의 상호 관련성 조사 및 예측을 수행하여 관계부처에 과학적 정보에 기반한 정책적 조언을 제공한다.

우리나라에서도 대기·기후·에너지 통합관리의 필요성에 대해서 공감대는 확보되었으나, 구체적인 통합관리 대책과 이를 지원하기 위한 연구는 제한적인 상황이다. 기후 위기 대응 최상위 계획인 탄소중립·녹색성장 기본계획, 중장기 에너지 종합계획인 에너지 기본계획, 대기 정책 최상위 계획인 대기환경개선 종합계획 등은 지속가능한 발전과 기후변화 대응 목표를 고려한 정책 방향을 제시하고 있다는 측면에서 일정 수준 정합성을 확보하고 있으나, 상호 공편익을 고려한 정책 수단을 제시하고 있지는 않다는 한계를 보인다. 2022년 발표된 ‘제3차 대기환경개선 종합계획’

에는 대기오염·온실가스 정책을 연계하고 공편익 분석을 위한 연구 지원을 확대하겠다고 밝히고 있으나, 구체적 실행계획은 확인하기 어렵다.

체계적인 중장기 통합관리정책을 수립하기 위해서는 대기·기후·에너지 정책의 상호작용을 넓은 시야로 포착하여, 관련 정책 수단의 공편익을 검토할 필요가 있다. 이에 본 연구는 대기·기후·에너지 상호관계에 대한 개념적 모형을 개발하고 우리나라 탄소중립 전략의 대기 정책에 대한 공편익을 직접배출 및 전 과정적 관점에서 분석하고자 한다. 또한 분석 결과를 기반으로 대기·기후·에너지 통합관리를 위한 향후 연구 방향을 모색한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 대기·기후·에너지의 공편익에 관한 선행 연구를 검토한 결과를 토대로 본 논문의 연구 방향을 제시한다. 또한, 대기·기후·에너지의 상호작용에 대한 개념적 모델을 제시하고 이를 기반으로 본 연구의 연구모델과 연구방법을 설명한다(제2장). 연구방법을 토대로 전환, 산업, 수송, 건물부문의 감축 수단별 공편익 유형을 구분한다(제3장). 이후 부문별·감축 수단별 공편익 유형분석 결과를 종합하고 공편익 유형별 대기·기후·에너지 통합관리를 위한 전략적 대응 방향과 향후 연구가 필요한 분야를 제시한다(제4장). 마지막으로 제5장은 본 연구의 요약, 의의와 한계에 관한 내용으로 구성한다.

2. 연구 설계

2.1 선행 연구 검토

2.1.1 공편익

대기, 기후, 에너지 정책의 공편익을 분석한 다수의 선행 연구에서 공편익의 개념은 연구자에 따라 다양하게 정의되고 있다(표 1 참조). Kim (2019)과 Kim and Choi (2017)는 공편익을 하나의 목표를 가진 정책 혹은 방안이 다른 목표에 미칠 수 있는 긍정적 효과로 정의하였다. Karlsson *et al.* (2020)은 공편익의 차원을 상승효과(synergy)의 방향성에 따라 기후정책의 타본

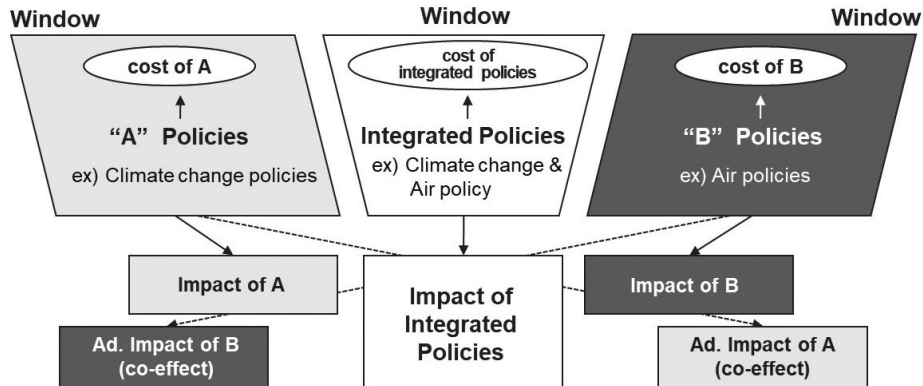
Table 1. Definition of co-benefit.

Source	Definition of co-benefit
Kim (2019)	• The positive impact that a policy or measure targeting one goal can have on other goals
Kim and Choi (2017)	• A measure in one area that also has a positive impact on another area
Karlsson <i>et al.</i> (2020)	• Benefits from climate change mitigation can be classified into three types: ① Co-benefits directly associated with climate policies, ② Climate-related co-benefits emerging from non-climate policies, ③ Synergistic benefits from multi-objective policies
Mayrhofer and Gupta (2016)	• A win-win strategy that achieves multiple objectives through a single policy instrument ① Climate co-benefit: The unintended but beneficial effects on climate change mitigation or adaptation that result from policies not directly aimed at addressing climate change ② Development co-benefit: The positive social or economic impacts that arise in the process of addressing climate change ③ Climate and other goal co-benefit: Synergistic effects that result when policies are designed and implemented to simultaneously consider climate change and objectives in other sectors
Deng <i>et al.</i> (2018)	• Positive co-benefits, ancillary benefits and adverse side effects
Bollen <i>et al.</i> (2009)	• Benefits and costs from policies • Co-benefits can be understood through three perspectives: ① The benefits and costs of climate change mitigation policies (including the benefits from greenhouse gas reduction and ancillary benefits to other policy areas), ② The benefits and costs of other policies (including the direct benefits from non-climate policies and ancillary greenhouse gas reduction benefits), ③ An integrated approach that considers the external effects of both climate change mitigation policies and other sectoral policies.

야 공편익, 타정책의 기후 관련 공편익, 다중 목표를 가진 정책 간 시너지효과로 구분한다. 이와 유사한 접근으로 Mayrhofer and Gupta (2016)는 공편익을 하나의 정책 수단으로 두 가지 이상의 목표를 이루는 win-win 전략으로 정의하고 기후변화 관련 공편익을 정책의 우선순위와 기대효과에 따라 세 가지 유형으로 구분하였다. 기후 공편익(climate co-benefit)은 기후변화와 직접적 관련이 없는 정책 시행의 부수적 이익으로 기후변화 대응(온실가스 감축 및 기후변화 적응) 효과가 나타난 유형이며, 개발 공편익(development co-benefit)은 기후변화 대응 과정에서 사회·경제에 기여하는 유형을 의미한다. 두 개의 유형은 기후변화 대응정책과 다른 부문의 정책 중 무엇을 우선순위로 두었는지에 따라 구분된다. 세 번째 유형은 기후변화 대응과 다른 부문의 목표를 동시에 고려하여 정책을 수립 및 시행함에 따라 발생하는 상보적 공편익(climate and other goal co-benefit)이다. 정책의 우선순위 없이 두 가지 이상의 목표를 동시에 달성하고자 하

는 유형으로 상호작용에 따라 발생하는 시너지효과를 추구한다.

한편, Deng *et al.* (2018)은 공편익을 특정 정책 수단에 의해 다른 분야에 미친 긍정적 영향만이 아니라 부정적 영향을 포괄하는 개념으로 정의하였다. 보다 구체적으로 Bollen *et al.* (2009)은 기후변화 완화정책의 공편익을 3가지 창(window)으로 분석할 수 있으며, 분석 시 정책 간 길항효과(trade-off)와 공동 비용(co-cost)을 고려할 필요가 있다고 제시한다(그림 1 참조). 첫 번째 유형은 기후변화 완화 정책의 편익(온실가스 감축에 따른 편익과 다른 정책에의 부수적 편익)과 비용을 고려하는 유형이며, 두 번째 유형은 다른 정책의 편익(다른 부문의 정책에 따른 편익과 온실가스 감축의 부수적 편익)과 비용을 반영하는 유형이다. 세 번째는 기후변화 완화정책과 다른 정책의 외부효과를 모두 고려하여 통합적으로 접근하는 유형으로 세 번째 유형으로 공편익 분석 시, 최적의 정책 수단을 탐색할 수 있다고 제시한다.



* Source: Modified from Bollen *et al.* (2009)

Fig. 1. Three windows in the analysis of co-effects.

본 연구에서는 공편익을 특정 분야의 정책이 다른 분야에 미친 긍정적 및 부정적 영향으로 정의한다. 또한, Bollen *et al.* (2009)이 제시한 공편익에 대한 접근 방식 중 첫 번째 유형인 기후변화 온실가스 감축정책에 따른 편익과 다른 정책에의 부수적 편익과 비용에 초점을 맞추어 대기·기후·에너지의 공편익을 검토한다.

2.1.2 대기·기후·에너지 공편익

대기·기후·에너지 공편익에 대한 연구를 수행한 국외 연구로 Deng *et al.* (2017)은 온실가스 감축으로 인한 대기오염, 생태계, 경제, 건강 등의 공편익을 주제로 한 출판물(학술논문, 발표논문, 서평 등)에 대한 서지분석을 진행하고 분석 결과에 기반하여 활발한 연구가 필요한 분야를 제시하였다. 이와 유사하게 Karlsson *et al.* (2020)은 기후정책을 중심으로 타분야의 공편익을 분석한 선행 연구를 종합 분석한 후 학문 분야 간 연계를 통한 다양한 공편익 연구가 필요하며, 이와 같은 연구 결과를 정책입안 시 반영할 수 있는 정책 프로세스를 구축할 필요가 있음을 제안하였다. 한편, 정량적 연구로 Rao *et al.* (2016)은 6개의 통합평가모형(IAM)을 활용한 다모형 비교연구를 통해, 기후변화 대응 시나리오에 따른 PM_{2.5} 노출 감소 효과를 평가하였다. 연구에서 기후정책과 대기오염 저감

정책이 상호보완적으로 작용할 수 있다는 측면에서, SDGs 달성을 위한 정책 통합의 필요성을 강조한다. Zhang *et al.* (2017)은 CMAQ 모델을 기반으로 국내외 온실가스 감축이 미국의 대기질에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 2050년 기준으로 미국 내 PM_{2.5} 및 오존 관련 조기 사망 회피에 따른 경제적 편익은 온실가스 감축의 한계비용을 상회하는 것으로 나타났다. Vandyck *et al.* (2020)은 기후정책 공편익의 정량화를 위해 다중모형(Multi-model) 시뮬레이션을 진행하였다. 기후정책 강도가 높아질수록 온실가스 1톤당 한계 공편익은 감소할 수 있으나, 대기질 공편익의 총 가치는 증가한다는 결과를 도출하였다. Rauner *et al.* (2020)은 REMIND, GAINS, TM5-FAST를 결합한 모델을 기반으로 기후변화 대응 시나리오에 따른 에너지원별 소비 변화와 대기오염물질 배출량 및 오염도 감소에 의한 건강 영향을 분석하였다. 분석 결과 대기질 규제 수준을 강화하였을 때 나타나는 조기 사망 감소효과보다 기후정책 수준을 강화했을 때 나타나는 조기 사망 감소효과가 더 크게 나타나며, 강한 기후정책은 대기정책에 큰 시너지효과를 보인다고 제시하였다. Rafaj *et al.* (2021)은 AIM/CGE, IMAGE, MES-SAGE, REMIND, WITCH 모델을 기반으로 파리협정의 1.5°C, 2°C 목표 경로 달성에 따른 주요 대기오염물질의 배출량 변화와 대기오염 농도 변화에 따른 조기

사망률의 변화를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과 기후정책과 높은 강도의 대기정책이 동시에 진행되어 강한 시너지효과를 발휘할 때만 조기 사망자 수가 감소하는 경향이 나타난다고 제시하였다.

국내 연구로 Chae *et al.* (2018)은 기후·대기·에너지 정책의 연계·통합을 위한 법제 개선 방향으로 기후·대기·에너지 계획 간 역할과 위상 명료화, 하위정책 수준에서 대기 및 에너지 통합 정책 수립 등을 제시하였다. Chae *et al.* (2010, 2009)은 기후변화 대응 정책으로 인한 온실가스 및 대기오염물질의 비용 대비 저감 효과를 분석하였고 동시감축을 위한 비용효과적인 정책으로 대중교통 이용 확대, 경차 보급, 산업부문 연료 전환(B-C유 → LNG), 저NO_x 보일러 보급 등을 제시하였다. 또한 Chae (2010)은 서울특별시의 NO_x, PM₁₀, CO₂의 동시저감을 가능하게 하는 수단의 비용 효과 분석 결과로 CNG 버스 운영, 산업부문 연료 전환(B-C유 → LNG) 등이 효과적임을 제시하였고 대기질 관리 및 계획과 온실가스 감축정책을 통합적으로 실시할 때 낮은 비용으로 큰 감축효과가 나타난다는 점을 강조하였다. Kim and Choi (2017)는 경기도를 대상으로 대기오염물질·온실가스 동시저감 사업의 사회적 편익과 투자 비용을 비교 분석하였다. 대기 정책의 시행으로 인한 대기오염물질 배출량 감소의 연 편익에 추가하여 부수되는 CO₂ 삭감량에 따른 사회적 편익을 추가하면 연평균 약 7%의 편익이 증가하는 것으로 나타났다. 세부 사업별로 전기차 보급, 집단에너지 보급, 수소연료전지차 보급, 민수용 무연탄 청정연료 전환 등이 CO₂ 삭감에 따른 사회적 편익을 크게 증가시켰다. Kim *et al.* (2020)은 한국의 기후변화 완화 정책이 2050년까지 대기질 개선과 공중보건에 미치는 공편익을 평가하기 위해 AIM/CGE, CMAQ/WRF 모델과 건강영향평가 모델을 활용하여 연구를 수행하였다. 분석 결과 SSP2, SSP3 시나리오에서 조기 사망 감소, 의료비 절감, 노동 손실 감소 등으로 인한 공편익이 완화 비용을 상회하는 것으로 나타났다. Phillips and Jung (2021)은 한국의 전력 생산 부문에서 연료전환을 통한 대기오염(PM_{2.5}) 감소와 기후변화 완화의 공편

익을 분석하기 위해 LEAP-IBC 모델을 활용한 시나리오 분석을 수행하였다. 분석 결과 원자력 발전 용량 최대화에 따른 연평균 조기 사망 감소와 온실가스 감축효과가 비용 대비 가장 큰 것으로 나타났다. Jang *et al.* (2024)은 GUIDE 모델을 활용하여 한국의 기후 및 대기질 정책이 2030년까지 온실가스와 대기오염물질에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 에너지, 산업 연소, 도로 수송부문의 SO_x, NO_x, PM_{2.5}, VOC 감소가 두드러지게 나타났다. Choi *et al.* (2022)은 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안의 감축 수단별 목표를 달성한다는 가정하에 2030년 탄소중립 계획이 이행되지 않았을 경우 대비 온실가스, 미세먼지 및 전구물질의 배출량과 농도 개선 효과를 부문별로 분석하였다. 대부분의 부문에서 온실가스 감축에 대기오염물질이 동시감축되는 효과를 보였으나 석탄발전의 LNG 발전으로의 대체로 다소 NH₃가 증가될 것으로 전망하였고 시멘트 산업의 경우 원료 대체의 대기오염 영향에 대한 배출량 변화 수준은 불확실하다고 제시한다. 후속 연구로 진행된 Choi *et al.* (2023)에서는 대기환경정책의 오염물질 감축 수단 중 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안과 중복되는 수단을 제외한 정책수단이 2030년 온실가스 배출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 다수의 대기환경정책 수단은 온실가스 감축에 긍정적으로 기여하나, 산업부문의 경우 온실가스 감축효과가 미미하고 수송부문의 건설기계 배출허용기준 강화정책, 건설기계 저공해 조치 정책 등은 온실가스 감축효과가 없음을 제시하였다.

선행 연구 검토 결과 정책 간 통합관리 기반 마련을 위해 법·제도 개선 방향을 제시하거나, 대부분의 연구에서 온실가스 감축정책 및 대기 관리정책 중 상승효과(synergy)가 나타날 것으로 예상되는 정책 수단을 중심으로 직접배출의 범위에서 온실가스 및 대기오염물질 저감 편익을 분석하는 것으로 나타났다(표 2 참조). 이는 기존에 대기·기후·에너지의 공편익에 대한 정량적 연구가 다수 진행되었으나, 이들 간의 상호 영향 관계를 심도 있게 고찰한 결과를 토대로, 종합적으

Table 2. Prior research on the co-benefits of air quality, climate change, and energy.

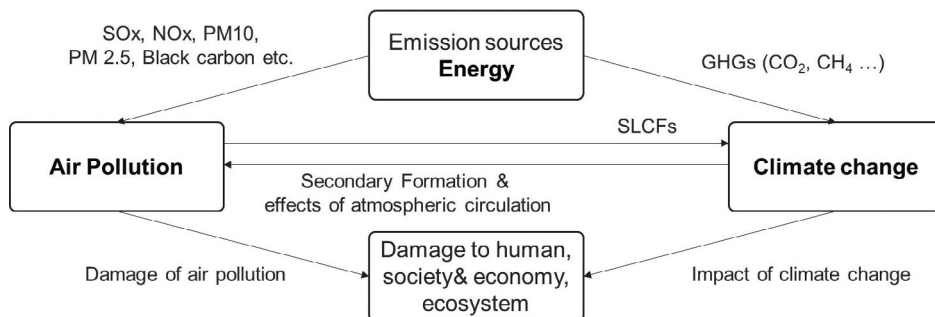
Source	Classification	Content
Deng <i>et al.</i> (2018)	Systematic Literature Review, Bibliometric Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Systematic literature review, bibliometric analysis, and network analysis on studies related to co-benefits of air quality, climate, and energy • (Key findings) Most studies on co-benefits focus on the sectors of energy transition, transportation, and residential emissions. Indicates a need for more active research in other sectors
Karlsson <i>et al.</i> (2020)	Systematic Literature Review, Bibliometric Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Systematic literature review on studies of co-benefits about air quality, climate, and energy • (Key findings) Many studies quantify co-benefits related to air quality improvement and health impacts (e.g., reduced mortality, increased life expectancy, productivity). Suggests the importance of incorporating these co-benefits into policy making
Rao <i>et al.</i> (2016)	Modeling (IAMs, TM5-FASST)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Coupled six Integrated Assessment Models (IAMs) with the global air quality model (TM5-FASST) to assess PM_{2.5} reduction effects under combinations of climate and air pollution policy scenarios • (Key findings) Simultaneous implementation of climate and air pollution control policies can reduce population exposure to PM_{2.5} by 5 to 6 times compared to implementing air pollution policies alone
Zhang <i>et al.</i> (2017)	Modeling (CMAQ)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Used CMAQ model with RCP4.5 scenario to evaluate domestic and international GHG reduction impact on air quality. • (Key findings) Avoided mortality benefits valued at \$45~137 per ton CO₂. About 31% of benefits due to international reductions. Likely exceeds marginal abatement cost by 2050.
Vandyck <i>et al.</i> (2020)	Modeling (multi-IAMs)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Simulated emission pathways for 2°C and 1.5°C targets using multi-IAMs to analyze air quality co-benefits • (Key findings) Higher climate policy ambition may reduce marginal co-benefits per ton CO₂, but increases total air quality benefits
Rauner <i>et al.</i> (2020)	Modeling (REMIND, GAINS, TM5-FAST)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Used REMIND, GAINS, TM5-FAST models to assess air pollution and health effects under climate scenarios • (Key findings) Strengthened climate policy shows greater reduction in premature deaths than stricter air pollution regulation
Rafaj <i>et al.</i> (2021)	Modeling (AIM/CGE, IMAGE, MESSAGE, REMIND, WITHCH)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Applied models (AIM/CGE, IMAGE, MESSAGE, REMIND, WITCH) to analyze emissions and premature mortality under 1.5°C and 2°C targets • (Key findings) Combined strong climate and air pollution policy leads to synergistic effects and notable reductions in premature mortality
Chae <i>et al.</i> (2018)	Case analysis, cost-benefit analysis	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Reviewed Korea's climate, air, and energy policies; cost-benefit analysis of PM and GHG policies in transport and power sectors • (Key findings) Clarifying the roles and hierarchy among plans, and integrating air pollutant and greenhouse gas reduction plans are suggested. As cost-effective policy measures, the adoption of best available environmental technologies is proposed for the power generation sector, stricter emission standards for diesel vehicles are recommended for the transport sector
Chae <i>et al.</i> (2010, 2009)	Cost-effective analysis	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Analysis of optimal integrated environmental strategies for improving air quality and reducing greenhouse gas emissions, based on multi-year research • (Key findings) Expansion of public transportation use, promotion of compact cars, fuel switching in the industrial sector (from B-C oil to LNG), and the adoption of low-NO_x boilers are suggested as cost-effective measures for reducing greenhouse gas emissions and improving air quality

Table 2. Continued.

Source	Classification	Content
Chae (2010)	Cost-effective analysis	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Using an emission calculation model and an optimization model, this study estimated the reduction costs and co-benefits of implementing an integrated climate and air quality policy in Seoul • (Key findings) Utilizing an integrated environmental strategy enables the achievement of Seoul's climate and air quality targets at a lower cost compared to implementing climate and air policies separately. The use of CNG buses is identified as one of the most effective measures for simultaneously reducing air pollutants and CO₂ emissions
Kim and Choi (2017)	Cost-benefit analysis	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) A comparative analysis of the social benefits and investment costs of projects aimed at simultaneously reducing air pollutants and greenhouse gas emissions in Gyeonggi-do • (Key findings) The adoption of electric vehicles, expansion of district energy systems, promotion of hydrogen fuel cell vehicles, and conversion from anthracite coal to clean fuels in the residential sector significantly increase the social benefits associated with CO₂ reduction
Kim <i>et al.</i> (2020)	Modeling (AIM/CGE, CMAQ/WRF, health impact assessment model)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Assessment of the impacts of South Korea's greenhouse gas reduction policies on air quality and public health using the AIM/CGE model, CMAQ/WRF system, and a health impact assessment model • (Key findings) Climate change mitigation leads to substantial reductions in PM_{2.5} and O₃ levels in South Korea, resulting in decreased premature mortality, reduced healthcare expenditures, and increased labor productivity by 2050 compared to 2005. The health benefits in 2050 are expected to offset the costs of carbon reduction. However, improvements in air quality from the agriculture and industrial process sectors are found to be minimal
Philips and Jung (2021)	Modeling (LEAP-IBC)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Analysis of reductions in carbon and air pollutant (PM_{2.5}) emissions resulting from fuel switching for greenhouse gas mitigation in South Korea's power generation sector using the LEAP-IBC model • (Key findings) The scenario maximizing nuclear power capacity yields the greatest cost-effective benefits, with significant reductions in PM_{2.5}-related premature deaths and carbon emissions
Jang <i>et al.</i> (2024)	Modeling (GUIDE)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Analysis of the impacts of South Korea's climate and air quality policies on greenhouse gas and air pollutant (SO_x, NO_x, PM_{2.5}, VOC, NH₃) emissions through 2030 using the GUIDE model • (Key findings) Emissions of SO_x from the power generation and industrial sectors, NO_x from the power generation and transport sectors, and PM_{2.5} from the power generation and industrial sectors are projected to decline alongside CO₂. The reduction rates of NH₃ from agriculture, PM_{2.5} from other sectors, and SO_x and VOC from industrial processes, as well as NO_x from on-road and off-road transport, are relatively low under current climate policies, indicating limited air quality improvement in these areas
Choi <i>et al.</i> (2022)	Scenario analysis, Modeling (CAMx)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Sectoral analysis of the emission and concentration reduction effects of greenhouse gases, fine particulate matter (PM), and precursor substances by comparing the 2030 carbon neutrality plan scenario—based on the assumption that each mitigation measure under the enhanced 2030 Nationally Determined Contribution (NDC) target is achieved—with a scenario in which the plan is not implemented • (Key findings) Most sectors show co-reduction effects of air pollutants alongside greenhouse gas reductions. However, a slight increase in NH₃ emissions is expected due to the replacement of coal power with LNG, and in the cement industry, the impact of raw material substitution on air pollutant emissions remains uncertain

Table 2. Continued.

Source	Classification	Content
Choi <i>et al.</i> (2023)	Scenario analysis, Modeling (CAMx)	<ul style="list-style-type: none"> • (Research method) Analysis of the impact on 2030 greenhouse gas emissions from air quality policy measures, excluding those that overlap with the enhanced 2030 Nationally Determined Contribution (NDC) mitigation measures • (Key findings) Many air quality policy measures contribute positively to greenhouse gas reduction. However, in the industrial sector, the reduction effect is minimal, and in the transport sector, policies such as stricter emission standards for construction equipment and low-emission measures for construction machinery show no effect on greenhouse gas reduction



* Source: Modified from Anenberg *et al.* (2019)

Fig. 2. Interactions of atmosphere, climate and energy.

로 공편익 효과를 분석하는 것에는 한계가 있었음을 시사한다. 또한, 국외 선행 연구에서 기후정책과 대기 오염관리 정책의 기존 연구 동향을 기반으로 추가 연구가 필요한 연구 영역을 제시한 연구는 확인할 수 있었으나 우리나라에서 실제 연구가 필요한 공편익 연구 분야를 제시한 연구는 제한적이었다. 이에 본 연구는 대기·기후·에너지 상호관계에 대한 개념적 모형을 개발하고 개념적 모형에 기반하여 우리나라 탄소중립 전략의 대기 정책에 대한 직접배출 및 LCA 차원에서의 공편익을 정성적으로 분석한다. 또한, 분석 결과를 기반으로 대기·기후·에너지 통합관리를 위해 향후 연구가 필요한 분야를 제시한다.

2.2 연구 방법

2.2.1 개념적 연구모형

본 연구는 대기·기후·에너지 상호작용에 초점을 맞추어 한국의 탄소중립 전략에서 제시된 수단의 대기

질 관리 정책에 대한 공편익을 분석하고 대기·기후·에너지 정책의 통합관리를 위해 향후 연구가 필요한 사항을 종합적으로 제시하고자 한다. 이에 검토한 대기·기후·에너지 정책의 공편익에 대한 선행 연구와 Anenberg *et al.* (2019), von Schneidmesser and Monks (2013)이 제시한 대기·기후·에너지의 상호작용 프레임워크를 기반으로 개념적 연구모형을 개발하였다.

대기·기후·에너지는 배출(emission), 확산(disposition), 영향(impact)의 모든 단계에서 상호 밀접한 관련성을 가진다(그림 2 참조). 에너지를 생산 또는 연소하는 과정에서 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄)과 같은 온실가스와 황산화물(SO_x), 블랙카본(Black carbon, BC), 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 등의 대기오염물질이 동시에 배출된다. 배출된 온실가스와 대기오염물질은 확산 과정에서 상호 영향을 미친다. 기후변화로 인한 기온 상승은 대기오염물질의 이차 생성, 자연 발생 오존의 생성을 가속화하며, 장기적으로는 대기 정체로

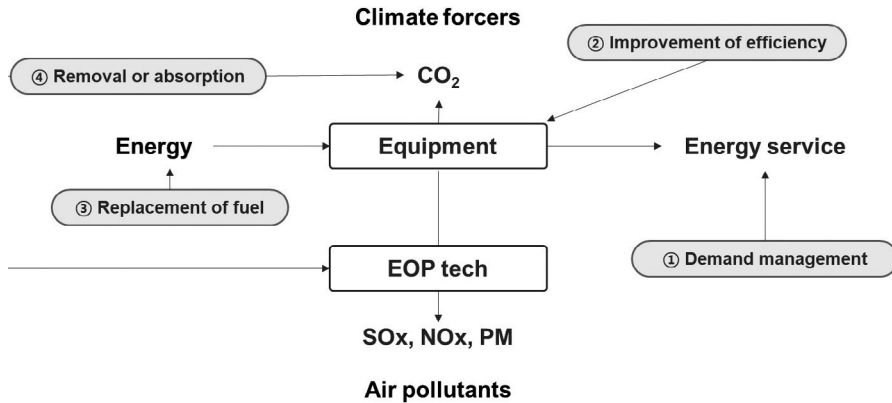


Fig. 3. Interactions of atmosphere, climate and energy at emission stage.

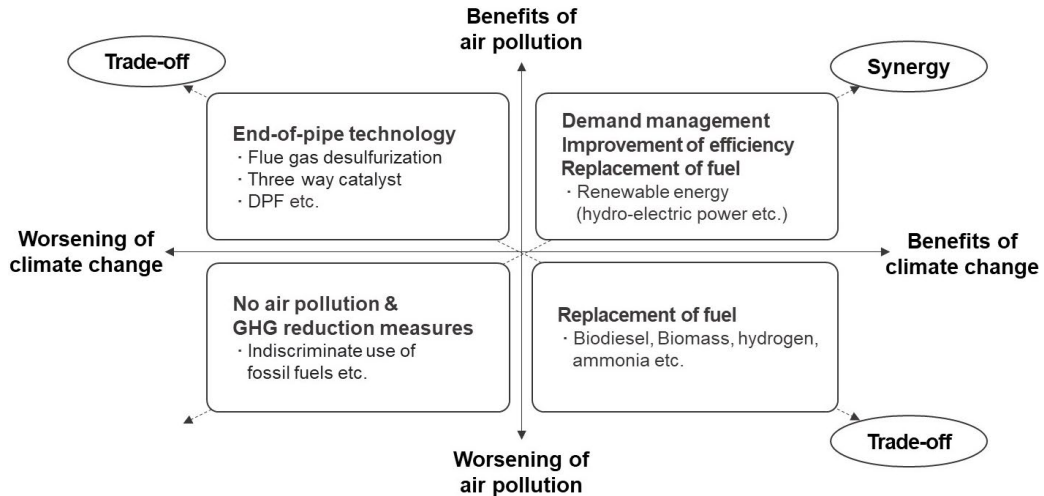
인해 대기질을 악화시킬 수 있다. 대기오염물질 중 SO_x, 질소산화물(NO_x), BC 등은 단기적인 기후변화를 유발하는 원인물질로 작용한다. 또한, 기후변화는 기존의 위험을 증폭하는 특징을 가지고 있다는 측면에서 대기질 악화와 기후변화의 심화는 복합적인 피해를 유발한다.

배출 단계에서 대기·기후·에너지의 관계에 주목할 경우, 대기·기후·에너지의 상호작용을 더욱 명료하게 포착할 수 있다(그림 3 참조). 에너지 서비스 수요(energy service demand)를 충족하기 위하여, 에너지 사용기기(energy equipment)를 가동하며, 기기의 가동을 위해 에너지를 투입하여 연소시킨다. 에너지를 연소하는 과정에서 온실가스가 발생하며, 대기오염방지시설(end-of-pipe technology)을 거쳐 대기 중으로 대기오염물질이 배출된다.

에너지 서비스를 제공하는 과정에서의 온실가스와 대기오염 감축 수단은 크게 4가지로 구분할 수 있다. 감축 수단의 유형에 따라 대기오염물질과 온실가스 배출에 다른 영향을 미친다. 첫째, 에너지 서비스에 대한 수요를 관리하면 에너지에 대한 수요가 줄어들며, 이는 온실가스와 대기오염 배출량의 동시감축으로 이어진다. 둘째, 에너지 사용기기의 효율이 높아지면, 동일 양의 에너지 서비스를 제공하더라도 상대적으로 적은 양의 에너지가 필요하므로 온실가스와 대기오염 배출량을 동시에 줄일 수 있다. 셋째, 에너지 사용기기

에 사용되는 에너지를 기존 대비 저탄소 에너지로 대체(저탄소 화석에너지로 전환, 화석연료를 신재생에너지로 전환)하는 방법으로 저탄소 에너지로의 전환에 따라 온실가스는 감축되나, 전환하는 에너지에 따라 대기오염 영향은 다르게 나타난다. 넷째, 에너지 연소로 발생하는 CO₂를 탄소포집 및 사용, 저장(carbon capture, utilization and storage, CCUS) 기술을 사용하여 감축하거나 대기오염물질을 대기오염방지시설을 활용해 감축하는 방법이다.

온실가스 및 대기오염물질 감축 수단의 상충효과와 길항효과를 도식화하면 그림 4와 같다. 수평축은 기후변화 편익, 수직축은 대기오염 편익을 의미한다. 1사분면은 기후변화와 대기오염에 모두 편익이 존재하는 수단으로 에너지 수요관리, 에너지효율 향상, 태양광에너지, 수력에너지 등의 재생에너지로 전환되는 경우가 포함된다. 2사분면은 대기오염에는 편익이 있지만, 온실가스 감축에는 부정적인 수단으로 배연탈황, 삼원촉매 등 에너지 사용기기에 대기오염방지설비를 설치한 경우이다. 설비 가동 시, 대기오염 방지에는 기여할 수 있으나 에너지효율이 일부 상쇄되면서 온실가스 배출이 증가할 가능성이 있다. 3사분면은 온실가스 및 대기오염물질 감축 수단이 활용되지 않는 경우로 무분별한 화석연료의 사용이 대표적인 예이다. 4사분면은 기후변화에는 긍정적인 측면이 있으나, 대기오염에는 부정적인 영향을 야기하는 수단으로 바이



* Source: Modified from von Schneidemesser and Monks (2013)

Fig. 4. Co-effect between climate change and air pollution reduction measures.

오연료 사용, 수소 및 암모니아와 같은 신에너지원의 대체 등이 포함된다.

2.2.2 연구 방법론

본 연구는 첫째, 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 (Joint ministries of Republic of Korea, 2023), 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안 (Joint ministries of Republic of Korea, 2021), 2050 탄소중립 시나리오안 (2050 Carbon neutrality and green growth commission, 2021)을 중심으로 2050 탄소중립 달성을 위한 전환, 산업, 수송, 건물 분야의 주요 감축 수단을 도출한다. 전환, 산업, 수송, 건물은 우리나라에서 온실가스 배출량이 많은 상위 4개 부문으로 각 부문과 연계되는 에너지산업 및 비산업 연소, 제조업 연소, 생산과정, 도로이동 및 비도로이동 오염원 등에서 PM_{2.5}, SO_x, NO_x, BC, 일산화탄소(CO) 등 상당량의 대기오염물질이 발생하고 있다(NAIR, 2023).

둘째, 대기·기후·에너지 공편익을 분석한 문헌 검토 및 대기·기후·에너지 분야의 전문가와의 초점집단 토론(focus group discussion, FGD)을 통해 온실가스 감축 수단별 대기오염물질 배출에 대한 영향을 분석한

다. FGD는 초점을 둔 주제에 대하여 소수의 전문가가 심도 있는 토의를 진행하는 정성적 연구 방법으로 본 연구와 같은 탐색적 연구(exploratory research)에 유용한 연구 기법이다(Kim *et al.*, 2018; Rhee and Chang, 1993). 선행 연구 내용을 목록화한 결과를 제공하고, 이를 기반으로 3차례에 걸친 FGD를 진행하여 주요 온실가스 감축 수단의 대기 영향에 대하여 평가하였다.

셋째, FGD 및 선행 연구 검토 결과를 토대로 매트릭스 분석법(matrix analysis)을 적용하여 2050 탄소중립 수단을 ① 수요관리, ② 에너지 효율성 향상, ③ 연료 대체로 구분하고 수단별 대기질 관리 측면에서의 공편익 유형을 분류한다. 공정 과정에서 원료를 대체하는 경우는 기존 서비스 수요가 감소하는 것으로 판단하고 수요관리 수단에 포함하였다. 개발 진행 중인 기술인 CCUS의 경우 참고할 수 있는 선행 연구가 부족하여, 분석 대상에서 제외하였다. 공편익 유형은 3가지로 구분하였다. 상승효과(synergy)는 대기오염 감소에 긍정적인 효과가 있는 유형, 길항효과(trade-off)는 대기오염물질 증가를 야기할 위험성이 있는 유형, 유보(reservation)는 대기오염에 대한 효과의 방향성이 불확실하여, 추가적인 분석이 필요한 유형이다. 공편

익 유형 분류 시, 직접배출과 전 과정 평가(life cycle assessment, LCA)로 구분하여 검토하였다. 검토 대상 대기오염물질은 CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, 총 부유분진(total suspended particles, TSP), 휘발성유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 암모니아(NH₃)로 한정하였으며, 탄소중립 수단이 상기의 대기오염물질을 감소시키면 상승효과, 대기오염물질 중 일부라도 증가시킬 가능성이 있는 경우 길항효과로 분류한다.

넷째, 본 연구는 에너지 관련 온실가스 감축 수단의 배출 측면에서의 대기 공편익에 대하여 탐색적으로 분석하고 있으나, 통합적 관점에서 대기·기후·에너지를 관리하기 위해서는 대기·기후·에너지의 배출, 확산, 영향 단계에서 각 부문 수단의 공편익을 연구할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 개념적 연구모형과 US EPA의 ACE StRAP(Air, Climate and Energy Strategic Research Action Plan)에서 제시하는 대기질, 기후변화, 에너지 부문의 연구 포트폴리오(US EPA, 2022, 2020, 2015)를 참고하여, 연구 영역을 과학적 기반 마련(배출, 확산, 영향), 전략적 도구 개발로 구분하고 영역별로 수행되어야 할 연구를 도출하기 위해 2차례에 걸친 FGD를 실시하였다.

3. 분석 결과

3.1 전환 부문

전환 부문의 분석 결과는 표 3과 같다. 전환 부문의 주요 감축 수단의 상당수는 연료 대체 유형으로 석탄 및 LNG 발전 비중 감소, 재생에너지 및 신에너지 발전 비중 증가, 무탄소(암모니아, 수소) 혼소·전소 전원 확대 등이 대표적이다. 연료 대체 유형의 경우 대체되는 연료에 따라 대기오염물질 저감에 미치는 영향을 상승 및 길항효과, 유보로 구분할 수 있다. 화석 에너지 발전 비중 감소, 대부분의 신재생에너지 발전 증가는 온실가스 배출량 감소와 동시에 대기오염물질을 저감한다. 다만, 가교 전원으로서 석탄발전이 LNG

발전으로 대체되고 활용도가 높아질 경우 일시적으로 대기오염물질 감축에 길항효과를 야기할 수 있다. LNG 발전 기동 시 불완전 연소로 인해 CO와 같은 대기오염물질 배출량이 증가하기 때문이다(Cho, 2022).

재생에너지 발전 중 바이오매스 혼소 또는 전소 발전의 경우 목재펠릿이 미이용 바이오매스인지에 따라 대기오염에 대한 영향이 달라질 수 있다(Nam, 2022; Löffler and Anderson, 2014). 바이오매스를 생산하는 과정에서 벌채를 통해 산림을 훼손하는 경우 온실가스와 대기오염물질의 흡수량이 감소한다. 따라서 바이오매스 발전 시, 사용하는 바이오매스가 미이용 바이오매스인지 여부에 따라 LCA 관점에서 바이오매스 발전 확대의 대기오염물질 감소효과는 다를 수 있다. 또한, 바이오매스가 LNG를 대체하는 경우 LNG 발전에 비하여 바이오매스 발전 시 대기오염물질 배출량이 증가할 수 있다는 측면에서 직접배출 측면에서도 유보로 평가하였다(Kang, 2023).

무탄소 전원 중 수소 전소 또는 혼소 발전은 석탄 및 LNG 등 화석연료 사용 대체로 온실가스 및 대다수 대기오염물질에 동반 감소효과를 보인다. 다만, 터빈의 종류와 조건에 따라 배출량은 상이하나 수소 혼소 비율 상승 시, NO_x 배출량이 상당히 증가하므로 대기오염물질 감축에 길항효과가 있다(Cellek and Pinarbasi, 2018). 한편, 석탄과 암모니아 혼소 발전 시 상당량의 NO_x가 생성되며(Lee *et al.*, 2021), 투입한 암모니아의 일부가 미반응 암모니아(NH₃ slip)로 연소되지 않고 대기 중 배출될 경우 미세먼지 전구물질이라는 특성상 미세먼지 증가에 영향을 미칠 수 있다(Kelly *et al.*, 2024). 따라서 암모니아 혼소 발전은 대기오염물질 감축에 길항효과를 보인다.

그 외의 전환 부문 감축 수단은 수요관리 유형인 에너지 관리시스템 보급, 전기요금 정상화를 통한 절약 유도 등 전력 수요관리 강화, 에너지 효율성 향상 유형으로 에너지효율 기준 강화, 스마트 조명 보급 등 고효율 기기 확대가 있다. 수요관리와 에너지 효율성 향상 정책은 산업, 건물, 수송부문의 전력 수요관리 및 효율성 향상 수단과 상당 부분 상통한다. 두 유형의 감축

Table 3. Results of the co-benefit analysis of carbon neutrality measures in the power sector.

Mitigation measure	Policy	Key policy measure	Air pollution impact	
			Direct emissions	LCA
• (Type 1) Demand management				
Strengthening power demand management	Carbon-green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Promotion of energy management systems in workplaces and buildings Strengthen efforts to save energy across all sectors 	Synergy	Synergy
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Integration of energy management systems Demand-based pricing 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Encouraging energy saving through normalization of electricity rate 		
• (Type 2) Energy efficiency improvement				
Strengthening energy efficiency standards	Carbon-green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Strengthen energy efficiency management in industry, building, and transportation 	Synergy	Synergy
Distribution of high-efficiency equipment	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Expand the use of high device Promotion of smart lighting 		
• (Type 3) Fuel substitution				
Reduction in the share of coal and LNG power	Carbon-green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Abolition of coal power plants and transition to LNG Power generation 	Synergy (reduction fossil fuel power generation)/ Trade-off (transition to LNG power generation)	Synergy (reduction fossil fuel power generation)/ Trade-off (transition to LNG power generation)
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Reduction in the share of coal (41.9% → 21.8%) Reduction in the share of LNG (26.8% → 19.5%) 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Reduction in the share of coal to 0.0% and LNG to 0.0~5.0% 		
Expansion of renewable energy generation	Carbon-green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Increase the share of renewable energy to the early 30% range by 2036 	Reservation (biofuel)/ Synergy (excl. biofuel)	Reservation (biofuel)/ Synergy (excl. biofuel)
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of renewable energy (6.2% → 30.2%) 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Increase in the share of renewable energy (60.9~70.8%) 		
Expansion of new energy source generation	Carbon-green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of renewable energy to over 21.6% by 2030 	Reservation (biofuel)/ Synergy (excl. biofuel)	Reservation (biofuel)/ Synergy (excl. biofuel)
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Increase in the share of renewable energy (6.2% → 30.2%) 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Increase in the share of hydrogen fuel cells (1.4~10.1%) 		
Expansion of carbon free co-firing/ full-firing power sources	Carbon-green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Ammonia co-firing power generation co-firing rate of 20% by 2030 	Trade-off (hydrogen combustion, ammonia)	Trade-off (hydrogen combustion, ammonia)
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Increase in the share of ammonia co-firing power generation (3.6%) 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of carbon-free power generation sources (13.8~21.5%) 		

수단은 타 부문에서의 절대적인 전력 사용량을 줄이는 데 기여하므로 발전량 감소에 따른 대기오염 저감에 상승효과를 야기한다.

3.2 산업 부문

산업 부문 중 온실가스 및 대기오염물질 다배출 업종인 철강, 시멘트, 석유화학·정유 업종의 주요 탄소 감축정책은 기존 연료를 전환하는 연료 대체 유형과 공정 과정에서 원료를 대체하는 수요관리 유형으로 두 개의 유형은 LCA 관점에서 주로 대기오염 저감에 길항효과를 야기하거나, 추가 검토가 필요한 보류 유형으로 구분되었다(표 4 참조).

철강 업종의 탄소감축정책인 수소환원제철 도입과 전기로 조강으로의 전환과 같은 연료대체 유형은 직접배출의 측면에서 기존 대비 대기오염물질을 감축하는 데 기여한다. 반면, LCA 관점에서 전환부문의 탈탄소화 정도와 수소의 생성 과정에서 발생하는 배출량에 따라 대기오염물질 저감에 미치는 영향이 달라질 것으로 예상된다(SNU *et al.*, 2023). 예를 들어 용광로를 전기로로 전환하는 경우 전력 수요가 증가하게 되며, 급증하는 전력 수요를 무탄소 전원으로 충족하지 못하고 화석에너지 발전이 큰 비중을 차지하는 경우 LCA 관점에서 전기 소비로 인한 원 단위 배출량이 증가할 수 있다(Jang *et al.*, 2022).

Table 4. Results of the co-benefit analysis of carbon neutrality measures in the industry sector.

Mitigation measure	Policy	Key policy measure	Air pollution impact	
			Direct emissions	LCA
Steel				
• (Type 3) Fuel substitution				
Introduction of hydrogen-based steelmaking	2050 carbon neutrality	• 100% replacement of carbon-based processes with hydrogen reduction steelmaking (replacing coke with hydrogen)	Synergy	Reservation
	2030 NDC	• Conversion of newly built or expanded blast furnaces to electric arc furnaces (3 million tons)		
Transition to electric arc furnace	2050 carbon neutrality	• Expansion of crude steel production using electric arc furnaces		
Cement				
• (Type 1) Demand management				
Raw material conversion (expansion of mixed materials)	2030 NDC	• Increase the proportion of mixed materials (15%)	Reservation	Reservation
	2050 carbon neutrality	• Increase the proportion of mixed materials (20%)		
Raw material conversion (substitution of limestone)	2030 NDC	• Expand the substitution rate of limestone raw materials (e.g. slag, ash)(2%)		
	2050 carbon neutrality	• Expand the substitution rate of limestone raw materials (12%)		
• (Type 3) Fuel substitution				
Fuel conversion (waste synthetic resin, hydrogen, etc.)	2030 NDC	• Replace bituminous coal with waste synthetic resin (e.g. waste plastic)(36%)	Trade-off	Trade-off
	2050 carbon neutrality	• Replace bituminous coal with waste synthetic resin and hydrogen heat sources (biomass co-firing) (100%)		

Table 4. Continued.

Mitigation measure	Policy	Key policy measure	Air pollution impact	
			Direct emissions	LCA
Petrochemical & refining				
• (Type 1) Demand management				
Naphtha substitution	2030 NDC	• Partially replace naphtha with bio-naphtha	Reservation (bio-naphtha)/ Synergy (hydrogen)	Reservation (bio-naphtha, hydrogen)
	2050 carbon neutrality	• Convert existing naphtha to bio and hydrogen feedstock (52%)		
Utilization of waste plastics	2030 NDC	• Increase the utilization rate of waste plastic feedstock (18.6%)	Trade-off	Trade-off
	2050 carbon neutrality	• Utilize waste plastic feedstock		
• (Type 3) Fuel substitution				
Fuel conversion (biomass, electricity, etc.)	2030 NDC	• Convert heavy oil 100% to eco-friendly fuel	Synergy	Reservation (biomass, electricity)
	2050 carbon neutrality	• Introduce electric heating furnaces • Replace biomass boiler		
Etc.				
• (Type 3) Fuel substitution				
Fuel conversion for district energy service	Carbon-green master plan	• Fuel conversion for district energy service (coal → LNG, etc.)	Trade-off (LNG)/ Reservation (etc.)	Trade-off (LNG)/ Reservation (etc.)
	2030 NDC	• Fuel conversion for combined heat and power facilities in industrial complexes (coal · oil → LNG · biomass)		

시멘트 업종에서 공정과정에서 유연탄을 폐플라스틱 등 폐합성수지로 대체하는 연료전환 유형의 경우 온실가스 감축에는 긍정적 영향을 미치지만, TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 등의 배출량은 유연탄에 비해 높기 때문에 길항효과를 나타낸다(Asamany *et al.*, 2017). 또한, 시멘트 공정에서 사용되는 석회석을 대체하기 위해 개발 중인 원료의 종류와 대체율, 클링커를 대신하는 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카질 혼합재 등 연료 대체에 따른 대기오염물질 배출량 영향에 대한 연구는 아직 명확하지 않다(Choi *et al.*, 2022). 따라서 원료를 대체하는 수요관리 유형의 경우 유보로 구분하였다.

석유화학·정유 업종에서 전기가열로 도입 및 바이오매스 보일러 교체 등 연료대체 유형은 LCA 관점에서 유보로 평가하였다. 전기가열로 도입 시 대기오염 영향은 전환부문 탈탄소화 정도에 따라 상이할 것

로 예상되며, 바이오매스 보일러 가동 시, 대기오염물질 배출 여부에 대해서는 추가 연구가 필요하다. 바이오납사의 대기오염 배출계수에 대하여 기존에 연구가 활발히 진행되지 않아 바이오 원료를 활용하는 등 부분적으로 기존 납사를 대체하는 경우는 유보로 평가하였다. 수소원료를 활용해 납사를 대체하는 경우 LCA 측면에서 그린 수소인지 여부에 따라 대기오염에 미치는 영향이 달라지며, 또한 직접 배출의 측면에서도 수소 연소에 따른 NO_x 배출량 증가로 상충효과가 있을 것으로 판단된다(Cellek and Pinarbasi, 2018). 한편, 폐플라스틱 원료를 활용할 경우에는 폐플라스틱 최초 가열 시 LPG 사용에 따른 대기오염물질이 발생하므로 상충효과로 판단하였다.

기타 업종과 관련하여, 집단에너지 사업의 연료를 LNG, 바이오매스로 대체하는 경우 LNG 대체 시, 불

Table 5. Results of the co-benefit analysis of carbon neutrality measures in the building sector.

Mitigation measure	Policy	Key policy measure	Air pollution impact	
			Direct emissions	LCA
• (Type 1) Demand management				
Strengthening behavior improvement	Carbon · green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Provide incentives for the spread of energy-saving culture and promote public-private collaboration 		
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Strengthen behavior improvement among the public (reduced by 0.9 million tons) 	Synergy	Synergy
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Additional reduction in energy demand through climate and environmental cost reflection and voluntary participation by the public 		
• (Type 2) Energy efficiency improvement				
Improvement of building energy efficiency	Carbon · green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Expand the certification scope for zero-energy buildings in public architectures Mandate green remodeling for aging public buildings Promote green remodeling in private buildings 		
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Encourage zero-energy buildings and expand green remodeling projects (reduce by 2.7 million tons) 	Synergy	Synergy
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Achieve 100% 1st grade zero-energy buildings (new construction) Achieve 100% energy efficiency rating of 1++ for residential and 1+ for commercial building in green remodeling Improve the energy use intensity for cooling and heating by more than 30% compared to 2018 		
Smart energy management	Carbon · green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Optimize the efficiency of energy-consuming building facilities Set and evaluate energy efficiency targets for large building 		
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Introduce integrated management systems for optimal energy control, such as BEMS and HEMS (reduced by 0.2 million tons) 	Synergy	Synergy
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Expand the deployment of integrated management systems for optimal energy control (save 2~5% of energy) 		
Promotion of high-efficiency devices	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Enhance energy efficiency and improve energy use intensity (reduce by 2.1 million tons) 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Improve energy use intensity of energy facilities and devices such as strengthening energy consumption efficiency and expanding labeling systems (approximately 30% energy saving) 	Synergy	Synergy
• (Type 3) Fuel substitution				
Promotion of clean energy	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of clean energy (solar, geothermal hydrothermal) deployment 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Increase in the use of renewable energy (solar, geothermal, hydrothermal, etc.) for cooling, heating, and hot water supply (1.7 million Toe in 2018 → 6.3 million Toe in 2050) 	Synergy	Synergy
Electrification of fossil fuel	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Partial electrification of equipment using fossil fuel (briquettes, diesel, kerosene, etc.) 		
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Replacement of remaining fossil fuels with electric 	Synergy	Reservation

완전 연소로 CO, VOC 등 대기오염 배출량이 일시적으로 증가할 수 있으며(Cho, 2022), 바이오매스의 경우 목재펠릿이 미이용 바이오매스 여부에 따라 LCA 관점에서 대기오염 배출량에 대한 영향이 상이할 수 있다(Nam, 2022; Löffler and Anderson, 2014).

3.3 건물 부문

탄소중립 녹색성장 기본계획, 2050 탄소중립 시나리오(안), 2030 NDC 상향안에서 제시하는 건물 부문의 감축 수단은 에너지 효율성 향상 유형이 다수를 차지하며, 수요관리와 연료대체 유형을 일부 확인할 수 있다(표 5 참조).

에너지 효율성 향상 유형으로는 노후 건축물의 그린 리모델링 의무화, 제로에너지 건축 유도 등의 건물 에너지 효율 향상을 위한 정책 수단과 건물에너지관리 시스템(building energy management system, BEMS), 가정에너지관리시스템(home energy management system, HEMS) 보급 확대 등 에너지 이용 최적제어 통합관리 시스템 도입과 같은 스마트 에너지 관리, 에너지 소비효율 강화 및 표시제도 확대 등 고효율 기기 보급 정책 등이 있다. 에너지 효율 향상을 위한 정책 수단은 동일한 수준의 냉난방 서비스 등의 제공 및 에너지 기기 사용 시 필요한 절대적인 에너지 수준을 감소시키므로 온실가스 및 대기오염물질 감축에 공동으로 기여한다(Choi *et al.*, 2022). 수요관리 유형에 해당하는 에너지 절약문화 확산 등 행태 개선 강화 정책 또한, 화석에너지 사용량 감소로 이어지므로 대기오염물질 감축에 기여한다.

한편, 청정에너지 보급, 화석연료 사용기기의 전력화와 같은 연료 대체 유형의 감축 수단의 경우 대체하는 연료에 따라서 상이한 영향을 미칠 수 있다. 냉난방 서비스를 태양열, 지열, 수열 등의 재생에너지를 활용하여 에너지를 충당할 경우 대기오염물질 감축에 상승효과가 있다. 반면 화석연료 사용기기의 전력화는 LCA의 측면에서 전력믹스에 따라 대기오염 정도에 상승 또는 길항효과를 유발할 수 있다(Jang *et al.*, 2022). 동일수준의 서비스를 충족하기 위한 화석연료

사용기기 사용 시의 직접 배출량과 전기 사용기기 사용 시의 간접 배출량에 대한 추가 검토가 필요하므로 직접배출 범위에서는 상승효과, LCA 범위에서는 유보로 평가하였다.

3.4 수송부문

수송 수단은 도로, 철도, 선박, 항공으로 구분된다(표 6 참조). 수송부문 온실가스 배출량의 90% 이상을 차지하는 도로수송의 주요 감축 수단은 수요관리 유형으로 대중교통 확대, 에너지 효율성 향상 유형으로 온실가스·연비기준 강화, 연료 대체 유형으로 저공해차 및 무공해차 보급 확대와 바이오디젤 혼합률 확대 등이 있다. 교통수요관리 정책은 내연기관차를 포함한 자동차의 총 주행거리를 감소시키므로 대기오염물질 감축에 상승효과를 유발한다(Choi *et al.*, 2022). 온실가스·연비 기준 강화 정책은 같은 양의 화석연료를 사용함에도 더 많은 이동 수요를 충족할 수 있으므로 대기오염물질 감축에 상승효과가 있다. 연료 대체 유형 중 저공해·무공해차 보급 확대는 무탄소 전력과 그린수소의 보급률이 높다는 전제하에 배기가스 감소에 따른 대기오염물질 감축에 기여한다. 반면, 바이오디젤 확대는 바이오디젤의 혼합률, 엔진 종류, 엔진제어 시스템에 따라 NO_x가 증가할 가능성이 있으므로 유보로 평가하였다. 경유와 바이오디젤 혼합률을 20%로 혼합한 경우, 매연 저감장치 미부착 시를 기준으로 먼저, CO는 감소하는 반면, NO_x는 다소 증가하는 것으로 나타났다(NIER, 2013). 바이오디젤 혼합 시, CO, PM, SO_x의 저감효과는 뚜렷한 반면, NO_x의 배출량은 바이오디젤의 혼합률에 따라 달라지고 특히 혼합률이 20% 이상인 경우 NO_x의 배출량이 더욱 증가한다. 단, NO_x의 배출량은 혼합률만이 아니라 자동차별 엔진제어 시스템에 따라 달라질 수 있다(Hoekman and Robbins, 2012).

철도의 주요 감축 수단은 '연료 대체 유형'으로 전기 및 수소 열차로의 전환 정책은 무탄소 전력과 그린수소를 활용한다는 가정하, 대기오염 감축에 상승효과를 보인다. 해운·항공의 주요 감축 수단은 두 가지 유형

Table 6. Results of the co-benefit analysis of carbon neutrality measures in the transport sector.

Mitigation measure	Policy	Key policy measure	Air pollution impact	
			Direct emissions	LCA
Road				
• (Type 1) Demand management				
Traffic demand management	Carbon · green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Strengthen public transportation network Promote shared mobility Establish free zones of internal combustion engine, etc. 		
	2030 NDC	<ul style="list-style-type: none"> Improve public transportation convenience Enhance connectivity Reduce vehicle mileage by 4.5% 	Synergy	Synergy
	2050 carbon neutrality	<ul style="list-style-type: none"> Promote public transportation use Enhance non-motorized and zero-carbon transport Expand remote work, etc. Reduce vehicle mileage by 20% 		
• (Type 2) Energy efficiency improvement				
Strengthening of greenhouse gas · fuel efficiency standard	Carbon · green master plan	Strengthen greenhouse gas and fuel efficiency standards considering LCA	Synergy	Synergy
• (Type 3) Fuel substitution				
Expansion of low-emission · zero emission vehicle deployment	Carbon · green master plan	<ul style="list-style-type: none"> Cumulative deployment of 4.2 million electric vehicles and 300,000 hydrogen vehicles by 2030 Conversion of internal combustion engine vehicles to electric vehicles 	Reservation (biofuel)/ Synergy (excl. biofuel)	Reservation
	2030 NDC	Composition of 3.62 million electric vehicles, 880,000 hydrogen vehicles, and 4 million hybrid vehicles		
	2050 carbon neutrality	Deployment of 85% to 97% zero-emission vehicles, with the remainder converted to carbon-free fuel		
Increasing in bio diesel use	2030 NDC	Increase in bio-diesel blend ratio from 3% to 8%		
Railroad				
• (Type 3) Fuel substitution				
Transition to eco-friendly railways	Carbon · green master plan	<ul style="list-style-type: none"> 100% replacement of diesel passenger trains with electric trains Demonstration of hydrogen-electric train 	Synergy	Reservation
	2050 carbon neutrality	100% conversion of diesel railway vehicles to zero-carbon power railways		

으로 연료 효율이 우수한 최신 항공기의 도입, 선박 운항 효율 개선 등 에너지 효율성 향상 유형과 바이오 항공유 등 친환경연료 활용 비중 증대, 전기·수소 항공기 도입 등 연료 대체 유형으로 분류할 수 있다. 선박

의 운항 효율을 개선하거나, 항공의 연료 효율을 개선하는 감축 수단은 일정한 이동 수요를 적은 에너지로 충족할 수 있도록 하므로 대기오염물질 감축에 상승 효과가 있는 반면, 친환경 선박·항공 전환 정책은 대

Table 6. Continued.

Mitigation measure	Policy	Key policy measure	Air pollution impact	
			Direct emissions	LCA
Maritime/Aviation				
• (Type 2) Energy efficiency improvement				
Improvement of fuel efficiency for maritime and aviation	Carbon · green master plan	• Introduce the latest aircraft with superior fuel efficiency		
	2030 NDC	• Improve ship operational efficiency • Enhance aircraft operation and fuel efficiency by 1.0% annually	Synergy	Synergy
	2050 carbon neutrality	• Improve aviation fuel efficiency by 2% annually		
• (Type 3) Fuel substitution				
Transition to eco-friendly maritime and aviation	Carbon · green master plan	• Increase the proportion of eco-friendly fuel, such as bio-aviation fuel • Transition to low-carbon and zero-carbon (hydrogen, ammonia, etc.) ships	Reservation (biofuel, ammonia)/ Synergy (excl. biofuel, ammonia)	Reservation (biofuel, hydrogen, electricity, ammonia)/ Synergy (excl. biofuel, hydrogen, electricity, ammonia)
	2030 NDC	• Introduce low-carbon (LNG, hybrid) ships		
	2050 carbon neutrality	• Expand the use of biofuels and LNG for ships, and increase the use of bio-aviation fuel (30%) • Achieve a 40% share of electric and hydrogen ships • Introduce electric and hydrogen aircraft		

체하는 연료에 따라서 대기오염물질 감축에 상승효과와 길항효과가 다르게 나타날 수 있다. 친환경 선박·항공기술은 기술 성숙도가 낮은 개발 중인 기술이므로 기술 활용에 따른 대기오염 영향에 대해서는 판단하기 어렵다. 바이오 항공유 등 바이오 연료가 대기오염물질 배출에 미치는 영향에 대한 선행 연구도 제한적인 상황이므로 연료 대체 기술의 대기오염 영향에 관한 추가 연구가 필요하다(Lee, 2024).

4. 고 찰

부문별로 검토한 2050 탄소중립 수단을 수요관리, 에너지 효율성 향상, 연료 대체의 3개 유형으로 구분하고 대기오염에 대한 영향을 직접 배출 및 LCA 관점에서 상승효과, 길항효과, 유보로 구분한 결과는 표 7과 같다.

에너지 사용기기의 효율 강화와 에너지 수요관리 등 주로 상승효과가 있는 감축 수단의 적극적 활용은 온실가스 감축정책에 대한 정책적 수용도를 높이는 데 기여할 수 있다. 온실가스 감축의 편익은 감축 대상과 지역에 귀속되지 않으며, 그 효과가 장기적으로 나타나는 특징을 지닌다. 반면, 대기질 관리 정책은 기후변화 대응정책과 대비하여 편익이 해당 지역에 귀속되고 그 효과가 단기간에 나타날 가능성이 크다. 또한, 대기오염물질 중 SLCPs의 배출량 감축은 단기간 내에 기온 상승을 억제하는 효과가 큰 특징을 가진다. 따라서, 대기질 개선에 상승효과가 있는 감축 수단은 적극적으로 발굴 및 활용할 필요가 있으며, 부처 간 중복집행 등의 비효율성을 줄이기 위해 통합적으로 관리하기 위한 체계를 우선하여 마련해야 한다.

연료 대체 및 원료 대체와 관련된 정책 수단의 일부는 대기정책과 길항효과가 있다. 길항효과가 있는 수단의 경우, 우선 대체 또는 보완할 기술이 있는지 연구

Table 7. Results of the atmospheric co-benefit analysis of greenhouse gas reduction measures.

Type	Category		Co-benefit	
	Sector	Mitigation measure	Direct emissions	LCA
(Type 1) Demand management	Power	• Strengthening power demand management	Synergy	Synergy
	Industry	• (Petrochemical & refining) Utilization of waste plastics	Trade-off	Trade-off
	Industry	• (Petrochemical & refining) Naphtha substitution - hydrogen	Synergy	Reservation
	Industry	• (Petrochemical & refining) Naphtha substitution - biofuel	Reservation	Reservation
	Industry	• (Cement) Raw material conversion (substitution of limestone)	Reservation	Reservation
	Industry	• (Cement) Raw material conversion (expansion of mixed materials)	Reservation	Reservation
	Building	• Strengthening behavior improvement such as energy saving	Synergy	Synergy
	Transport	• (Road) Traffic demand management	Synergy	Synergy
(Type 2) Energy efficiency improvement	Power	• Strengthening energy efficiency standards	Synergy	Synergy
	Power	• Distribution of high-efficiency equipment	Synergy	Synergy
	Building	• Promotion of high-efficiency devices	Synergy	Synergy
	Building	• Improvement of building energy efficiency	Synergy	Synergy
	Building	• Smart energy management	Synergy	Synergy
	Transport	• (Road) Strengthening of greenhouse gas · fuel efficiency standard	Synergy	Synergy
	Transport	• (Maritime/Aviation) Improvement of fuel efficiency for maritime and aviation	Synergy	Synergy
(Type 3) Fuel substitution	Power	• Reduction in the share of coal and LNG power generation – Reduction in thermal power generation	Synergy	Synergy
	Power	• Expansion of renewable energy generation – excl. bio energy	Synergy	Synergy
	Power	• Expansion of new energy source generation	Synergy	Synergy
	Power	• Reduction in the share of coal and LNG power generation – Transition to LNG Power generation	Trade-off	Trade-off
	Power	• Expansion of carbon free co-firing/full-firing power sources – Hydrogen, ammonia	Trade-off	Trade-off
	Power	• Expansion of renewable energy generation – Bio energy	Reservation	Reservation
	Industry	• (Steel) Transition to electric arc furnace	Synergy	Reservation
	Industry	• (Steel) Introduction of hydrogen-based steel making	Synergy	Reservation
	Industry	• (Etc.) Fuel conversion for district energy service – Transition to LNG	Trade-off	Trade-off
	Industry	• (Petrochemical & refining) Fuel conversion such as introducing electric heating furnaces and replacing biomass boiler	Synergy	Reservation
	Industry	• (Cement) Fuel conversion such as waste synthetic resin and hydrogen heat sources	Trade-off	Trade-off
	Industry	• (Etc.) Fuel conversion for district energy service – Transition to biomass	Reservation	Reservation
	Building	• Promotion of clean energy(solar power, geothermal, hydrothermal)	Synergy	Synergy

Table 7. Continued.

Type	Category		Co-benefit	
	Sector	Mitigation measure	Direct emissions	LCA
(Type 3) Fuel substitution	Building	• Electrification of fossil fuel	Synergy	Reservation
	Transport	• (Road) Expansion of low-emission-zero emission vehicle deployment	Synergy	Reservation
	Transport	• (Road) Increasing in bio diesel use	Reservation	Reservation
	Transport	• (Railroad) Transition to eco-friendly railways	Synergy	Reservation
	Transport	• (Maritime/Aviation) Transition to eco-friendly maritime and aviation - LNG and hybrid ships, etc.	Synergy	Synergy
	Transport	• (Maritime/Aviation) Transition to eco-friendly maritime and aviation - Biofuel, ammonia, hydrogen, electricity, etc.	Reservation	Reservation

할 필요가 있다. 또한, 탄소 감축 수단에 대한 대기오염물질 배출 규제 기준을 명확히 하여, 발생할 수 있는 대기오염 위험성을 줄일 수 있도록 제도적 기반을 마련해야 한다. 길항효과가 있는 정책적 수단에 관하여 비용효과분석을 수행하고, 길항효과가 있는 정책 수단에 대한 사회적 수용성을 높이기 위한 전략적 방안을 검토하는 것도 중요하다.

일부 산업 공정상의 원료 대체 수단과 바이오·수소 연료 및 전기 대체와 관련된 감축 수단은 대기 정책에 대한 상승효과와 길항효과 여부를 판정하기 어렵다. 이와 같은 유형의 수단은 최우선으로 정책 수단이 야기할 수 있는 상호 영향을 분석하기 위한 기초 연구를 진행할 필요가 있다. 연구를 통해 상호 간 메커니즘을 명확화하고 이에 기반하여 전략적으로 접근할 수 있도록 해야 한다.

본 연구는 배출 단계에 초점을 맞추어 에너지와 관련된 기후정책 수단을 중심으로 대기 관리에 관한 공편익을 분석하였으나, 효과적인 대기·기후·에너지 정책의 통합관리를 위해서는 대기·기후·에너지의 배출, 확산, 영향 단계에서 각 부문 수단의 공편익을 통합적 관점에서 검토할 필요가 있다. 대기·기후·에너지 정책의 통합관리를 위해 향후 수행되어야 할 연구를 과학적 기반 마련(배출, 확산, 영향), 전략적 도구 개발로 구분하여 제시한 결과는 표 8과 같다.

대기·기후·에너지의 통합관리를 위한 과학적 기반

마련을 위하여 에너지, 나아가 비에너지 부문에서의 온실가스 및 SLCPs를 포함한 대기오염물질의 배출량을 국가 및 지역 단위에서 정확히 산출하고 전망할 필요가 있다. 우선하여 온실가스 및 대기오염 배출량 통계의 정확도를 향상하고 통계 간 정합성을 강화해야 한다. 또한, 탈탄소 에너지 정책의 대기오염물질 배출량에 대한 영향, 특히 신에너지(암모니아, 수소 등)의 대기오염 배출계수에 대한 연구를 진행할 필요가 있다.

기후변화에 따른 대기오염물질 간의 상호 영향을 검토하는 것도 중요하다. SLCPs의 대기 중 복사강제력 평가, 오존 및 블랙카본이 탄소흡수원 감소에 미치는 영향에 관한 연구와 기후변화로 인한 대기 확산 강도 변화, 자연기원 휘발성유기화합물(biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 배출 영향에 대한 연구 등을 수행해야 한다.

기후변화는 인간 건강, 생태계, 사회·경제에 복합적인 영향을 미치며, 대기오염에 따른 피해와 복합하여 더 큰 영향을 야기할 가능성이 있다. 따라서 기후변화에 따른 대기오염과의 복합적인 인간 건강, 생태계 영향, 사회·경제적 영향에 대한 분석이 필요하다. 특히, 기후변화로 인한 재생에너지 발전량 변화, 이상기후로 인한 전력수급변화 등 에너지 분야에 대한 기후변화 영향을 분석함으로써, 대기오염 및 온실가스 배출량 변화에 미칠 영향을 검토할 수 있다.

Table 8. Research directions for integrated management of air · climate · energy.

Category	Research topics
Emission	<ul style="list-style-type: none"> • Improvement of accuracy and consistency of greenhouse gas and air pollutant emission statistics at the national and local government levels • Analysis of emission projections and reduction potential for SLCPs • Research on air pollutant emissions and concentrations related to decarbonization energy policies • Study on air pollutant emission factors for new energy sources (e.g., ammonia, hydrogen, bio-naphtha) • Research on the characteristics of air pollutant emissions in non-energy sectors and the relationship between key drivers • Development of a model for evaluating and forecasting progress in carbon neutrality implementation • Modeling of air quality concentrations and exposure characteristics at the national and local government levels
Scientific basis	<ul style="list-style-type: none"> • Research on the radiative forcing assessment of SLCPs • Study on the impact of ozone and black carbon on the reduction of carbon sinks • Detailed analysis (national-regional) of changes in atmospheric dispersion intensity and impacts due to future climate change • Research on the relationship between climate change and emissions of BVOCs
Impact	<ul style="list-style-type: none"> • Research on the combined health impacts of air pollution and climate change • Vulnerability assessment of affected groups to the combined effects of air pollution and climate change • Study of the combined ecological impacts of climate change and air pollution • Analysis of the relationship between climate change and renewable energy production • Research on the impact of power supply and demand changes due to abnormal climate on energy security • Study on the impact of climate change on power generation and transmission efficiency • Research on the impact of power supply and demand changes due to abnormal climate on greenhouse gas and air pollutant emissions • Study on the impact of air pollutant emissions due to climate change on agricultural productivity • Research on the impact of air pollutant emissions due to climate change on biodiversity
Development of strategic tools	<ul style="list-style-type: none"> • Research on the reform of legal system and organizational structures for integrated management of climate, air, and energy • Analysis of co-benefits (synergy, trade-off) between air, climate, and energy at nation and local levels • Research on cost-benefit estimation reflecting synergy and trade-off of climate and air pollution reduction measures • Research on strategies to response to the trade-off of air, climate and energy policies • Development of tools for implementation and performance evaluation of integrated air, climate, energy policies • Assessment of social acceptability of integrated climate-air policies (focusing on trade-off) • Research on greenhouse gas and air pollutant reduction strategies in non-energy sectors • Research on impact analysis and response support for simultaneous change in climate and air quality at the local government level

또한, 대기·기후·에너지의 효과적 통합관리를 위해서는 우선하여 통합관리를 가능하게 할 수 있도록 법·제도적 기반이 마련되어야 하며, 통합관리 정책 수립을 위한 대기·기후·에너지 정책 간 공편익 발생 여부를 검토하고 비용편익을 산정할 필요가 있다. 길항효과가 나타나는 정책적 수단에 대해서는 대응하기 위한 전략과 정책 이행에 따른 사회적 수용성을 확보하기 위한 방안을 마련해야 한다.

5. 결 론

탄소중립이 상수가 된 현시점에 온실가스·대기오염물질의 효과적 감축을 위한 대기·기후·에너지 통합관리 방향을 고찰하는 것은 중요한 의미를 지닌다. 본 연구에서는 배출, 확산, 영향 중 배출의 측면에서 대기·기후·에너지의 상호관계에 대한 개념적 모형을 구축하였다. 개념적 모형을 기반으로 문헌 조사 및 전문

가 의견조사를 통해 국가 기후변화 대응 계획에 명시된 온실가스 감축 수단을 수요관리(에너지 수요관리, 원료 대체), 에너지 효율성 향상, 연료 대체로 구분하고 수단별 대기오염물질 감축 관련 직접배출 및 LCA 측면에서의 공편익 여부를 분석하였다.

분석 결과 에너지 수요관리, 에너지 효율성 향상과 관련된 감축 수단은 대기오염물질과 온실가스 감축에 있어 직접 배출 및 LCA 측면에서 상승효과가 있는 것으로 나타났다. 수요관리 유형 중 원료 대체 수단과 수소, 바이오연료 등 일부 연료 대체 유형은 길항효과를 보이거나, 그 영향을 검토하기 위해서는 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 이와 같은 연구 결과를 기반으로 대기·기후·에너지 통합관리를 위한 대응 방향을 제시하고 나아가 통합관리를 위해 향후 진행되어야 할 주요 연구 방향을 제언하였다.

우리나라를 포함한 여러 국가에서 대기·기후·에너지를 통합적으로 관리하려는 노력을 보이고 있지만, 장기적, 체계적인 통합관리 대책을 마련하고 실행한 사례를 찾는 것은 용이하지 않다. 대기, 기후, 에너지의 통합관리를 위해서는 우선하여 정책 수단의 상호영향에 대한 명확한 이해가 수반되어야 한다. 이를 통해 탄소중립 이행 과정에서 발생할 수 있는 온실가스-대기 상승효과를 확대하고, 길항작용을 줄일 수 있다. 이러한 맥락에서 LCA를 고려한 탄소감축 및 대기오염방지 기술별 배출계수 및 배출 후 대기 중 상호작용과 인간사회 및 생태계 영향에 대한 연구 등 활발한 연구 지원이 필요하다. 또한, 기후·대기질 목표를 달성하기 위한 정책적 수단의 장·단기 우선순위를 도출하기 위하여 향후 정책적 수단의 공편익 효과를 정량화하기 위한 방법론과 수단간 우선순위 설정을 위한 기준 마련 등 정책 평가 도구에 대한 연구를 병행할 필요가 있다.

본 연구는 탐색적 연구로 광범위한 탄소중립 수단의 공편익을 상승효과, 길항효과, 유보로 구분하고 유형별 통합관리를 위한 대응 전략과 향후 대기·기후·에너지 통합관리를 위해 필요한 연구 방향을 제언하였다는 의의가 있다. 다만, 배출 측면에서 온실가스 감축 수단의 대기오염물질 감축 공편익에 한정하여 분

석하여 기후·대기·에너지 간 복잡한 상호작용 중 일부만 포착하여 분석하였다는 한계가 있다. 또한, 문헌검토와 FGD와 같은 정성적 기법을 주로 활용해 분석 결과를 도출하였고 특정한 가정하 탄소감축 수단의 대기오염물질에 대한 영향을 분석한 일부 문헌에 근거하여 감축 수단의 상승, 길항효과를 구분하였으므로 향후에는 기술별 대기오염물질 배출에 대한 실증 연구를 진행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원을 받아, 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단이 수행한 결과물입니다(RS-2025-02142 978).

References

- 2050 carbon neutrality and green growth commission (2021) 2050 carbon neutrality scenario. https://www.2050cnc.go.kr/download/BOARD_ATTACH?storageNo=360 (accessed on Feb. 05, 2025).
- Anenberg, S.C., Dutton, A., Goulet, C., Swain, D.L., van der Pluijm, B. (2019) Toward a resilient global society: Air, sea level, earthquakes, and weather, *Earth's Future*, 7(8), 854-864. <https://doi.org/10.1029/2019EF001242>
- Asamany, E.A., Gibson, M.D., Pegg, M.J. (2017) Evaluating the potential of waste plastics as fuel in cement kilns using bench-scale emissions analysis, *Fuel*, 193, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.054>
- Bollen, J., Guay, B., Jamet, S., Corfee-Morlot, J. (2009) Co-benefits of climate change mitigation policies: Literature review and new results, OECD publishing, France, 1-46. <https://doi.org/10.1787/224388684356>
- Cellek, M.S., Pinarbasi, A. (2018) Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 1194-

1207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydene.2017.05.107>
- Chae, Y. (2010) Co-benefit Analysis of an Air Quality Management Plan and Greenhouse Gas Reduction Strategies in the Seoul Metropolitan Area, *Environmental Science & Policy*, 13(3), 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.01.003>
- Chae, Y., Jeon, H., Chung, Y., Kim, E., Yoo, K., Kim, E. (2018) Measures to link climate, air and energy policies to effectively reduce fine dust and greenhouse gases, Korea Environment Institute, Republic of Korea. 1-180.
- Chae, Y., Kim, Y., Lee, S., Kim, I. (2009) The 5th integrated environmental strategy (IES) study, Korea Environment Institute, Republic of Korea. 1-77.
- Chae, Y., Lee, S., Kim, I., Kim, S., Moon, K., Park, K. (2010) The 6th integrated environmental strategy (IES) study, Korea Environment Institute, Republic of Korea. 1-161.
- Cho, S. (2022) Air pollution control system for combined cycle power plants in Korea, *KIC news*, 25(2), 28-33.
- Choi, K., Han, J., Jeong, E., Jeon, H., Kim, F., Jeong, Y. (2023) Predicting particulate matter concentration in 2030 and setting the policy direction for its simultaneous reduction in line with the carbon neutrality strategy (I), Korea Environment Institute, Republic of Korea, 1-82.
- Choi, K., Jeong, Y., Jeong, E., Jeon, H., Kim, Y. (2022) Predicting particulate matter concentration in 2030 and setting the policy direction for its simultaneous reduction in line with the carbon neutrality strategy (I), Korea Environment Institute, Republic of Korea, 1-124.
- Deng, H.-M., Liang, Q.-M., Liu, L.-J., Anadon, L.D. (2018) Co-benefits of greenhouse gas mitigation: A review and classification by type, mitigation sector, and geography, *Environmental Research Letters*, 12(12), 1-27. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa98d2>
- Green Climate Fund (GCF) (2020) GCF programming manual. <https://www.greenclimate.fund/sites/default/files/event/gcf-programming-manual-webinar-presentation.pdf> (accessed on Feb. 03, 2025).
- Hoekman, S.K., Robbins, C. (2012) Review of the effects of bio-diesel on NO_x emissions, *Fuel processing technology*, 96, 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.036>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018) summary for policymakers. in global warming of 1.5°C IPCC special report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Cambridge university press, Cambridge, 1-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Jang, M., Lee, J., Lee, H., Ahn, Y. (2022) A study on GHG emission and emission intensity pathways in the power sector of Korea by the 2050 carbon neutrality scenarios, *Journal of Climate Change Research*, 13(6), 843-858, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.6.843>
- Jang, Y., Hu, H., Kim, B., Kim, Y., Yoo, S., Jang, K., Kim, Y., Jin, H., Woo, J. (2024) Assessing the impact of climate and air quality policies on future emissions in Korea through quantification of control and co-control effects, *Atmospheric Pollution Research*, 15(1), 101952. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101952>
- Joint ministries of Republic of Korea (2021) 2030 nationally determined contribution (NDC) enhancement plan. https://www.2050cnc.go.kr/download/BOARD_ATTACH?storageNo=174 (accessed on Jan. 09, 2025).
- Joint ministries of Republic of Korea (2023) National carbon neutrality-green growth master plan. https://www.2050cnc.go.kr/download/BOARD_ATTACH?storageNo=2310 (accessed on Jan. 08, 2025).
- Kang, S. (2023) Pohang biomass power generation resurgence... Environmental pollution controversy likely to reappear, *Yeongnam Economic News*. <https://www.ynews.kr/news/articleView.html?idxno=40680> (accessed on Jul. 23, 2023).
- Karlsson, M., Alfredsson, E., Westling, N. (2020) Climate policy co-benefits: A review, *Climate Policy*, 20(3), 292-316. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1724070>
- Kelly, J., Jeong, S., Oh, D. (2024) The threat of toxic substances: Increase in fine dust and health risks due to ammonia co-firing, Centre for research on energy and clean air · Solutions for our climate, Republic of Korea, 1-16.
- Kim, D.Y., Choi, M.-A. (2017) Greenhouse gas reduction by air quality management policy in Gyeonggi-do and its co-benefit analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(6), 570-582, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.570>
- Kim, E.-J. (2019) The legislative study for the integrated management of air pollutant, Korea Legislation Research Institute, Republic of Korea. 1-439.
- Kim, S.E., Xie, Y., Dai, H., Fujimori, S., Hijioka, Y., Honda, Y., Hashizume, M., Masui, T., Hasegawa, T., Xu, X., Yi, K., Kim, H. (2020) Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea, *Environmental International*, 136, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105507>
- Kim, Y., Kim, J., Kang, J., Jeong, K., Jeong, S., Cho, J., Cho, H., Choi, S., Jeong, J., Oh, S., Kim, C., Kim, M., Kim, K., Lim, H.

- (2018) The Joy of Qualitative Research, Changjisa, Republic of Korea. 1-463.
- Lee, H., Woo, Y., Lee, M. (2021) The needs for R&D of ammonia combustion technology for carbon neutrality - Part II R&D trends and technical feasibility analysis, *Journal of The Korean Society of Combustion*, 26(1), 84-106. <https://doi.org/10.15231/jksc.2021.26.1.084>
- Lee, K. (2024) Direction for advancing carbon neutrality and air quality management policy - Focused on the transportation sector, 3rd carbon neutrality linked air policy innovation forum, Ministry of Environment.
- Loeffler, D., Anderson, N. (2014) Emissions tradeoffs associated with cofiring forest biomass with coal: A case study in Colorado, USA, *Applied Energy*, 113, 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.011>
- Mayrhofer, J.P., Gupta, J. (2016) The Science and Politics of Co-benefits in climate policy, *Environmental Science & Policy*, 57, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.11.005>
- Metrovancouver (2021) Clean air plan 2021. <https://metrovan-couver.org/services/air-quality-climate-action/Documents/clean-air-plan-2021.pdf> (accessed on Jan. 09, 2025).
- Nam, J. (2022) 'Biomass=Renewable energy', Lax standards... could damage earth's forests, Hankyoreh. <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1045371.html> (accessed on Jun. 06, 2024).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2023) 2021 National air pollutants emission. <https://www.air.go.kr/file/download.do?fileid=508> (accessed on Jan. 15, 2025).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Environmental assessment study of fine particles (PM_{2.5}) resulting from the use of bio-diesel fuel. <https://ecolibrary.me.go.kr/nier> (accessed on Dec. 23, 2024).
- Phillips, D., Jung, T. (2021) An alternative co-benefit framework prioritizing health impacts: potential air pollution and climate change mitigation pathways through energy sector fuel substitution in South Korea, *Climate*, 9(6), 101. <https://doi.org/10.3390/cli9060101>
- Rao, S., Klimont, Z., Leitao, J., Riahi, K., van Dingenen, R., Reis, L.A., Calvin, K., Dentener, F., Drouet, L., Fujimori, S., Harmsen, M., Luderer, G., Heyes, C., Strefler, J., Tavoni, M., van Vuuren, D.P. (2016) A multi-model assessment of the co-benefits of climate mitigation for global air quality, *Environmental Research Letters*, 11(12), 124013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124013>
- Rafaj, P., Kieseewetter, G., Krey, V., Schöpp, W., Bertram, C., Drouet, L., Fricko, O., Shinichiro, F., Harmsen, M., Hilaire, J., Huppmann, D., Klimont, Z., Kolp, P., Aleluia Reis, L., van Vuuren, D.P. (2021) Air quality and health implications of 1.5-2°C climate pathways under considerations of ageing population: A multi-model scenario analysis, *Environmental Research Letters*, 16(4), e045005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdf0b>
- Rauner, S., Hilaire, J., Klein, D., Strefler, J., Luderer, G. (2020) Air quality co-benefits of ratcheting up the NDCs, *Climatic Change*, 163, 1481-1500. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02699-1>
- Rhee, K.-O., Chang, M.-W. (1993) A practical guide for focus group discussion, *Health and Social Welfare Review*, 13(1), 84-98, (in Korean with English abstract).
- Seoul National University (SNU), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Sookmyung Women University (SMWU) (2023) Phase 2 (2020-2022) Korea-China joint air quality research (III), National Institute of Environmental Research, Republic of Korea.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015) Air, climate, and energy strategic research action plan 2016-2019. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/strap_2016_ace_508.pdf (accessed on Feb. 08, 2025).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2020) Air and energy strategic research action plan 2019-2022. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/a-e_fy19-22_strap_final_2020.pdf (accessed on Feb. 08, 2025).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2022) Air, climate, and energy strategic research action plan fiscal years 2023-2026. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-10/ACE%20FY23-26%20StRAP_EPA-ORD_October%202022_508.pdf (accessed on Feb. 08, 2025).
- Vandyck, T., Keramidias, K., Chung-Ming, S., Weitzel, M., Van Dingenen, R. (2020) Quantifying air quality co-benefits of climate policy across sectors and regions, *Climatic Change*, 163, 1501-1517. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02685-7>
- von Schneidemesser, E., Monks, P.S. (2013) Air quality and climate - synergies and trade-offs, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(7), 1315-1325. <https://doi.org/10.1039/C3EM00178D>
- Zhang, Y., Smith, S.J., Bowden, J.H., Adelman, Z., West, J.J. (2017) Co-benefits of global, domestic, and sectoral greenhouse gas mitigation for US air quality and human health in 2050, *Environmental Research Letters*, 12(11), 114033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8f76>

Authors Information

이지윤(숙명여자대학교 기후환경에너지학과 초빙교수)

(jyunlee@sookmyung.ac.kr)

유승직(숙명여자대학교 기후환경융합학과 교수)

(sjyoo@sookmyung.ac.kr)

송창근(울산과학기술원 도시환경공학과 교수)

(cksong@unist.ac.kr)

이현진(숙명여자대학교 기후환경에너지학과 박사과정)

(hyeonjinlee128@sookmyung.ac.kr)

양혜영(숙명여자대학교 기후환경에너지학과 석박통합과정)

(didgpdud94@sookmyung.ac.kr)

장명진(숙명여자대학교 기후환경에너지학과 박사과정)

(galejang@sookmyung.ac.kr)

안영환(숙명여자대학교 기후환경에너지학과 교수)

(yh.ahn@sookmyung.ac.kr)