

기후대기 통합평가모형 개발연구(II)

Development of an Integrated Modeling Framework
for Assessing Climate and Air Quality (II)

장훈 외

K O R E A
E N V I R O N M E N T
I N S T I T U T E

저자

장 훈, 이정은, 임형우, 최형식, 최기철, 김현규, 양유경, 서정빈, 구윤모, 김만영, 고성민

연구진

연구책임자	장 훈	한국환경연구원	선임연구위원			
참여연구원	이정은	한국환경연구원	부연구위원	임형우	한국환경연구원	부연구위원
	최형식	한국환경연구원	부연구위원	최기철	한국환경연구원	연구위원
	김현규	한국환경연구원	부연구위원	김성진	한국환경연구원	연구위원
	신동원	한국환경연구원	연구위원	문종우	한국환경연구원	부연구위원
	구윤모	서울대학교	교수	김만영	사단법인 희스트	부회장
	양유경	한국환경연구원	전문연구원	서정빈	한국환경연구원	연구위원
	고성민	서울대학교	박사과정	전병찬	서울대학교	박사과정
	한중혁	서울대학교	박사과정	신규수	사단법인 희스트	특임연구원
	정민경	사단법인 희스트	선임연구원			

연구자문위원(가나다순)

공성용	한국환경연구원	명예연구위원
박주영	한국환경연구원	연구위원
방종철	온실가스종합정보센터	연구관
심창섭	한국환경연구원	선임연구위원
안영환	숙명여자대학교	기후환경융합학과 교수
우정현	서울대학교	환경대학원 교수
이상엽	한국환경연구원	선임연구위원

| 연구보고서 2024-01 |

기후대기 통합평가모형 개발연구(II)

Development of an Integrated Modeling Framework for Assessing Climate and Air Quality (II)

© 2024 한국환경연구원

발행인 이 창 훈
발행처 한국환경연구원
(30147) 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 과학·인프라동
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
www.kei.re.kr

인 책 2024년 12월 26일
발 행 2024년 12월 31일
등 록 제 2015-000009호(1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-984-2 93530
인쇄처 (사)아름다운사람들 02-6948-9650

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
장훈 외(2024), 「기후대기 통합평가모형 개발연구(II)」, 한국환경연구원.

값 9,000원

서언

2024년 가을 폭염과 폭우 등 이상기후 현상이 빈번히 발생되었고, 이처럼 기후위기는 더 이상 낯선 이슈가 아닙니다. 국제 사회는 기후위기에 대응하기 위해 2015년 파리 협정을 체결하였고, 이에 따라 각 국가는 온실가스 감축목표를 설정하고 다양한 정책 수단을 모색하고 있습니다. 또한 각 국가는 감축정책 이행성과를 BTR을 통해 보고해야 할 의무를 지니고 있습니다.

본 연구는 기후·대기질 문제를 포괄하는 통합평가모형 KICAT(KEI Integrated Climate-ATmosphere model)을 개발하기 위한 연구입니다. KICAT은 경제적·사회적·기술적 요인을 모형 내에 반영하여 기후·대기 부문 정책 평가도구를 제공하는 것을 목표로 합니다.

본 연구는 총 6차 연도 과제 중 2차 연도 연구로, 이번 연도에는 CGE-전력-대기 모형의 일방향 연계를 시도하였고, 수송 모형과 기후변화 영향 모듈을 새롭게 개발하여 KICAT 프레임워크의 기반을 다졌습니다. KICAT 모형은 향후 다양한 기후 및 대기 부문 정책의 도입과 시행 과정에서 중요한 근거자료로 활용될 것으로 기대합니다.

끝으로 본 연구를 수행한 한국환경연구원 기후대기연구본부 장훈 선임연구위원, 탄소중립연구실 김성진 연구위원, 이정은 부연구위원, 임형우 부연구위원, 최형식 부연구위원, 문종우 부연구위원, 양유경 전문연구위원, 대기환경연구실 최기철 연구위원, 서정빈 연구위원, 국가기후위기적응센터 김현규 부연구위원, 그리고 서울대학교 구윤모 교수, 고성민 연구원, 전병찬 연구원, 한종혁 연구원, 사단법인 희스트 김만영 부회장, 신규수 특임연구원, 정민경 선임연구원께 깊은 감사를 포함합니다. 바쁘신 와중에도 자문을 통해 연구에 도움을 주신 온실가스종합정보센터 방종철 연구관, 숙명여자대학교 안영환 교수, 서울대학교 우정현 교수께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 공성용 명예연구

위원, 심창섭 선임연구위원, 이상엽 선임연구위원, 박주영 연구위원의 자문에도 감사를 포함합니다.

2024년 12월
한국환경연구원
원장 이창훈

기후대기 통합평가모형 개발연구(II)

장훈 외

1. 모형 개발

1.1 수송 모형

수송부문의 상향식 모형은 승용차와 화물 부문에 국한하여 기초 형태의 모형을 구축하였다. 우선 국내의 주요 상향식 모형의 구조와 주요 특징을 심층적으로 분석하여 모형의 프레임워크를 설계하였다. 수송부문의 상향식 모형은 크게 4개 모듈로 구성되어 있는데, ① 자동차 등록대수와 인구수, GDP 전망치를 활용하여 자동차 수요(총 자동차 수, 주행거리)를 산정하고, ② 차량 생존확률을 통해 신차와 폐차 대수가 결정되며, ③ 신차는 구매비용과 운영비용, 연료비용을 최소화하는 목적함수에 따라 결정되고, ④ 산출된 자동차 스톡을 바탕으로 에너지 소비량과 온실가스 배출량을 전망한다. 자동차 등록대수 및 주행거리 데이터, 기술 및 비용 데이터 등을 바탕으로 기초 모형을 구축하였다.

구축한 모형을 활용하여 승용차와 화물차의 차량 변화와 온실가스 배출량을 추정하였다. 승용차의 경우 2030년까지 친환경차 보급 속도가 상대적으로 낮아 2030년 온실가스 배출량이 2019년 대비 약 24% 감축하는 것 전망되었다. 2050 탄소중립 시나리오(B안)를 구현한 결과, 전기차와 수소차의 연비 개선 및 구매가격 감소 전제하에 친환경차로의 선택이 이루어져 2050년까지 온실가스 배출량을 2019년 대비 약 91% 감축하는 것으로 나타났다. 한편 화물차의 경우 소형 화물차는 대부분 전기차로 전환되고 중형과 대형 화물차는 수소차로 전환되어, 2050년에 배출량이 2019년 대비 약 72%까지 감축될 수 있다. 정책 시나리오 결과를 통해 친환경차로의 전환이 수송부문의 탄소중립을 달성하기 위해 필수적임을 확인하였다.

1.2 기후변화 영향 모듈

기후변화로 인한 기온 및 강수량 등의 변화가 건강과 에너지 사용량 등에 미치는 영향을 분석할 수 있는 영향 모듈 개발을 진행하였다. 기후변화 영향 분석과 관련하여 선행연구 조사를 수행하고, 분석을 통해 영향 모듈 구축을 위한 자료수집 및 분석방법론을 도출하였다. 또한 계량경제학적 방법론을 활용하여 기온에 따른 건강과 전기사용량 변화를 보여주는 기온반응함수(temperature response function)를 구축하였다.

건강과 에너지 부문 기온반응함수 구축 결과 두 부문 모두 기온의 변화에 따라 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다. 건강과 에너지 부문 모두 U-자 형태의 기온반응함수를 가지는 것으로 분석되었으며, 건강 부문은 폭염보다는 한파로 인한 사망률 증가가 상대적으로 더 높은 것으로 분석되었다. 에너지 부문은 가정용 전기사용량은 여름철에 증가폭이 높고, 일반용 전기사용량은 여름철과 겨울철 모두 유사한 수준의 증가율을 보였다. 기온반응함수는 건강과 에너지 부문 모두 지역(도시, 농촌)보다는 시기(전반기, 후반기)에 따른 형태 변화가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 분석되었다.

건강과 에너지 부문 기온반응함수는 향후 영향 모듈 구축 시 기후변화 영향 분석을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 당해 연도(2024년) 연구를 통해 구축한 기온반응함수의 결괏값을 바탕으로 차년도(2025년)에는 기후변화 시나리오와 연계하여 기후변화에 따른 사망자 수 및 전기사용량 변화를 분석하고 시스템화할 계획이다.

2. 모형 간 연계 및 개선

2.1 하향식 모형

본 연구에서는 대기 모형 및 각종 상향식 모형과의 연계를 고려하여 하향식 모형(KICAT-UNICON-CGE)을 개선하였다. 선행연구들에서 확인할 수 있듯이 상당수의 연계 모형들은 일방향 연성 연계(one-way soft-link) 방식을 채택하고 있으며, 본 연구 역시 개별 모형의 고유성을 유지하며 연계 시나리오 분석을 가능하게 하기 위해 이러한 연계 방식을 택하였다. 이를 위해 하향식 모형은 발전부문을 확대하여 기존 5개의 발전기술을 10개로 세부 구분하고, 대기확산모형과의 연계를 위해 CAPSS 자료와의 정합성을 높일 수 있는 방향으로 업종을 구분하였다. 이 외에도 2019년 산업연관표를 기준으로 에너지밸런스, 온실가스 배출량 자료 등을 추가 반영하여 모형 데이터 구조를 최신화하였다.

모형 고도화를 위해 기존 모형에서 고려하지 못했던 CCS 및 수소 산업에 대한 내용을 조사해 추가 모듈을 구성하였다. CCS 기술은 선진특허분류코드(CPC Y-Code)를 이용하여 국내 기업 자료를 재구성하였으며, 수소 기술은 생산방식에 따라 그린, 부생, 개질수소로 구분하여 추가 모듈을 구성하였다.

2.2 전력 모형

UNICON-K-Power 모형은 장기 온실가스 감축목표를 달성하기 위한 비용 최적의 기술투자 경로를 시뮬레이션하며, 선형계획법을 기반으로 빠르고 근사적인 해를 제공한다. 이 모형은 연간 전력수요, 시간 단위 전력수요 패턴, 발전기 열효율, 기술 및 연료비용, 재생에너지 이용률 등 다양한 데이터를 입력자료로 하여 총 전력시스템 비용을 최소화한다. K-평균 클러스터링 방법을 통해 시간해상도를 연간 8,760시간의 데이터를 672시간으로 축약하여 전력수요, 재생에너지 이용률을 구성한다. 모형에 재생에너지 공급 증가에 따른 한계비용 증가법칙을 반영하였으며, 시장 잠재량 및 기술적 잠재량에 따른 자원 효율성도 고려하였다.

한국전력통계 기반의 총발전량과 판매전력량 데이터를 이용해 모형과 정합성을 맞췄으며, 재생에너지 보급 목표를 연도별로 반영하였다. CGE 모형과의 연계를 위해 전력 모형 내의 석탄과 LNG 발전의 상세기술 분류를 통합하였으며, 한전에서 판매하는 자가발전량만을 모형 내에서 전력 공급량으로 모델링하였다.

2.3 대기 모형

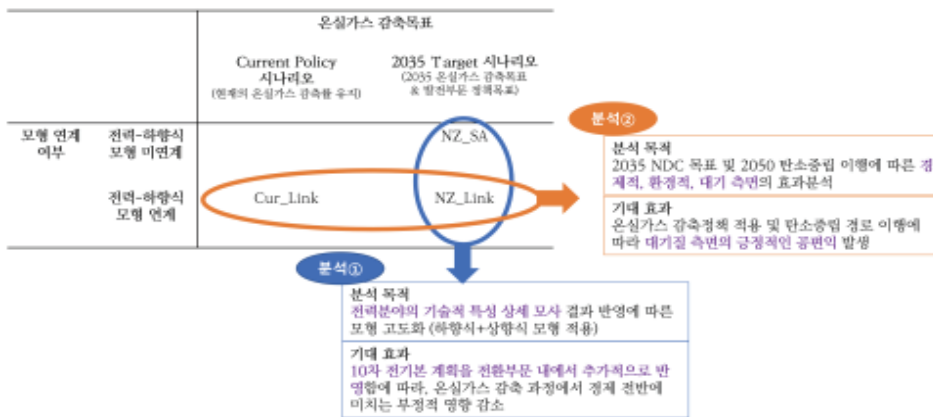
대기 모형은 전단에 위치한 부문별 모형들에서 도출된 시나리오 결과를 바탕으로 예상되는 대기오염물질 배출량과 그로 인한 미세먼지 농도 등 대기질 영향을 도출하는 것을 목적으로 개발하였다. 이를 위해 크게 배출목록 산출 모듈과 대기질 영향평가 부분으로 구성하고, 대기질 영향평가는 다시 상세 모형 기반 대기질 분석체계와 축약형 대기확산 모듈로 이원화하여 구성하는 것을 최종 목표로 한다. 이원화된 시스템을 바탕으로 다양한 시나리오에 대한 스크리닝과 양방향 연계는 축약형 모듈을, 상세한 시공간적 분석과 최종 결과 도출에는 상세 모형 기반 분석체계를 활용하고자 한다.

당해 연도 연구에서는 CGE 모형과 연계한 배출목록 산출 모듈과 축약형 대기확산 모듈에 대한 초기형을 개발하였다. 이를 기반으로 CGE에서 도출된 여러 시나리오에 따른 대기오염물질 배출 변화와 PM_{2.5} 농도 개선효과를 평가할 수 있을 것으로 기대되며, 시나리오에 따른 시범 분석은 아래와 같이 수행하였다.

3. 정책 시나리오 설계 및 분석

3.1 시나리오 구성

본 연구에서 분석한 시나리오는 목적에 따라 두 가지로 분류된다. 첫 번째 분석 목적은 모형 연계에 따른 효과 비교로, 상향식 전력 모형(KICAT-UNICON-Power)과 하향식 모형(KICAT-UNICON-CGE)의 연계 분석에 따른 차이를 비교하는 것이다. 이를 위해 두 모형을 연계하지 않은 2035년 감축목표(안) 시나리오 분석(NZ_SA)과 두 모형을 연계한 2035년 감축목표(안) 분석 시나리오(NZ_Link)를 비교하였다. 두 번째 목적은 현 정책을 유지할 때와 2035년 감축목표(안)에 따라 온실가스를 추가적으로 감축했을 때의 효과를 비교하였다. 이를 위해 현재의 온실가스 감축률을 유지하는 시나리오(Cur_Link)와 2035년 감축목표(안)에 따라 온실가스 배출량을 감축하는 시나리오(NZ_Link)를 비교하여 추가적인 온실가스 감축에 따른 경제적·환경적 편익을 분석하였다.



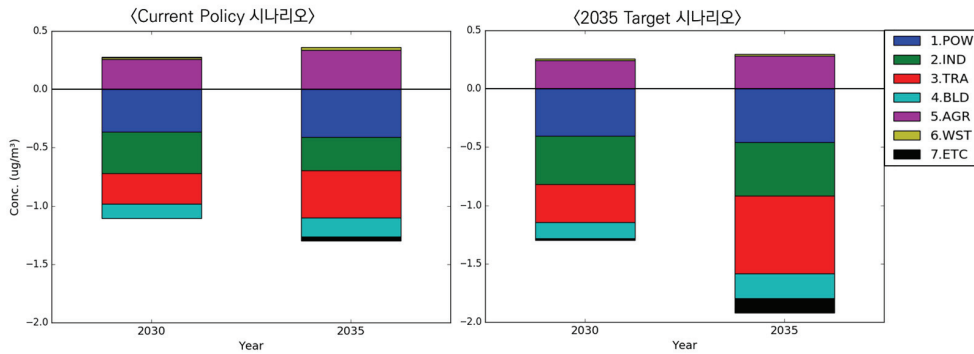
자료: 저자 작성.

그림 1 정책 시나리오 구성

3.2 분석 결과

먼저 모형 연계 유무에 따른 두 시나리오(NZ_SA와 NZ_Link) 분석 결과, 경제적 측면에서 큰 차이점으로 하향식 모형의 발전량 전망과 상향식 모형의 발전량 전망 사이에 상당한 간극이 존재하였다. 특히 연계 시나리오에서 신재생에너지 발전량이 급증하는데, 이는 『제10차 전력수급기본계획』에 따라 해상풍력 및 육상풍력 발전량이 급격하게 증가하였기 때문이다. 이로 인하여 석탄화력 및 가스화력 등의 발전량이 감소한 것으로 판단된다. 발전믹스에서의 에너지 전환으로 인해 연계 모형에서 탄소비용이 감소되었다. 탄소비용 감소에 따라 고탄소 에너지원을 많이 사용하는 다배출 업종의 온실가스 배출량이 소폭 증가할 수 있으나, 전체적인 온실가스 감축은 하락 추세를 유지될 것으로 전망된다. 대기질과 관련해 연계 모형에서는 산업 생산에 미치는 부담이 감소하여 대기오염물질 배출량 감소 경향이 둔화될 것으로 전망된다. 이러한 결과는 모형 간 연계를 통해 분석 결과의 현실 적합성을 개선될 수 있음을 나타낸다. 이번 분석에서는 전력부문과 연계하였으나, 향후 신규개발 중인 모듈(수소, 기후변화 영향 등)과의 연계를 통해 하향식 모형의 정확도를 계속적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 현 정책 시나리오와 2035년 온실가스 감축목표(안) 시나리오(Cur_Link와 NZ_Link)를 비교 분석하였다. 2035년 온실가스 감축목표(안) 이행에 따라 재생에너지 분야의 발전량이 증가하고 고효율 LNG 발전기 이용률이 개선되는 등 발전부문의 변화가 나타났다. 더불어 석탄화력 발전량이 유의미하게 감소되었다. 전력 발전량뿐 아니라 석탄 및 석유제품의 소비도 감소하였는데, 특히 온실가스 다배출 업종을 중심으로 연료 전환이 더 빠르게 이루어졌다. 다만 온실가스 감축목표를 강화하는 것은 탄소비용이 높아져 생산자에게 추가적인 부담 요인으로 작용하였다. 이로 인해 온실가스 다배출 업종은 경제적 비용이 추가로 발생할 것으로 전망되었다. 그러나 이러한 모형 분석 결과는 CCS 등의 추가적인 감축수단이 반영되지 않아, 추가적인 감축수단이 고려된다면 경제적 부담은 완화될 여지가 있을 것으로 판단된다. 한편 대기질에서는 온실가스 감축목표(안) 이행에 따라 산업 및 수송 부문의 대기오염물질이 유의미하게 감소하는 경향을 보였다. 2035 온실가스 감축목표 시나리오에서 발전 및 산업 부문의 SO_x 배출량이 큰 폭으로 감소하였고, 초미세먼지 농도 감소에 유의미하게 기여하는 것으로 분석되었다. 다만 이러한 결과는 분야별 성장 전망에 기반하여 추산되었으므로, 추후 연구를 통해 배출원 특성의 이질성에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.



자료: 저자 작성.

그림 2 기준연도(2018년) 대비 Current Policy 시나리오 및 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2030년, 2035년 초미세먼지 농도 변화 및 주요 부문별 기여

주제어 기후대기 통합평가모형, CGE 모형, 전력 모형, 수송 모형, 대기 모형, 기후변화 영향 모듈



CONTENTS

기후대기 통합평가모형 개발연구(II)


국문요약	i
제1장	서론
	1. 연구의 배경 및 필요성 1
	2. 연구의 목적 및 수행체계 2
제2장	모형 개발
	1. 수송 모형 6
	2. 기후변화 영향 모듈 41
제3장	모형 간 연계
	1. 하향식 모형 56
	2. 전력 모형 76
	3. 대기 모형 84

제4장	정책 시나리오 설계 및 분석	
	1. 시나리오 구성	94
	2. 모형 연계에 따른 효과 분석 결과	97
	3. 2035 온실가스 감축목표 시뮬레이션 분석 결과	102

제5장	결론	
	1. 결론	111
	2. 연구의 한계점 및 추후 과제	114

참고문헌		115
부 록	I. 수송모형 선행연구 사례	123

Executive Summary		143
--------------------------	--	-----



■ 표차례

표 2-1	국내 선행연구 요약	7
표 2-2	국외 선행연구 요약	9
표 2-3	국토교통부 자동차 등록자료 통계의 차량 구분	10
표 2-4	KAMA 자동차등록통계의 차량 구분	11
표 2-5	수송 모형의 주요 데이터	13
표 2-6	화물차 적재량별 등록 현황	14
표 2-7	화물차 차령별 등록 현황	14
표 2-8	화물차 유형별 세부기준	15
표 2-9	화물차 유형, 적재량, 업종별 1일 평균 주행거리	15
표 2-10	화물차 연료별 주행거리 현황	16
표 2-11	화물차 규모별 주행거리 현황	17
표 2-12	규모별 화물차의 연료 타입 종류	18
표 2-13	화물차 연료별 연비 현황	18
표 2-14	규모 및 연료 타입별 화물차 연비	19
표 2-15	화물차 유형별 가격 전망	20
표 2-16	화물차 기술 세분화	22
표 2-17	전기 승용차 및 전기 수소차 누적 보급대수	31
표 2-18	수송부문 온실가스 감축 및 대기오염 개선 대표 정책 수단	32
표 2-19	정책 시나리오	33
표 2-20	시나리오별 유종별 신규차량 등록 비중	34
표 2-21	시나리오별 유종별 누적차량 등록 비중	34
표 2-22	국내외 건강, 에너지 부문 기온반응함수 분석 사례	43
표 2-23	기온반응함수 구축에 사용한 자료의 시공간 단위와 자료 출처	44
표 2-24	건강과 전기사용량 부문 기초 통계량	45
표 3-1	모형 연계와 관련된 선행연구	61
표 3-2	하향식 모형의 업종 구분	65
표 3-3	산업연관표와 에너지밸런스 매칭	67
표 3-4	CPC Y02C 특허 코드	71
표 3-5	수소 기술별 기초자료	74
표 3-6	2035년 대기오염 물질 배출량 비교	83
표 3-7	대기 배출원 분류체계와 CGE 산출물 연계 분류 예시	87
표 3-8	전구물질 배출량과 미세먼지 성분 농도와의 연계	91

표 4-1	Current Policy 시나리오와 2035 Target 시나리오의 온실가스 배출량 전제 비교	96
표 4-2	시나리오 간의 전제 비교	97



■ 그림차례

그림 1-1	연구의 목적	3
그림 1-2	2차연도(2024년) 연구 내용	4
그림 1-3	연차별 주요 연구 내용	4
그림 1-4	연구 프레임워크	5
그림 2-1	수송 모형 개발 방향	21
그림 2-2	도로부문의 네스팅 구조	22
그림 2-3	자가용 부문의 RES	23
그림 2-4	승용차 등록대수 전망	24
그림 2-5	화물차 대수 추이 및 전망	25
그림 2-6	화물차 연도별 총 주행거리 추이 및 전망	26
그림 2-7	소형 화물차의 평균 주행거리 분포	26
그림 2-8	중형 화물차의 평균 주행거리 분포	27
그림 2-9	대형 화물차의 평균 주행거리 분포	27
그림 2-10	자동차 폐차확률 전망(위: 승용차, 아래: 화물차)	28
그림 2-11	신규 승용차 수요 전망	34
그림 2-12	누적 승용차 수요 전망	35
그림 2-13	승용차 부문 시나리오별 배출량 전망	35
그림 2-14	신규 화물차 연료별 등록비중 전망(좌: BAU, 우: 정책 시나리오)	36
그림 2-15	누적 화물차 등록대수 전망(좌: BAU, 우: 정책 시나리오)	36
그림 2-16	소형 화물차 연평균 주행거리별 등록대수 전망	37
그림 2-17	중형 화물차 연평균 주행거리별 등록대수 전망	38
그림 2-18	대형 화물차 연평균 주행거리별 등록대수 전망	39
그림 2-19	화물차 부문 시나리오별 배출량 전망	40
그림 2-20	시군구 단위 월평균 만 명당 사망자 수 추세(2010~2019년)	46
그림 2-21	가정용 전기사용량 추세	46
그림 2-22	일반용 전기사용량 추세	47
그림 2-23	한국의 기온과 강수량 및 기온 빈	48
그림 2-24	건강부문 기온반응함수 산정 결과	50
그림 2-25	건강부문 조건별 기온반응함수 산정 결과	51
그림 2-26	전기사용량 부문 기온반응함수 산정 결과	51
그림 2-27	가정용 전기사용량 부문 조건별 기온반응함수 산정 결과	53
그림 2-28	일반용 전기사용량 부문 조건별 기온반응함수 산정 결과	54

그림 3-1	하향식 모형 구성요소	58
그림 3-2	CGE-전력-대기 모형 연계도	62
그림 3-3	발전부문 수정	63
그림 3-4	산업연관 분석 결과	64
그림 3-5	하향식 모형 생산파트 구조도	68
그림 3-6	CCS 제거량 및 비중(2026년, 2030년, 2050년)	69
그림 3-7	CCS 관련 산업 정의 프로세스	70
그림 3-8	CCS 투입구조 비중	72
그림 3-9	수소에너지 소비 현황(2022년 기준)	75
그림 3-10	전력 모형 관련 주요 입력자료 및 결과	77
그림 3-11	태양광 공급 비용 곡선 모델링	78
그림 3-12	한국전력통계 기반 2023년 총발전량 및 판매전력량 흐름도	79
그림 3-13	『제10차 전력수급기본계획』의 태양광, 풍력 누적 보급목표	80
그림 3-14	『제10차 전력수급기본계획』의 태양광, 풍력 연도별 신규 보급목표	80
그림 3-15	『제10차 전력수급기본계획』에 따른 육상 및 해상풍력 누적 보급용량 추정	81
그림 3-16	시나리오별 발전량 변화	82
그림 3-17	시나리오별 대기오염물질 배출량 변화	83
그림 3-18	전력, CGE 모형과 연계한 대기확산 영향 분석체계 모식도	85
그림 3-19	CGE 모형과 대기 배출원 및 대기 배출량 산출 모듈 연계체계	86
그림 3-20	CGE와 연계한 대기 배출량 산출 모듈 구성도	88
그림 3-21	CGE 산출물 매핑이 적용된 대기 배출원별 배출량 산출 예시	89
그림 3-22	축약형 대기확산 모듈 개발에 활용된 대기질 모형 수행 조건	90
그림 3-23	기준연도(2018년) 전국 일평균 PM _{2.5} 관측농도(OBS)와 모델 모의농도(MOD)의 산포도	91
그림 3-24	부문별 배출량에 의한 PM _{2.5} 농도확산 영향 분석 예시	92
그림 3-25	초기 구축된 배출모형 기반 배출량 산정 결과(좌) 및 시나리오에 따른 농도 변화(우) 분석 예시	93
그림 4-1	정책 시나리오 구성	95
그림 4-2	미연계 시나리오(NZ_SA)와 연계 시나리오(NZ_Link) 구조도	96
그림 4-3	신재생에너지 발전량(미연계 시나리오 - 연계 시나리오)	98
그림 4-4	전통에너지 발전량(미연계 시나리오 - 연계 시나리오)	99
그림 4-5	누적 GDP 차이 비교(미연계 시나리오 - 연계 시나리오)	100

그림 4-6	탄소비용(미연계 시나리오 - 연계 시나리오)	100
그림 4-7	주요 산업 온실가스 배출량(미연계 시나리오 - 연계 시나리오)	101
그림 4-8	온실가스 감축목표 시나리오에 대한 모형 연계(좌) 및 비연계(우)에 따른 2030년, 2035년 대기오염물질 배출 전망 비교	102
그림 4-9	신재생에너지 및 전통에너지 발전량 비교(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)	103
그림 4-10	석탄 및 석유제품 소비량(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오) ...	104
그림 4-11	누적 GDP 차이 비교(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)	105
그림 4-12	탄소비용(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)	105
그림 4-13	주요 산업 온실가스 배출량(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오) ..	106
그림 4-14	기준연도(2018년) 대기오염물질별 배출량(위)과 Current Policy 시나리오(좌), 2035 온실가스 감축목표 시나리오(우)에 따른 대기오염물질 배출량 변화 비교 ...	107
그림 4-15	기준연도(2018년)(위) 및 Current Policy 시나리오(좌), 2035 온실가스 감축목표 시나리오(우)에 따른 2035년 대기오염물질별 배출량 및 주요 부문별 기여	108
그림 4-16	Current Policy 시나리오 및 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2030년, 2035년 대기오염물질별 주요 부문별 기여 변화	109
그림 4-17	기준연도(2018년) 대비 Current Policy 시나리오 및 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2030년, 2035년 초미세먼지 농도 변화 및 주요 부문별 기여 ...	110

제 1 장 서 론

1. 연구의 배경 및 필요성
2. 연구의 목적 및 수행체계

1. 연구의 배경 및 필요성

이상기후 현상과 대기질 문제는 전 세계가 직면한 가장 중요한 환경 문제로 각각 독립적인 이슈로 다뤄지는 경우가 많았으나 통합적 접근의 필요성이 대두되고 있다. 온실가스와 대기오염물질은 발전, 수송, 산업 등 동일한 배출원에서 화석연료 연소를 통해 배출되어 배출원과 저감 정책이 유사하다. 이러한 배경에 따라 온실가스 감축과 대기오염물질 관리를 동시에 달성할 수 있는 정책적 전략과 과학적 기반이 요구되고 있는 실정이다.

특히 『제3차 대기환경개선 종합계획』(환경부, 2022)은 대기오염물질과 온실가스를 통합적으로 관리하고 정책 간 연계성을 강화할 필요성을 명시하고 있다. 예를 들어 전기차 보급 확대 정책은 온실가스와 대기오염물질을 동시에 감축 가능하여 공편익(co-benefit)을 제공하는 것으로 평가된다. 그러나 이런 유사 정책들이 개별 부처에서 독립적으로 실행될 경우 비용 측면의 비효율성과 정책 중복의 문제가 우려된다. 따라서 정책 간의 정합성과 비용 효율성을 극대화하는 통합적 접근이 필요하다.

온실가스와 대기오염물질의 상호작용은 기후변화와 대기질에 복합적인 영향을 미친다. IPCC(2023, pp.68-69)는 일부 대기오염물질이 단기 기후 강제 요인(SLCF: Short-Lived Climate Forcers)으로 작용해 지구 복사와 강수 시스템에 영향을 주며, 기후변화는 대기 화학 과정에 변화를 일으켜 대기질에도 영향을 미칠 수 있음을 지적하였다. 또한 IPCC(2023, p.89)는 부문 간 감축 수단의 공편익 및 상충(trade-off) 효과를 고려해야 함에 따라 통합적 접근이 중요하다고 주장하였으며, 기후변화와 대기 문제를 동시에 해결할 수 있는 전략이 수립되어야 함을 강조하였다.

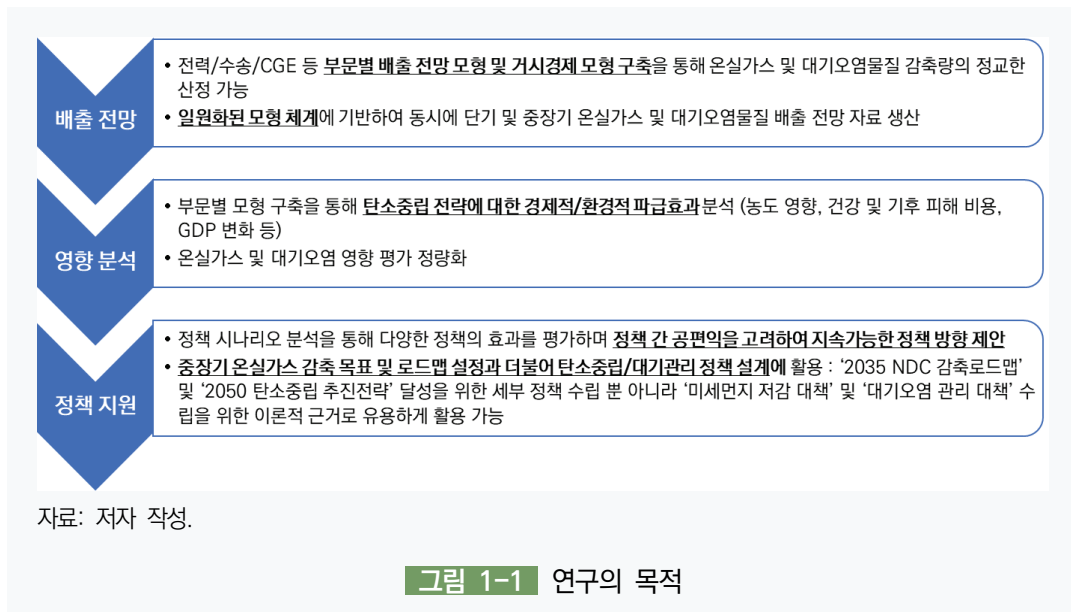
따라서 온실가스와 대기오염물질의 배출원 및 정책적 유사성을 고려하여 온실가스 감축과 대기질 개선을 동시에 달성할 수 있는 시나리오를 개발해야 한다. 대기오염에 따른 조기 사망과 질병은 의료지출 증가 및 노동생산성 저하를 야기하며, 경제에 부정적인 영향을 초래한다. 이에 온실가스 및 대기오염물질 배출 전망은 물론 대기농도 변화, 건강 영향, 경제적 파급효과까지 종합적으로 아우르는 평가도구 개발이 필요하다.

기후-경제-대기 통합 모형은 온실가스와 대기오염물질 배출을 전망하여 기후와 대기질 변화 예측 및 정책의 경제적 파급효과를 분석할 수 있는 유용한 도구이다. 그러나 이와 같은 통합 평가모형이 국내에는 부족한 것으로 평가된다. 기존 모형은 배출량 전망을 단방향으로 분석하여 기후-대기-경제의 피드백 효과를 충분히 반영하지 못하는 것으로 평가된다. 반면 미국, 유럽연합(EU), 중국 등은 GAINS, PAGE, WITCH와 같은 글로벌 모형을 활용해 온실가스 감축과 대기오염 저감의 공편익을 분석한다. 이와 같은 글로벌 모형을 이용하여 우리나라 정책의 효과성을 분석하고 있으나, 국내 상황에 부합한 정교한 양방향 통합모형 개발이 시급한 것으로 사료된다.

따라서 본 연구는 기후-대기 통합평가모형을 개발하여 탄소중립 정책의 경제·환경적 파급 효과를 종합적으로 분석하는 것을 목표로 한다.

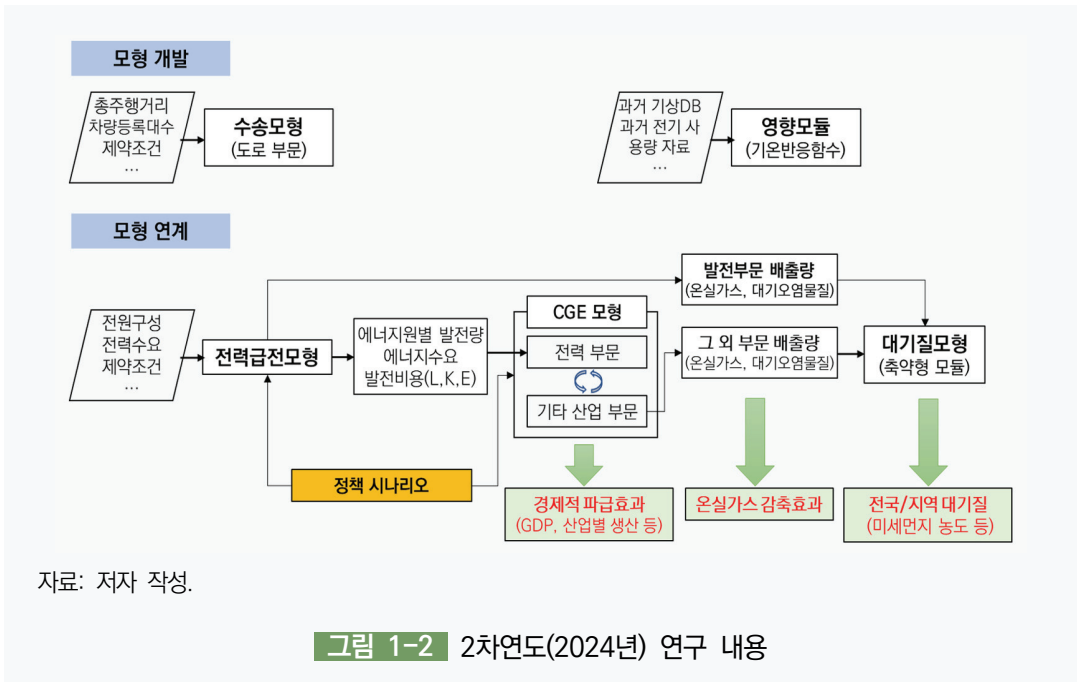
2. 연구의 목적 및 수행체계

본 연구는 기후변화와 대기질 변화를 종합적으로 평가·예측하는 기후대기 통합평가모형인 KICAT(KEI Intagrated Climate ATmosphere) 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 전력, 수송, 하향식 CGE 모형 등 부문별 모형을 구축하여 정교한 온실가스 배출 전망치를 산정하고자 한다. 또한 모형 간 연계를 통해 일원화된 모형 체계를 구축하여 온실가스 및 대기오염 물질 배출량 전망치의 현실 정합성을 제고하고, 대기확산모형을 이용하여 대기오염물질의 농도 변화를 관찰하고자 한다. 그리고 KICAT 모형을 이용해 정책 시나리오 분석을 수행하여 정책의 효과성을 평가하고 정책수립·의사결정 과정에 기초자료를 제공하고자 한다.



본 연구는 총 6개 연차에 걸쳐 순차적으로 수행될 계획이다. 1차 연도(2023년)에는 통합평가 모형의 구성 방안을 수립하고, 전력급전모형과 대기확산모형 간 연계 방안을 도출하였다. 또한 탄소중립과 미세먼지 저감 정책 DB를 구축하고, 발전부문에서 사용될 암모니아와 수소 등 무탄소 연료의 배출물질 DB를 구축하였다.

당해 연도인 2차 연도 연구에서는 부문별 배출전망 모형 개발 및 고도화와 대기확산모형과의 연계에 집중하였다. 우선 단독모형 개발 측면에서 수송 모형의 경우 2024년 처음으로 개발 되기 때문에 도로부문(승용차, 화물차)의 기초 형태의 상향식 모형을 구축하였다. 영향 모듈은 기온변화가 건강, 전기수요 등에 미치는 영향을 평가하기 위해 과거 기상자료와 전기사용량 자료를 바탕으로 기온반응함수를 도출하여 향후 모형 개발을 위한 기초작업을 수행하였다. 전력 모형은 CGE 모형과의 연계를 위해 전력 모형의 구조를 개선하고 『제10차 전력수급 기본계획』을 바탕으로 태양광, 육상 및 해상 풍력 공급 목표를 반영하였다. CGE 모형은 전력 모형의 결과를 연계하기 위해 발전부문을 상세화하였으며, 탄소중립 신산업(CCS, 수소)을 고려하여 모형을 고도화하였다. 대기확산모형에서는 CGE 모형과의 연계를 위해 배출원을 재분류하여 배출량 산출 모듈을 구축하였으며, 단순(reduced-form) 대기확산 영향 분석 모듈을 통해 미세먼지 농도 결과를 제시하였다. 마지막으로 2035 온실가스 감축목표(안)에 대한 시나리오를 구축하고 연계 모형을 활용하여 시범 분석하였다. 특히 2024년은 전력과 CGE, 대기 모형 간 단방향 연계 작업을 통해 GDP를 비롯한 경제적 파급효과와 온실가스 감축효과, 대기오염물질 농도 변화 등을 분석하였다.



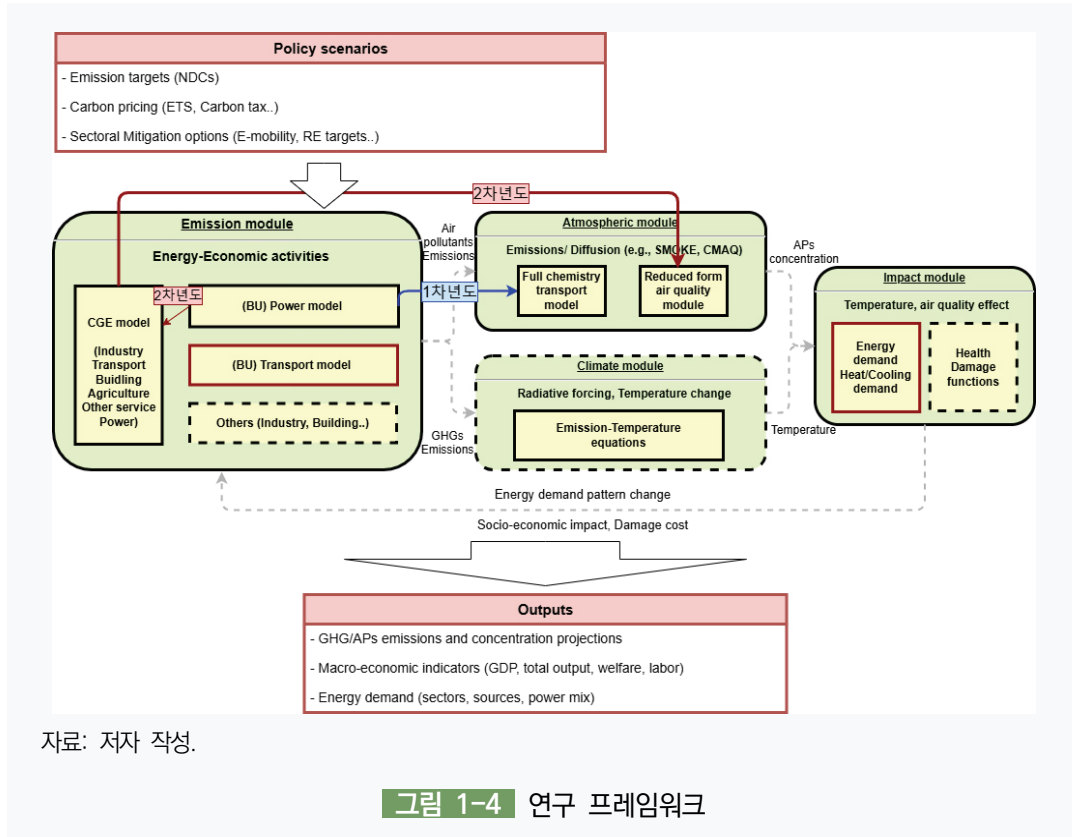
3차 연도는 부문별 모형 간 연계를 본격적으로 수행하는 동시에 병렬적으로 독립 모형을 개선하고 고도화하고자 한다. 예를 들어 수송 모형의 경우 미구축된 도로부문의 기본 모형을 구축하는 동시에 모형 간 연계를 위한 개선 작업을 시행한다. 4차 연도에는 모형 간 연계를 위한 프레임워크를 개발하며 부문 모형(수송-대기, 전력-수송-CGE 등) 간 연계 작업을 수행한다. 마지막으로 5, 6차 연도에는 전체 모형 및 모듈을 통합하고 연계 모형을 고도화하는 작업을 수행한다. 더불어 탄소중립 정책 시나리오 분석을 통해 경제적 파급효과와 온실가스 감축효과, 대기질 개선효과 등을 분석한다.

	CGE 및 통합모형	전력 모형	수송 모형	대기 확산 모형	영향모듈	
1차년도	통합평가모형 관련 국내외 연구 사례	전력모형-대기확산모형 연동방안 마련		대기확산모형 계절 단위 세분화 방안 마련		
2차년도	CGE 모형 고도화, 전력 모형과 시범 연계	CGE-전력모형 연계 (단방향)	도로 부문 수송 모형 개발	대기 확산 영향 모듈 개발	기후변화 영향 모듈 개발을 위한 전략 수립	
3차년도	전력, 수송 및 대기확산모형과의 연계	CGE-전력모형 연계 (양방향)		전력 및 수송모형 연계 방안 마련	부문별 기후변화 영향 분석 및 피해비용 산정	탄소중립/대기정책 시나리오 구성
4차년도	전력, 수송 및 대기확산모형과의 연계	전력모형과 기후영향(전력수요) 연계	CGE, 전력 및 대기확산 모형과의 연계	이중(dual) 대기확산모듈 개발 및 통합 모형 연계	전력 모형과의 연계	
5차년도	전체 모듈 통합 및 모형 고도화	전력 모형 고도화	수송 모형 고도화	통합 모형을 위한 모형 개선 및 고도화	통합 모형을 위한 모듈 개선 및 고도화	시나리오 구성 적용을 통한 정책적 합의 연구
6차년도	(상하향식)대기확산/영향					

자료: 저자 작성.

그림 1-3 연차별 주요 연구 내용

본 연구는 최종적으로 기후-대기 통합평가모형 KICAT을 구축하는 것을 목표로 한다. KICAT은 부문별 배출 전망을 비롯한 경제적 파급효과, 대기질 개선 및 건강 영향을 종합적으로 분석·평가하는 모형으로, 2035 국가 온실가스 감축목표 및 중장기 탄소중립 경로를 수립함에 있어 중요한 도구로 활용될 것으로 기대된다.



제 2 장

모형 개발

1. 수송 모형
2. 기후변화 영향 모듈

1. 수송 모형

가. 선행연구

본 절에서는 승용차와 화물부문에 대한 수송부문 상향식 모형을 구축하기 위하여 국내외 주요 상향식 모형 선행연구 사례를 살펴보았다. 국내 선행연구로는 권오상 외(2018), UNICON-수송모형, METER, 오인하(2011)를 살펴보았다. 국내 모형들은 캘리브레이션 중첩 로짓 모형(권오상 외, 2018; UNICON-수송모형), LP 모형(METER), BLP 모형(오인하, 2011) 등이 검토되고 있는 것으로 파악되었다. 국외 선행연구들은 OECD-ITF, UK TEAM, NREL TEMPO, IEA MoMo, GCAM-transport와 같이 국제기구 등에서 활용 중인 모형을 중심으로 살펴보았다. 이들 모형은 로짓모형에 기반하고 있었으며, 국내 모형보다 상세한 교통 수요 전망 및 공급(인프라) 고려, 다양한 정책 분석이 가능한 특징을 지니고 있다. 개별 모형들의 분석기간, 주요 전망 변수, 빈티지 반영방식 및 정책시나리오 등 주요 분석 결과는 <표 2-1>과 <표 2-2>와 같다. 각 모형에 대한 자세한 사례분석 결과는 <부록 1>에 수록하였다. 국내외 주요 상향식 모형의 구조와 특징 분석결과를 기반으로 본 연구의 모형 프레임워크를 설계하였다.

표 2-1 국내 선행연구 요약

구분	권오상 외(2018)	UNICON-수송모형	METER	오인하(2011)
사용 모형	Calibration 중첩 로짓(nested logit) 모형		선형계획법(Linear Programming) 모형	랜덤계수 이산선택모형(BLP)
분석 기간	2016~2050년	2015~2050년	2019~2100년	1997~2002년
분석 결과 (주요 변수 전망치)	자동차 유형별 등록대수 연료별 연간 수요량	차종 비율 에너지 사용량	기술 보급량 조화	신차 구매 선택
기술	32개 자가용 차종(기술) • 1단계: 승용차, 승합차, 소형트럭 • 2단계: 휘발유, LPG, 경유, 하이브리드, 전기, 플러그인 하이브리드, 수소	도로여객 내 59개 기술 - 자가용: 2단계 기술 구분 - 1단계: 승용 일반, SUV, 승합 일반 - 2단계: 휘발유, LPG, 경유, 하이브리드, 전기, 연료전지(수소) • 택시, 시내버스, 시외버스: 1단계 기술 구분 - 택시: LPG, 하이브리드, 전기, 수소 - 시내버스: 경유, CNG, 전기, 수소 - 시외버스: 경유, 전기	84개 기술로 세분화 • (용도) 비사업용, 사업용 • (차종) 승용차, 승합차, 화물차 • (차급) 승합차: 소형, 중대형, 화물차: 소형, 중형, 대형 승용차: 차급 구분 없음 • (연료) 휘발유, 경유, LPG, CNG, 전기, 수소 • (기술) 내연기관, 하이브리드, 플러그인 하이브리드, CNG차, 전기차, 수소차	별도의 기술 구분을 하지 않음 (참고) 김대욱, 김종호(2015) • 1단계: 국산차, 기타제화 • 2단계: 경형, 소형, 중소형, 중형, 대형, 미니밴, SUV, 스포츠카 • 3단계: 차량 모델 예: 이벤티, 소나타 등
주요 추정 파라미터	가격탄력성, 차량 유형별 가중치	가격탄력성, 비-비용요소 값	-	시장점유율, 평균효용 수준, 관측되지 않는 품질특성 (소비 측면/공급 측면)
총 수요 전망	연간 주행거리: 고펠레츠 합수 (설명변수: 1인당 자가용 보유대수, 1인당 GDP 등) • 인구 천 명당 자동차 등록대수: 고펠레츠 합수(설명변수: 1인당 GDP)	등록대수(자가용 일반): 고펠레츠 합수(설명변수: 1인당 GDP) 연간 수요: 고펠레츠 합수, 지수함수 (설명변수: 1인당 GDP)	총 주행거리: 회귀분석(설명변수: 인구, GDP, 국제유가, 자동차 등록대수) • 자동차 등록대수: 로그선형함수 (설명변수: GDP, 인구)	수요 전망 미고려

표 2-1의 계속		오인하(2011)		
구분	권오상 외(2018)	UNICON-수용모형	METER	
데이터	<ul style="list-style-type: none"> 자비용 판매가격 : 네이버 자동차, 제작사 홈페이지 연비: 온실가스종합정보센터 연평균 운행거리: 임의 가정(13,000km) 단위당 에너지가격 : 오피넷, 수소는 김봉진(2015) 취득세: 판매가 2% 등록세 : 승용-승합 판매가 5%, 화물 판매가 3% 자동차세: 2015 국가교통통계 지방세 자동차 등록대수 : 국토교통부 자동차등록현황 가구당 월평균 운송기구 유지비 및 수리비 : 2인가구 이상 가계수지 가구수, GDP: 한국은행 경제통계시스템 	<ul style="list-style-type: none"> 자동차 등록대수: 국토교통부 자동차등록현황 GDP: 국회예산정책처 장기재정전망 연간 주행거리: 국토교통부 연간 주행거리 평균 승차 인원: (자가용) 에너지총조사보고서, 1) (택시) 국가교통DB, (시내/시외버스) 임의 가정 자동차 실연비: 네이버 자동차, EIA Annual Energy Outlook 연료가격: 오피넷 자동차 구매비용: 네이버 자동차 대중교통 1km 평균 요금: 대중교통 DB 택시 운송 수입금: 서울시 홈페이지 고속도로 통행료 수입금: 공공 데이터 포함 요일별 고속/시외버스 평균 이용인원 및 요금: 대중교통DB 대중교통 현황조사 	<ul style="list-style-type: none"> 인구: 통계청 장래 인구 및 가구 추계 GDP: 한국은행 자동차 등록대수: 국토교통부 총 주행거리: 국토교통부 차량 구입비: 제조사 홈페이지 연비: 한국에너지공단, 미국 NREL 연료가격, 에너지소비량 : 페트로넷, EV 무공해 통합누리집, 환경부 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 품질특성 변수(내외부 크기, 연비, 무게 대비 마력, 연료타입, 자동변속, 차종타입): 제조사 홈페이지 차량 판매량: 자동차공업협회
빈티지 반영 방식	<ul style="list-style-type: none"> 차량분포함수 추정 (곱메르츠 함수, 로지스틱 함수) 	<ul style="list-style-type: none"> 폐차확률함수 추정 (수정 웨이블 분포 가정) 	<ul style="list-style-type: none"> 자동차 생존확률 추정 (웨이블 분포 가정) 	-
정책 시나리오	<ul style="list-style-type: none"> 신차가격 하락: 가격 외생적 변화 보조금: 보조금 외생적 고려 에너지 효율 및 연비 개선: 차량분포함수에 연비 변화 촉차적으로 반영 	<ul style="list-style-type: none"> 탄소세: 연료별 배출계수 조정 기술변화: 친환경자동차 보급 확대 및 평균연비 개선 연료가격 변화: 수소가격 등 외생적 변화 가정 	<ul style="list-style-type: none"> 수요관리 강화: 주행거리 감소를 모형 내 반영 바이오디젤: 배출계수 조정 친환경자동차 전환: 내연기관 퇴출시점 제약년 설정 	<ul style="list-style-type: none"> 참고: 신동원(2019) 유류세 조정에 따른 신차 구매 변화 분석

주: 1) 2005년, 2008년, 2011년, 2014년의 평균값 적용.
 자료: 오인하(2011); 권오상 외(2018); 환경부, 환경산업기술원(2021); 숙명여자대학교 지구환경연구소(2023.12)를 참고하여 저자 재구성.

표 2-2 국외 선행연구 요약

구분	OECD-ITF	UK TEAM	NREL TEMPO	IEA MoMo	GCAM-Transport
분석 기간	~2050년	~2100년	~2050년	~2060년	~2100년
분석 결과 (주요 변수 전망치)	주행거리, 비용, 교통수단 구성 추정, 에너지 사용량, 배출량	교통수요, 수단별 점유율, 에너지 사용량, 배출량 및 환경영향	총 여행비용, 수단별 점유율, 에너지 사용량 및 배출량	주행거리, 수단별 점유율, 연비, 에너지 사용량, 배출량	주행거리, 수단별 점유율, 에너지 사용량, 배출량
모형 구조	사회경제적 특성 모듈, 토지이용 모듈, 교통공급 모듈, 차량대수 모듈, 교통수요 모듈, 환경 모듈로 구성	교통수요 모듈, 자동차 제고 모듈, 직접 배출 모듈, 생애 전 주기 및 환경영향 모듈로 구성	기술별 특성-교통수요-교통 옵션-수단/기술선택-차량 재고-시스템 레벨 결정 흐름으로 분석	ASIF 구조 (Activity*Structure*energy Intensity=Fuel use)	교통수요(주행거리) 추정, 여행비용 추정, 시장점유율 추정으로 구분됨
총 수요 전망	1인당 GDP 및 기타 사회경제적 요인을 기반으로 추정	시물레이션 접근 방식 (인구, 소득, 연료가격)	총 여행비용 및 여행시간 점유율, 인구성을 고려하여 추정	GDP, 인구, 운송시스템 구조, 연료가격 기반 추정	1인당 GDP, 여행비용, 인구, 소득·가격탄력성 기반 추정
기술선택 모형	교차 중첩 로짓 모형	Multinomial 로짓 모형	로짓 모형	로짓 모형	Calibration 로짓 모형
비탄지 반영 방식	생존합수 (웨이브 분포, 실패 기율기 및 특성수명 정보)	폐차확률합수 (수정 웨이브 분포, 실패 기율기 및 특성수명 정보)	생존율 혹은 폐차율	폐차정보 반영	생존율
정책 시나리오	<ul style="list-style-type: none"> • 혼합요금제: 모드별 차별화된 도로요금 부과 • 대중교통 공급량 증가 • 교통관리: 도로기반 대중교통 빈도/속도 증가 • 카셰어링 인센티브: 공유 차의 대체비용 감소 • 저공해차량 인센티브: 저공해차 평균 구매비용 감소 	<ul style="list-style-type: none"> • (재정) 차량 구매세, 연료세, 보조금 등 • (규정) 연비 기준, 연료 의무, 저배출 구역 지정 • (기타) 카셰어링, 수요 변화, 라벨링, 전력믹스 변화, 대중교통 인프라 개발 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 감축목표 달성을 정책수단 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • 파리협정 목표 달성을 위한 각 수단별 감축량과 감축수단 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • (에너지 효율) 연비 개선에 따른 기술선택 변화 분석 • (탄소 가격정책) 탄소세, 배출권거래제 적용 효과 • (기타) 보조금, 배출기준 등

자료: Mishra et al.(2013); Teter(2018); Christian et al.(2019); OECD/ITF(2020); Muratori et al.(2021)을 참고하여 저자 재구성.

나. 데이터

1) 승용차 부문

가) 국토교통부 자동차 등록자료

자동차 등록대수와 주행거리에 대한 자료는 국토교통부의 ‘자동차 등록현황보고’¹⁾에 기반한다. 국토교통부 자료는 매년 매월 단위로 업로드되며, 차량의 용도, 차종, 크기, 연료 등 다양한 형태의 통계자료를 제공한다. 차종의 경우 승용, 승합, 화물, 특수차로 나뉘며, 유형에 따라 (승용) 일반형(국산/외산), 승용 겸 화물, 승용 다목적, 승용 기타, (승합) 일반형, 특수형, (화물) 일반형, 덤프형, 밴형, 특수용도형, (특수) 등으로 나뉜다. 또한 용도에 따라 관용, 자가용, 영업용을 구분하며, 연료 기준은 휘발유, 경유, LPG, 전기, CNG, 하이브리드 (휘발유/경유/LPG/CNG+전기), 수소, 기타연료 등으로 구분한다.

표 2-3 국토교통부 자동차 등록자료 통계의 차량 구분

차종	유형	크기
승용	일반형 (국산+외산)	800CC 미만 1,000CC 미만 1,500CC 미만 ...
		5,000CC 이상 (500CC 단위로 구분) 저속전기, 전기
	승용 겸 화물형	1,500CC 미만 ...
		3,500CC 이상 저속전기, 전기
다목적형	1,500CC 미만 ...	
	3,500CC 이상 저속전기, 전기	
기타형	1,500CC 미만 ...	
	3,500CC 이상 저속전기, 전기	
승합	일반형	시내버스, 시외버스, 전세버스, 고속버스, 농어촌버스, 마을버스 일반기타(승차 인원별)
	특수형	구급차, 장의차, 헌혈·채혈 차, 방송·보도용 차, 승합피견인형, 승합특수형 기타

1) 국토교통 통계누리, “자동차 등록현황보고”, 검색일: 2024.4.30.

표 2-3의 계속

차종	유형	크기
화물	일반형	픽업형, 카고형 (1톤 이하, 3톤 이하, 5톤 미만, ... 톤별 구분)
	덤프형	1톤 이하, 3톤 이하, 5톤 미만, ... 톤별 구분
	밴형	1톤 이하, 3톤 이하, 5톤 미만, ... 톤별 구분
	특수용도형	청소차, 살수차, 소방차, 냉장, 냉동차, 곡물 사료운반, 유조차, 탱크로리, 피견인차
특수	견인형	5톤 이하, 10톤 미만, 10톤 이상
	구난형	5톤 이하, 10톤 미만, 10톤 이상
	특수용도형	고소작업차, 고가사다리소방차, 오가크레인, 피견인형, 기타

자료: 국토교통 통계누리, “자동차 등록현황보고”, 검색일: 2024.4.30를 참고하여 저자 작성.

나) 한국자동차모빌리티산업협회(KAMA) 자동차등록통계월보²⁾

한국자동차모빌리티산업협회(KAMA: Korea Automobile & Mobility Association)에서는 월별 자동차 등록통계를 구축하고 있다. 협회 자료는 제작사별·모델별 다양한 기준으로 세분화된 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 우선 차종의 경우 승용, 승합, 화물, 특수로 분류하며, 크기별로 경형(1.0L 미만), 소형(1.6L 미만), 중형(1.6~2.0L), 대형(2.0L 이상)을 구분한다. 또한 연료 분류는 휘발유, 경유, 하이브리드, LPG, 전기, 수소이며, 1년 미만~10년 미만, 15년 미만, 15년 이상의 연식별 데이터를 제공한다.

표 2-4 KAMA 자동차등록통계의 차량 구분

차종	크기	연료	예시
승용	경형(1.0L 미만) 소형(1.6L 미만) 중형(1.6~2.0L) 대형(2.0L 이상)	휘발유, 경유, 하이브리드, LPG, 전기, 수소	ACCENT, AVANTE, VERNA 등
승합	경형(1.0L 미만) 소형(1.6L 미만) 중형(1.6~2.0L) 대형(2.0L 이상)	휘발유, 경유, 하이브리드, LPG, 전기, 수소	STAREX, GALLOPER, SANTAFE 등
화물	경형, 소형, 중형, 대형 및 톤별 분류	휘발유, 경유, 하이브리드, LPG, 전기, 수소	PONY, PORTER, MIGHTY DUMP 등
특수	경형, 소형, 중형, 대형 및 톤별 분류	휘발유, 경유, 하이브리드, LPG, 전기, 수소	LIBERO, PONY PICK UP, STRAREX VAN 등

자료: 한국자동차산업협회, “자동차등록통계월보(2010.1~2023.12)”, 검색일: 2024.5.30를 참고하여 저자 작성.

2) 한국자동차모빌리티산업협회, “자동차등록통계월보(2010.1~2023.12)”, 검색일: 2024.5.30.

다) CAPSS 대기오염물질 배출량³⁾

환경부 국가미세먼지정보센터 대기정책지원시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System)에서는 매년 대기오염물질 배출량을 배출원별로 상세하게 제공하고 있다. 수송부문의 경우 자동차 특성 및 주행거리에 따라 배출량을 산정하고 있어 이에 대한 자료를 활용할 수 있다. 환경부 국가미세먼지정보센터 CAPSS(이하 'CAPSS') 자료에서는 차종을 승용, 승합, RV, 화물, 특수, 버스, 택시로 구분하며, 크기별로는 경형, 소형, 중형, 대형, 전인차, 고속버스, 구난차, 덤프트럭, (시내, 시외, 전세) 버스, 특수를 구분한다. 연료의 경우 휘발유, 경유, LPG, CNG, 수소차, 전기차, 하이브리드를 다루며, 15년까지의 연식을 제공하고 있다.

이 외에도 자동차 주행거리(분포)에는 한국교통안전공단 자동차주행거리통계(용도별, 차종별, 규모별, 연료별) 차령별 주행거리를 참고하였다.

라) 기타 자료

자동차 연료 소비를 계산하기 위해 필요한 연비 및 연료 소비량 데이터는 각각 '에너지총조사 보고서(산업통상자원부, 2022)'와 '2023 자동차 에너지소비효율 분석집(한국에너지공단, 2023)', 그리고 네이버 자동차 정보 및 제작사 홈페이지 자료를 활용하였다. 실연비의 경우 차종 및 차급, 연료별 대푯값을 활용하였으며, 연비 전망 자료는 NREL의 'Transportation Annual Technology Baseline(ATB)' 전망치를 활용하여 기준연도 연비 대비 증가율을 반영하였다.

자동차 기술비용과 관련하여 차량가격은 각 차종 및 유종별 대표 차량을 선택하여 제작사 홈페이지 및 네이버 자동차 정보를 활용하여 수집하였다. 미래 차량가격의 경우 NREL의 유종별 가격변화 전망치를 활용하여 기준연도 차량가격 대비 변화율을 적용하였다. 예를 들어 내연기관차의 경우 연평균 0.2%씩 구매가격이 증가한다고 가정하였으며, 하이브리드 차의 경우 연평균 0.1%, 전기차의 경우 1%, 수소차의 경우 약 2%씩 가격이 하락한다고 가정하였다. 유류가격의 경우 오피넷⁴⁾의 주유소 제품별 연평균 판매가격을 활용하였으며, 전기는 급속/완속 충전의 중간값을, 수소는 차량 충전용 가격을 적용하였다. 자동차 유지보수 비용으로 수리비 및 보험료를 취합하기 어려워 차량가격 대비 5%를 가정하였다. 친환경차와 관련된 보조금은 무공해차 통합누리집⁵⁾에서 제공하고 있는 국가 보조금(서울시 기준)을 활용하여 차종별 대표 차량의 보조금을 고려하였다.

마지막으로 온실가스 배출량의 경우 IPCC 가이드라인의 연료별 배출계수를 활용하였으며, 전기 및 수소의 배출계수는 없는 것으로 가정하였다.

3) 환경부 국가미세먼지정보센터, "CAPSS-부문별 배출량", 검색일: 2024.4.25.

4) 오피넷, "국내유가통계-주유소 평균판매가격", 검색일: 2024.8.18.

5) 무공해차 통합누리집, "구매보조금 지원", 검색일: 2024.8.18.

〈표 2-5〉는 본 연구에서 수송 모형을 개발하기 위한 주요 데이터를 정리한 표이다. 주요 자료는 자동차 수요, 연료 소비 및 온실가스 배출량, 기술 비용 및 성능 특성치, 기타 사회경제적 통계 변수로 구분된다.

표 2-5 수송 모형의 주요 데이터

모듈	데이터	해상도	단위	연도	출처
자동차 수요	자동차 등록대수	차량 크기, 차종, 연식, 연료	대	2010~2023년	한국자동차모빌리티산업협회 자동차등록통계월보
		용도, 차량 크기, 연료, 차종	대	2010~2023년	국도교통 통계누리 자동차 등록현황보고
		차종별 크기, 연료, 연식	대	2019~2021년	CAPSS
	중고차 거래량	총 거래량	대	2010~2023년	국도교통 통계누리 자동차 등록현황보고
	자동차 연간 주행거리	차종별 크기, 용도, 연료	천km	2010~2022년	KOSIS 국가통계포털자동차 주행거리통계
		차종별 크기, 연료, 연식 (실측/비실측)	천km	2019~2021년	CAPSS
연료 소비 및 배출량	실연비	차종, 차급, 연료	km/L, km/MWh	2013~2022년 (3년 단위)	산업통상자원부 에너지총조사보고서
		차종별, 연료별, 공차중량별, 배기량별, 하이브리드 평균	km/L	2001~2023년	자동차 에너지소비효율 분석집
	공인연비	차종, 크기, 연료	km/L	2017~2023년	한국자동차모빌리티산업협회 자동차 등록통계월보, 네이버 자동차 정보
	연료 소비량	차종별 크기, 연료	kL, MWh	2010~2019년 (3년 단위)	산업통상자원부 에너지총조사
	CO ₂ 배출량	차종별, 연료별, 공차중량별, 배기량별, 하이브리드차 평균	gCO ₂ /km	2001~2023년	자동차 에너지소비효율 분석집
기술 비용	차량가격	차종, 크기, 연료	원	2017~2023년	한국자동차모빌리티산업협회 자동차 등록통계월보, 네이버 자동차 정보
	연료가격	연료	원/L, 원/kg	2007~2024년	오피넷 (석유제품, LPG)
	세금 및 보조금	시도별 평균, 차량 크기별	원	2019~2023년	무공해차 통합누리집
사회 경제적 변수	인구 통계자료 및 전망	연도	명	~2050년	통계청 장래인구추계
	GDP 통계자료 및 전망	연도	원, 성장률%	~2050년	한국은행 경제통계시스템, KDI 경제전망 자료

자료: 저자 작성.

2) 화물차 부문

가) 화물차 등록대수

한국자동차모빌리티산업협회(KAMA)의 “자동차등록통계연보”에서는 화물차의 용도를 관용, 자가용, 영업용으로 구분하여 적재량별 등록 현황을 제시한다(표 2-6 참조). 2020년 기준 화물차의 총 등록대수는 3,616,574대이며, 3톤 이하의 적재가 가능한 화물차는 전체 비중의 약 89.26%를 차지한다.⁶⁾

표 2-6 화물차 적재량별 등록 현황

(단위: 대)

용도	합계	1톤 이하	3톤 이하	5톤 이하	8톤 이하	10톤 이하
계	3,616,574	2,923,195	304,986	173,934	42,047	12,683
관용	33,440	21,549	4,724	4,179	1,944	83
자가용	3,157,073	2,754,248	231,684	109,688	17,716	4,278
영업용	426,061	147,398	68,578	60,067	22,387	8,322

용도	12톤 이하	15톤 이하	20톤 이하	20톤 초과	기타	
계	15,075	13,412	14,277	101,529	15,436	
관용	469	313	32	91	56	
자가용	4,547	3,298	4,446	14,349	12,819	
영업용	10,059	9,801	9,799	87,089	2,561	

자료: 한국자동차모빌리티산업협회, “자동차등록통계월보(2020.1~2020.12)”, 검색일: 2024.5.30.

<표 2-7>의 화물차 차령별 등록 현황에 따르면 10년 이상의 차량 비율은 전체의 약 38.47% (약 140만 대) 수준인 것으로 확인되었으며, 그 외의 차령별 등록 현황은 약 18만~25만 대 정도 수준인 것으로 나타났다.

표 2-7 화물차 차령별 등록 현황

(단위: 대)

용도	합계	1년 미만	2년 미만	3년 미만	4년 미만	5년 미만	6년 미만
총계	3,616,419	244,876	248,460	248,164	242,993	227,446	229,582

용도	7년 미만	8년 미만	9년 미만	10년 미만	15년 미만	15년 이상	
총계	219,804	197,649	178,750	187,425	634,461	756,809	

자료: 한국자동차모빌리티산업협회, “자동차등록통계월보(2020.1~2020.12)”, 검색일: 2024.5.30.

6) 한국자동차모빌리티산업협회, “자동차등록통계월보(2020.1~2020.12)”, 검색일: 2024.5.30.

나) 화물차 주행거리

국가법령정보센터 「자동차관리법 시행규칙」, [별표 1]에서는 화물차의 종류를 정의하고 있다. 화물차의 유형은 일반형, 덤프형, 밴형, 특수용도형으로 분류한다. 화물차 유형별 세부기준은 <표 2-8>과 같이 정의된다.

표 2-8 화물차 유형별 세부기준

유형	세부기준
일반형	보통의 화물운송용인 것
덤프형	적재함을 원동기의 힘으로 기울여 적재물을 중력에 의하여 쉽게 미끄러뜨리는 구조의 화물운송용인 것
밴형	지붕구조의 덮개가 있는 화물운송용인 것
특수용도형	특정한 용도를 위하여 특수한 구조로 하거나, 기구를 장치한 것으로서 위 어느 형에도 속하지 아니하는 화물운송용인 것

자료: 국가법령정보센터, “자동차관리법 시행규칙”, [별표 1], 검색일: 2024.5.18.

화물차의 1일 평균 주행거리는 약 51.1km이며, 사업용 화물차와 비사업용 화물차의 1일 평균 주행거리는 각각 153.6km, 40km로 사업용 화물차의 1일 평균 주행거리가 더 긴 것으로 나타났다. 일반형 화물차의 경우 차량의 적재량이 증가함에 따라 1일 평균 주행거리가 증가하는 경향이 있으며, 관련 현황은 <표 2-9>과 같다.

표 2-9 화물차 유형, 적재량, 업종별 1일 평균 주행거리

(단위: km/대)

구분		1일 평균 주행거리		
		전체	비사업용	사업용
일반형		51.1	40	153.6
1톤 이하	소형	42.6	40.4	102.1
5톤 미만	중형	49.3	35.8	131.2
5톤 이상	대형	135.7	50.9	194.1
덤프형		19	18.1	40.8
1톤 이하	소형	21.7	21.6	32.3
5톤 미만	중형	15.6	14.5	36.8
5톤 이상	대형	19.7	16.6	47.4
밴형		39.4	38.2	90.3
1톤 이하	소형	40.9	39.6	93.4
5톤 미만	중형	30.4	30	58.9
특수용도형		55.2	49.8	71.7

자료: 국토교통 통계누리, “용도별 차종별 유형별 규모별 자동차주행거리”, 검색일: 2024.5.18.

국토교통 통계누리⁷⁾에서는 화물차 주행거리에 대해 구체적인 자료를 제공하고 있다. 화물차의 1일 평균 주행거리는 1대당 약 49.4km이며, 연간 주행거리는 65,019백만 km이다. 업종 및 연료별 주행거리 현황을 비교하면 경유, 기타연료, LPG 순으로 차량의 주행거리가 가장 긴 것으로 확인되었으며, 사업용 화물차의 주행거리가 비사업용 화물차에 비해 긴 경향이 있는 것으로 나타났다. 일반형 화물차는 적재 가능 규모가 클수록 1일 평균 주행거리가 크게 나타났다. 특히 사업용 화물차는 규모에 따른 주행거리가 증가하는 경향이 있는 것이 확인되었다. 사업용 화물차가 비사업용 화물차의 주행거리보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다.

표 2-10 화물차 연료별 주행거리 현황

업종	차종	연료	1일 평균 주행거리 (km/대)	연간 주행거리 (천 km)
전체	화물차	합계	49.4	65,018,813
		휘발유	30.3	174,445
		경유	50.0	61,245,859
		LPG	37.0	1,638,074
		기타연료	49.9	1,960,435
비사업용	화물차	합계	38.8	45,073,855
		휘발유	30.3	174,149
		경유	39.4	43,277,614
		LPG	28.4	1,135,477
		기타연료	26.1	486,615
사업용	화물차	합계	130.3	19,944,958
		휘발유	46.3	296
		경유	140.2	17,968,245
		LPG	117.7	502,597
		기타연료	71.5	1,473,820

자료: 국토교통 통계누리, "자동차주행거리통계", 검색일: 2024.5.18.

7) 국토교통 통계누리, "자동차주행거리통계", 검색일: 2024.5.18.

표 2-11 화물차 규모별 주행거리 현황

업종	차종	규모	1일 평균 주행거리 (km/대)	연간 주행거리 (천 km)
전체	합계	합계	49.4	65,018,813
	일반형	합계	48.1	45,038,225
		소형	39.2	28,600,525
		중형	50.6	6,750,838
		대형	133.1	9,686,862
	덤프형	합계	18.6	374,965
		소형	21.4	206,142
		중형	14.4	104,923
		대형	19.7	63,900
	밴형	합계	40.1	5,890,275
		소형	41.7	5,488,103
		중형	26.1	402,172
	특수용도형	합계	64.6	13,715,348
비사업용	합계	합계	38.8	45,073,855
	일반형	합계	37.6	31,758,097
		소형	37.5	26,382,266
		중형	35.3	3,952,693
		대형	48.5	1,423,138
	덤프형	합계	17.8	345,067
		소형	21.3	203,832
		중형	13.4	93,847
		대형	16.5	47,388
	밴형	합계	38.5	5,530,899
		소형	40.0	5,142,389
		중형	25.7	388,510
	특수용도형	합계	48.2	7,439,793
사업용	합계	합계	130.3	19,944,958
	일반형	합계	145.8	13,280,128
		소형	83.9	2,218,259
		중형	132.0	2,798,144
		대형	190.2	8,263,724
	덤프형	합계	39.6	29,899
		소형	32.5	2,310
		중형	36.0	11,075
		대형	43.9	16,513
	밴형	합계	105.1	359,376
		소형	109.6	345,715
		중형	51.6	13,662
	특수용도형	합계	108.7	6,275,555

자료: 국토교통 통계누리, “자동차주행거리통계”, 검색일: 2024.5.18.

다) 화물차 연비

화물차 연비에 대한 자료는 산업통상자원부(2022)의 ‘2020년 에너지총조사보고서’ 및 미국 국립재생에너지연구소(NREL: National Renewable Energy Laboratory)의 ‘연간 교통기술 기준 데이터[Transportation Annual Technology Baseline (ATB) Data]’를 활용하여 구축하였다. “연간 교통기술기준 데이터”는 화물차의 규모 및 연료 타입별 연비 데이터를 확인할 수 있다. 화물차의 규모에 따라 제공되는 화물차의 연료 타입은 <표 2-12>와 같다. 제공되는 연료 타입 중 소형 화물차의 경우에는 경유, 휘발유, LPG, 하이브리드, 전기, 수소를 본 모형에 포함하고 있으며, 중형 및 대형 화물차에 대해서는 경유, 전기, 수소만을 연구 대상으로 설정했다.

표 2-12 규모별 화물차의 연료 타입 종류

소형 화물차	중형 및 대형 화물차
디젤, 가솔린, LPG, 가솔린 하이브리드, 플러그인 하이브리드, 전기, 수소	디젤, 디젤 하이브리드, 플러그인 하이브리드, 전기, 수소

자료: NREL, “Transportation Annual Technology Baseline (ATB) Data”, 검색일: 2024.8.2를 토대로 저자 번역 및 재구성.

‘2020년 에너지총조사보고서’(산업통상자원부, 2022, p.133)에서 제공하고 있는 화물차 연비는 1리터당 3.4~6.5km까지 분포하고 있으며, 2016년 대비 2019년의 화물차 연비는 유사하거나 증가한 것으로 나타났다.

표 2-13 화물차 연료별 연비 현황

차종 구분	(단위: km/L)		
	2013년	2016년	2019년
1톤 이하	7.8	6.0	6.5
3톤 미만	6.9	6.6	6.3
5톤 미만	5.4	5.1	5.2
8톤 미만	4.8	4.8	4.9
10톤 미만	4.1	4.1	4.2
12톤 미만	3.6	3.9	4.1
12톤 이상	3.1	3.0	3.4

자료: 산업통상자원부(2022), p.133.

‘연간 교통기술기준 데이터’는 향후 화물차의 연비를 세 가지 시나리오에 기반하여 전망한다. 본 연구는 세 가지 시나리오 중 Mid 시나리오를 기반으로 화물차의 연비를 전망했으며, 친환경차(전기차/수소차)에 한하여 연비의 개선을 가정했다. 화물차 연비의 전망은 ‘2020년 에너지총조사보고서’에서 제시되는 화물차 연비에 “연간 교통기술기준 데이터”의 연비 변화율을 적용하여 도출하였으며, 규모 및 연료 타입별 화물차 연비를 전망한 결과는 <표 2-14>와 같다.

표 2-14 규모 및 연료 타입별 화물차 연비

(단위: km/L, km/KWh, km/kg H₂)

규모	연료 구분	2020년	2025년	2030년	2035년	2040년	2045년	2050년
소형	디젤	6.40						
	가솔린	5.20						
	LPG	5.26						
	하이브리드	5.34						
	전기	2.65	2.77	2.89	3.17	3.28	3.41	3.55
	수소	43.78	45.14	45.98	48.71	49.76	50.71	51.76
중형	디젤	3.58						
	전기	0.87	0.94	1.02	1.11	1.15	1.19	1.23
	수소	18.74	20.37	22.47	24.51	25.51	26.46	27.45
대형	디젤	2.26						
	전기	0.48	0.52	0.59	0.64	0.67	0.70	0.73
	수소	9.53	10.81	12.07	13.44	14.17	14.91	15.64

자료: 산업통상자원부(2022, p.133); NREL, “Transportation Annual Technology Baseline (ATB) Data”, 검색일: 2024.8.2를 참고하여 저자 작성.

라) 화물차 가격

화물차 가격은 한국자동차모빌리티산업협회에서 제공하는 “자동차등록통계”에 등록된 화물 차량을 대상으로 수집했다. 화물차 차량의 가격은 네이버,⁸⁾ 이트릭스⁹⁾ 및 카이즈유¹⁰⁾에서 검색을 통해 취합했다. 확인이 어려운 연료 및 연도별 화물차 가격은 미국 국립재생에너지 연구소(NREL)의 자료를 활용하여 설정했다. 특히 미래 화물차 가격은 NREL ATB의 Mid (중간) 시나리오에서 예측한 비율을 적용하여 전망하였다(표 2-15 참조).

8) 네이버, “자동차”, 검색일: 2024.8.19.

9) 이트릭스, “트럭”, 검색일: 2024.9.2.

10) 카이즈유, “자동차”, 검색일: 2024.8.19.

표 2-15 화물차 유형별 가격 전망

(단위: 만 원)

규모	연료 구분	2020년	2025년	2030년	2035년	2040년	2045년	2050년
소형	디젤	3,500.0	3,376.6	3,407.5	3,407.5	3,396.2	3,387.8	3,379.4
	가솔린	2,978.4	2,957.3	3,034.5	3,083.5	3,087.7	3,090.5	3,097.6
	LPG	3,609.4	3,486.0	3,522.4	3,522.4	3,525.2	3,530.8	3,536.5
	하이브리드	3,146.6	3,081.0	3,131.5	3,160.1	3,158.4	3,155.6	3,153.4
	전기	4,000.0	3,542.0	3,256.1	3,092.7	3,019.6	2,947.0	2,874.0
	수소	5,491.2	5,093.9	4,615.3	4,332.9	4,251.6	4,173.1	4,092.7
중형	디젤	7,800.0	7,810.3	7,904.7	7,912.4	7,931.3	7,950.2	7,965.6
	전기	10,700.0	9,777.5	9,309.6	9,045.8	8,935.4	8,825.0	8,712.7
	수소	12,747.7	10,974.9	10,214.7	9,893.7	9,787.3	9,691.2	9,584.8
대형	디젤	16,000.0	16,097.6	16,487.8	16,699.2	16,796.7	16,861.8	16,975.6
	전기	34,829.3	29,886.2	27,089.4	25,593.5	25,008.1	24,390.2	23,804.9
	수소	29,804.9	25,056.9	23,024.4	22,146.3	21,886.2	21,626.0	21,365.9

자료: 네이버, “자동차”, 검색일: 2024.4.30; 이트릭스, “트럭”, 검색일: 2024.9.2; 카이즈유, “자동차”, 검색일: 2024.8.19; NREL, “Transportation Annual Technology Baseline (ATB) Data”, 검색일: 2024.8.2를 참조하여 저자 재구성.

마) 화물차 온실가스 배출량

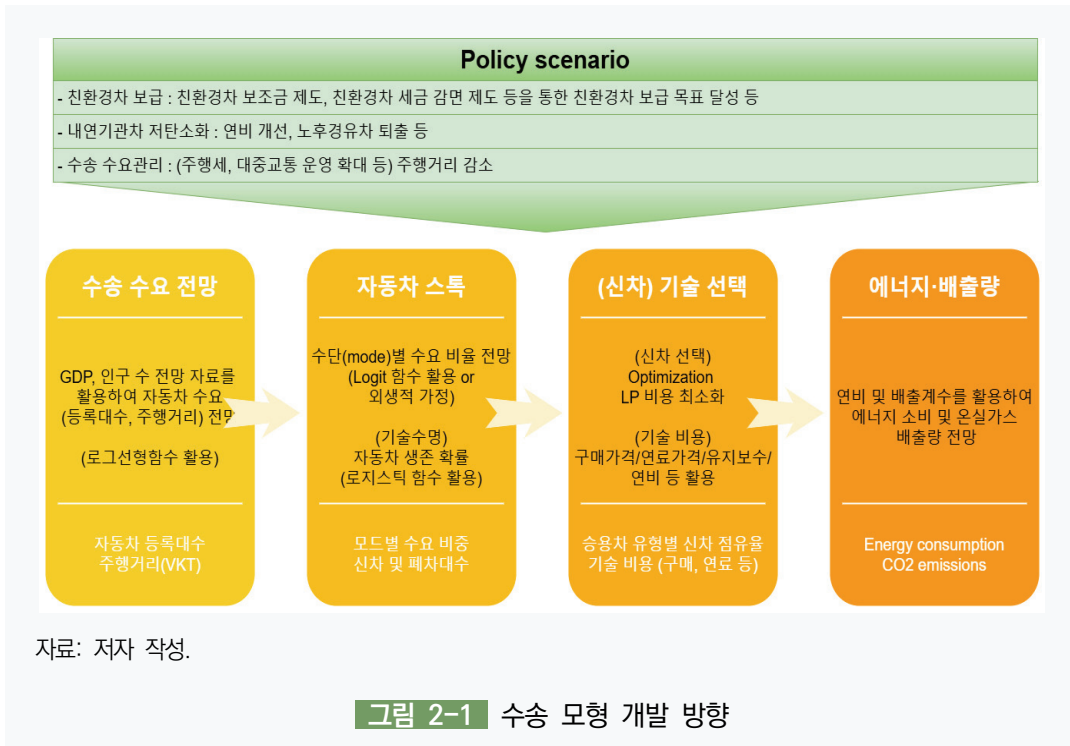
김규승 외(2023, p.77)에 따르면, 2020년 기준 국내 화물수송 부문의 온실가스 총 배출량은 29,726천 톤CO₂eq이다. 2018년 온실가스 총 배출량(30,258천 톤CO₂eq)에 비해 감소했으나, 2025년 및 2030년 장래 배출량은 지속적으로 증가하는 경향이 있을 것으로 예측되었다.

다. 모형 설계

본 연구에서 수송부문 온실가스 감축정책의 효과를 분석하기 위해 개발하고자 하는 수송부문 상향식 모형(KICAT-Transport model)은 도로부문에 한정되어 있다. 특히 이번 2차 연도에서는 수송부문 배출량의 대부분을 차지하는 자가용(약 53%)과 화물차(약 30%)를 대상으로 기본 모형을 설계하였다. 분석 연도는 2019년을 기준으로 2050년까지 연 단위로 구성되어 있다.

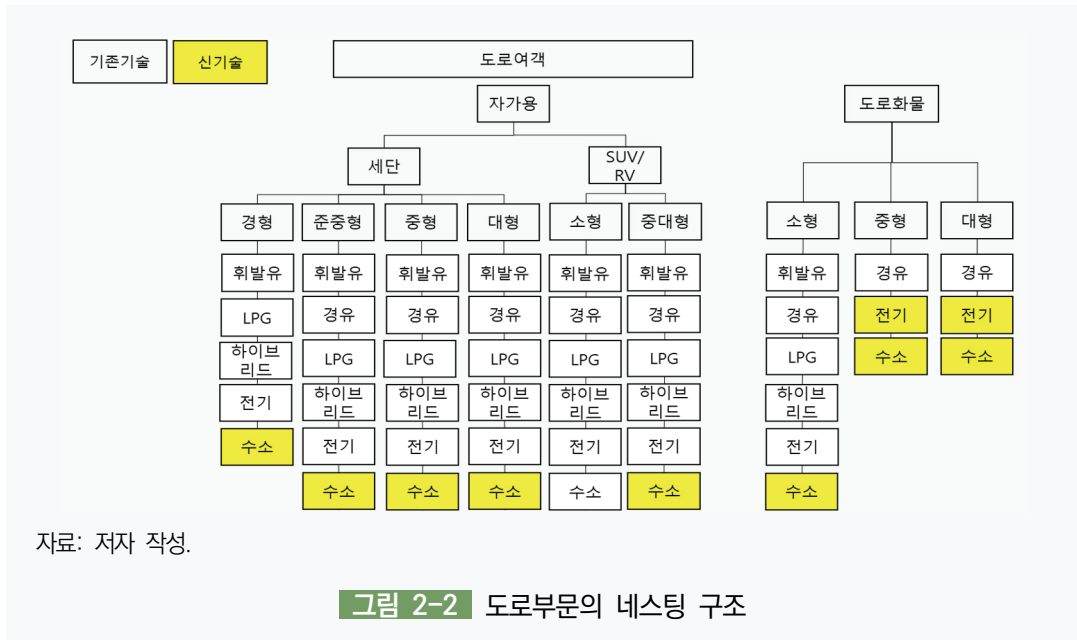
상향식 모형의 구조는 선행연구와 유사한 형태로 크게 수송 수요 전망, 자동차 스톡 전망, (신차) 기술선택 및 주행거리 결정, 에너지 소비 및 배출량 산정 모듈로 구성되어 있다. 수송 수요 전망 모듈에서는 GDP, 인구수 전망 자료를 바탕으로 자동차 등록대수를 전망하였다. 자동차 스톡 모듈에서는 수단(mode)별 수요 비율을 전망하고 자동차 수명에 기반한 생존

확률을 도출하여 신차 및 폐차 수요를 결정한다. (신차) 기술선택 및 주행거리 모듈에서는 선형계획법(LP)에 기반한 비용최소화 목적함수를 바탕으로 신차의 수요(대수)와 주행거리를 결정한다. 이때 고려되는 기술비용으로는 구매비용과 연료비용, 유지보수 비용 등이 있다. 마지막으로 에너지 소비 및 배출량 산정 모듈에서는 주행거리 해를 바탕으로 연비 및 배출계수를 활용하여 에너지 소비량과 온실가스 배출량을 산정한다.



1) 기술 세분화

수송 모형의 네스팅 구조는 크게 자가용 부문과 도로화물 부문으로 구분된다(그림 2-2 참조). 네스팅 구조는 모형에서 다루는 기술 단위로 크게 자동차의 종류(용도), 크기, 연료를 기준으로 구분되며, 차량의 연식(vintage)을 고려한다. 우선 자가용의 경우 세단, SUV/RV로 구분한다. 크기는 세단의 경우 경형, 준중형, 중형, 대형으로 나뉘고, SUV/RV는 소형, 중대형으로 구분하였다. 승용차의 경우 다양한 연료를 사용하고 있기 때문에 휘발유, 경유, LPG, 하이브리드, 전기, 수소로 나뉜다. 연료는 현재 판매되고 있는 자동차를 기준으로 하며, 향후 개발될 수소 승용차도 고려하고 있다.



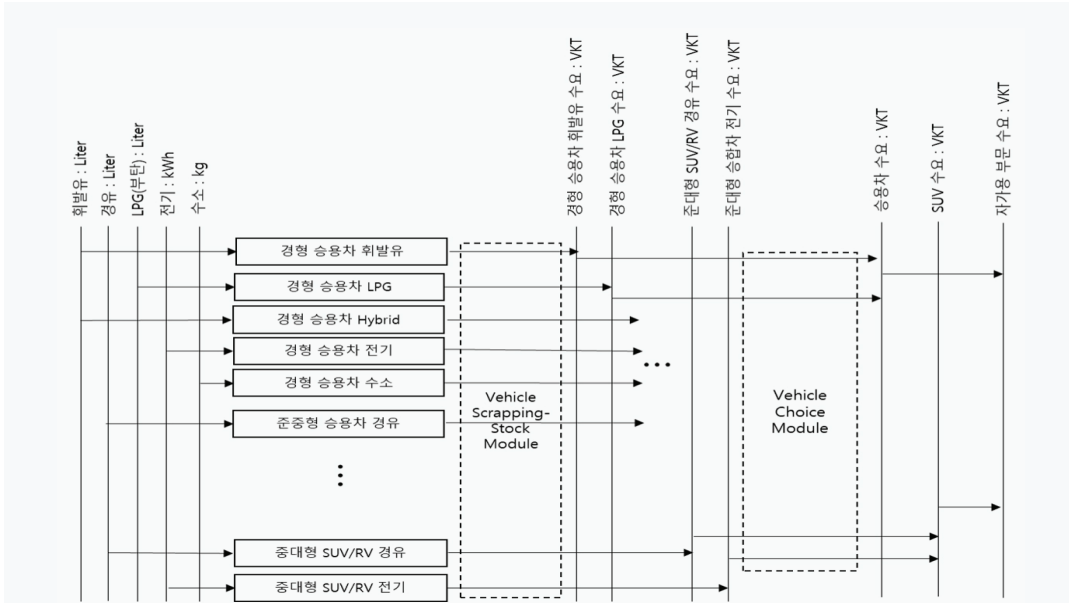
화물차의 규모에 따라 연비 및 연평균 주행거리가 다르다는 점을 고려하여 화물차의 규모를 소형, 중형, 대형으로 구분했다. 화물차의 경우 중형과 대형에서는 현재 경유차로만 운행되고 있고 추후 전기 및 수소 화물차가 시장에 출시될 것을 고려하여 규모별로 연료 종류를 달리 적용하였다. 특히 화물차는 승용차보다 가용한 연료가 적기 때문에 화물차 특성을 고려하여 주행거리 분포를 10개 그룹으로 구분하였다. 화물차 기술 세분화는 <표 2-16>과 같다.

표 2-16 화물차 기술 세분화

차종	규모	기술	연료
화물차	소형	내연기관	디젤
			가솔린
			LPG
		하이브리드	가솔린
		전기차	전기
	수소차	수소	
	중형	내연기관	디젤
		전기차	전기
		수소차	수소
대형	내연기관	디젤	
	전기차	전기	
	수소차	수소	

자료: 저자 작성.

상향식 모형의 에너지 흐름(in/out flow)은 기준에너지시스템(RES: Reference Energy System)으로 구현된다.



자료: 저자 작성.

그림 2-3 자가용 부문의 RES

2) 차량수요 모듈

차량의 수요를 추정하기 위해 우선 자동차 등록대수를 전망하였다. 과거 자동차 등록대수의 시계열 자료를 분석하여 등록대수를 전망할 때 고펜페르츠(Gompertz) 함수 및 로지스틱(Logistics) 함수를 활용하면 상대적으로 과소 추정되는 경향이 존재하여 로그선형함수를 사용하여 추정하였다(최도영 외, 2012, p.74). 과거의 자동차 등록대수와 1인당 GDP 간 상관관계가 있다고 가정하여 로그선형함수의 형태로 계수를 추정했다. 인구수의 경우 ‘장래 인구추계: 2022~2072년(통계청 보도자료, 2023.12.14, pp.87-88)’ 자료를 활용하였으며, GDP는 한국은행 경제통계시스템의 ‘국민소득(명목, 시장가격)’¹¹⁾ 자료를 활용하였다. 자동차 등록대수는 국토교통 통계누리 ‘자동차 등록현황보고’의 연도별 등록대수를 활용하였으며, 자동차 등록대수당 인구수 수렴치는 1.5로 가정하였다. 과거 통계자료를 기반으로 로그선형 함수를 추정하였을 때 승용차에 대한 계수 α , β 는 각각 6.904, -2.102로 추정하였다.

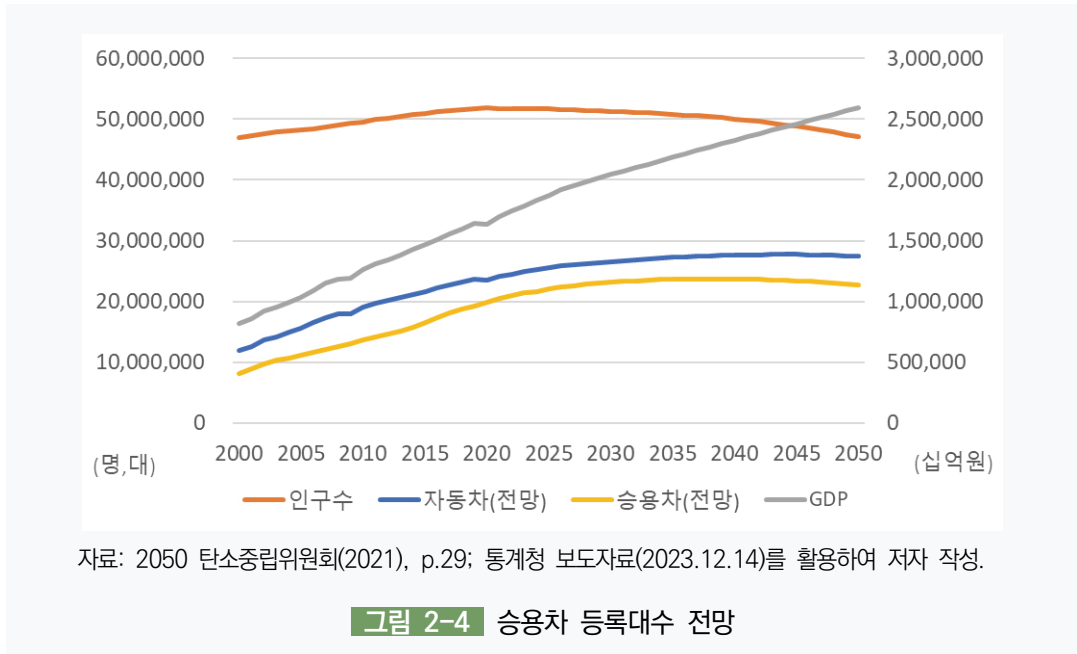
$$\ln\left(\frac{pop}{carstock} - \frac{pop}{carstock}\right) = \alpha + \beta \ln\left(\frac{GDP}{pop}\right) \quad \text{식(2-1)}$$

GDP 는 국내총생산, pop : 인구수, $carstock$: 자동차 등록대수,

$\frac{pop}{carstock}$: 자동차 등록대수당 인구수 수렴치

11) 한국은행 경제통계시스템, “국민소득(명목, 시장가격)”, 검색일: 2024.6.18.

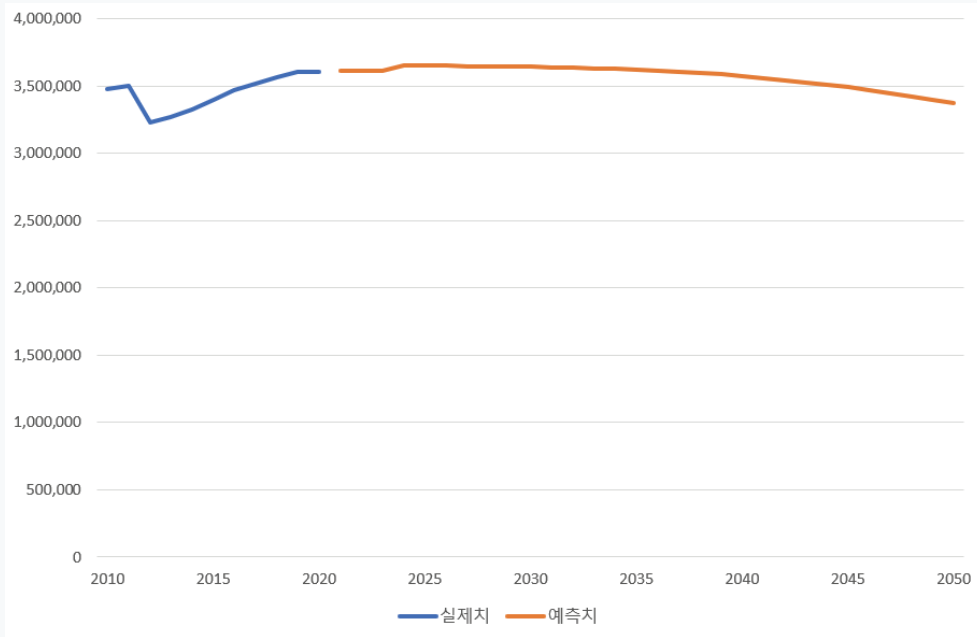
구축한 로그선형함수를 바탕으로 인구수 및 GDP 전망 자료¹²⁾를 활용하여 추정된 결과 2050년까지 자동차 총 대수가 3,000만 대 이하로 수렴하였으며, 그중 자가용은 2,300만 대 이하로 수렴하였다. 승용차 총 주행거리의 경우 승용차 등록대수 전망치와 평균 승차인원, 연간 평균 주행거리를 곱하여 추정하였다.



화물차의 등록대수 전망을 위해 승용차와 마찬가지로 로그선형함수를 사용하였다. 화물차 등록대수당 인구수의 수렴치는 연구 분석기간의 시작 시점으로부터 10년간의 변화 추이를 고려하여 수렴치를 산정하였으며, 이를 활용하여 추정된 계수 α , β 는 각각 -32.584, -3.130이다.

추정한 계수는 인구수 및 GDP 전망 자료를 활용하여 2050년까지의 화물차 등록대수를 전망하였다. 인구수는 통계청의 ‘장래인구추계: 2022~2072년’을 사용했으며, GDP는 김지연 외(2022, p.6)의 장기경제성장률 전망치를 활용하였다. 인구수 및 GDP를 전망하여 도출한 결과 화물차는 350만 대에서 점차 감소할 것으로 전망된다.

12) GDP 전망치의 경우 2050 탄소중립위원회(2021, p.29)의 ‘2050 탄소중립 시나리오’에서 적용한 GDP 성장률을 적용하여 추정하였음.



자료: 지표누리, “국내총생산”, 검색일: 2024.9.6을 활용하여 저자 작성.

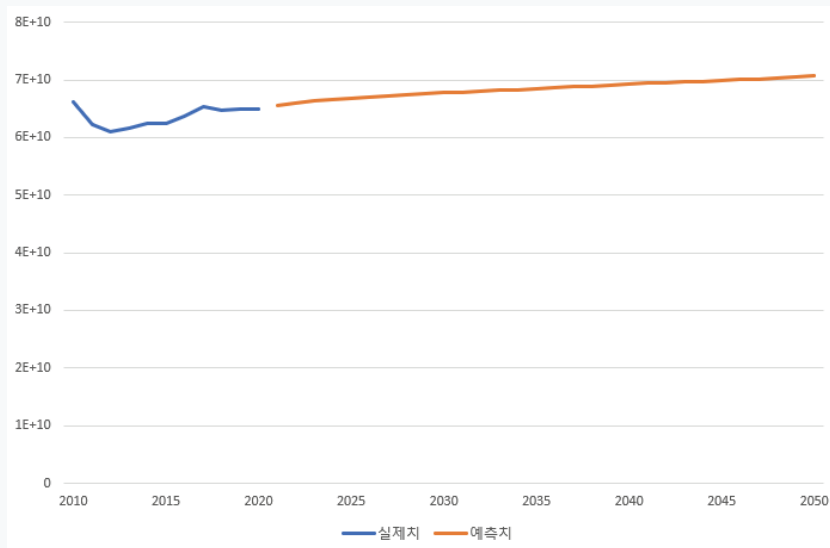
그림 2-5 화물차 대수 추이 및 전망

화물차의 경우 연도별 화물차의 평균 주행거리를 설정하기 위해 화물차의 총 주행거리를 전망하였다. 화물차의 총 주행거리는 1인당 GDP 간 상관관계가 있다고 가정하여 로그선형 함수를 활용하였다. 2009년부터 2020년까지의 연도별 화물차 총 주행거리 자료를 바탕으로 추정된 계수 γ , δ 는 각각 26.401, 0.148이다.

$$\ln(VKT) = \gamma + \delta \times \ln(GDP/P) \quad \text{식(2-2)}$$

VKT : 연도별 화물차 총 주행거리, GDP : 국내총생산, P : 인구수

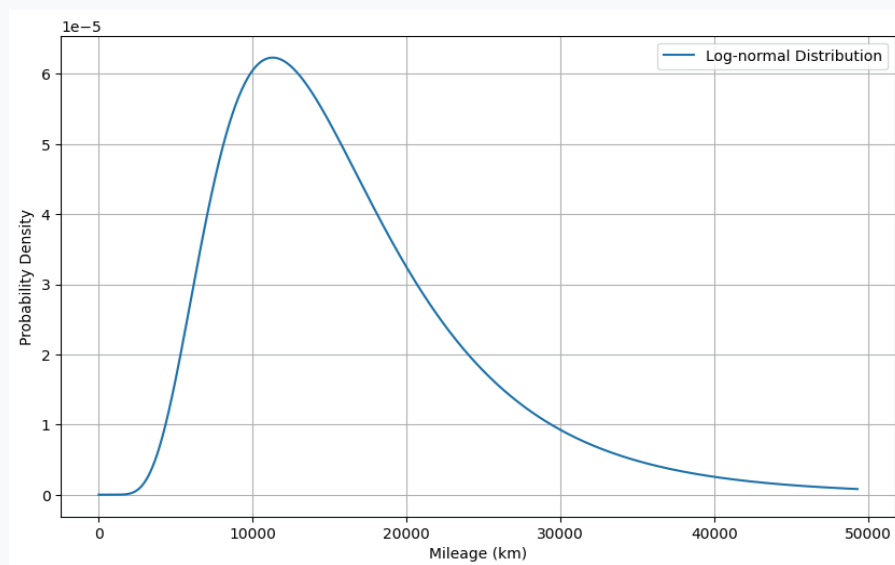
앞서 화물차 대수 추이에 활용한 인구수 및 GDP 전망 자료를 활용하여 2050년까지의 총 주행거리를 도출한 결과는 <그림 2-6>과 같다.



자료: 국토교통 통계누리, “자동차주행거리통계”, 검색일: 2024.5.18을 활용하여 저자 작성.

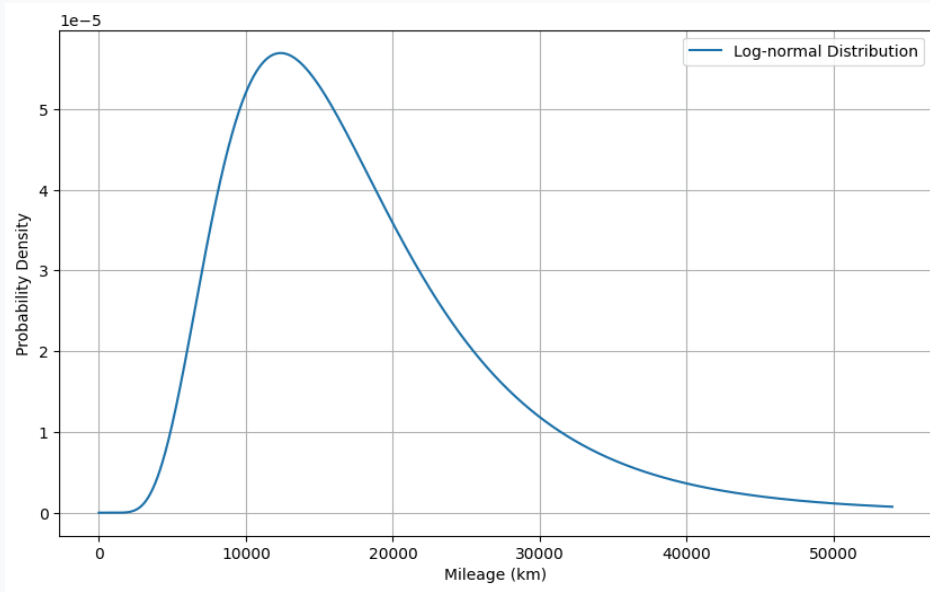
그림 2-6 화물차 연도별 총 주행거리 추이 및 전망

화물차의 연도별 평균 주행거리는 총 주행거리 및 연도별 화물차 등록대수를 활용하여 도출하였다. 도출한 화물차의 연도별 평균 주행거리는 화물차 규모별로 10개 그룹으로 세분화하여 총 30개의 연평균 주행거리를 도출했다. 그룹별 연평균 주행거리는 로그노말 분포를 가정하였으며, 그룹별 연평균 주행거리는 변화하는 연도별 화물차 등록대수 및 총 주행거리를 반영하여 산정했다. 규모별 화물차의 평균 주행거리를 로그노말 분포를 통해 분석한 결과는 <그림 2-7>, <그림 2-8>, <그림 2-9>와 같다.



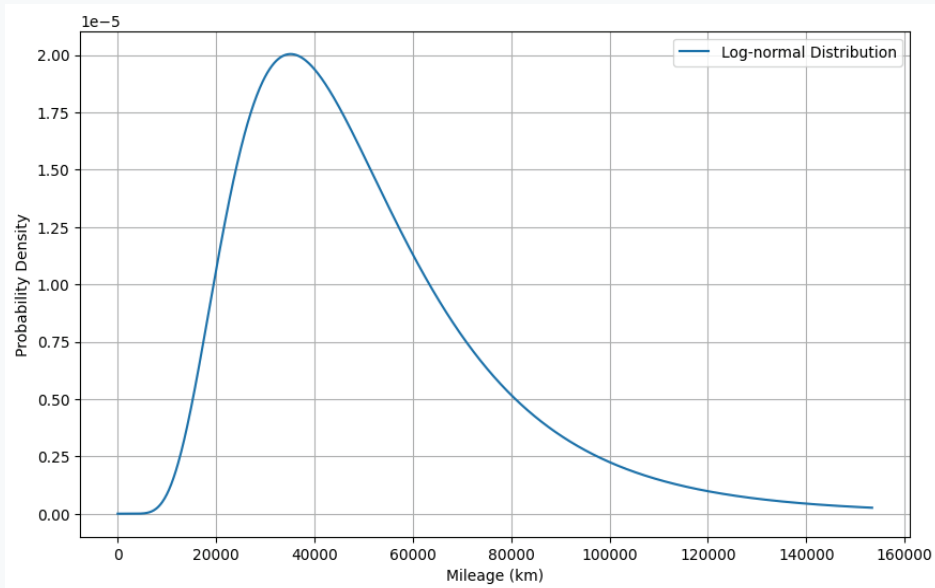
자료: 저자 작성.

그림 2-7 소형 화물차의 평균 주행거리 분포



자료: 저자 작성.

그림 2-8 중형 화물차의 평균 주행거리 분포



자료: 저자 작성.

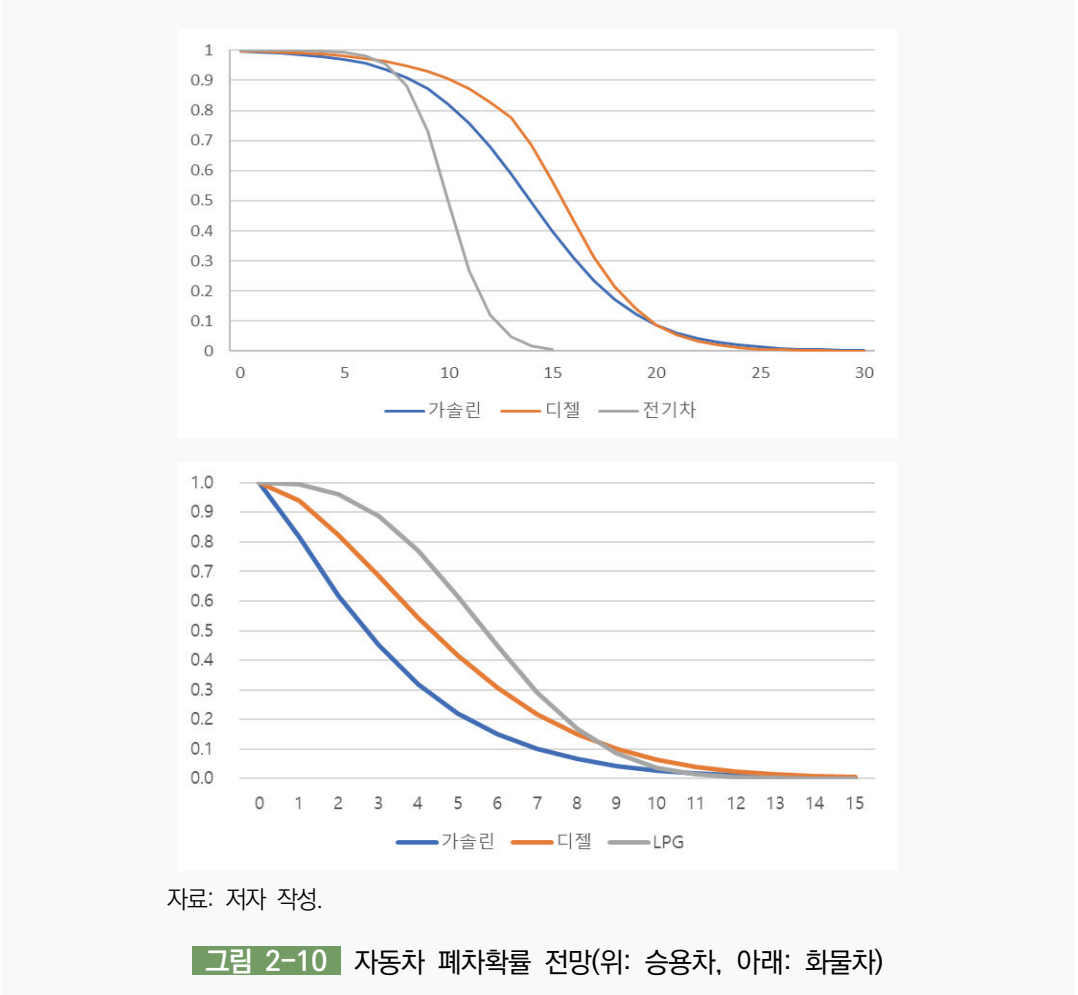
그림 2-9 대형 화물차의 평균 주행거리 분포

3) 차량 스톡(stock) 모듈

신차와 폐차의 수요를 산정하기 위해 자동차 수명에 기반한 생존확률함수를 도출하였다. 임형우 외(2022, pp.43-46)에서 로지스틱 함수를 활용하여 국내 차량 유종별 생존함수를 도출하였다. 본 연구에서도 2017년부터 2021년까지의 국토교통부 ‘자동차 등록자료 통계’

(차량별 등록현황)¹³⁾를 활용하여 승용차의 경우 평균수명을 15년으로 가정한 로지스틱 함수를 통해 유종별 생존확률을 추정하였다. 추정 결과 경유차가 휘발유차보다 생존확률이 상대적으로 높았으나, 차량 20년부터는 유사하였다. 반면 전기차의 경우 평균수명이 10년으로 내연기관차에 비해 생존율이 상대적으로 낮게 나타났으나, 이는 전기차의 보급연수가 짧아 수명이 상대적으로 짧게 추정되는 한계가 있어, 모형에서는 추정 결과를 활용하는 대신 휘발유차와 동일하다고 가정하였다.

화물차의 경우 적재량별 화물차 등록현황 자료¹⁴⁾를 활용하였으며, 화물차의 생존확률은 Weibull distribution을 따른다고 가정하였다. 수집한 연료 타입별 화물차 등록대수 감소 추이에 최대우도 추정치(MLE: Maximum Likelihood Estimation)를 적용하여 화물차의 생존확률을 계산하였다. 전기 및 수소 화물차의 보급 시점을 고려하였을 때 생존확률을 추정함에 한계가 존재하여 전체 화물차의 생존확률로 가정하였다.



13) 국토교통 통계누리, “자동차등록현황보고”, 검색일: 2024.4.30.
 14) 국가물류통합정보센터, “적재량별 화물차 등록현황”, 검색일: 2024.8.12.

4) 신차 기술선택 및 수요 모듈

신차의 수요를 결정하는 기술선택 모형은 METER, AIM, MESSAGE 모형과 유사하게 선형 계획법(LP)으로 결정된다. 즉 주어진 수요 조건하에서 비용최소화 목적함수에 따라 신차(수요) 기술선택 및 주행거리가 결정된다. 상향식 모형의 분석 기간은 2019~2050년이며, 모델링 기간 동안 총비용을 최소화한다. 이때 기술비용은 t 시점 연도의 차량 구매비용, 운영비용, 연료비용을 포함하며, 각 비용은 할인율이 적용되어 합산된다.

$$Total\ Cost = \sum_t discount\ factor_t \times (AVC_t + AOC_t + AFC_t) \quad \text{식(2-3)}$$

AVC_t : t 시점의 자동차 연간 구매비용,

AOC_t : t 시점의 자동차 연간 운영비용,

AFC_t : t 시점의 자동차 연간 연료비용

$$Discount\ factor_t = \frac{1}{(1+r)^{(t-by)}} \quad \text{식(2-4)}$$

r : 할인율, by : 기준연도(baseyear)

차량 구매비용은 연간 주행거리 수요를 달성하기 위해 구매가 필요한 차량의 수에 차량 가격, 자본회수계수를 적용하여 연간 균등화한 값으로 계산한다. 매년 필요한 차량의 수는 연간 주행거리 수요를 충족하기 위해서 요구되는 자동차 수에 폐차되는 차량의 수를 기반하여 산정된다.

$$AVC_t = \sum_{s,f} \sum_{p=t} (NV_{t,s,f,g} \times VP_{t,s,f} \times CRF_{p-t+1}) \quad \text{식(2-5)}$$

$NV_{t,s,f,g}$: t 시점에서 그룹 g 의 규모(s) 및 연료(f)별 차량 구매대수,

$VP_{t,s,f}$: t 시점에서 규모(s) 및 연료(f)별 차량가격, CRF_t : 자본회수계수

$$CRF_t = \frac{r \times (1+r)^{(LT-1)}}{(1+r)^{(LT-1)} - 1} \quad \text{식(2-6)}$$

LT : 차량 평균수명(lifetime)

차량 운영비용은 차가 폐차되기까지 매년 지불한다고 가정했으며, 차량 구매가격의 5%로 가정했다.

$$AOC_t = \sum_{s,f} \sum_{p=t} SP_{p-t+1,f} \times NV_{t,s,f,g} \times VP_{t,s,f} \times 0.05 \quad \text{식(2-7)}$$

$SP_{p-t+1,f}$: 연료 종류(f)별 차량 생존확률

차량 연료비용은 규모 및 유종에 따라 달라지는 연비, 연료가격, 그룹별 주행거리에 의해 결정한다. 연료가격은 해당 시점의 연료가격을 반영하였으나, 2024년부터는 2023년의 연료가격을 활용했다.¹⁵⁾

$$AFC_t = \sum_{s,f,g} \sum_{p=t} SP_{p-t+1,f} \times NV_{t,s,f,g} \times FP_{t,f} \times AD_{t,s,g} \div FE_{t,s,f} \quad \text{식(2-8)}$$

$FE_{t,s,f}$: t 시점에서 규모(s) 및 연료 종류(f)별 연비,

$FP_{t,f}$: t 시점에서의 연료(f)가격,

$AD_{t,s,g}$: t 시점에서 규모(s) 및 그룹(g)별 평균 주행거리

이 외에도 총 주행거리(수요) 제약, 차종별 수요(주행거리) 제약, 기술도입 제약 등 일정 비율 유지 제약조건을 추가하여 LP에서 단독해가 나타나는 문제를 유연하게 대체하였다.

$$FD_{t,s,g} \leq \sum_f (TV_{t,s,f,g} \times AD_{t,s,g}) \quad \text{식(2-9)}$$

$FD_{t,s,g}$: t 시점 규모(s) 및 그룹(g)에 대한 최종 수요량,

$TV_{t,s,f,g}$: t 시점에서 그룹 g 의 규모(s) 및 연료(f)별 차량 등록대수

5) 에너지 소비량 및 온실가스 배출량 산정 모듈

에너지 소비량의 경우 자동차 수요(주행거리)를 연비로 나눈 값으로 도출한다. 이를 바탕으로 연료 소비에 따른 온실가스 배출계수를 적용하여 온실가스 배출량을 산정한다.

$$FC_{f,t} = \sum_{s,g} \sum_{p=t} SP_{p-t+1,f} \times NV_{t,s,f,g} \times AD_{t,s,g} \div FE_{t,s,f} \quad \text{식(2-10)}$$

15) 오피넷, “국내유가통계-주유소 평균판매가격”, 검색일: 2024.8.18.

$$CO2\ emission_t = \sum_f FC_{f,t} \times CO2\ coef_f \quad \text{식(2-11)}$$

$FC_{f,t}$: t 시점 연료 종류(f)별 소비량

라. 시나리오 구성 및 모형 분석 결과

1) 시나리오 구성

시나리오는 크게 BAU(Business-As-Usual) 시나리오와 정책 시나리오로 구분한다. BAU 시나리오는 현재의 차량 판매 추세가 지속된다고 가정한 결과이다. 예를 들어 친환경차 보조금 정책의 경우 차량가격 전망을 반영하여 내연기관차와 유사해지는 경우 종결된다고 가정하였다. 다만 화물차의 경우 구매 보조금이 2030년까지 현재 수준을 유지한 후 2050년까지 점진적으로 감소한다고 가정하였다.¹⁶⁾ 또한 차량 비용 및 연비 등의 기술 전망치를 반영하였다. 화물차에 대한 경유와 LPG 유가 보조금은 2050년까지 유지되며, 화물차 수소 충전 비용에 대한 보조금은 2030년부터 점차 감소하여 2050년에 경유 유가 보조금 수준에 도달하는 것으로 가정하였다.¹⁷⁾

표 2-17 전기 승용차 및 전기 수소차 누적 보급대수

(단위: 만 대)					
차종	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년
전기차	7.4	9.9	14.8	23.2	32.3
수소차	0.5	1.0	1.9	2.9	3.3

자료: 국토교통 통계누리, “자동차등록현황보고”, 검색일: 2024.4.30을 참조하여 저자 작성.

정책 시나리오의 경우 수송부문의 온실가스 감축 및 대기오염 개선 정책의 대표 수단을 구현하고자 한다. 온실가스 감축과 관련하여 “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안”(관계부처 합동, 2021), “2050 탄소중립 시나리오”(2050 탄소중립위원회, 2021)를 반영하였다. 대기오염 측면의 대표 정책으로는 『제3차(2023~2032년) 대기환경개선 종합계획』(환경부, 2022), 『미세먼지 관리 종합계획(2020-2024)』(관계부처 합동, 2019)에서 제시하고 있는 주요 수단을 고려하였다.

16) 중형 수소 화물차의 구매 보조금 수준은 대형 수소 화물차의 구매 보조금에 화물차 가격의 비중을 곱해 설정하였음.

17) 화물차 유가보조금은 2001년 에너지 세제 개편에 따라 유류 인상분의 일부를 보조해주는 정책으로 현재까지 축소되거나 중단되지 않고 유지되고 있기 때문에 향후에도 유사한 수준으로 지속되는 것을 가정하였다.

표 2-18 수송부문 온실가스 감축 및 대기오염 개선 대표 정책 수단

주요 감축수단	2030 NDC	2050 탄소중립 시나리오	미세먼지 관리 종합계획	제3차 대기환경개선 종합계획
무공해차 전환	<ul style="list-style-type: none"> '30년 전기차 420만 대, 수소차 30만 대 보급 	<ul style="list-style-type: none"> (A안) 무공해차 보급률 97% (B안) 무공해차 보급률 85% 	<ul style="list-style-type: none"> '24년까지 전기차 85만 대, 수소차 15만 대 보급 	<ul style="list-style-type: none"> '27년 무공해차 200만 대 보급 '30년 무공해차 450만 대 보급
내연기관차 저탄소화	<ul style="list-style-type: none"> 온실가스·연비 기준 강화 바이오디젤 혼합률 상향 노후 경유차 조기폐차 지원 	<ul style="list-style-type: none"> e-fuel, 바이오연료 등 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 제작차 배출가스 인증기준 강화 수송용 에너지 상대가격 조정 '24년까지 노후 경유차 80% 이상 퇴출('24년 49만 대 이하) 	<ul style="list-style-type: none"> 제작차 배출가스·온실가스 관리 강화 '24년까지 5등급 경유차 조기폐차 지원 완료
수요관리 강화	<ul style="list-style-type: none"> '30년 총 주행거리 4.5% 감축 	<ul style="list-style-type: none"> '50년 총 주행거리 15% 감축 	-	-

자료: 관계부처 합동(2019, 2021); 2050 탄소중립위원회(2021); 환경부(2022)를 참고하여 저자 작성.

정책 시나리오는 크게 ① 무공해차 전환, ② 내연기관차 저탄소화, ③ 수요관리 강화로 구분된다. 우선 무공해차 전환 시나리오는 정부가 제시한 무공해차 전환 목표 비율을 달성하는 것으로, 2030년까지 전기차 450만 대, 수소차 30만 대 보급이 이루어지는 경우를 가정한다. 이 중 사업용 차량에 50만 대를 우선 보급하기로 발표함에 따라 이를 제외하였다. 그러나 세부 보급 목표 수준이 없었기에 따라 김규승 외(2023, p.81)에서는 2018년 여객/화물용 자동차 및 사업용/비사업용 차량의 등록대수 비율을 가중평균하여 목표 보급 대수를 산출하였다. 이를 바탕으로 2030년까지 승용 전기차 321만 대, 승용 수소차 22.9만 대 보급 목표를 가정하였다. 친환경차 보급 경로로 2019년에서 2023년까지 실제 친환경차 보급 통계자료를 반영하였으며(BAU 시나리오와 동일), 그 이후로는 선형 증가하여 목표치에 달성하는 것으로 가정하였다. 2050년까지 친환경차 보급 목표율은 2050 탄소중립 시나리오 B안을 반영하였다. 화물차에서도 마찬가지로 2030 NDC의 친환경차 전환 목표에서 여객 및 화물용 자동차의 등록대수 비율을 가중평균하여 목표 대수(전기차 64만 대, 수소차 4.5만 대)를 가정하였다.

내연기관차 저탄소화 시나리오에는 제작차의 배출가스와 연비 기준을 강화하는 정책과 바이오디젤의 혼합 의무화, 노후 경유차 조기폐차 지원 등이 있다. 이 중 내연기관차 연비 기준은 BAU 대비 연평균 1% 증가하는 경우를 가정하였으며, 노후 경유차 조기폐차의 경우 BAU 대비 2050년까지 경유차 폐차 확률이 5~10% 증가하는 것을 가정하였다. 화물차의 경우 2025년부터 신규 소형 경유차의 판매를 제한하는 정책을 반영하였다.

마지막으로 수요관리는 '2030 NDC'와 '2050 탄소중립 시나리오'에 따라 2030년 총 주행 거리 4.5% 감소, 2050년 15% 감소를 가정하였으며, 선형보간법을 사용하여 연간 주행거리가 감소한다고 가정하였다.

표 2-19 정책 시나리오

주요 감축수단	자가용 승용차	화물차
무공해차 전환	<ul style="list-style-type: none"> 2030 NDC 고려('30년 승용 전기차 321만 대, 승용 수소차 22.9만 대 가정) 2050 탄소중립 시나리오 B안 무공해차 보급 비율 85% 달성 	<ul style="list-style-type: none"> 2030 NDC 고려('30년 화물 전기차 64만 대, 화물 수소차 4.5만 대 가정) 수소 충전 가격 인하('30년 4,000원/kg, '40년 3,000원/kg)
내연기관차 저탄소화	<ul style="list-style-type: none"> 제작차 연비 기준 강화(BAU 연비 개선 대비 연평균 1% 증가) 노후 경유차 조기폐차(내연기관차 폐차 확률 5~10% 증가) 	<ul style="list-style-type: none"> '25년부터 소형 경유차 판매 제한
수요관리 강화	<ul style="list-style-type: none"> 대중교통 전환 등을 고려한 주행거리 감소 '30년 4.5%, '50년 15% 감소 가정 	

자료: 저자 작성.

2) 자가용 부문 분석 결과

가) 승용차 수요

신규 자가용 승용차 수의 경우 공통적으로 경유차는 신차 판매 추세 및 조기폐차를 고려하여 급격히 감소하는 경향을 보인다. BAU 시나리오에서는 2030년까지 하이브리드차와 전기차의 신차 비중이 꾸준히 증가하는 것으로 관찰되었다. 그럼에도 불구하고 내연기관차의 비중이 70% 이상으로, 그중 휘발유차의 수요가 45%로 가장 큰 비중을 차지한다. 이는 차량의 규모 별로 보았을 때 중형 세단의 비중이 높은 데에서 기인한 결과로 볼 수 있다. 반면 2050년까지 세단을 중심으로 하이브리드차의 강세가 이어지며, SUV에서는 전기차의 구매가격 감소 및 전비 개선으로 인해 친환경차 비중이 50%까지 증가하게 된다.

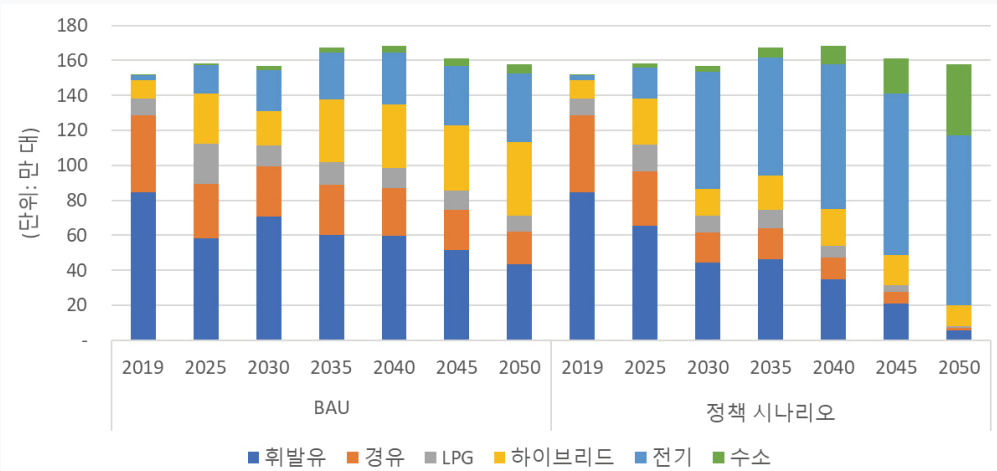
모형상에서 정책 시나리오를 구현한 결과 2030년 신차 중 친환경차 비율이 약 55%(하이브리드 18%, 전기 35%, 수소 2%)까지 증가하는 것으로 보인다. 특히 2030년까지 전기차의 판매가 급격히 증가하였다. 이는 친환경차 보급 목표 대수를 충족하기 위한 모형상 제약 조건의 결과이며, 특히 중형/대형 세단에서의 전기차 보급이 크게 증가하였다. 2030년 이후로는 전기차와 수소차의 신차 선택이 대부분을 차지하며, 이로 인해 하이브리드차가 증가하다 감소하는 경향을 보였다.

표 2-20 시나리오별 유종별 신규차량 등록 비중

(단위: %)

구분	연도	휘발유	경유	LPG	하이브리드	전기	수소
기준연도	2019년	56	29	6.3	7.0	2.0	0.3
BAU	2030년	45	19	7.4	13	15	1.7
	2050년	28	12	5.9	27	25	3.3
정책 시나리오	2030년	28	11	6.0	18	35	2.3
	2050년	3.6	0.8	0.6	7.7	62	26

자료: 저자 작성.



자료: 저자 작성.

그림 2-11 신규 승용차 수요 전망

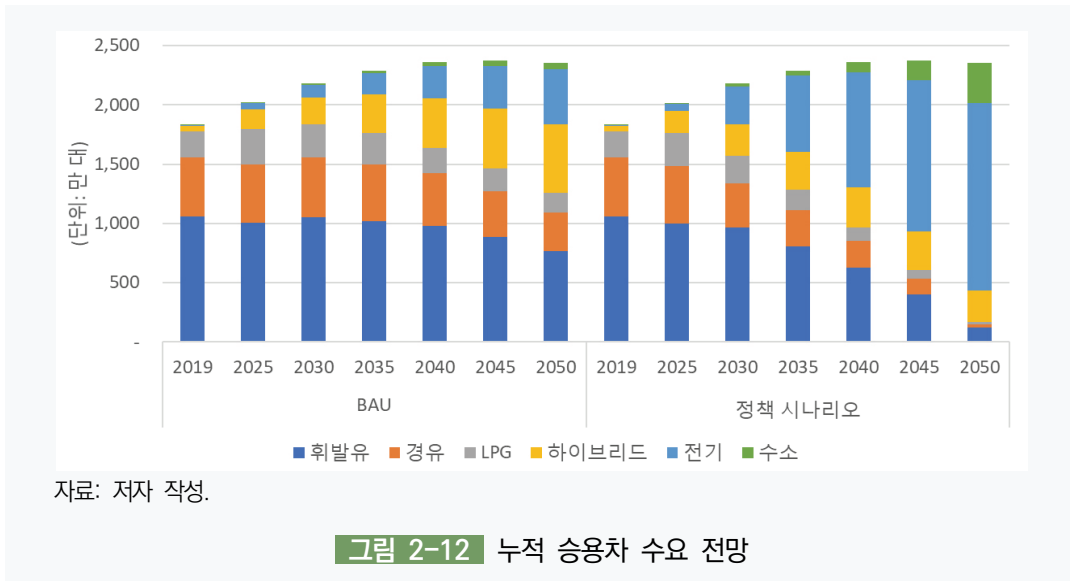
자가용 누적 등록대수의 경우 BAU 시나리오에서는 수소차 보급이 상대적으로 관찰되지 않으며, 하이브리드와 전기차의 비중이 증가하는 경향을 보였다. 반면 정책 시나리오에서는 전기차와 수소차 보급이 급격히 증가하며, 하이브리드의 경우 2040년까지 증가하다 감소되어 대부분의 차량(90% 이상)이 친환경차로 전환됨을 확인하였다.

표 2-21 시나리오별 유종별 누적차량 등록 비중

(단위: %)

구분	연도	휘발유	경유	LPG	하이브리드	전기	수소
기준연도	2019년	58	27	12	3	0.4	0.03
BAU	2030년	48	23	13	10	5	0.5
	2050년	33	14	7	25	20	2.4
정책 시나리오	2030년	44	17	10	12	15	1.0
	2050년	5.2	1.1	0.8	11	67	14

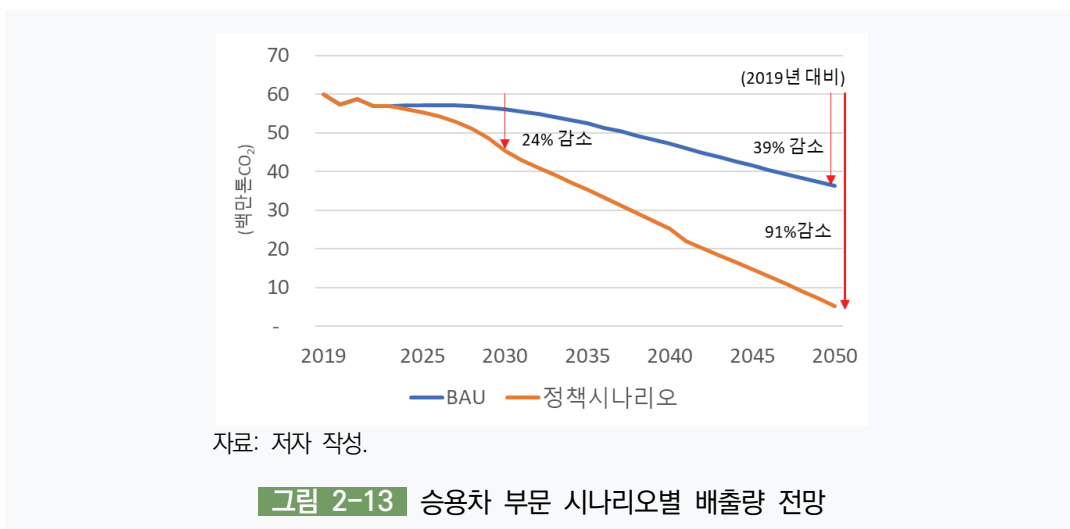
자료: 저자 작성.



나) 온실가스 배출량

정책 시나리오 구현 결과 자가용 부문의 2030년 배출량은 2019년 대비 약 24% 감소(△15백만 톤)하였다. 전기차와 수소차 보급 목표를 달성하더라도 내연기관차의 비중이 현저히 높기 때문에, ‘2030 국가 온실가스 감축목표 상향안’에서 수송부문의 감축 목표량(2018년 대비 △37.8%)에 미흡하여 2030 NDC 달성을 위해 추가적인 정책수단이 필요함을 시사한다.

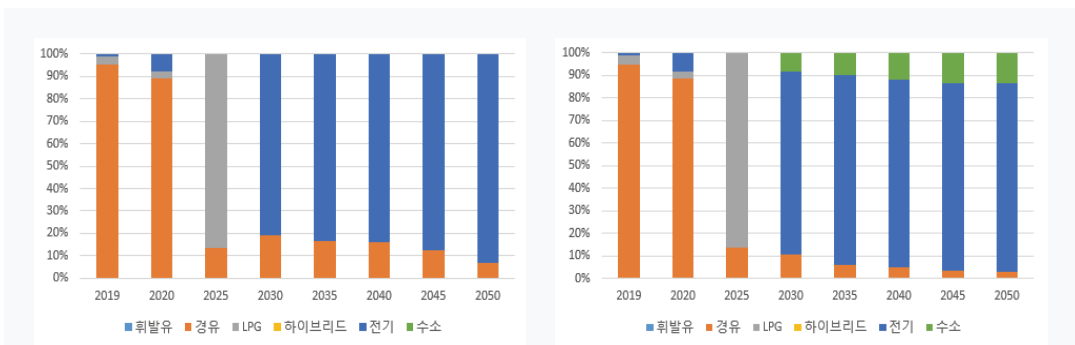
정책 시나리오에서 2050년 배출량은 2019년 대비 약 91% 감소하여 약 5.3백만 톤이 배출 되는 것으로 나타났다. 이는 2050 탄소중립 시나리오의 수송부문 배출량 9백만 톤 중 자가용 승용차의 배출량이 수송부문 배출량의 약 60%를 차지한다고 가정하였을 때 2050 탄소중립 목표에 도달하는 것을 확인하였다. 특히 정책 시나리오에서는 무공해차 전환 비율을 바탕으로 전기차 1,610만 대, 수소차 345만 대가 보급되는 것이 모형상에서 구현되었으며, 하이브리드 차의 비중 또한 내연기관차보다 높아 배출량 감축에 크게 기여함을 확인할 수 있다.



3) 화물차 부문 분석 결과

가) 화물차 수요

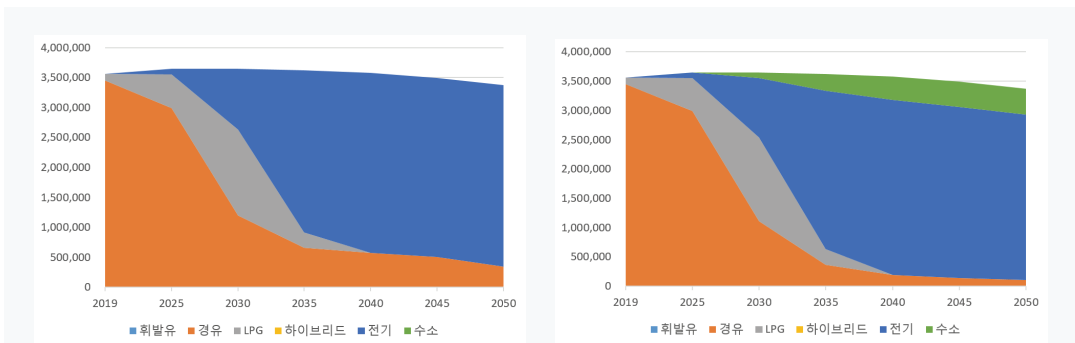
신규 화물차 구매의 경우 경유 화물차에서 전기 및 수소 화물차로 전환되는 경향이 존재한다. BAU 시나리오 및 정책 시나리오 모두 2029년까지 LPG의 신차 비중이 증가한 후 2030년부터 차량 구매가 친환경차로 전환되는 것으로 관찰되었다. 두 시나리오 모두 연비 개선 및 구매 가격 감소로 전기 화물차 구매가 급격히 증가하였다. 반면 수소 화물차는 수소 화물차 구매 보조금 및 연료 보조금 외에도 정부의 수소 충전비용 인하 계획이 달성되었을 때 수소 화물차의 구매가 이뤄지는 것으로 관찰되었다.



자료: 저자 작성.

그림 2-14 신규 화물차 연료별 등록비중 전망(좌: BAU, 우: 정책 시나리오)

BAU 시나리오하에서 수소 화물차의 보급이 이뤄지지 않는 것으로 확인되었으며, 이로 인해 정책 시나리오보다 더 많은 경유 화물차가 2050년에도 생존하는 것으로 나타났다. 모형상에서 정책 시나리오를 구현한 결과 2030년 신차 중 친환경차 비율은 약 30%까지 증가하였으며, 전기 및 수소 화물차의 비중은 각각 전체의 약 28%, 2% 수준인 것으로 나타났다. BAU와 정책 시나리오 모두 경유 화물차의 비중이 급격히 감소됨에 따라 전기 화물차 및 수소 화물차의 수가 증가하는 것으로 나타났다.

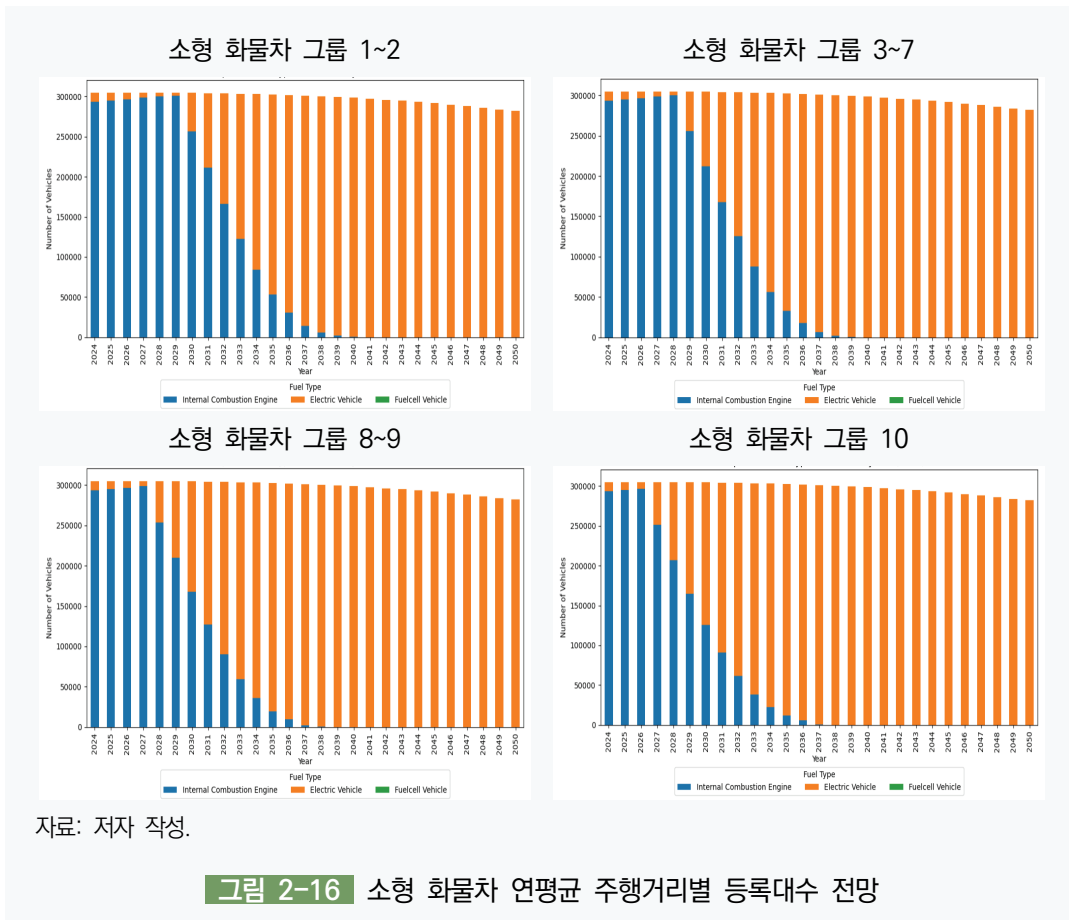


자료: 저자 작성.

그림 2-15 누적 화물차 등록대수 전망(좌: BAU, 우: 정책 시나리오)

나) 주행거리 그룹별 수요 변화

화물차의 주행거리 그룹별로 친환경차 전환에 대한 패턴을 식별하였다. 소형 화물차는 휘발유, 경유, LPG, 하이브리드를 포함하는 내연기관 화물차가 시간이 지남에 따라 전기 화물차로 전환되었으며, 소형 화물차의 연평균 주행거리가 길어짐에 따라 소형 전기 화물차의 구매 시점은 2030년에서 2027년으로 빨라졌다. 이는 연비 효율성으로 인해 연평균 주행거리가 긴 집단에서 전기 화물차로의 전환이 먼저 발생한 것이며, 전환이 확산되면서 2041년에 소형 화물차 전부가 전기 화물차로 전환되었다.



중형 화물차는 경유 화물차가 수소 화물차로 전환되는 것을 확인하였다. 수소 화물차의 연료 가격 인하, 수소 충전 보조금 및 연비 효율성은 시간이 지남에 따라 구매를 유도할 수 있는 것으로 나타났으며, 중형 화물차도 연평균 주행거리가 긴 그룹에서부터 수소 화물차의 전환이 먼저 발생했다. 수소 화물차의 도입 시점은 그룹별로 2027년부터 2044년까지 넓게 분포해 있으나, 연평균 주행거리가 짧은 두 집단에서는 수소 화물차가 도입되지 않는 것으로 확인되었다.

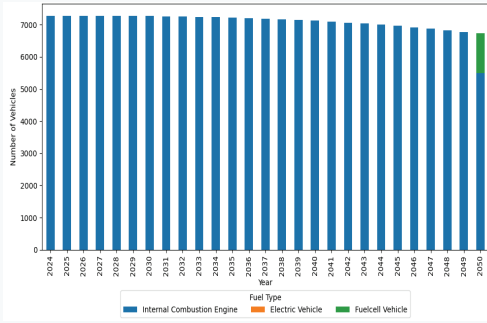


자료: 저자 작성.

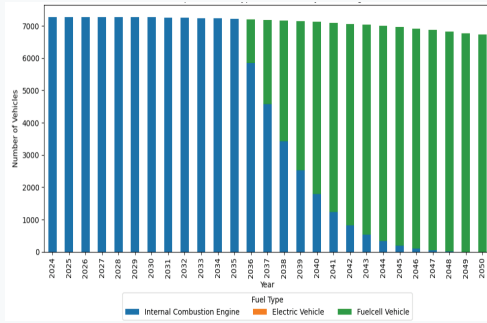
그림 2-17 중형 화물차 연평균 주행거리별 등록대수 전망

대형 화물차도 경유 화물차에서 수소 화물차로 전환되며, 중형 화물차에 비해 연평균 주행거리가 길어 연비 효율성 개선, 연료가격 인하 및 수소 충전 보조금 지원의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이에 따라 연평균 주행거리가 가장 짧은 집단을 제외한 나머지 집단은 2027년에서 2036년 사이에 수소 화물차로의 전환이 시작되어 중형 화물차보다 전환 시점이 상대적으로 빨랐다. 반면 연평균 주행거리가 가장 짧은 집단에서는 대부분의 분석기간 동안 연료비용 측면에서의 상대적 이점이 존재하지 않아 전환이 발생하지 않았다.

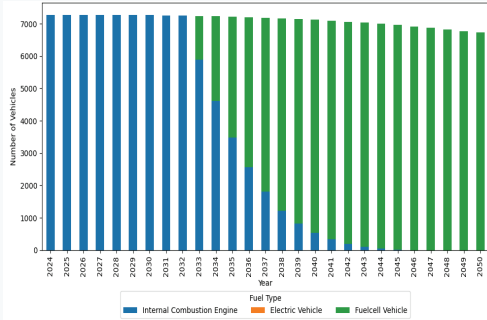
대형 화물차 그룹 1



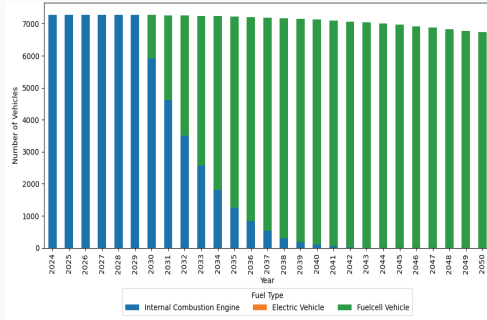
대형 화물차 그룹 2



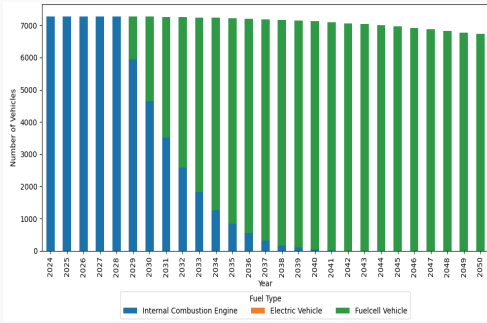
대형 화물차 그룹 3



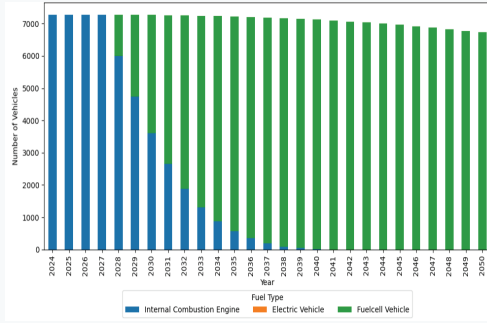
대형 화물차 그룹 4~6



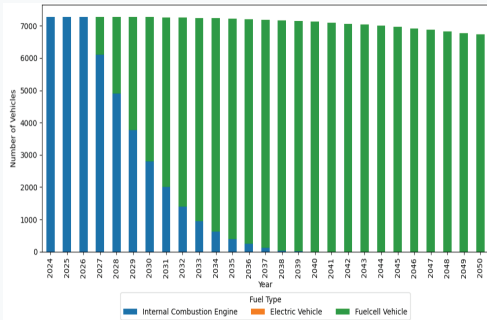
대형 화물차 그룹 7~8



대형 화물차 그룹 9



대형 화물차 그룹 10

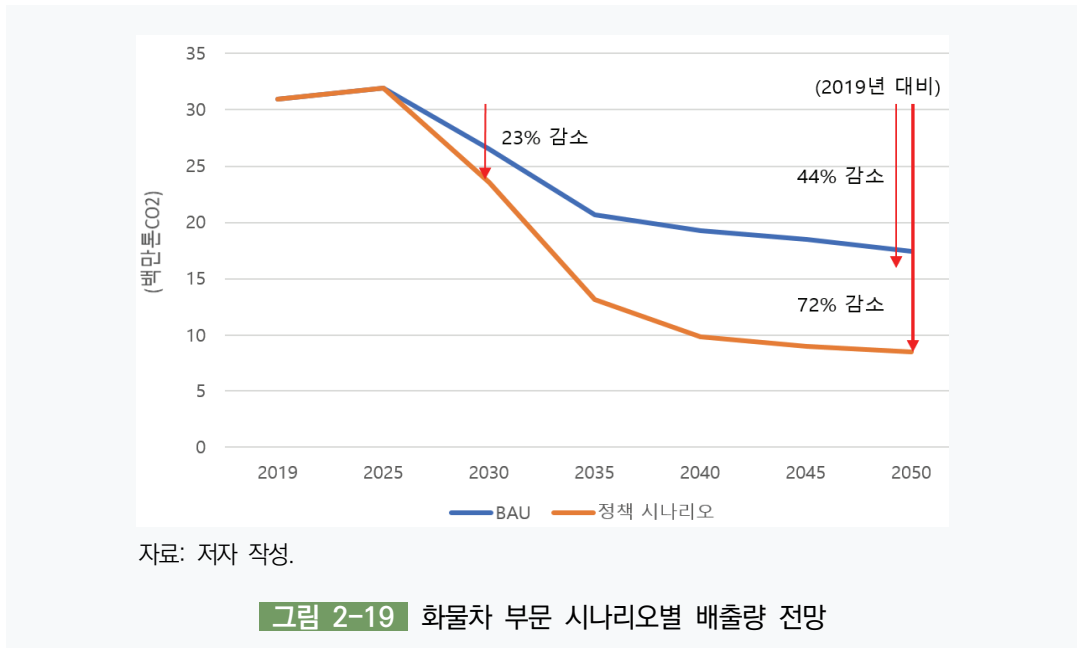


자료: 저자 작성.

그림 2-18 대형 화물차 연평균 주행거리별 등록대수 전망

다) 온실가스 배출량

정책 시나리오 구현 결과 화물차 부문의 2030년 배출량은 2019년 대비 7.3백만 톤 감소하여 약 23% 감소하였으며, 2050년 배출량은 약 72% 감소하여 약 8.5백만 톤에 이를 것으로 나타났다. 배출량 전망치는 ‘2030 국가 온실가스 감축 목표 상향안’ 수송부문의 감축 목표량 (2018년 대비 △37.8%) 달성에 한계가 있는 것으로 나타나, 2030 NDC 달성을 위해 화물차 부문에도 추가적인 정책수단 마련이 필요하다.



마. 소결

2024년 연구 목표는 수송부문의 모형을 개발하여 모형이 잘 작동하는지 확인하는 것에 집중하였다. 구축한 모형을 바탕으로 정책 시나리오를 시범 분석한 결과, 2030 NDC 달성은 어려우나 2050 탄소중립 시나리오 목표안(B)을 구현한 경우 온실가스가 크게 감축됨을 보였다. 이는 모형의 초기 연도인 2019년부터 2023년까지 실제 보급량을 반영하였기 때문에 2030년까지 친환경차 보급 속도가 상대적으로 낮기 때문이며, 온실가스 감축목표 달성을 위해 추가적인 정책수단과 기술적 노력이 필요함을 확인하였다. 반면 2050년까지 대부분의 차량이 무공해차로 전환되는 경우 수송부문의 탄소중립이 실현될 수 있다. 그러나 이는 전기 및 수소의 배출계수를 '0'으로 가정한 결과이며, 전력믹스 및 수소 생산구조에 따라 간접적인 배출량이 발생할 수 있다.

현재 모형의 결과는 내생적 선택이기보다 친환경차 전환비율 달성 등 제약조건에 의존한 결과로, LP 모형의 문제점을 파악하였다. 신차 선택에 있어서 비용최소화를 만족시키는 단독해 발생으로 인해 유종별 수요 변화가 매끄럽게 나타나기보다 하나의 차종으로 쏠림

현상이 크게 나타났다. 특히 화물차의 경우 1톤 이하의 소형차가 대부분(80%)을 차지하며, 차량가격 및 연비 등 외생변수(parameter)의 전망치 가정으로 인해 2030년 이후 대부분 전기차가 선택되는 결과가 나타났다. 화물차의 경우 전기 및 수소차는 대부분 미래 기술로 실제 보급률, 연료 유형별 생존확률, 적재량별 주행거리 등의 데이터가 부족하여 추정치로 대체된 부분이 많기 때문에 결과에 불확실성이 크다. 또한 기술선택의 주요 요소로 비용만을 고려했기 때문에 차량선택에 있어서 소비자의 선호, 전기 및 수소차의 충전시간 및 주행거리 제한, 충전소 접근성 등 비-비용요소를 반영하지 못한 한계가 있다.

이로 인해 추후 모형 개선 방향은 다음과 같다. 우선 LP의 단독해 문제를 해결하기 위해 차량선택 모형을 로짓 함수 형태로 추가 개발을 고려할 예정이다. 이 경우 차량선택에 있어서 비용최소화 조건 외에 자동차 선택에 영향을 주는 비-비용요소를 고려할 수 있다. 또한 친환경 경차 구매에 영향을 주는 요인으로 소비자의 차량에 대한 선호 및 충전에 대한 불편성을 반영할 수 있다. 데이터 보완 측면으로 전기차와 수소차의 실제 운행 데이터를 기반으로 모형의 현실성을 높일 수 있다. 마지막으로 현재 구축한 승용차(자가용)/화물 모형에서 승합차, 택시, 버스 등을 추가로 고려하여 도로부문의 배출량을 모사할 수 있도록 모형을 확장할 예정이다.

중장기적으로는 도로부문의 상향식 모형을 구축하여 다양한 정책 시나리오를 분석할 예정이다. 또한 연구의 최종 목표인 하향식 모형 및 대기 모형과의 연계를 위해 배출원 및 기술 분류 체계 등 모형의 구조를 조정할 고려할 필요가 있다.

2. 기후변화 영향 모듈

가. 개요

본 절에서는 기후변화로 인한 기온 및 강수량 등의 변화가 건강과 에너지 사용량 등에 미치는 영향을 분석할 수 있는 영향 모듈을 개발한다. 이를 위해 기후변화 영향 분석 관련 국내외 선행연구를 조사 분석하고, 영향 모듈 구축을 위한 자료와 자료 분석방법 등을 조사했다. 그리고 계량경제학적 분석방법론을 활용해 기온 변화에 따라 건강과 에너지 사용량의 변화를 보여주는 기온반응함수(temperature response curve)를 구축했다.

나. 선행연구

기후변화가 건강 또는 에너지 사용량에 미치는 영향에 관한 연구는 지속해서 진행되고 있다. 특히 기온을 독립변수로 사용해 건강부문 사망자 수나 에너지 부문 전기사용량 등 대리지표(proxy)에 미치는 영향을 분석하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 연구의 특징은 대부분 기온과 부문별 대리지표인 종속변수 간의 상관관계를 보여주는 기온반응함수를 구축하는 것이다.

기온반응함수는 Deschênes and Greenstone(2011)이 미국의 연간 사망자 수와 연간 에너지 사용량 자료를 활용해 작성한 이후 지속해서 발전되어 왔다. 특히 기온과 부문별 영향을 대표하는 대리지표 간의 비선형적인 관계를 더욱 자세하게 분석하기 위해 다양한 계량경제학적 분석 방법을 적용해 왔다. 비선형적인 상관관계를 분석하기 위한 대표적인 방법으로 Restricted Cubic Spline(RCS), 다차함수 등이 있다. 이러한 방법들은 기온과 종속변수 간 비선형적인 상관관계를 더욱 유연하게 분석함으로써 기온변화에 따라 영향이 본격적으로 발생하는 지점을 더욱 명확하게 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

〈표 2-22〉에서 볼 수 있는 것처럼 여러 연구들이 건강과 에너지 부문의 기온반응함수를 구축했다. 건강과 에너지 부문에 구축한 기온반응함수의 공통점은 모두 U-자 형태의 비선형적인 형태를 가지는 것이다. 연구마다 약간의 차이가 있지만 연간 사망자 수와 전기사용량 모두 15℃에서 20℃ 사이에서 최저점을 보이고, 그보다 기온이 높거나 낮으면 사망률이나 전기사용량이 증가하는 모습을 보인다. 다만 연구가 진행된 시기에 따라 동일한 부문에 유사한 지표를 바탕으로 한 기온반응함수 구축이라도 분석 방법은 달라지는 것을 볼 수 있다. 예를 들면 Deschenes and Greenstone(2011)은 패널고정효과 모형을 사용했지만, 기온과 연간 사망자 수 간의 상관관계를 분석할 때에는 기온 빈(Bin)만 적용한 선형 분석 방법론을 활용했다. 하지만 Carleton et al.(2022)에서는 기존의 연구보다 기온과 사망자 수 간 비선형적인 관계를 더욱 자세하게 분석할 수 있도록 4차 함수를 활용해 분석을 진행했다. 에너지 부문에서도 Kim(2021)은 RCS라는 통계적 기법을 활용해서 기존보다 더욱 자세하지만 절제된 비선형 기온반응함수를 구축했다.

본 연구에서는 이러한 기존 연구에서 개발한 연구 방법론과 한국 상황에 맞는 자료를 활용해서 건강과 전기사용량 부문의 기온반응함수를 구축했다.

표 2-22 국내외 건강, 에너지 부문 기온반응함수 분석 사례

부문	건강		에너지	
	연간 사망자 수	연간 사망자 수	연간 에너지 사용량	월 전기 사용량
대리 지표	연간 사망자 수	연간 사망자 수	연간 에너지 사용량	월 전기 사용량
기상요소	기온, 강수량	기온, 강수량	기온, 강수량	기온, 강수량
분석방법	패널고정효과 모형, 선형 분석	패널고정효과 모형, 4차 함수	패널고정효과 모형, 선형 분석	패널고정효과 모형, Restricted Cubic Spline
저자	Deschênes and Greenstone(2011)	Carleton et al.(2022)	Deschênes and Greenstone(2011)	Davis and Gertler (2014)
기온반응함수				

자료: Deschênes and Greenstone(2011), p.167, p.174; Davis and Gertler(2014), p.3; Kim(2021), p.9; Carleton et al.(2022), p.2057을 참조하여 저자 재구성.

$$kWh \text{ per } Cont_{i,t} = \frac{kWh_{i,t}}{cont_{i,t}} \quad \text{식(2-13)}$$

식(2-13)은 가정용과 일반용 내에 계약자별 월 전기사용량($kWh \text{ per } Cont_{i,t}$)을 보여준다. 식에서 보이는 것처럼 계약자별 월 전기사용량은 시군구 단위 총 월 전기사용량($kWh_{i,t}$)에서 계약자 수($cont_{i,t}$)를 나누어준 것과 동일하다.

〈표 2-24〉는 기온반응함수 구축에 사용된 만 명당 사망자 수와 가정용 및 일반용 계약별 전기사용량의 기초 통계량을 보여준다. 표에 따르면 2010년에서 2019년 사이 시군구 단위 월평균 만 명당 사망자 수는 약 6.2명이고, 최솟값은 0.92, 최댓값은 23명인 것으로 나타났다. 가정용 계약별 월평균 전기사용량은 약 333kWh이고, 최솟값은 118kWh, 최댓값은 1,846kWh인 것으로 나타났다. 일반용 전기사용량은 가정용보다 높아서 월평균 2,518kWh로 나타났다.

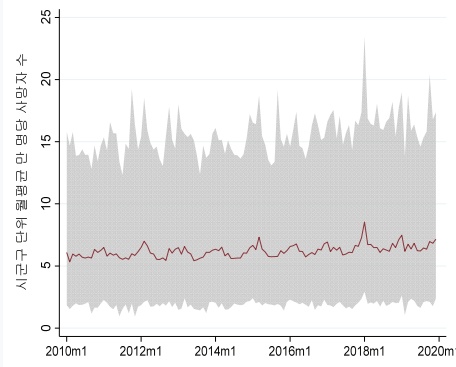
표 2-24 건강과 전기사용량 부문 기초 통계량

구분	평균 (표준편차)	최솟값	최댓값
만 명당 사망자 수 (명)	6.20 (3.03)	0.92	23.45
가정용 계약별 전기사용량(kWh)	333.61 (162.8)	118.2	1,846.6
일반용 계약별 전기사용량(kWh)	2,518.3 (1,267.4)	91.7	20,423.6

자료: 저자 작성.

〈그림 2-20〉은 2010년부터 2019년 사이 시군구 단위 만 명당 월평균 사망자 수 추세를 보여준다. 만 명당 사망자 수의 장기 추세는 큰 변화는 없으나 지속해서 약간씩 상승하고 있는 모습을 보여준다. 사망자 수를 월별로 살펴보면 계절효과가 뚜렷하게 나타났다. 사망자 수는 일반적으로 12월과 1월 같은 겨울철에 높게 나타났고, 6월까지 줄었다가 여름철인 7월과 8월에 다시 상승하고, 9월에 잠시 감소한 후 겨울철에 상승하는 모습을 보였다.

A. 월평균 만 명당 사망자 수 추세(2010~2019년)



자료: 저자 작성.

B. 월별 만 명당 사망자 수

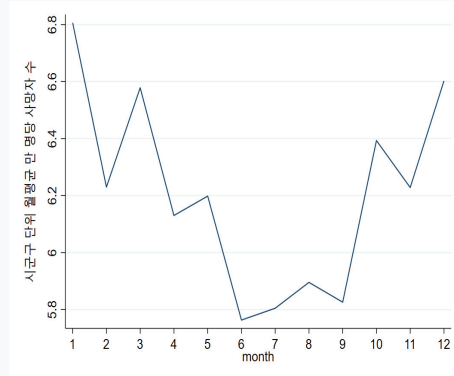
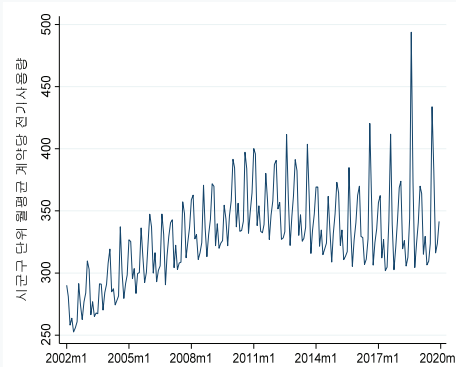


그림 2-20 시군구 단위 월평균 만 명당 사망자 수 추세(2010~2019년)

전기사용량은 가정용과 일반용 모두 유사한 장기 추세와 월별 변화를 보였다. 장기 추세에서는 전반기(2002~2011년)에는 뚜렷한 증가 추세를 보였고, 후반기(2012~2019년)에는 2012년에서 2015년까지는 평균적으로 약간 줄어드는 모습을 보이다가 2015년 이후 다시 증가하는 모습을 보였다. 특히 폭염으로 인한 피해가 컸던 대표적인 해로 알려진 2018년에 가정용 전기사용량이 아주 높게 나타났다. 월별 변화를 보면 가정용과 일반용 모두 확실한 계절적 영향을 받는 것으로 나타났다. 주로 겨울철과 여름철에 냉난방 수요로 인해 전기사용량이 많고, 봄과 가을철 사용량은 상대적으로 사용량이 적은 것으로 나타났다. 다만 가정용은 겨울철보다는 여름철에 전기사용량이 더욱 높은 것으로 나타났고(그림 2-21 B 참조), 일반용 전기사용량은 여름과 겨울철 거의 동일한 수준으로 증가하는 것으로 나타났다(그림 2-22 B 참조).

A. 가정용 전기사용량 변화 추세



자료: 저자 작성.

B. 월별 전기사용량

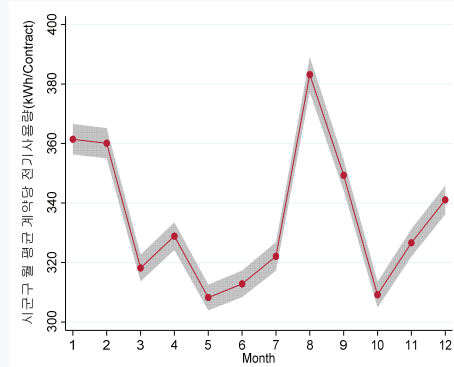
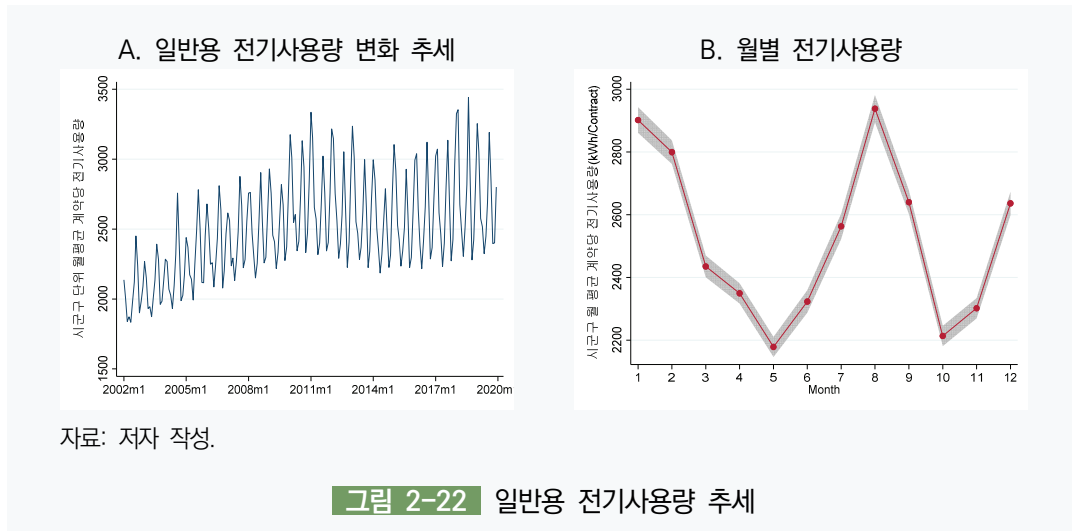


그림 2-21 가정용 전기사용량 추세



기온반응함수 구축을 위해 필요한 또 다른 주요 자료는 기상 자료로, 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 MKPRISM의 과거 기상 자료¹⁹⁾를 활용했다. MKPRISM은 일 단위로 기온과 강수량 자료를 제공하며, 기온 자료는 일별 최저기온과 최고기온을 제공한다. 본 연구에서는 사망자 수와 전기사용량 자료를 활용해서 분석하기 위해 일별 최저와 최고 기온 자료를 월 단위 기온 빈(bin)으로 구축해 분석에 활용했다. 월 단위 기온 빈은 해당 월에 각 기온 빈이 지속된 시간을 보여주는 변수이다. 일 단위 기상 자료를 월 단위로 구축한 이유는 종속변수로 사용되는 사망자 수와 전기사용량 자료가 월 단위로 제공되기 때문에 독립변수와 종속변수 사이 시간 단위를 통일하기 위함이다.

기온 빈 구축을 위해 우선 일별 최저기온과 최고기온을 활용해 시간 단위 기온 자료를 구축했다. 시간 단위 기온 자료는 같은 날 기온이 사인(sine) 그래프와 같은 모습으로 변화한다는 가정하에 일별 최저기온과 최고기온을 사인함수로 연결해 기온별 지속시간을 산정했다(식 2-14 참조).

$$Tbin_{t_2-t_1} = \left[\arcsin\left(\frac{t_2-b}{c-b}\right) - \arcsin\left(\frac{t_1-b}{c-b}\right) \right] \times \frac{12}{\pi} \times 2 \quad \text{식(2-14)}$$

식(2-14)에서 c 와 b 는 각각 일 최고기온과 최저기온, t_1 과 t_2 는 기온 빈이 시작되는 기온과 끝나는 기온을 나타낸다. 따라서 이 식을 통해 산정되는 $Tbin_{t_2-t_1}$ 은 해당 일(day)에 기온이 t_2 와 t_1 사이에 있었던 시간을 나타낸다.

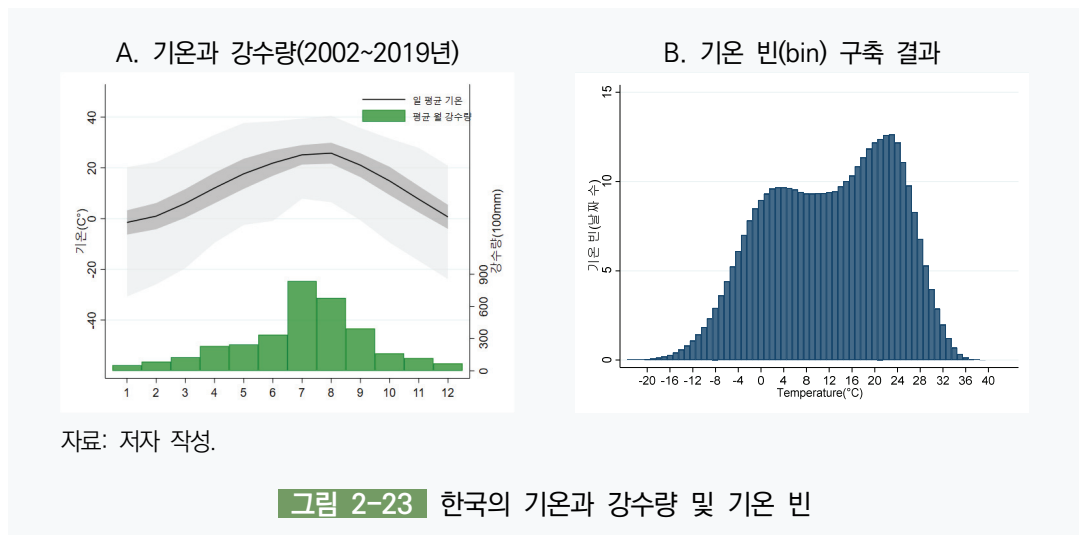
식(2-14)를 통해 산정한 일 단위 기온의 지속시간($Tbin_{t_2-t_1}$)은 월 단위로 합산하여 기온별 월 단위 지속시간을 산정해 월별 기온 빈을 최종적으로 구축했다(식 2-15 참조).

19) 기상청(2022.2).

$$Tbin_{t,j}^{temp} = \sum_{d=1}^D x_{d,j}^{temp} \quad \forall t = \sum_{d=1}^{D \in \{30,31\}} d \quad \text{식(2-15)}$$

〈그림 2-23〉은 본 연구에서 사용한 MKPRISM의 기온과 강수량 자료로 구축한 2002~2019년 사이 월별 기온과 강수량과 기온 빈(bin) 구축 결과를 보여준다. 그림에 따르면 한국의 일평균 기온은 겨울철은 평균적으로 0℃ 부근이고, 여름철에는 24~25℃까지 오르는 것으로 나타났다. 해당 기간 중 가장 높았던 기온은 약 40℃이고, 가장 낮았던 기온은 -30℃ 수준이었다. 강수량은 장마철인 7~8월에 높았으며, 장마철 월평균 강수량은 700~800mm 수준으로 나타났다. 장마철을 제외한 기간은 대부분 평균 강수량이 300mm를 밑돌았는데, 특히 겨울철은 건조한 기간이라 월평균 강수량이 50mm 이하로 떨어지는 것으로 나타났다.

〈그림 2-23 B〉는 기온 자료를 바탕으로 기온 빈을 구축한 결과를 보여준다. 그림에 나타난 기온 빈 분포는 2002~2019년까지 구축한 시군구 단위 월 기온 빈을 연 단위로 합한 후 평균한 결과이다. 그림에 따르면 한국의 경우 20℃에서 28℃ 사이에 노출되는 시간이 평균적으로 가장 많은 것으로 나타났다. 그림에서 x축은 기온을 나타내고, y축은 기온 빈 즉 해당 기온에 노출되는 날짜 수를 나타낸다. 따라서 24℃일 때 기온 빈이 13일이면 연평균 기온이 24℃ 이상 25℃ 미만인 시간이 약 13일인 것을 의미한다.



본 연구에서는 위에서 구축한 기상 자료와 사망자 수, 전기사용량 자료를 바탕으로 건강과 에너지 부문 기온반응함수를 산정했다.

라. 분석 방법

월 단위 기상 자료(기온과 강수량)와 종속변수로 사용되는 사망자 수와 전기사용량 자료를 구축한 후 계량경제학적 분석 방법을 활용해서 기온반응함수를 산정했다. 본 연구에서 사용하는 계량경제학적 분석 방법에서 가장 중요한 요소는 기온과 종속변수 간의 비선형적인 상관관계를 명확하게 분석하는 것이다. 비선형적인 상관관계 분석을 위해 Spline, RCS 또는 4차 다항 함수 등이 활용되었으며, 본 연구에서는 RCS를 활용해서 비선형적인 관계를 분석했다.

$$\ln y_{i,t} = \beta_0 + \beta_j f_j(h, Tbin_{i,t}^h) + P(prcp) + \delta_i + \tau_t + e_{i,t} \quad \text{식(2-16)}$$

식(2-16)은 종속변수와 기온 간의 상관관계를 분석하기 위한 주된 계량경제학 식이다. $y_{i,t}$ 는 종속변수로 건강이나 에너지 부문에 따라 만 명당 사망자 수($d_{i,t}$) 또는 계약자별 월 전기사용량($kWh \text{ per Cont.}_{i,t}$) 자료를 활용했다. 종속변수 분포가 한쪽으로 치우쳐지는 것을 방지하고 정규분포로 변환하기 위해 변수를 로그화(loged)해서 연구에 활용했다.

β_j 는 f 함수에 포함된 각 차항(f)의 결정계수이며, δ_i 는 시군구(i)에 관한 고정효과, τ_t 는 시간(t)에 대한 고정효과를 나타내고, $e_{i,t}$ 는 오차항을 나타낸다. 본 연구에서는 수집한 자료에서는 관찰되지 않았지만, 시군구 사망자 수나 전기사용량에 영향을 미칠 수 있는 변수로 인해 발생할 수 있는 누락변수편향(omitted-variable bias)을 해결하기 위해 시군구 단위 고정효과(δ_i)와 시간 고정효과(τ_t)를 추가했다.

식(2-16)을 통해 산정한 각 차항의 결정계수 β_j 는 다시 식(2-17)을 통해 최종적으로 기온 빈별 기온반응함수를 산정하게 된다.

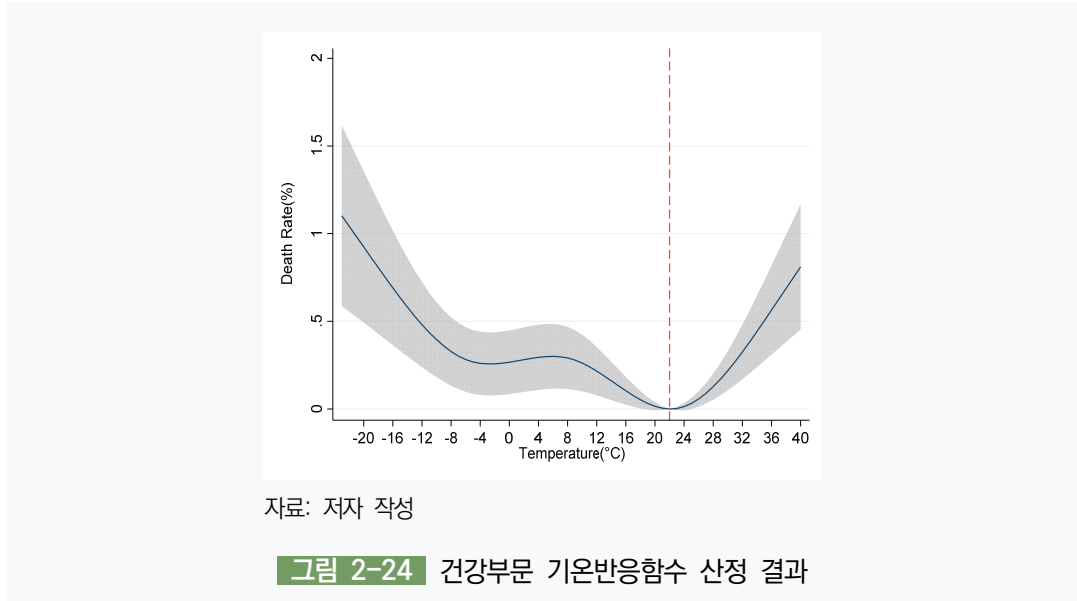
$$\alpha_h = \sum_{j=1}^J \beta_j \times f_j(h - h_b) \quad \text{식(2-17)}$$

식(2-17)에서 h_b 는 기준 기온을 나타내며, α_h 는 각 기온 빈별로 산정된 기온반응함수의 계수를 나타낸다.

마. 분석 결과

월 사망자 수와 전기사용량 자료를 계량경제학적 분석 방법을 활용해서 기온 변화에 따라 사망자와 전기사용량 변화를 보여주는 기온반응함수를 산정했다. <그림 2-24>의 기온반응함수는 건강부문 기온반응함수 산정 결과를 보여준다. 기온반응함수에서 x축은 기온을 나타

내며, y축은 기온 변화 시 만 명당 사망자 수의 변화율을 나타낸다. 사망자 수 변화율은 기준 기온 대비 상대적인 변화율로, 만약 36도에서 y축이 0.5를 가르킨다면 기준 기온인 22도인 날이 36도로 대체될 때 월 만 명당 사망자 수는 0.5% 증가한다고 해석할 수 있다.

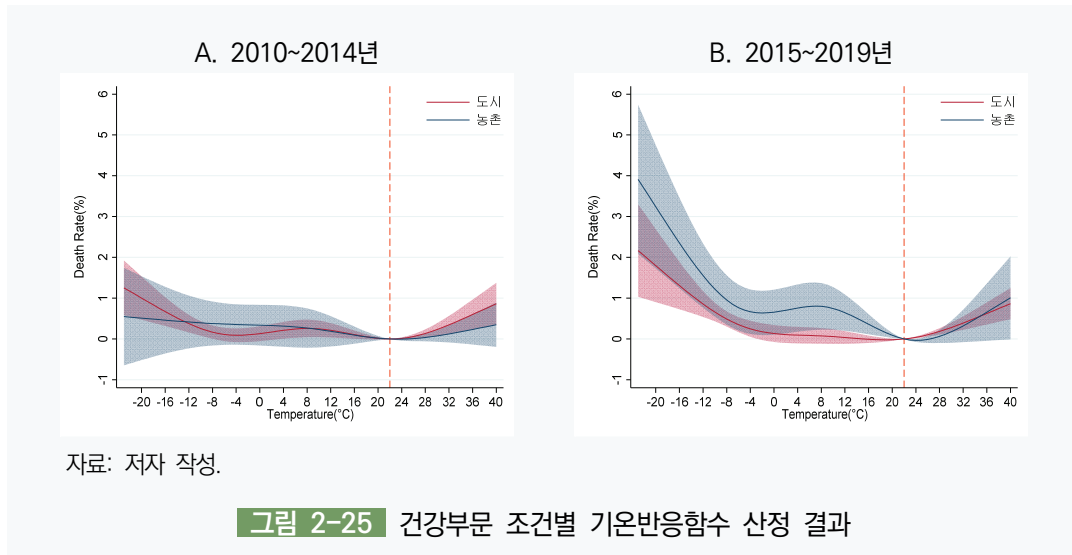


건강부문 기온반응함수에 따르면, 기온으로 인한 사망자 수는 기온 변화에 뚜렷하게 반응하는 것으로 나타났다. 기온반응함수는 뚜렷한 U-자 형태를 보였고, 이는 선행연구들의 결과와 유사하다. 기준 기온은 22°C로 기준 기온 대비 기온이 올라가거나 내려갈 때 사망률이 증가하는 것으로 분석되었다. 큰 차이는 없었지만 여름철 폭염보다는 겨울철 한파로 인한 사망률이 조금 더 높은 모습을 보였다. 예를 들어 40°C 기온 빈에서 상대적 사망률은 평균 약 0.8%를 기록했지만 -20°C에서는 약 1.1%를 기록해, 기온이 높을 때보다는 낮을 때 사망률이 더욱 높은 것으로 분석되었다.

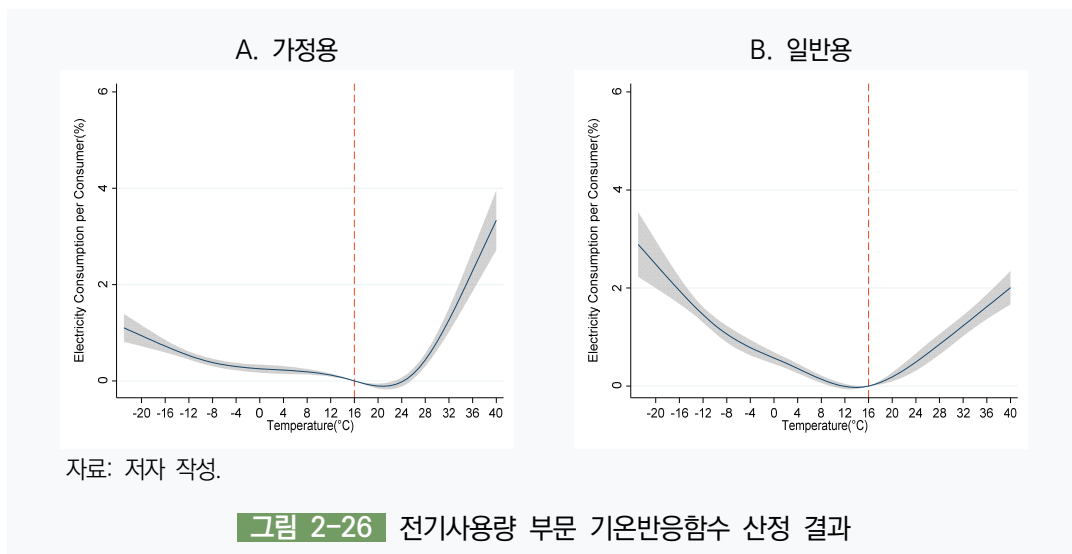
건강부문에서 산정한 기온반응함수가 지역 또는 기간에 따라서 어떻게 변화하는지 살펴보기 위해서 자료를 전반기(2010~2014년)와 후반기(2015~2019년), 도시와 농촌으로 구분해서 각각의 기온반응함수를 산정했다. 도시와 농촌은 시군구 중 서울특별시를 포함한 7대 광역시와 인구 10만 명 이상인 지역을 도시로 그 외 지역의 시군구는 농촌 지역으로 구분해 분석을 진행했다.

<그림 2-25>는 기간과 지역을 구분해 분석한 건강부문 기온반응함수 산정 결과를 보여준다. 그림에 따르면 도시와 농촌 간 지역 구분보다는 기간이 기온반응함수 형태에 더욱 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 도시와 농촌의 기온반응함수는 전반기와 후반기 모두 유사한 모습을 보였다. 후반기 겨울철 농촌의 사망률 변화가 도시보다 상대적으로 높은 것으로 분석되었지만, 전반적인 함수의 형태는 유사한 것으로 나타났다.

다만 전반기와 후반기의 기온반응함수는 아주 다른 모습으로 분석되었다. 전반기인 2010~2014년 사이에는 여름철과 겨울철 모두 기온의 상승 또는 하락에 따라 사망률이 증가했지만, 변화율이 아주 크지는 않았다. 하지만 2015년 이후에는 겨울철 사망률이 여름철에 비해 큰 폭으로 증가하는 모습을 보였다. 이는 도시와 농촌 모든 곳에서 나타나는 공통 현상으로, 한국이 고령화 사회로 진입하면서 겨울철 사망하는 노령인구가 증가해서 나타난 결과로 해석할 수도 있다.



한국전력 전기사용량 자료를 바탕으로 에너지 부문의 기온반응함수를 산정한 결과는 <그림 2-26>과 같다. 기온반응함수는 가정용과 일반용으로 구분해서 산정했으며, 두 계약종 모두 동일한 기준 기온을 적용했다. 그림에 따르면 가정용과 일반용 모두 기온 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 앞서 논의한 건강부문처럼 전기사용량 부문 기온반응함수도 U-자 형태의 모습을 보여준다. 다만 계약종에 따라 U-자 형태는 약간 다른 것으로 분석되었다.



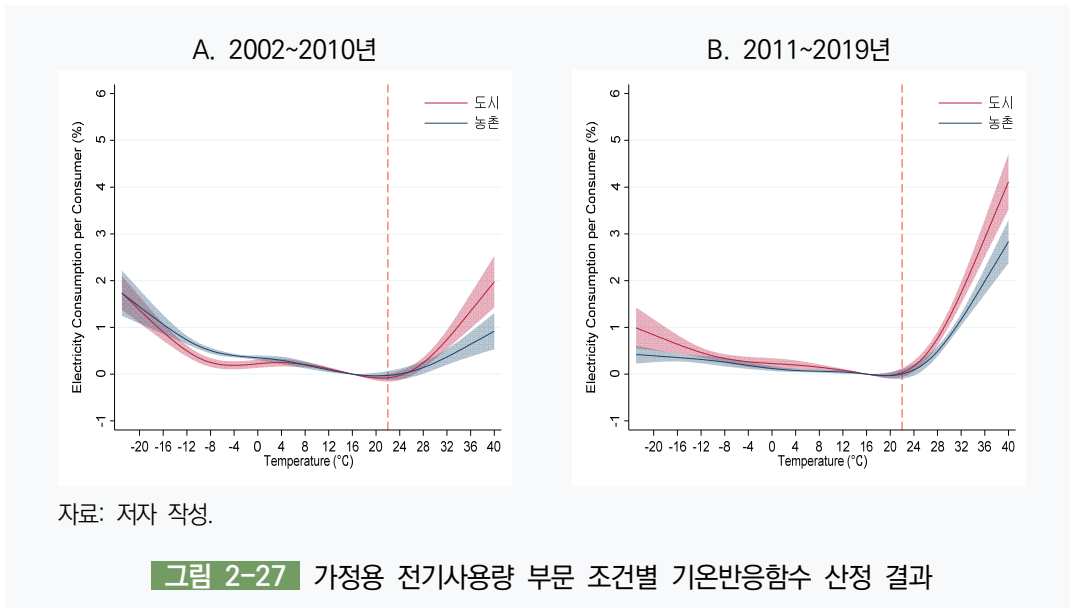
가정용 전기의 기온반응함수는 비대칭 U-자 형태를 가진 것으로 나타났다. <그림 2-26 A>에 따르면 겨울철보다 여름철에 전기사용량 증가율이 현저히 높은 것으로 나타났다. 기온이 40℃에 근접하면 상대적 전기사용량 증가율이 약 3% 이상으로 나타났으나, 반대로 기온이 내려갈 때는 -20℃에도 약 1% 수준으로 나타났다. 이는 가정의 경우 여름철 냉방은 대부분 선풍기 또는 에어컨과 같은 전기를 주 에너지원으로 하는 전자제품을 사용하지만, 겨울철 난방은 전기 외에도 도시가스, 등유, 연탄 등 다양한 에너지원을 활용할 수 있기 때문으로 풀이된다.

일반용 전기의 기온반응함수는 가정용에 비해 상대적으로 대칭적인 기온반응함수 형태로 나타났다. 여름철 외에도 겨울철에도 기온 하강에 따라 전기사용량이 증가해 대칭적인 U-자 형태의 모습을 보였다(그림 2-26 B 참조). 이는 일반용 전기를 사용하는 상업 건물 특성상 전기를 주 에너지원으로 사용해서 냉난방을 하기 때문으로 판단된다.

더불어 일반용 전기사용량은 가정용 전기사용량에 비해 더욱 낮은 기온에서부터 반응하는 것으로 나타났다. 예를 들어 가정용의 경우 22℃에서 전기사용량이 최저점을 기록하고, 이후 기온 상승에 따라 전기사용량이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 일반용 전기는 이보다 더욱 낮은 기온인 약 14℃에서 최저 사용량을 기록한 후, 기온이 상승하거나 하강할 때 전기 사용량이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

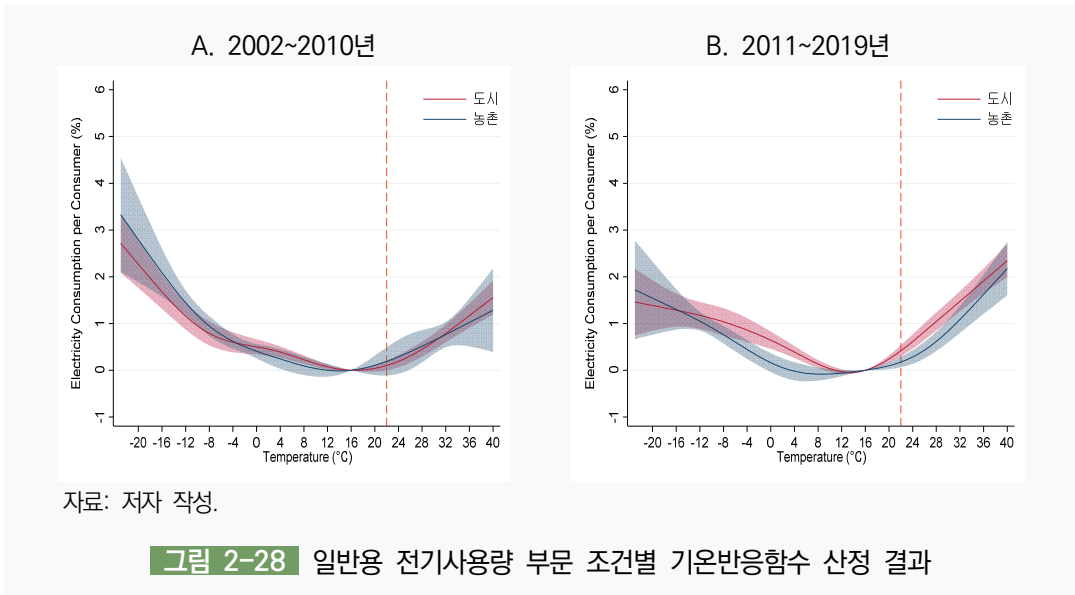
건강부문과 마찬가지로 전기사용량 부문도 기간과 지역에 따른 기온반응함수 변화를 살펴보기 위해 도시와 농촌, 전반기와 후반기로 구분해서 기온반응함수를 산정했다. 도시와 농촌은 건강부문과 동일한 기준을 적용해 시군구 중 7대 광역시에 포함되거나 인구가 10만 명 이상인 시군구는 도시로 구분하고, 나머지 지역은 농촌으로 구분했다. 기간은 2002~2010년을 전반기, 2011~2019년을 후반기로 구분해서 각각 기온반응함수를 구축했다.

<그림 2-27>은 가정용 전기사용량 자료를 바탕으로 기간과 지역을 구분해 기온반응함수를 산정한 결과이다. 가정용 전기사용량의 경우 도시와 농촌 모두 유사한 형태의 기온반응함수 그래프를 보였다. 전반기와 후반기 모두 도시의 기온에 따른 전기사용량 증가율이 농촌보다 더욱 높은 것으로 나타났다. 예를 들어 전반기에 약 40℃ 부근에서 농촌의 전기사용량 증가율은 약 1%였으나, 도시는 약 2% 수준으로 나타났다. 후반기에는 전기사용량 증가율이 더욱 높아져 농촌은 약 3%, 도시는 약 4% 수준으로 나타났다. 겨울철에는 여름철에 비해 상대적으로 큰 격차는 나지 않는 것으로 분석되었다.



기간별로 살펴보면 전반기 대비 후반기에 동일한 기온에서 전기사용량 증가율이 훨씬 더 높은 것으로 분석되었다. 앞서 언급한 것처럼 전반기 여름철 최고기온 시 전기사용량 증가율은 약 1~2% 수준이었으나, 후반기에는 3~4% 수준으로 더욱 뚜렷하게 증가한 모습을 볼 수 있다. 이러한 여름철 전기사용량 증가는 아마도 에어컨의 활발한 보급 때문으로 풀이된다. 전력거래소(2020)의 주택용 주요 가전기기 보급률에 따르면 2002년 에어컨 보급률은 가구당 0.38대였으나, 2019년에는 가구당 0.97대로 거의 1에 근접한 것으로 나타났다. 에어컨 보급률의 급속한 증가는 여름철 냉방을 위한 전기 수요 증가로 이어진 것으로 판단된다.

〈그림 2-28〉은 일반용 전기사용량의 기간과 지역별 기온반응함수 산정 결과를 보여준다. 일반용 전기의 경우 도시와 농촌 지역에 상관없이 기온반응함수가 매우 유사한 것으로 나타났다. 가정용의 경우에는 여름철 전기사용량 변화율에서 차이가 있었지만, 일반용은 거의 동일한 사용량 변화율을 보였다. 이러한 모습은 전반기와 후반기에서 모두 동일하게 나타났다. 기간에 따라서도 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 전반기에 비해 후반기에 겨울철 전기사용량 증가율이 상대적으로 낮아진 것으로 제외하고는 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다.



바. 소결

본 연구에서는 기후변화 영향을 분석할 수 있는 영향 모듈 구축의 첫 단계로 건강과 에너지 부문의 기온반응함수를 산정했다. 기온반응함수는 사망자 수나 전기사용량 등 부문별 기후 변화 영향을 대변할 수 있는 대리 지표(proxy)를 선정하고, 이러한 대리 지표가 기온 변화에 따라 어떻게 달라지는지 보여주는 함수이다. 기후변화는 기온과 강수 등 기상요소의 변화를 수반하기 때문에, 이러한 기상요소와 대리 지표 간 상관관계를 분석해 함수로 구축하는 것은 미래 기후변화 영향 분석을 위해 반드시 필요한 요소 중 하나이다.

건강과 에너지 부문 기온반응함수 산정을 위해 본 연구에서는 시군구-월 단위 만 명당 사망자 수와 계약별 전기사용량(가정용, 일반용) 자료를 구축하고, 기상청의 MKPRISM 과거 기상 자료를 활용해 월 단위 기온 빈을 마련해 분석에 활용했다. 기온과 사망자 수 및 전기사용량 간의 비선형적인 관계를 더욱 자세하게 분석하기 위해 본 연구에서는 Restricted Cubic Spline을 활용해서 분석을 진행했다.

기온반응함수 산정 결과 건강과 전기사용량 모두 기온 변화에 뚜렷하게 반응하는 것으로 나타났다. 기준 기온을 중심으로 기온이 올라가거나 내려갈 때 사망자 수와 전기사용량이 증가하는 U-자 형태의 모습을 보였다. 다만 부문에 따라 U-자 형태의 대칭 수준은 다른 것으로 나타났다. 예를 들어 건강과 일반용 부문 전기사용량은 좌우가 대칭인 기온반응함수 형태를 보였지만, 가정용 전기사용량은 여름철에는 높고 겨울철에는 상대적으로 낮은 비대칭적인 U-자 모습을 보였다. 또한 부문별로 기간 또는 지역 구분에 따라 기온반응함수 형태가 달라지는 모습을 보였다. 예를 들면 가정용 전기사용량은 2011년을 기준으로 2011년 이전 보다 2011년 이후 동일한 기온에도 전기사용량 증가량이 더 높은 것으로 나타났다. 이러한

가정용 전기사용량 증가량은 농촌보다 도시에서 더 높게 나타났고, 이는 급속한 에어컨 보급률 증가가 크게 기여한 것으로 판단한다.

본 연구에서는 기후대기 통합평가모형 구축 중 기후변화로 인한 영향을 분석할 수 있는 모듈을 구축하는 첫 번째 단계로 건강과 에너지 부문의 기온반응함수를 산정했다. 본 연구에서 구축한 기온반응함수를 바탕으로 2025년에 진행될 연구에서는 향후 기후변화로 인해 발생할 기온의 변화를 기온반응함수에 반영하여 기후변화의 영향을 시나리오별로 산정할 수 있도록 모듈을 구축할 계획이다.

제 3 장

모형 간 연계

1. 하향식 모형
2. 전력 모형
3. 대기 모형

1. 하향식 모형

가. 개요

1) UNICON-CGE 모형 개요

UNICON-CGE 모형은 환경부 환경기술개발사업의 ‘한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발과제’(2014.5~2020.12)에서 구축한 통합모형 중 CGE 방법론에 기반한 하향식 모형을 의미한다.

하향식 모형은 한국형 통합감축시스템의 핵심 구성요소로, 상향식 모형에서 도출된 기술 조합 및 산출물의 가격을 제공하고, 경제 전반에 미치는 영향을 분석하는 역할을 한다. 이 모형의 주요 목적은 두 가지이다. 첫째, 상향식 모형에서 도출된 기술 조합과 그 산출량이 시장에서 형성되는 가격을 도출하여 상향식 모형에 정보를 공급하는 역할을 한다. 이를 통해 상향식 모형에서 추출된 기술의 경제적 비용을 고려하여 국가의 에너지 소비 및 온실가스 배출량을 보다 정확하게 예측할 수 있다. 둘째, 상향식 모형에서 도출된 변화가 국민경제에 미치는 경제적 파급효과와 온실가스 배출량 변화 등을 분석하는 역할을 맡는다.

하향식 모형은 국가 단위의 경제 전반을 고려하여 상향식 모형의 기술변화가 산업별·부문별로 어떻게 파급되는지를 경제적·환경적 측면에서 분석할 수 있다. 이를 통해 정부 정책, 특히 온실가스 감축정책의 효율성을 평가하고, 장기적인 경제 발전에 미치는 영향을 정량화할 수 있는 도구로 활용된다.

가) 모형 구조

UNICON-CGE 모형의 구성은 <그림 3-1>과 같이 6개 부문으로 구성된다. 첫째, 기업(산업) 부문은 86개 산업으로 구성되며, 각 산업은 하나의 상품을 생산한다. 이 중 36개 산업은 상향식 모형과 연계되며, 발전, 제조업, 수송, 건물, 토지이용, 폐기물 관리 등 여러 분야의 에너지 소비 및 온실가스 배출 자료를 제공한다. 산업부문에서 각 산업은 주로 CES (Constant Elasticity of Substitution) 함수로 모델링되며, 자본, 노동, 에너지의 투입요소 간의 대체 가능성이 반영된다.

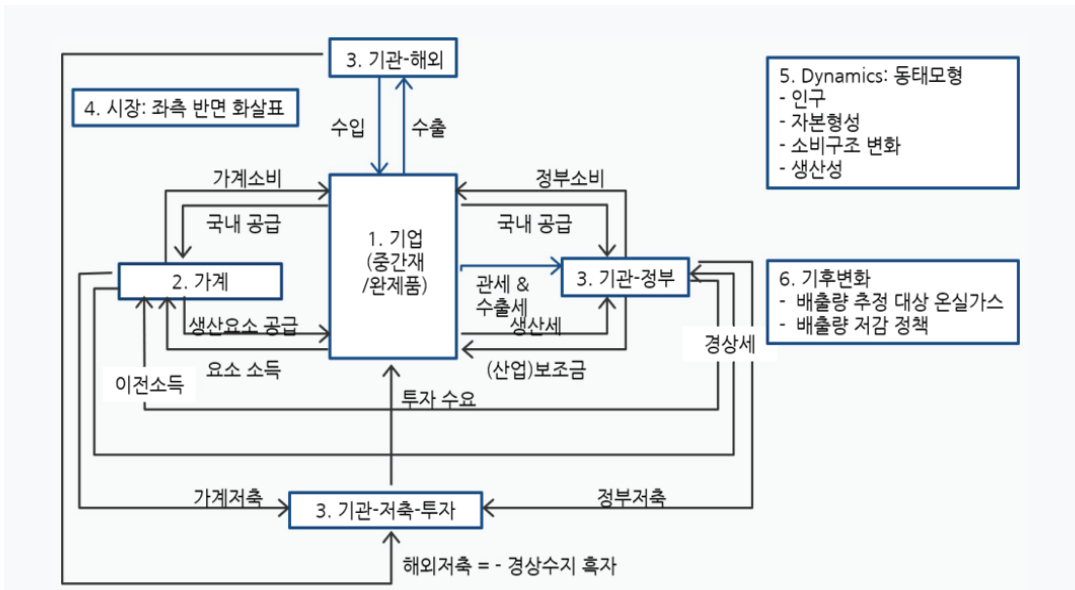
둘째, 가계부문은 노동과 자본을 제공하며, 이로 인해 소득을 얻고 이를 통해 소비와 저축을 결정한다. 가계의 소비는 효용극대화 문제를 통해 결정되며, CES 효용함수를 통해 다양한 상품 간의 대체 가능성을 반영하여 각 가계의 소비구조를 설명한다.

셋째, 기관부문은 정부, 저축-투자, 해외로 구성된다. 정부는 세수와 지출을 통해 경제에 영향을 미치며, 탄소세와 같은 환경세를 통해 온실가스 배출을 줄이는 역할을 한다. 정부는 가계와 기업으로부터 세금을 징수하며, 이를 바탕으로 공공 서비스에 대한 지출을 계획한다. 저축-투자는 가계의 저축을 취합하여 민간 및 정부의 투자 재원으로 활용하는 구조를 취한다. 해외부문은 국내 경제와 국제 경제 간의 상호작용을 반영하는 구성요소로, 수출입 가격, 교역량, 환율 등을 고려하여 무역과 자본 흐름을 모델링한다.

넷째, 시장부문에서는 각 부문에서 생산된 재화나 서비스의 가격이 결정되고, 이 가격이 부문별로 균형을 이루도록 설정된다. 각 상품시장의 시장 청산 조건을 통해 특정 상품의 공급량이 그 상품의 수요량과 일치하도록 하며, 요소시장 차원에서도 수요와 공급이 균형 되도록 한다.

다섯째, 동태방정식 부문은 각 실행 시점마다 일부 파라미터 값을 조정하여 시뮬레이션을 진행하는 축차동태모형을 기반으로 한다. 이 동태방정식은 자본축적, 인구변화, 고령화, 해외 저축, 국제유가, 비에너지 배출 변화, 효율성 변화, 선호도 변화 등의 변화를 반영하며, 시뮬레이션 결과가 각 경제변수의 변화에 맞추어 동적으로 변화하도록 설정된다.

마지막으로 기후변화 부문은 생산 및 소비 과정에서의 에너지 연소와 공정배출 등을 포함하는 온실가스 배출량 산정 모듈로 구성된다. 특히 탄소가격 부과에 따라 에너지 전환 과정이 모형 내 반영되며, 이를 통해 온실가스 배출량이 변화하는 과정이 시뮬레이션된다.



자료: 환경부, 한국환경산업기술원(2021), p.24.

그림 3-1 하향식 모형 구성요소

나) 입력자료 구성

UNICON-CGE 모형의 입력자료는 사회회계행렬(SAM), 온실가스 산업연관표, 비에너지 온실가스 배출량 등으로 구성된다.

먼저 사회회계행렬은 각 경제 주체 간의 거래 흐름을 정량적으로 나타내는 행렬이다. 여기에는 가계, 정부, 저축-투자, 해외부문 등이 포함되며, 이들 간의 소득과 지출 관계가 기록된다. SAM은 산업연관표를 기반으로 구성되며, 2015년 산업연관표와 국민계정 자료를 사용하여 산업 간 거래를 반영한다.

다음으로 온실가스 산업연관표는 각 산업의 에너지 소비 및 온실가스 배출량을 반영한다. 에너지 집약적인 산업들의 배출량을 추정하고, 이를 통해 탄소세와 같은 환경정책이 산업별로 미치는 영향을 분석할 수 있도록 한다. 기본부문 i 의 생산과정에서 배출한 온실가스 배출량을 부문에 투입된 j 중간재의 양에 따라 배분하는 구조를 따른다.

비에너지 온실가스 배출량의 경우 산업 공정이나 폐기물 처리 등에서 발생하는 배출량을 포함한다. 특히 시멘트를 포함한 요업제품의 생산과정 혹은 요업제품을 사용하는 과정에서 발생하는 이산화탄소, 화학산업 생산공정에서 발생하는 이산화탄소, 이산화질소 및 메탄과 철강산업에서 전기로를 사용하는 과정에서 발생하는 이산화탄소 그리고 각종 불소화가스 등을 반영하였다.

2) 기후대기 통합분석을 위한 KICAT-UNICON-CGE 모형 구성

앞서 살펴본 UNICON-CGE 모형의 경우 ‘한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발과제’(환경부, 한국환경산업기술원, 2021)상에서 개발한 여러 상향식 모형과 연계를 위해 이에 특화되어 있는 체계로 구성되었다. 해당 연구에서 발전, 10개 제조업, 6개 수송서비스, 3개 건물서비스, 14개 토지이용 산업, 2개 폐기물 산업 업종을 상향식 모형과 연계하였다.

연구 개발 후 시간이 지나며 모형의 업데이트가 필요한 상황이나, 상향식 모형들의 전반적인 업데이트가 힘들고, 이로 인해 2035년 감축목표와 같이 최신 시나리오 분석이 어렵다는 한계가 존재한다. 특히 UNICON-CGE 모형은 대기질 부문과의 연계를 고려하지 않았기 때문에 해당 부문에 특화된 업종 구분과 시나리오 분석이 불가능하다는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 이러한 한계를 인식하고 대기질 모형 및 전력, 수송 등 상향식 모형과의 연계를 고려하여 기존 모형을 개선한 KICAT-UNICON-CGE 모형을 구성하였다. 이를 위해 투입 자료 측면에서 2019년 산업연관표²⁰⁾로 최신화하였으며, 전력, 대기 및 수송 모형과의 연계성을 고려한 세부 50개 업종으로 재편하였다. 또한 해당 모형을 바탕으로 2035년 온실가스 감축 목표 달성에 따른 경제적 영향을 분석할 수 있는 시나리오 분석을 수행하였다.

나. 모형 간 연계성 강화

1) 연계 관련 선행연구

모형 간의 연계에 대한 다양한 선행연구가 존재한다. <표 3-1>은 CGE와 같은 하향식 모형과 에너지 등 상향식 모형, 그리고 대기질 모형을 연계하는 사례이다. ETH-NEXUS, ThreeMe-IESA-Opt, Mayer et al.(2024)의 사례는 상향식 에너지 모형과 하향식 경제 모형을 연계한 사례이다. 이 중 ETH-NEXUS와 ThreeMe-IESA-Opt는 양방향 연계가 적용된 모형으로, 하향식 모형을 통해 도출된 연간 전력수요 및 발전기술 가격을 상향식 모형에서 반영하여 발전량 및 투자금액 등을 산정하는 방식으로 모형 간 연계가 이루어진다. ETH-NEXUS 모형은 에너지 시스템 측면에 집중한 모형으로, 전력망, 재생에너지, 분산형 및 중앙집중형 발전 등의 요소를 모듈 형태로 연결하며, 이를 통해 도출한 발전량 자료를 경제모형을 통해 분석하여 경제적 영향을 분석하였다.

20) 한국은행 경제통계시스템, “산업연관표”, 검색일: 2024.6.18.

Fattahi et al.(2023)의 ThreeME-IESA-Opt 모형은 국가 차원의 하향식 CGE 모형인 ThreeME 모형과, 에너지 시스템 최적화 모형인 IESA-Opt 모형을 연계한 방식을 취했다. ThreeME는 프랑스 경제를 대상으로 신케인스 경제학에 기반한 시장의 불완전성을 반영하는 CGE 모형이다(Reynes et al., 2021). IESA-Opt 모형은 에너지 시스템 장기투자 분석을 위해 개발된 모형으로, 유럽 내 전력시스템 모델링을 통해 재생에너지 및 전력, 열 등 주요 에너지원의 사용량 및 에너지 믹스를 분석한다.

하향식 모형과 대기 모형을 연계하려는 노력도 존재한다. Rauner et al.(2020)은 REMIND (Regional Model of Investments and Development) 모형에 대기오염물질 배출량을 산정하는 GAINS 모형과 대기질 부분을 분석하는 TM5-FASST 모형을 결합하여 대기 측면의 효과를 함께 분석하였다. Ščasný et al.(2015)의 경우 WITCH 모형에 발전소의 오염물질 배출 및 대기 확산을 분석하는 ExternE IPA 방식을 적용하여 대기 측면의 영향을 분석하였다.

OECD(2016)은 OECD ENV-Linkage 모형에 기반하여 하향식 모형과 대기확산모형 연계를 시도하였다. 하향식 모형인 ENV-Linkage 모형을 통해 부문별 활동을 전망하고, 활동자료를 바탕으로 대기오염물질 배출량을 추산한다. 이를 대기질 모형인 TM5-FASST와 연계하여 대기 중 오염물질 농도변화 및 이에 따른 피해비용을 산정한다. 최근 연구인 Lanzi et al.(2022) 연구는 한국을 포함한 동북아시아를 대상으로 OECD(2016) 연구의 모형에 기반하여 세부적인 시나리오 분석을 수행하였다.

이상에서 살펴볼 수 있듯이 상향식(에너지)-하향식(CGЕ)-대기질 모형 전체를 연계하여 분석하는 연구는 흔하지 않다. 또한, 모형 간의 방법론적인 차이로 인해 연성 연계(soft-link)를 통한 모형 간 연계가 대부분을 차지하고 있다.

표 3-1 모형 연계와 관련된 선행연구

모형	국가	모형 구성			연계	
		에너지	하향식	대기 모형	연계 방법	연계 변수
ThreeMe-IESA-Opt (Fattahi et al., 2023)	네덜란드	IESA-Opt	ThreeME	-	양방향 연계 (연성 연계)	(CGE → 에너지) 가구 소비 증가, 부문별 생산성 증가를 토대로 Activity 수요 산출 (에너지 → CGE) 설비, 에너지믹스, 에너지 가격, 거래량 등을 통해 자본 생산성, 에너지 생산성 등
Mayer et al.(2024)	유럽	Euro-Calliope (전력, 열, 수송 부문)	WEGDYN	-	단방향 연계 (연성 연계)	(에너지 → CGE) 에너지믹스, 전력 생산 비용, 부문별 에너지 수요 등
Pisoni et al.(2023)	EU27 개국	-	EDGAR v5.0 배출 모형	EMEP Chemical Transport Model	단방향 연계 (연성 연계)	(하향식 → 대기) 부문별 대기오염물질 배출량 전망
Vandyck et al.(2020)	전 세계	POLES-JRC	-	TM5-FASST	단방향 연계 (연성 연계)	(에너지 → 대기) 지역 및 부문별 온실가스 배출량
Chepeliev et al.(2024)	전 세계	KINESYS	ENVISAGE	TM5-FASST	단방향 연계 (연성 연계)	(에너지 → CGE) 기후정책 경로에 따른 온실가스 배출량 → 경제적 효과 분석 (CGE → 대기) 대기오염물질 배출량
OECD(2016)	전 세계		ENV-Linkage	GAINS TM5-FASST	양방향 연계	(하향식 → 대기) 25개 지역 부문별 경제활동 및 대기오염물질 배출량 전망 → 대기질 모형을 통해 농도 계산 (대기 → 하향식) 대기질 악화에 따른 건강 지출 증가, 노동생산성 감소, 농업생산성 변화를 하향식 모형에 입력
Lanzi et al.(2022)	동북 아시아		ENV-Linkage	GAINS TM5-FASST	양방향 연계	(하향식 → 대기) 동북아시아 3개 지역에 대한 22개 경제부문별 경제활동 → GAINS 모형에 기반하여 대기오염물질 배출량 계산 → 대기질 모형을 통해 농도 계산 (대기 → 하향식) 대기질 악화에 따른 건강 지출 증가, 노동생산성 감소, 농업생산성 변화를 하향식 모형에 입력

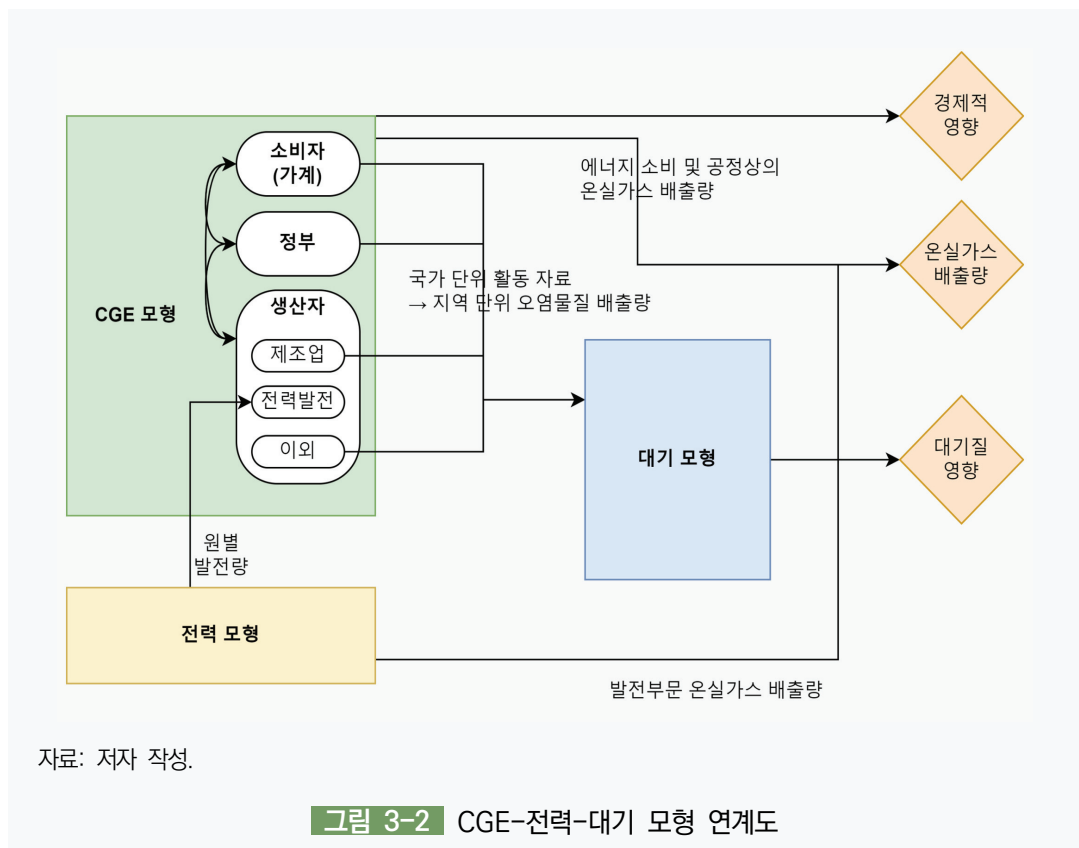
자료: OECD(2016); Vandyck et al.(2020); Lanzani et al.(2022); Fattahi et al.(2023); Pisoni et al.(2024); Mayer et al.(2024)을 참조하여 저자 재구성.

2) 연계 방식 및 연계 구조

본 연구에서는 이러한 선행연구에 기반하여 전력급전-하향식-대기질 모형을 포함하는 일방향 연성 연계 방식을 취하고자 한다. 이를 위해 전력, CGE 및 대기 부문에 대해 <그림 3-2>와 같은 연계도를 구성하였다.

전체 경제부문은 하향식 모형인 KICAT-UNICON-CGE 모형을 기준으로 하되, 전력부문의 발전량과 관련된 부분은 CGE 모형 내에서 내생적으로 결정되는 것이 아닌, 전력 모형의 발전량을 적용하는 연성 연계 방식을 취한다. 이후 하향식 모형에서 도출된 가계, 정부 및 생산자의 활동 자료는 지역 단위로 세분화되어 오염물질 배출량으로 전환되며, 이는 곧 대기 확산모형을 통해 대기질에 영향을 미치는 구조로 이어진다.

이에 따라 전체적인 경제적 영향은 하향식 모형인 KICAT-UNICON-CGE 모형에서 담당하게 되며, 온실가스 배출량은 전력 모형(발전부문)과 하향식 모형(발전부문 외 나머지)이 담당하게 된다. 마지막으로 대기질 측면의 영향은 대기확산모형을 통해 분석된다.



3) 연계를 위한 모형 구조 변경

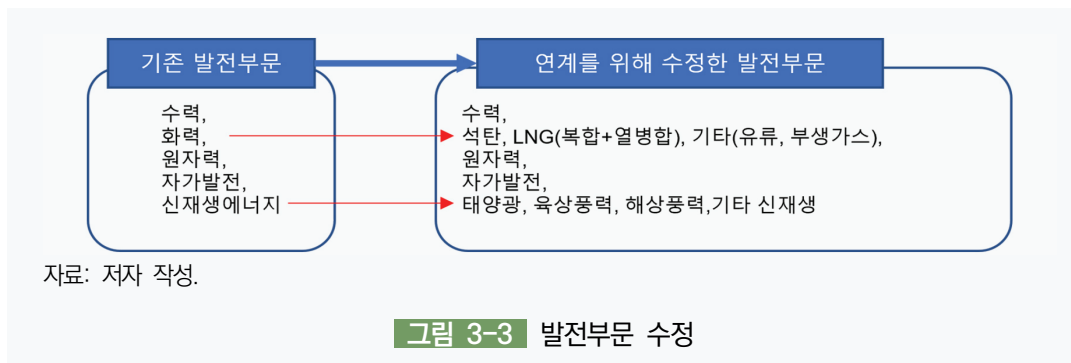
이러한 연계 구조를 위해 본 모형에서는 하향식 모형의 업종을 기존 UNICON-CGE와 달리 재분류하였다. 2030년 NDC 및 2050년 탄소중립 시나리오가 발표되면서 신재생에너지, 특히 해상풍력에 대한 중요도가 부각되었으며, 수소 및 CCS 부문에 대한 추가적인 고려가 필요하였다.

가) 업종 재구성

(1) 발전부문 확대 재구성

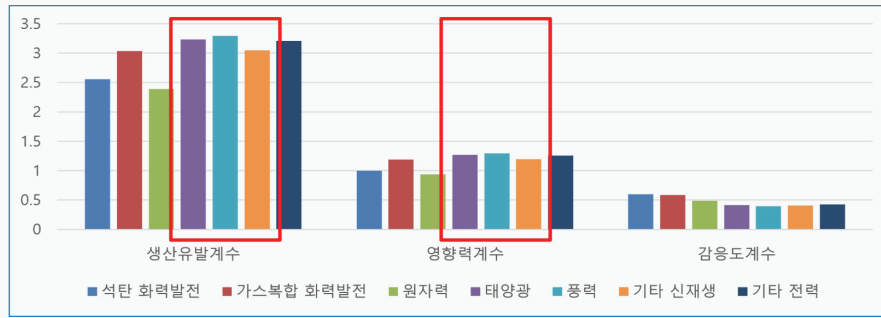
기존 UNICON-CGE 모형에서는 전력 업종을 단일 업종으로 구성하였으며, 상향식 전력 모형과의 연계를 위해 발전 분야와 기타 전력 분야로 분할하여 구성하였다. 본 연구에서는 하향식 모형 자체적으로 발전부문에 대해 독립적인 분석이 가능하고, 필요에 따라 연계가 가능하도록 하기 위해 산업연관표에서 5개로 구분하여 제시하고 있는 발전부문을 10개로 세부 구분하였다.

본 연구에서 수정한 발전부문 구성은 <그림 3-3>과 같다. 산업연관표상에서 구분된 발전 부문에 기반하여 화력발전을 석탄, LNG, 기타 발전으로 세부 구분하였으며, 신재생에너지 발전을 태양광, 육상풍력, 해상풍력, 기타 신재생으로 구분하였다. 이를 통해 세부적인 발전 기술에 대한 분석이 가능하도록 모형을 조정하였다.²¹⁾



분할 결과, 태양광 및 풍력 분야의 생산유발계수 및 영향력 계수가 석탄 화력에 비해 높게 나타나는 등 신재생에너지 분야의 투입-산출 구조가 석탄 및 가스복합 화력발전 등과 상이하게 나타나는 부분을 확인할 수 있다.

21) 세부적인 방법은 임형우 외(2024) <부록 I>을 참조.



자료: 임형우 외(2024), p.122.

그림 3-4 산업연관 분석 결과

(2) 대기확산모형 연계 위한 분야 세분화

대기확산모형은 CAPSS 데이터를 바탕으로 오염원을 도출하기 때문에 CAPSS 자료와의 연계를 위해 하향식 모형에서 업종에 대한 재분류가 필요하다. 다만, 배출원과 업종 사이에 1대1 매칭이 불가능하기 때문에 대기확산모형과 연계할 수 있는 최적의 업종 재분류를 수행하였다.

첫째, 연료 소비에 따른 대기오염물질 배출량 산정을 위해 연료와 관련된 업종은 최대한 구분하였다. 2019년 산업연관표에 제시된 석탄(061), 원유 및 천연가스(062)를 광업에서 별도 구분하였으며, 석탄코크스 및 석탄 관련 제품(1611), 연탄(1612), 나프타(1621), 휘발유(1622), 제트유(1623), 등유(1624), 경유(1625), 중유(1626), 액화석유가스(1627), 기타 석유 제품(163) 등 석탄 및 석유 관련 제품을 세부적으로 구분하였다. 이러한 연료원은 CAPSS 데이터상에서 에너지산업 및 비산업/제조업 연소 등의 연료와 매칭되어 활용된다.

둘째, 대기오염 배출 및 대기질 측면에서 도로이동오염원 및 비도로이동오염원의 영향이 크기 때문에 산업연관표 중 수송서비스 분야를 세부적으로 구분하였다. 수송서비스는 철도 운송서비스(531), 도로운송서비스(532), 수상운송서비스(540), 항공운송서비스(550)로 구분하였으며, 이들 분야의 에너지원별 소비량 등도 세부적으로 구분하였다.

마지막으로, 농림어업 분야에 대해서도 추가적인 구분이 이루어졌다. CAPSS 내 농업활동과 축산활동에 대한 식별을 위해 산업연관표 내 작물(01)과 축산물(02)를 구분하였으며, 이 외 분야를 기타 농림수산물로 별도 구분하여 배출원을 추가적으로 구분할 수 있도록 업종을 재편하였다.

(3) 최종 업종 구분

이러한 특징을 고려하여 최종적으로 설정한 업종은 <표 3-2>와 같다. 전력 및 대기확산모형과의 연계를 고려하여 총 50개 산업 업종으로 재분류하였다.

표 3-2 하향식 모형의 업종 구분

대분류	코드	상품명
농림어업	01	작물
	02	축산물
	A_ot	기타 농림수산물
광업	061	석탄
	062	원유 및 천연가스
	B_ot	금속 및 비금속광물
제조업	C01	음식료품
	C02	섬유 및 가죽제품
	C03	목재 및 종이, 인쇄
	1611	석탄코크스 및 석탄 관련 제품
	1612	연탄
	1621	나프타
	1622	휘발유
	1623	제트유
	1624	등유
	1625	경유
	1626	중유
	1627	액화석유가스
	163	기타 석유제품
	C05	화학제품
	C06	비금속광물 제품
	C07	1차 금속제품
	C08	금속가공제품
	C09	컴퓨터, 전자 및 광학기기
	C10	전기장비
	C11	기계 및 장비
	C12	운송장비
C13	기타 제조업 제품	
C14	제조임가공 및 산업용 장비 수리	
전력, 가스 및 증기	4501H	수력발전
	4502c	석탄발전
	4502g	LNG발전
	4502of	기타 화력발전
	4503N	원자력발전
	4504O	자가발전
	4505or	기타 신재생발전
	4505s	태양광발전
	4505fw	해상풍력발전
	4505nw	육상풍력발전
	461	도시가스
	462	증기 및 온수 공급

표 3-2의 계속

대분류	코드	상품명
수도 및 폐기물	E_ot	수도 및 폐수처리
	49	폐기물 처리 및 자원재활용서비스
건설	F	건설
수송	531	철도운송서비스
	532	도로운송서비스
	540	수상운송서비스
	550	항공운송서비스
서비스	rnd	연구개발
	srv	기타 서비스

자료: 저자 작성.

나) 투입자료 및 모형구조 재구성

(1) 투입자료

본 연구에서는 2019년 산업연관표를 기반으로 모형을 구축하였다. 한국은행에서 제공하는 산업연관표 내 기본자료를 활용하였으며, 생산세에 대한 자료 확보를 위해 2015년 세율을 준용하여 활용하였다.

추가로 모형 내 반영한 발전부문의 경우 세부적인 정보가 부재하기 때문에 외생적인 가정을 부여하였다. 신재생에너지의 경우 별도의 수입이 없다고 가정하였으며, 노동세 및 자본세의 경우 타 에너지원과 유사한 수준으로 가정하였다. 또한 신규 발전부문 수요처의 경우 발전량에 기반하여 기존 전력의 수요처를 분해하는 방식을 통해 조정하였다.

발전부문을 추가적으로 구축함에 따라 발생한 사회계수행렬상 오차는 RAS 알고리즘을 이용하여 조정하였다. RAS 방식은 Stone and Brown(1962)에서 제안된 방식으로, 행과 열의 합계를 유지하면서 산업연관표 내에서 균형을 이루는 방식이다. 이 방식은 이중비례(biproportional) 조정 방식에 의거하여, 행(row)과 열(column)의 합계를 유지하면서 테이블의 내부 값을 반복적으로 조정하여 정확한 균형을 이루도록 조정한다.

(2) 에너지 소비량 및 온실가스 배출량

산업연관표와 연계된 에너지밸런스 및 온실가스 배출량 산정을 위해 2019년 에너지밸런스 자료 및 온실가스 인벤토리 자료를 활용하였다. 에너지밸런스 내 에너지원별 공급량(혹은 소비량) 자료를 산업연관표와 매칭하였으며(표 3-3 참조), 각 업종의 에너지원별 투입액을 바탕으로 에너지 소비량을 할당하는 방식을 통해 에너지 소비량을 산정하였다.

이후 온실가스 배출량의 경우 각 에너지원별 탄소배출계수를 활용하여 산정하였다. 배출계수의 경우 EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼 내의 온실가스 배출계수를 준용하여 활용하였다.

표 3-3 산업연관표와 에너지밸런스 매칭

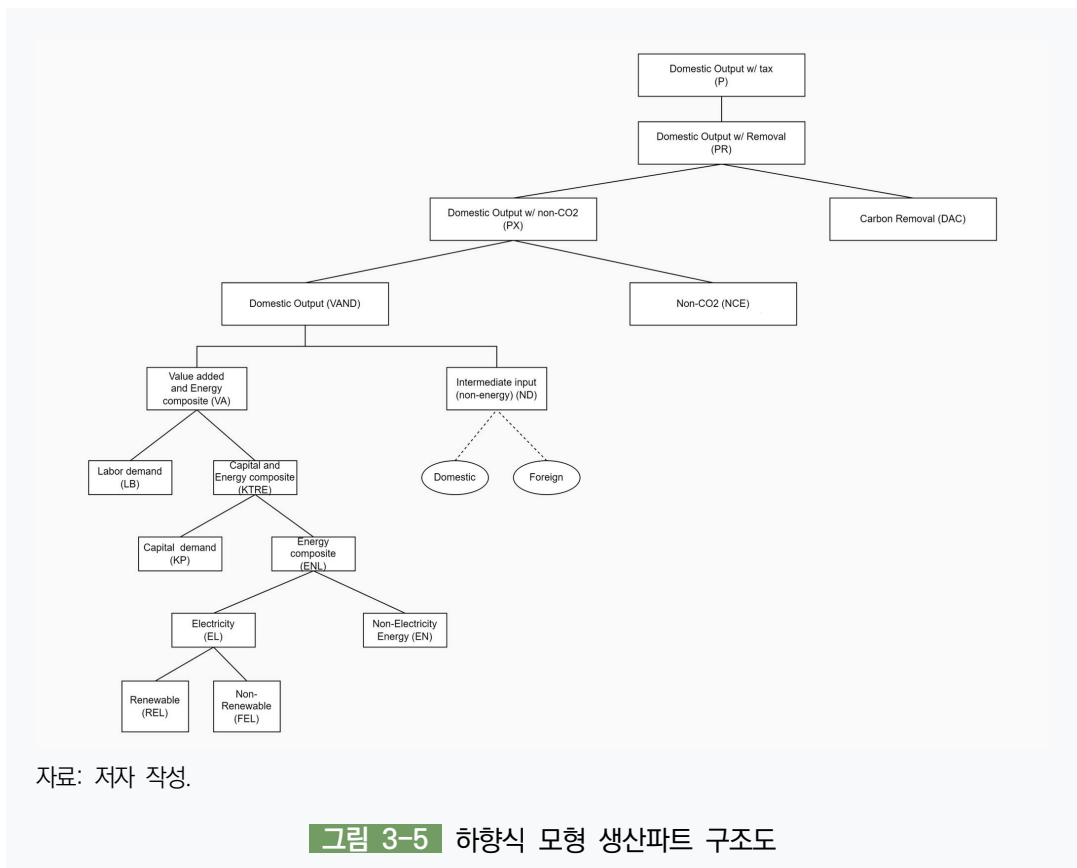
산업연관표		에너지밸런스
1612	연탄	무연탄 국내탄
0611	무연탄	무연탄 수입탄
0612	유연탄	유연탄 원료탄
		유연탄 연료탄
1622	휘발유	휘발유
1624	등유	등유
1625	경유	경유
1626	중유	경질중유
		중유
		중질중유
1623	제트유	항공유
		항공유
		항공유
1627	액화석유가스	프로판
		부탄
1621	나프타	나프타
1639	기타 석유정제 제품	용제
		아스팔트
1628	정제혼합용 원료유	윤활기유
		석유코크
1639	기타 석유정제제품	파라핀왁스
		기타제품
0622	천연가스(LNG)	액화천연가스
4610	도시가스	도시가스
4501	수력	수력
4503	원자력	원자력
450	발전	전력
4620	증기 및 온수 공급	열
4505	신재생에너지	신재생 및 기타

자료: 저자 작성.

다) 모형 구조 재구성

모형 구조 측면에서 기존 UNICON-CGE 모형의 구조를 준용하였으며, 전력 발전원 간의 대체관계를 모사하기 위해 전력분야를 신재생에너지와 이외 에너지원으로 구분하여 구조를 설정하였다. 산업의 생산구조는 다중 네스트(multi-nest) CES 함수를 적용하였으며, 세부 네스트 구조는 <그림 3-5>와 같다.

신재생에너지 및 비신재생에너지 간의 노드 구분을 통해 각각의 기술적 차이점을 고려하였으며, 이를 바탕으로 전력복합재, 에너지복합재를 구성하였다. 모형 구조상 자본-에너지 간의 대체관계, 노동-자본에너지복합재 간의 대체관계를 반영하였다. 연료 연소와 무관한 비연소 배출(공정배출 등)은 상위 네스트에 묶어 생산과의 보완관계를 모사했다. 또한 향후 모형 고도화를 고려하여 CCS와 같은 탄소제거(carbon removal) 기술을 모형 내 반영하였다.



다. 모형 고도화 방안

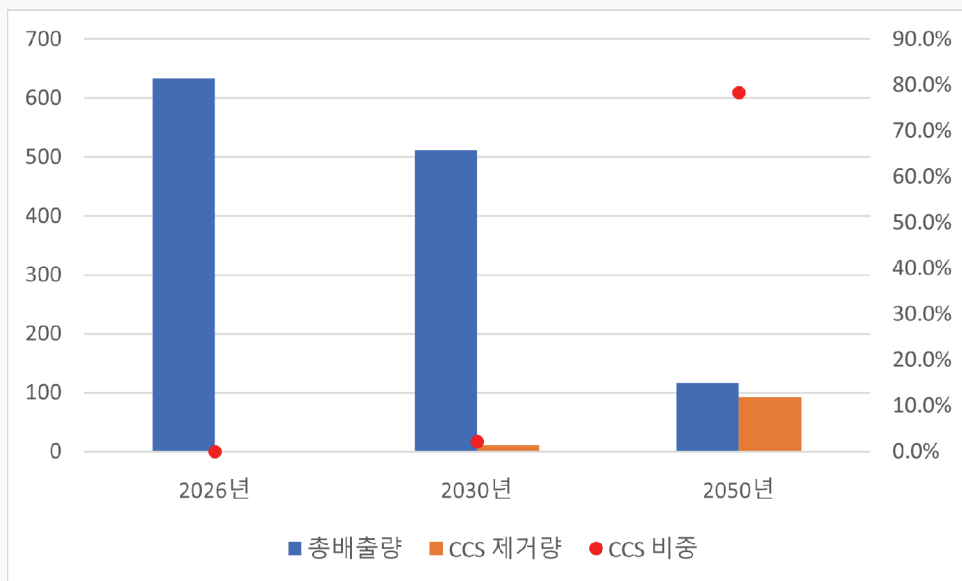
본 연구에서는 기존 UNICON-CGE 모형을 개선하여 최근 탄소중립 정책 및 계획과 대응하여 분석이 가능하도록 기존 모형을 고도화하였다. 이번 연구에서 집중적으로 고도화를 진행한 사항은 CCS 산업에 대한 반영 및 수소 산업 모듈에 대한 추가 고려이다.

1) CCS 산업 반영

가) 탄소중립 측면에서 CCS 역할

NDC 및 탄소중립 계획 내 CCS 등 탄소중립 신산업의 중요성은 더욱 커지고 있다. <그림 3-6>은 탄소중립 기본계획 및 탄소중립 시나리오에서 제시한 연도별 총배출량과 CCS(CCU 및 DAC 포함) 제거량 및 그 비중을 요약한 것이다. 2026년 CCS 제거량은 0.4백만 톤 수준으로 전체 배출량의 0.1%에 불과할 것으로 예상되나, 이후 2030년 11.2백만 톤(총배출량의 2.2%), 2050년경에는 92백만 톤(총배출량의 78%) 수준으로 급증할 것으로 전망된다.²²⁾

이에 따라 2035년 온실가스 감축목표 분석 및 더 나아가 2050년까지의 분석을 위해서는 CCS 분야에 대한 고려가 필요하다.



자료: 2050 탄소중립위원회(2021), p.32; 관계부처 합동(2023), p.22.

그림 3-6 CCS 제거량 및 비중(2026년, 2030년, 2050년)

22) 2050년 CCS 포집량은 탄소중립 시나리오 B안을 기준으로 산정하였음.

과거 선행연구들에서 CCS 혹은 CCU 기술과 연계된 산업부문에 대해 정의하려는 다양한 노력이 존재하였다. 이해진, 강윤영, 김윤경(2019)은 CCU 기술에 집중하여 기술별 산출물에 대한 정의를 바탕으로 기계·설비 공사 관련 산업과 함께 산출물과 연계된 산업부문을 구성하였다. 에너지경제연구원(2018)는 ‘국내외 환경변화에 따른 CCS 정책 추진계획 수립 연구’를 진행하면서, 이산화탄소 포집 옵션별 응용분야의 설명을 통해 발전산업, 철강산업, 시멘트업, 정유업, 시멘트업, 천연가스 및 합성가스 생산, 산업플랜트 관련 업종이 기술과의 연관성이 높음을 언급하고 있다. 이상의 선행연구들은 CCS 관련 산업의 기술적 특징을 유용하게 살펴볼 수 있는 기준을 제시하였다. 다만, CCS 기술의 경우 여전히 사업화 또는 상용화가 미흡한 상황이기 때문에 실제 산업과의 관련성을 논의하기에는 모호한 측면이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 데이터 기반의 과학적인 접근을 위하여 CCS의 기술적 정의를 통계청에서 제공하고 있는 선진특허분류코드(CPC Y-code)를 사용하였다. 데이터적인 측면에서 CCS 관련 특허기술에 대한 국내 현황 자료를 추출하고 해당 기술을 보유하고 있는 기업을 추출하여 이와 연계된 산업을 관련 산업군을 도출하는 분석을 수행하였다.



선진특허분류코드(CPC Y-code)의 코드는 미국과 유럽특허청이 개발하여 기존의 IPC 코드로 분류하기 어려운 기후변화 관련 기술이나 첨단기술과 관련된 분야의 선진기술을 분류하는데 활용된다. 이 중 Y02 코드는 주로 기후변화 대응 기술분야를 다루고 있으며, 여기서 Y02C Capture, storage, sequestration or disposal of greenhouse gases [GHG]는 온실가스 감축을 위한 포집, 저장 처리 관련 기술을 기술 범위에 포함하고 있다.

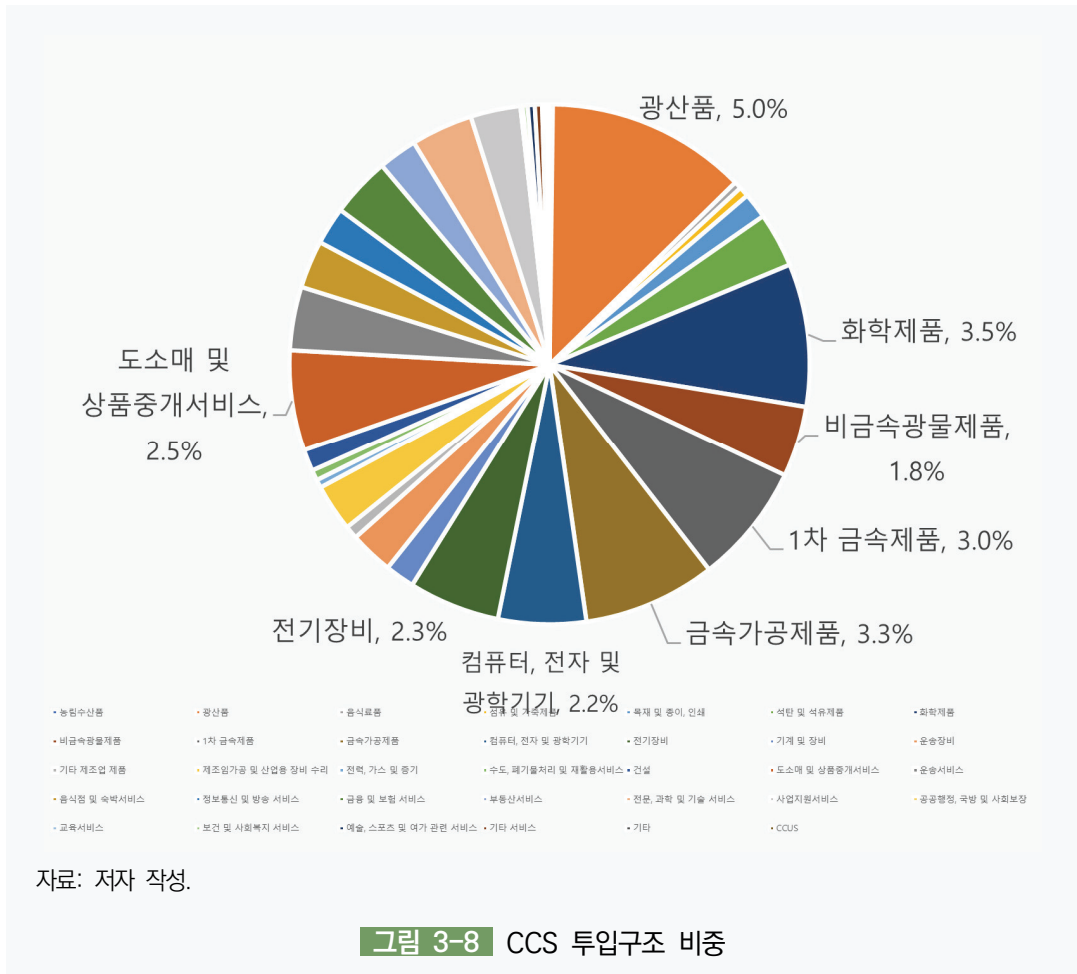
표 3-4 CPC Y02C 특허 코드

CPC	COOPERATIVE PATENT CLASSIFICATION	
Y02C	Capture, storage, sequestration or disposal of greenhouse gases [GHG]	온실가스(GHG)의 포집, 저장, 격리 또는 처리
Y02C10/00	CO ₂ capture or storage	CO ₂ 포집 또는 저장
Y02C10/02	Capture by biological separation	생물학적 분리를 통한 포집
Y02C10/04	Capture by chemical separation	화학적 분리를 통한 포집
Y02C10/06	Capture by absorption	흡수를 통한 포집
Y02C10/08	Capture by adsorption	흡착을 통한 포집
Y02C10/10	Capture by membranes or diffusion	막 또는 확산을 통한 포집
Y02C10/12	Capture by rectification and condensation	정류 및 응축을 통한 포집
Y02C10/14	Subterranean or submarine CO ₂ storage	지하 또는 해저 CO ₂ 저장
Y02C20/00	Capture or disposal of greenhouse gases [GHG] other than CO ₂	CO ₂ 이외의 온실가스(GHG) 포집 또는 처리
Y02C20/10	Capture of nitrous oxide (N ₂ O)	아산화질소(N ₂ O)의 포집
Y02C20/20	Capture of methane	메탄의 포집
Y02C20/30	Capture of perfluorocarbons [PFC], hydrofluorocarbons [HFC] or sulfur hexafluoride [SF ₆]	과불화탄소(PFC), 수소불화탄소(HFC) 또는 육불화황(SF ₆)의 포집

자료: IP 분류본부 홈페이지, "CPC Y02C", 검색일: 2024.8.10.

본 연구는 이를 바탕으로 KPRIS를 통한 CCS 특허정보와 NICE 평가의 기업신용정보시스템을 연계하여 CCS 기술과 연관된 산업을 선별하였다. 이를 바탕으로 산업연관표와의 매칭을 통해 기존 산업연관표 내에서 CCS 분야를 별도로 분리하는 과정을 거쳤다.

산업연관표 매칭을 통해 분석한 CCS 분야의 투입구조 비중은 <그림 3-8>과 같다. CCS 분야의 투입구조 분석 결과 광산품, 화학제품, 금속가공제품, 1차금속제품, 도소매 및 상품중개서비스 등의 투입비중이 높음을 확인하였다. 또한 산업연관 분석 결과 CCS 산업은 전방효과가 1.649이고, 후방효과가 1.067로 나타났다. 이는 CCS 산업이 도소매 및 상품중개서비스, 화학제품, 운송, 1차금속제품, 전문 과학기술 서비스 등과 함께 전방효과가 높은 산업의 특징을 가지는 중간수요적 제조업형 산업이라는 것을 의미한다.



나) 하향식 모형 내 CCS 산업 반영

하향식 모형에서 사용하는 산업연관표 및 사회계수행렬 중 CCS 분야가 없기 때문에, 본 연구에서는 앞에서 도출한 CCS 산업의 투입구조를 바탕으로 새로운 업종을 식별하여 투입 변수에 추가하였다.

다만 CCS 산업의 수요구조에 대해서는 불확실성이 매우 크다. 아직 국내 CCS 산업이 활성화 되지 않았기 때문에 이를 가정하여 적용하는 데 한계가 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 글로벌 시장규모를 토대로 2019년 CCS 시장을 가정하였다. Markets and Merkets(2020)은 2020년 기준 CCS 분야의 글로벌 시장이 EOR 54%, 석유화학부문 22%, 발전부문 18%, 철강부문 5%, 시멘트 1%로 구성되어 있다고 제시하였다. 이 중 국내 EOR 사업은 시행하지 않고 있기 때문에, 나머지 시장규모 비중을 참고하여 국내 CCS 산업의 수요처 비중을 도출하였다. 또한 이 과정에서 발생하는 사회계수행렬상의 오차에 대해서는 RAS 방법론을 통해 조정하였다.

2) 수소 산업 반영

가) 탄소중립 측면에서 수소 산업의 역할

탄소중립에 있어 수소 산업의 중요성이 부각되고 있다. 탄소중립이 달성될 경우 수소에너지 수요는 2030년 약 1.4억 톤, 2050년 6.6억 톤 규모로, 최종에너지 수요의 22%에 달할 것으로 전망된다(김채현 외, 2023).

수소 산업의 주 수요처는 산업, 발전 및 운송 부문이다. 수소는 철강, 화학 등의 고탄소 배출 산업에서 탈탄소화 수단으로 사용될 수 있다. 예를 들어 철강 생산에 사용되는 코크스(탄소 기반 연료) 대신 수소를 활용하면 생산 과정에서의 탄소 배출을 크게 줄일 수 있다. 또한 수소는 암모니아 및 메탄을 생산에 필요한 원료로 사용되며, 이들 산업의 배출을 줄이는데 기여할 수 있다.

전력 측면에서는 수소연료전지를 이용한 발전과 에너지 저장 매체로서의 역할을 담당할 수 있다. 수소연료전지는 수소와 산소의 화학 반응을 통해 전기를 생산하며, 탄소 배출이 없는 청정에너지 기술이다. 또한 수소 혼소·전소발전을 통해 노후 가스터빈을 개선하고 저탄소화가 가능할 것으로 기대된다. 그리고 재생에너지를 통해 생산하는 그린수소는 간헐적인 재생 에너지(태양광, 풍력)의 안정성을 보완하는 데 기여할 수 있다. 마지막으로 운송부문 측면에서 수소차뿐 아니라 선박, 드론, 항공 등 다양한 모빌리티로 수소 활용처를 확대함으로써 화석 연료 사용을 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

이에 따라 국내에서도 수소 산업에 대한 여러 지원책 및 목표가 발표되고 있다. 2019년 발표한 “수소 경제 활성화 로드맵”에서는 2040년까지 2.9백만 대의 수소차와 15GW 규모의 발전용 연료전지를 보급하는 것을 목표로 제시하였다. 2021년 발표된 『제1차 수소경제 이행 기본계획』에서는 수소 공급량을 2020년 22만 톤에서 2030년 390만 톤(그린수소 25만 톤, 블루수소 75만 톤 포함), 2050년 2,790만 톤(전부 그린수소)으로 늘린다는 목표를 제시하였다.

나) 하향식 모형 내 수소 산업 반영

(1) 수소 생산

국내 수소 생산의 경우 2021년 기준 제조 방식과 부생 방식의 수소 생산량 자료를 확보할 수 있었다. 약 2백만 톤의 전체 수소 생산량 중 약 44%가 개질수소 방식으로 생산되며, 부생수소 방식의 경우 나머지 56% 정도를 담당하고 있다. 아직까지 그린수소를 통한 생산량은 존재하지 않는 것으로 나타났다.

선행연구 내 주요 결과를 요약하여 그린수소, 부생수소, 개질수소에 대한 비용자료를 정리 하면 <표 3-5>와 같다. 부생수소 및 개질수소 방식은 상용화가 된 기술이며, 부생수소는

1.38백만 톤(2020년), 개질수소는 1.04백만 톤(2022년) 수준으로 나타났다. 생산단가의 경우 연구에 따라 가격의 차이가 존재하였으나, 부생수소는 kg당 약 2,000원 수준이었으며, 개질수소는 연구에 따라 다르나 1,841원(김재경 외, 2020)에서부터 5,100원 수준으로 범위가 다소 넓게 나타났다. 이에 따라 현재 시장규모는 부생수소와 개질수소가 유사한 수준으로 예상된다.

각 기술에 따라 자본비용 및 운영비용의 비중 차이가 크게 나타났다. 그린수소의 경우 신재생 에너지를 기반으로 하기 때문에 연료비용(전기요금)이 전체 비용의 80% 수준으로 높게 나타났다. 개질수소 역시 연료비용이 전체 비용의 60%를 상회하였다. 자본비용 및 운영비용 측면에서는 그린수소와 개질수소 모두 자본비용의 비중이 다소 높게 나타나는 등 유사한 특징을 보였다.

표 3-5 수소 기술별 기초자료

구분	그린수소	부생수소	개질수소
개요	물을 전기분해하여 수소 생산	납사의 개질이나 분해, 제철 등의 공정에서 발생하는 혼합가스를 정제해 순도를 높여 생산하는 수소	천연가스 내 메탄을 물과 반응시켜 이산화탄소와 수소로 분해하는 방식
기술수준	기술개발	상용화	상용화
생산량 (백만 톤)	0(현재) 0.25('30년 목표) (자료: 2030 NDC)	1.38('20년) (자료: EG-TIPS)	1.04('22년) (자료: EG-TIPS)
생산단가 (원/kg)	10,475.17원/kg	저장비용: 2,000원/kg (자료: 월간수소경제(2020.7.2))	1,841~5,100원/kg (자료: 김재경 외, 2020)
시장규모 (백만 원)	0(현재) 2,045.66('30년 목표)	2,751	1,915
Capex	12.19%	자료 없음	국내 자료 없음 (미국의 경우 21.06%, 자료: 김재경 외, 2020)
Fixed Opex	4.48%	100% (저장비용 100% 고정비용 반영)	국내 자료 없음 (미국의 경우 10.52%, 자료: 김재경 외, 2020)
Variable Opex	신재생에너지 83.33% (전기요금 수준 105원/kWh 가정)	정유/화학 원료 (자료 없음)	국내 자료 없음 (미국의 경우 68.42%, 자료: 김재경 외, 2020)

자료: 김재경 외(2020); 월간수소경제(2020.7.2), “부생수소에 주목한다 ① 수소경제 포문 연 ‘부생수소’”, 검색일: 2024.9.29; 관계부처 합동(2021); 신동원 외(2022)를 참조하여 저자 재구성.

(2) 투입구조 가정

수소분야의 경우 산업연관표에 대한 별도의 분해 없이 수소 생산자료 및 비용자료를 토대로 투입구조를 가정하였다. 아직까지 부생 및 개질수소의 비중이 높기 때문에 전체적인 투입구조는 개질수소의 비용구조를 따랐다. 자본비용은 총비용의 20% 수준으로 가정하였으며, 운영비용으로써 노동비용은 총비용의 10%를 가정하였다. 나머지 70%는 에너지 비용으로 구성하였으며, 이 중 개질수소의 원료에 해당하는 천연가스가 에너지비용의 50%(총비용의 35%), 전력을 에너지비용의 50%(총비용의 35%)로 가정하였다.

(3) 수요구조 가정

앞서 살펴보았듯이 수소의 수요처는 크게 산업, 발전, 모빌리티 분야이다. 산업분야에서는 철강, 석유화학, 시멘트 공정에서 수소 활용을 꾀하고 있다. 2022년 기준으로 수소 소비의 62.9%가 정유업종에서 이루어지고 있으며, 화학업종에서 36.7%, 기타 업종에서 0.4% 정도 소비되고 있다.

(단위: 톤)

구분	정유			화학			기타			합계
	원료	연료	소계	원료	연료	소계	원료	연료	소계	
울산	811,394	1,271	812,665	390,639	0	390,639	131	28	159	1,203,463
전남	321,615	6,485	328,100	131,708	57,798	189,506	-	14	14	517,620
충남	143,697	-	143,697	174,129	275	174,404	1,493	41	1,534	319,635
기타	34,976	-	34,976	16,220	0	16,220	3,560	2,853	6,413	57,609
합계	1,311,682	7,756	1,319,438	712,696	58,073	770,769	5,185	2,935	8,120	2,098,326

자료: EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼 홈페이지, “수소에너지 생산”, 검색일: 2024.9.29.

그림 3-9 수소에너지 소비 현황(2022년 기준)

수소 연료전지의 경우 2022년 기준 발전용으로 878MW가 설치되었다. 다만 대부분의 수소 연료전지는 설비 내 LNG를 개질하여 수소를 생산하고 이를 연료로 사용하는 형태이기 때문에 수소의 수요구조로 가정하기 어렵다.

수소 모빌리티의 경우 수소 승용차와 버스로 구분하여 추산할 필요가 있다. 수소 승용차 등록대수는 2019년 5,083대에서 2020년 10,906대, 2022년 29,623대, 2023년 34,258대 수준으로 급등하는 모습이 나타난다.²³⁾ 수소 승용차의 연 주행거리를 15,000km로 가정할 때 차량당 수소 사용량은 연간 약 150kg 정도로 추산되며, 연간 합산 시 2022년 기준 약 4,500톤 정도의 수소 소비를 가정할 수 있다.²⁴⁾ 수소 버스의 경우 수소 소비량이 상대적으로

23) 수소경제 종합정보포털 홈페이지, “국내 수소차 등록현황(연도별)”, 검색일: 2024.9.29.

24) 현대 넥소 모델의 경우 100km 주행에 약 1kg의 수소를 소비함.

더 많기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

이상의 내용을 종합하여 본 연구에서는 수소의 수요구조를 이에 따라 본 연구에서는 수요에 대한 소비구조를 정유업계 62.9%, 화학업종 36.8%, 가계 0.3%로 설정하여 모형에 활용하였다.

라. 소결

본 연구에서는 기존 UNICON-CGE 모형을 바탕으로 대기 모형 및 각종 상향식 모형과의 연계를 고려하여 개선하는 과정을 거쳤다. 모형 간 연계를 분석한 선행연구를 바탕으로 일방향 연성 연계 방식을 기존 방식으로 설정하고, 이를 위한 모형 개량을 거쳤다. 먼저 업종 재구성을 위해 발전부문을 확대하여 기존 5개 발전부문을 10개로 세부 구분하였다. 또한 대기확산모형과의 연계를 위해 CAPSS 자료와의 정합성을 고려하는 형태로 업종을 세부 구분하였다. 두 번째로, 투입자료 및 모형구조를 재구성하였다. 2019년 산업연관표를 기반으로 모형을 재구성하였으며, 발전부문 상세화에 따른 투입구조상의 불균형을 RAS 방식으로 조정하였다. 이 외에도 에너지밸런스, 온실가스 배출량 자료 등을 최신화하였다. 모형 구조 측면에서는 기존 UNICON-CGE 모형의 구조를 준용하되, 전력분야에 대한 다중 네스트 구조를 설정하여 발전원 간의 대체관계를 보다 상세히 모사하였다.

모형 고도화 측면에서는 기존 모형이 다루지 못하고 있던 CCS 산업 및 수소 산업에 대한 모듈을 추가적으로 구축하였다. CCS 기술의 경우 선진특허분류코드(CPC Y-Code)를 바탕으로 국내 기업의 특성 자료를 토대로 산업군을 별도로 구분하는 과정을 거쳤다. 수소의 경우 수소 생산 방식을 그린수소, 부생수소 및 개질수소로 세부 구분하였으며, 이에 대한 대체관계를 모형 내에 반영하는 방식을 통해 수소 모듈을 구성하였다.

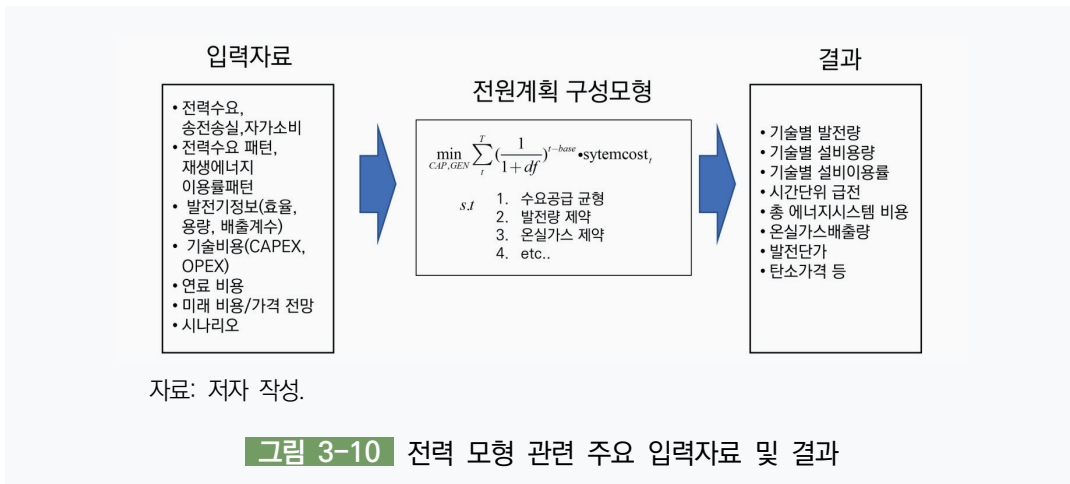
2. 전력 모형

가. 개요

UNICON-K-Power 모형(환경부, 한국환경산업기술원, 2021)을 활용하여 CGE와의 일방향 모형 연계를 시도하였다. UNICON-K-Power 모형은 선형계획법 기반 전원계획 구성 모형으로서 장기온실가스 감축목표를 달성하기 위한 비용최적의 기술투자 경로를 시뮬레이션한다. 선형계획법의 장점은 대규모 모형에 대하여 빠른 연산이 가능하며, 주요 결정변수에서 연속적인 값으로 발전량, 투자용량을 결정할 수 있다는 것이다. 반면 발전기의 가동 여부 및 시간 단위 출력을 결정할 수 없다. 따라서 선형계획법은 근사적으로 빠른 시간 내에 대규모 모형의

해를 구하는 데 적합하며, 장기전원계획 구성모형에서도 많이 활용되고 있다.

주요 입력자료로서 전력수요 관련하여 연간 전력수요, 시간단위 전력수요 패턴이 필요하다. 전력공급 관련해서 발전기별 열효율, 기술 투자비용과 연료비용, 그리고 재생에너지 관련해서는 시간 단위 재생에너지 이용률 패턴이 필요하다. 미래 시나리오를 위해서는 전력수요 변화, 연료가격 전망, 기술비용 전망 자료들이 필요하다(그림 3-10 참조). 모형식의 목적함수는 총 전력시스템 비용으로서 설비투자비용, 고정운영비용, 연료비용으로 구성된다. 주요 제약함수로서 시간대별 수요공급 균형, 최대발전량 제약, 에너지 저장장치 제약, 연도별 설비 투자 용량 제약 등이 있다. 모형의 주요 결과로서는 신규 설비투자 용량, 기술별 발전량 및 설비 이용률, 총 에너지시스템 비용 등이 있다. 또한 배출량 제약으로 미래 시나리오를 시뮬레이션할 경우 배출량 제약식에서 그림자 가격(shadow price)을 도출하여 탄소가격으로 해석 가능하다.

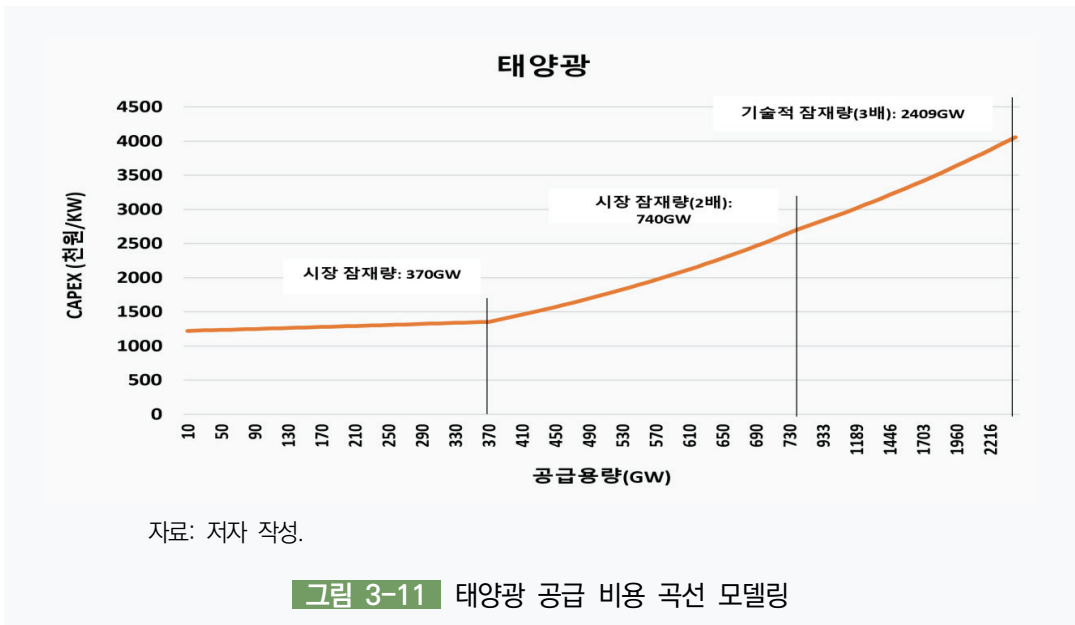


UNICON-K-Power 모형은 순차동태 최적화(recursive dynamic)와 Forward-looking²⁵⁾ 방식으로 모두 연산 가능하다. Forward- looking 방식에서는 주어진 미래 정보(연료가격, 기술투자비용 변화, 전력수요 등)가 완벽하다는 가정 아래 할인율에 기반하여 미래 특정 시점에 발생하는 비용을 현재 가치로 환산하여 현재 시점에서 가장 비용효율적인 투자 의사 결정을 내리는 것이다. 이는 MESSAGE(Huppmann et al., 2019), TIMES(Loulou et al., 2005)와 같은 장기 에너지 시스템 분석 모형에서 주로 활용된다. 하지만 이러한 의사결정은 미래 정보의 불확실성에 대한 고려가 없는, 의사결정자의 적극적인 장기 의사결정 행태를 반영하고 있으며, 현실적인 모습과는 차이가 있다. 따라서 순차동태 최적화는 다음 의사결정 시기의 전력수요 및 비용, 온실가스 감축목표만으로 의사결정이 가능하여 보다 현실적인 의사결정의 모습을 지니고 있다.

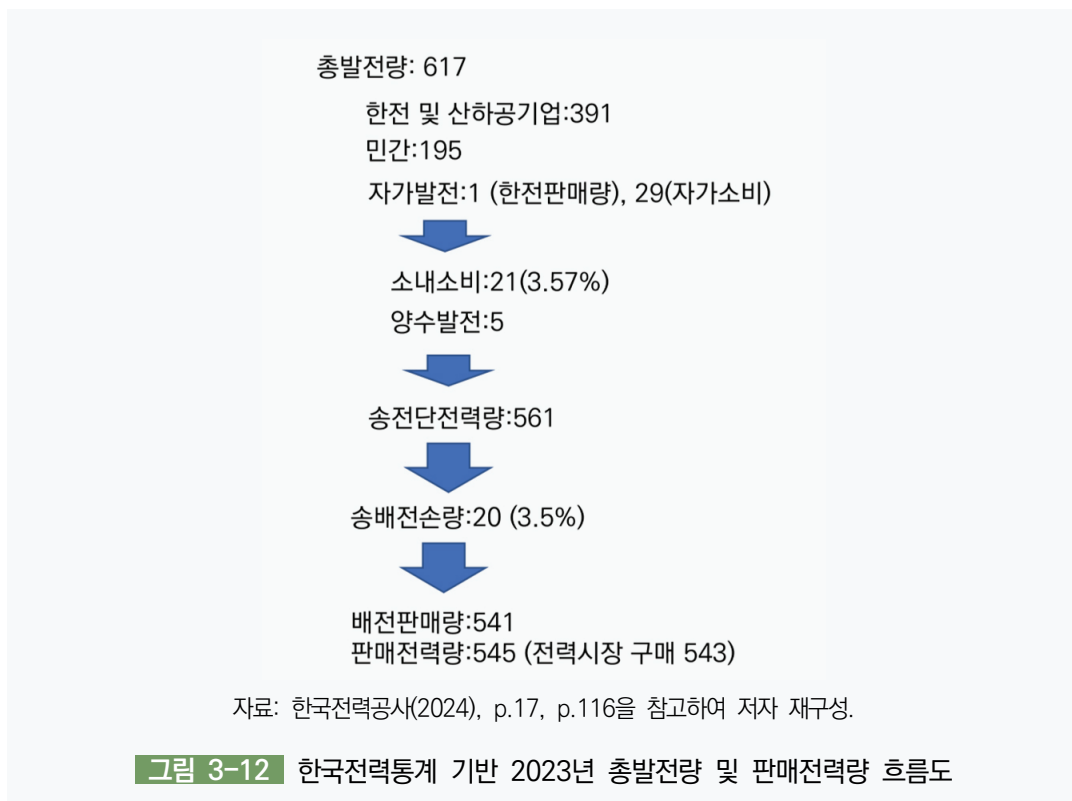
25) 미래지향적 의사결정 모형으로 번역 가능하나 본 연구에서는 Forward-looking 방식으로 지칭함.

이전 버전보다 개선된 사항은 시간 해상도를 672시간(24시간×28일)으로 조정하였다. K-평균 클러스터링(K-mean clustering) 기법을 활용하여 1년 8,760시간에서 가장 특징적인 28일과 24시간의 시간 구간별 전력수요, 태양광, 육상 및 해상풍력 이용률을 구하였다. 태양광 및 풍력 이용률은 한국전력거래소의 발전량 자료²⁶⁾를 활용하여 추정하였다. 태양광, 풍력의 전국 발전량에 대하여 전국 설비용량 데이터를 활용하여 2020년 기준으로 이용률을 계산하였다. 특히 해상풍력발전 이용률에 대해서는 제주 지역의 풍력발전 패턴 자료를 사용하였다. 한편 각 재생에너지의 평균 이용률은 이근대, 임덕오(2022, p.56)를 참고하여 태양광 15.4%, 육상풍력 23.0%, 해상풍력 29.4%로 조정하였다.

UNICON-K-Power 모형은 재생에너지에 증가에 따라 생산비용이 증가하는 한계비용 증가법칙(Law of Diminishing Returns)을 반영하였다. 시장 잠재량 및 기술적 잠재량을 기준으로 재생에너지 공급 증가에 따라 효율적인 입지가 먼저 사용됨에 따라 자원효율성이 떨어지면서 한계비용이 증가하도록 하였다.



본 연구에서는 선형계획법 기반의 장기전원계획구성 전력모형을 사용하며, 장기 전력수급에 따른 발전량 정보를 CGE 모형에 제공하기 위해 활용한다. 전력모형과 대기모형간의 직접적인 연계는 없으며, CGE에 제공된 전력믹스 변화 정보가 대기모형에 반영된다. 전력 모형 발전량 및 배출량을 엄밀히 조정하기 위하여 한국전력통계(한국전력공사, 2024) 기반의 총발전량과 판매전력량을 기준으로 모형과 정합성을 맞추었다. 현재 전력수급기본 계획에서의 전력소비인 판매전력량은 2023년 기준으로 545TWh이며, 이 중 배전판매량이 541TWh이며, 기타 발전원 전력구매를 포함한 전력시장 구매는 543TWh, 그리고 PPA 전력구매 중 전력시장 판매분을 포함하여 545TWh가 한국전력에서 판매한 전력량이다.²⁷⁾ 모형에서는 545TWh를 전력수요로 가정하며, 송배전 손실량 3.5%, 모형 내의 전력소비율을 반영하여 전력공급을 결정한다.

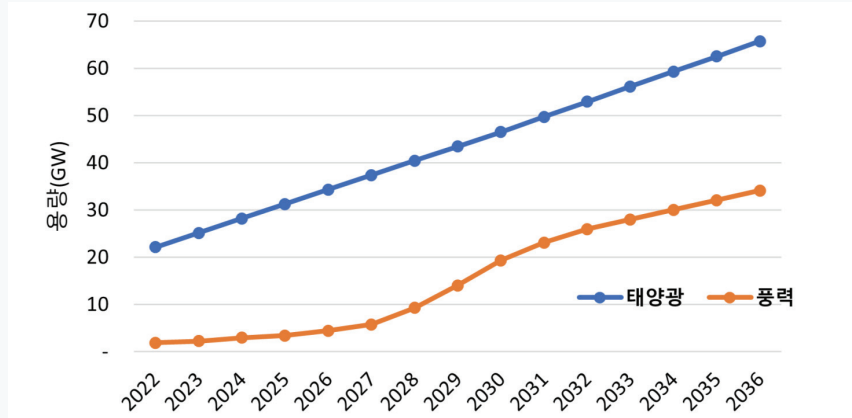


따라서 전력공급에서는 한국전력통계에서의 전력공급량 617TWh 전부 전력 모형에 반영되지 않는다. 전력공급량에 포함된 자가발전의 자가소비 29TWh를 모형 내에 반영하지 않았으며, 한전 및 산하 공기업, 그리고 민간 발전사의 발전량과 자가발전 한전판매량 1TWh를 포함한 587TWh를 기준으로 전력 모형에서 발전량을 결정한다.

『제10차 전력수급기본계획』(이하, 전기본)(산업통상자원부, 2023)에 따른 태양광, 풍력 보급량 계획을 연도별로 반영을 개선하였다. 특히 육상 및 해상풍력의 보급 전망이 『제10차 전기본』에서는 명확히 제시되어 않아 반영에 어려움이 있었지만, 전력정책심의회 자료를 기반으로

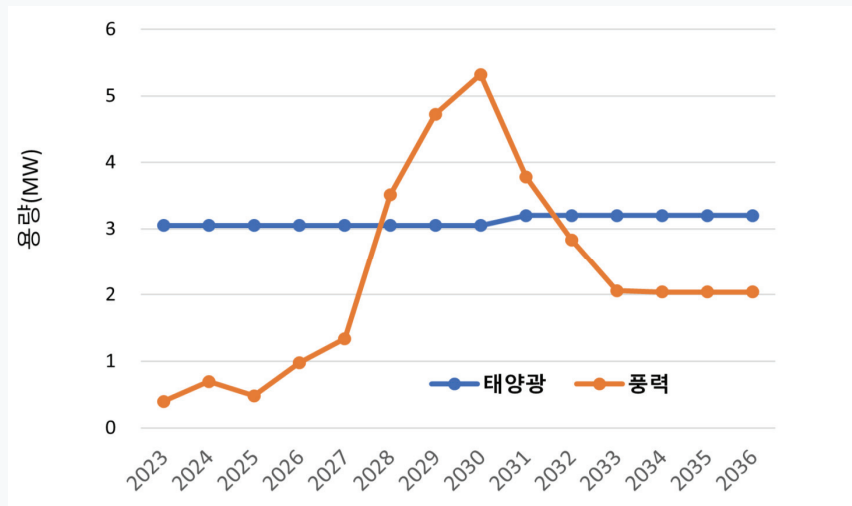
27) 한국전력공사(2024), p.17, p.116, p.121.

2030년 육상풍력 5GW, 해상풍력 14.3GW를 정부 목표로 반영한다.²⁸⁾ 연도별 신규 보급 목표는 육상풍력은 2023년 0.3GW, 2026년 1GW, 2030년 1.9GW, 2033년 1.2GW, 2036년 1.2GW이며, 해상풍력은 2026년 1.2GW, 2030년 13GW, 2033년 7.5GW, 2036년 4.9GW로 제시되어 있다. 한편 전기본 계획에서는 연도별 물량이 연속적으로 제시되어 있어 전기본 계획에 따르기 위해 풍력발전의 연도별 보급 목표를 연도별로 배분하였다.



자료: 산업통상자원부(2023), p.85를 참고하여 저자 재구성.

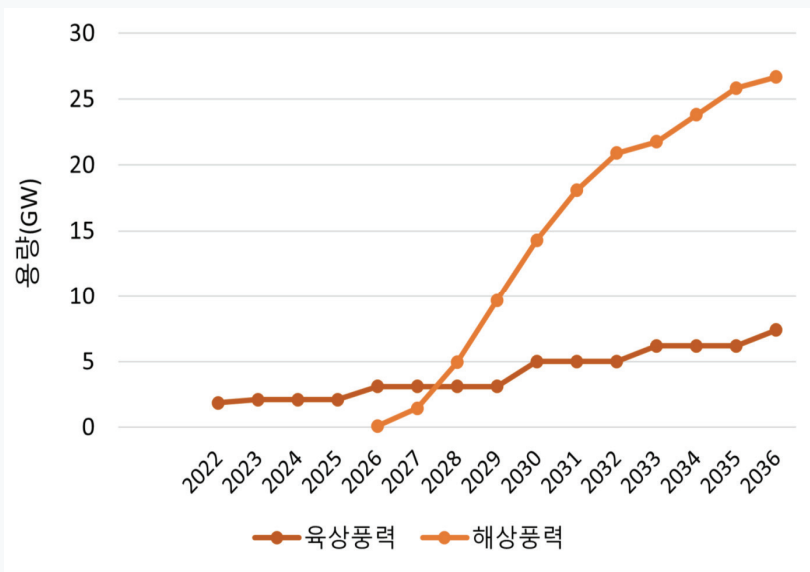
그림 3-13 『제10차 전력수급기본계획』의 태양광, 풍력 누적 보급목표



자료: 산업통상자원부(2023), p.85를 참고하여 저자 재구성.

그림 3-14 『제10차 전력수급기본계획』의 태양광, 풍력 연도별 신규 보급목표

28) 일렉트릭파워(2023.1.12), “2036년 풍력 등 재생에너지 발전 비중 28.9% 목표”, 검색일: 2024.9.29.



자료: 산업통상자원부(2023), p.85; 일렉트릭파워(2023.1.12), “2036년 풍력 등 재생에너지 발전 비중 28.9% 목표”, 검색일: 2024.9.29를 참고하여 저자 재구성.

그림 3-15 『제10차 전력수급기본계획』에 따른 육상 및 해상풍력 누적 보급용량 추정

다. CGE 모형 연계

CGE 모형 연계를 위하여 다음과 같은 사항을 개선하였다. CGE 모형과의 연계를 위해 2019~2035년까지 1년 단위로 전력시장 급전을 시뮬레이션하였다. 설비투자 계획은 『제10차 전력수급계획』의 설비용량 계획을 따르며, 신재생에너지 용량도 시나리오에 따라 외생적으로 반영한다.

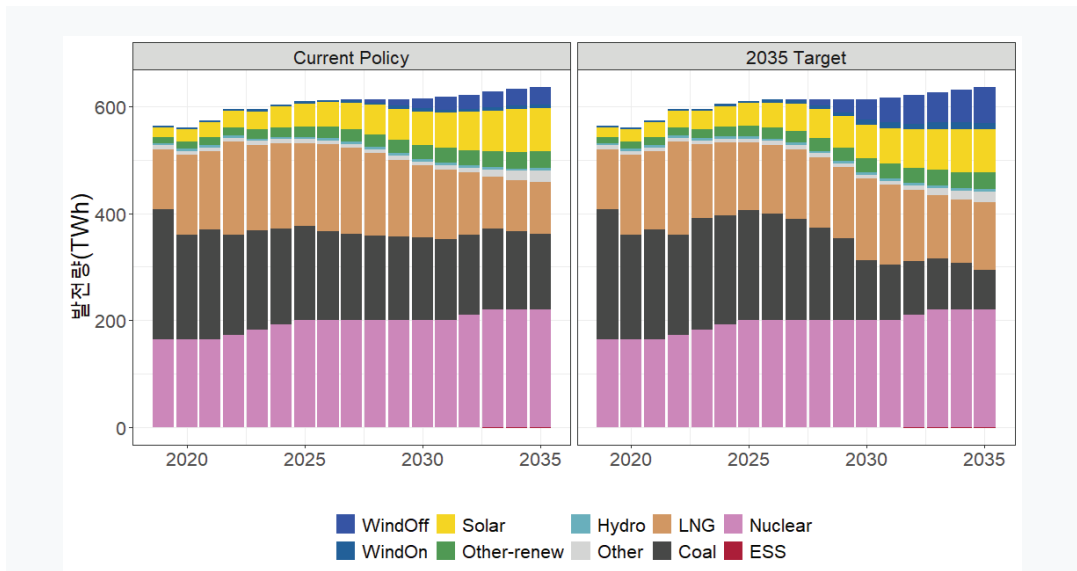
기술분류를 CGE 모형에 맞추어 발전기술별 발전량을 재조정하여 CGE 모형에 제공하였다. 전력 모형에서는 기술분류를 석탄과 LNG에서 세분화하여 무연탄, 유연탄, 복합LNG, 열병합 LNG로 나뉘고 있다. CGE 모형에 제공하기 위해 주요 기술분류를 단순화하였으며, 기술은 발전원료에 따라 석탄과 LNG로 통합하였다. 따라서 결과적으로 CGE 모형 연계를 위해 원자력, 석탄, LNG, 유류, 기타, 기타 신재생, 태양광, 육상풍력, 해상풍력, 자가발전, 수력으로 단순화하였다.

또한 CGE 모형에서도 산업연관표에서의 전력생산에서 자가발전분을 포함하고 있으며, 전체 생산액의 5%에 해당한다. 전력 모형에서는 자가발전기의 한전 전력판매에 대한 정확한 모델링의 어려움으로 인해 자가발전량을 제외하고 모델링하는 것을 결정하여 두 모형 간의 간극이 존재한다. 이를 해결하기 위해서 전력 모형에서는 자가발전 중 한전 판매량만 고려하여 모델링하고, 사후적으로 CGE 모형에 결핍값 반영 시에는 과거 수준의 자가발전량을 추가한 생산량을 반영하였다.

향후 연계에서는 전력믹스뿐만 아니라 전력 모형에서 계산한 전력 인상을 일방향(one-way)으로 반영하여 CGE 모형에서 반영하지 못하는 전력요금 관련 정부 정책 요소를 반영할 수 있다. 향후 양방향 연계에서 전력가격 및 연료 수요를 전력 모형에서 결정하고, 이에 따른 전력수요와 연료가격을 전력 모형에 다시 피드백하여 반복연산을 통해 새로운 시장 균형점을 발견하는 양방향 연산을 시도할 수 있다.

라. 시나리오 분석 결과

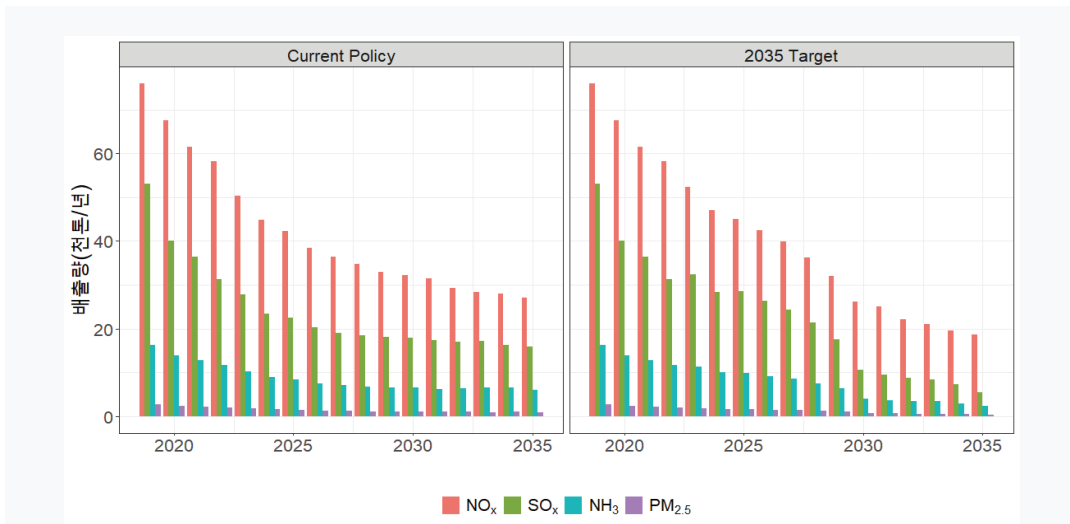
시나리오에 따른 발전량 변화(그림 3-16 참조)를 보면, 재생에너지 도입에 따라 석탄과 LNG 발전량 차이가 크다. 원자력, 기타 발전, 기타 신재생의 발전량은 외생적으로 정부 계획에 따라 변하지 않는다. Current Policy에서는 시나리오 가정에 따라 온실가스 감축율이 높지 않다(표 4-1 참조). 이는 재생에너지 보급이 증가하지만 더디기 때문이며, 증가하는 전력수요를 충당하기 위해 연료비가 상대적으로 저렴한 석탄 발전량이 활용되기 때문이다. LNG발전은 2020년 대비 감소하는 것으로 나타난다. 2035 Target에서는 풍력발전확대 및 감축 목표 상향에 따라 석탄발전이 2030년부터 2035년까지 지속적으로 감소한다. LNG 발전은 2030년 NDC 달성까지 발전량은 확대 또는 유지된다. 하지만 2030년 이후에는 2020년에 발전량에 대비하여 감소하게 된다. 재생에너지 확대에 따라 낮과 밤에 발전하는 태양광과 풍력발전은 온실가스 배출계수가 높은 석탄발전을 주로 대체하지만, 동시에 상대적으로 고비용의 LNG 발전을 대체하는 효과도 발생한다.



자료: 저자 작성.

그림 3-16 시나리오별 발전량 변화

시나리오에 따른 대기오염물질 배출량 변화(그림 3-17 참조)를 보면, 재생에너지 도입 및 온실가스 감축에 따라 두 시나리오에서 NO_x, SO_x, NH₃, PM_{2.5}가 지속적으로 감소한다. 2035 Target에서는 Current Policy보다 대기오염물질 배출이 적게 나타난다. <표 3-6>에서 발전기술별 NO_x와 SO_x 배출량 변화를 제시한다. NO_x는 감소하고 있지만 LNG발전 증가로 감소폭이 상대적으로 작으며, SO_x는 대폭 감소한다. Current Policy에서 NO_x는 총 약 2만 7천 톤 배출되며, 석탄발전에서 약 1만 6천 톤, LNG발전에서 약 1만 1천 톤 배출한다. 2035 Target에서는 석탄발전량 감소로 NO_x배출은 5천 톤으로 감소하며, LNG발전의 NO_x 배출은 약 1만 3천 톤으로 증가한다. 결과적으로, LNG 발전량 증가로 인해 NO_x 배출량이 증가하지만, 석탄발전량 감소로 인한 NO_x 감소량이 더 크기 때문에, 전체 NO_x 배출량은 감소한다. SO_x는 주로 석탄발전에서 배출을 하며 Current Policy에서 2035년 총배출 약 1만 5천 톤을 전망한다. 2035 Target에서는 석탄발전량 감소로 인하여 SO_x는 Current Policy에 대비하여 1/3 수준으로 감소한다.



자료: 저자 작성.

그림 3-17 시나리오별 대기오염물질 배출량 변화

표 3-6 2035년 대기오염 물질 배출량 비교

(단위: 톤/연)

		Current Policy	2035 Target
NO _x	석탄	15,887	5,378
	LNG	11,127	13,333
	종합	27,014	18,711
SO _x	석탄	15,803	5,403
	LNG	64	79
	종합	15,867	5,482

자료: 저자 작성.

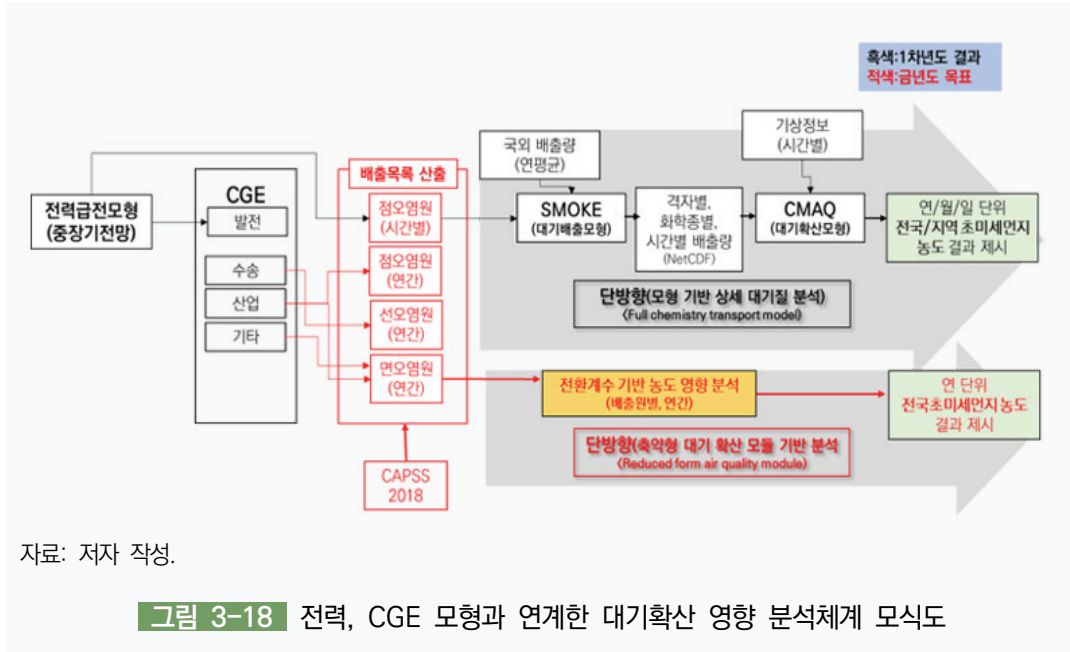
3. 대기 모형

가. 개요

전체 통합 모형하에서 대기 모형의 역할은 전단에 위치한 부문별 모형들에서 도출된 시나리오 결과를 바탕으로 예상되는 대기오염물질 배출량과 그로 인한 미세먼지 농도 등 대기질 영향을 도출하는 것이다. 이를 위해 대기 모형은 크게 배출목록 산출 모듈과 대기질 영향 평가 모듈로 구성된다.

배출목록 산출 모듈은 본 통합 모형을 위해 별도로 개발한 신규 모듈로, 모형과의 연계 방안을 마련하고 대기오염물질 배출목록에서 정의하는 각 배출원별 배출량을 추산하는 과정을 수행한다. 대기질 영향 모듈은 크게 두 가지로 이원화된 구성을 완성하는 것을 최종 목표로 한다. 모형 기반 상세 대기질 분석체계(Full chemistry transport model)는 기본적으로 US EPA Model-3 framework, 즉 배출 모형-SMOKE(The Sparse Matrix Operator Kernel Emissions), 기상 모형-WRF(The Weather Research and Forecasting model), 대기질 모형-CMAQ(The Community Multiscale Air Quality Modeling System)에 기반한 것으로, 본 통합 모형에 맞추어 연계 수행이 가능하도록 구성하는 것을 목표로 한다. 모형 기반 상세 대기질 분석체계는 전산 자원 요구 수준이 높으며 모사에 적지 않은 시간이 소요되는 대신, 다른 방안에 비해 결과의 신뢰성이 높고 시공간적 수준에서 상세한 분석이 가능하다는 장점이 있다. 본 통합 모형 내에서 상세 대기질 분석체계의 활용 목적은 시나리오 분석 결과의 최종 결과 도출과 상세한 시공간 영향 분석 연구에 활용하는 것에 두고자 한다. 축약형 대기확산 모듈(Reduced form air quality module)은 배출과 농도확산 영향 간의 상관관계를 단순화하여 빠르게 대기질 농도 영향을 평가할 수 있도록 하는 것에 목표를 두고 있다. 정확도 및 신뢰도는 실제 대기질 모형을 활용하는 것에 비해 낮을 수 있으나, 빠르게 농도 영향을 산출할 수 있어 다양한 시나리오에 대한 스크리닝 목적의 활용이나 타 모형과의 양방향 연계에 활용하는 것에 목적을 두고 있다.

〈그림 3-18〉은 당해 연도(2024년) 연구까지 구성된 모형 간의 연계 구조를 나타낸 것이다. 1차 연도 연구를 통해 전력 모형과 대기 배출원 중 발전부문에 대해 연계를 수행하였으며, 대기질 모형까지 직접적인 연계 방안을 마련하고 과거 시범 분석을 통해 상세 시공간 수준에서 정책효과를 분석한 바 있다. 금년도 연구는 CGE와의 연계를 중점으로 하며, 축약형 대기확산 모듈 초기 버전을 개발하여 그 활용성을 검토하였다.



자료: 저자 작성.

그림 3-18 전력, CGE 모형과 연계한 대기확산 영향 분석체계 모식도

나. CGE 모형과의 연계

CGE 모형의 결과는 각 산업 생산품에 대한 생산량 혹은 비용으로 도출되어 이를 대기오염물질 배출량으로 바로 연계할 수 없다. 또한 국내를 대상으로 적용된 CGE 모형의 공간적 해상도는 국가 전체로, 대기오염물질 배출 위치에 따른 영향이 크게 달라질 수 있음을 고려할 때 이를 바로 적용하기에는 무리가 있다. 본 연구에서는 CGE 모형과 연계한 대기오염물질 배출량 산출 및 대기확산 영향을 평가하기 위하여 CGE 모형의 산출 결과를 성장계수(scale-up factor)로 활용하여 국내 대기오염물질 배출목록에 적용하였다.

〈표 3-7〉은 CGE 모형의 산출물과 대기 배출원 분류체계와 연계한 결과 중 일부를 예시로 나타낸 것이다. 각 산출물과 분류체계는 고유의 코드로 부여하여 체계적으로 연동될 수 있도록 하였다. 기본적으로 각 산출물이 대기 배출원 산정 방법 내 활용된 활동도 자료와 동일하거나 분류 종류와 정의가 유사하다고 판단되는 것을 연계하도록 구성하였으며, 가능한 연소 배출원 들은 연료 사용량과 직접 연계하여 정책 시나리오에 따른 연료 사용량 추이 변화를 반영할 수 있도록 하였다. 이를 통해 CGE 모형의 산출물을 대기 배출원 634개(2018년 기준)에 연계될 수 있도록 그 체계를 마련하였다.

표 3-7 대기 배출원 분류체계와 CGE 산출물 연계 분류 예시

No.	SCC1	SCC2	SCC3	Fuel	L_ID1	L_ID2	L_Fuel	CAT
1	에너지산업 연소	공공발전시설	1, 2, 3종 (보일러)	무연탄	1	4502c	61	1.POW
2	에너지산업 연소	공공발전시설	1, 2, 3종 (보일러)	유연탄	1	4502c	61	1.POW
3	에너지산업 연소	공공발전시설	1, 2, 3종 (보일러)	B-C유	1	4502of	1626	1.POW
4	에너지산업 연소	공공발전시설	1, 2, 3종 (보일러)	경유	1	4502of	1625	1.POW
5	에너지산업 연소	공공발전시설	1, 2, 3종 (보일러)	등유	1	4502of	1624	1.POW
6	에너지산업 연소	공공발전시설	1, 2, 3종 (보일러)	LNG	1	4502g	62	1.POW

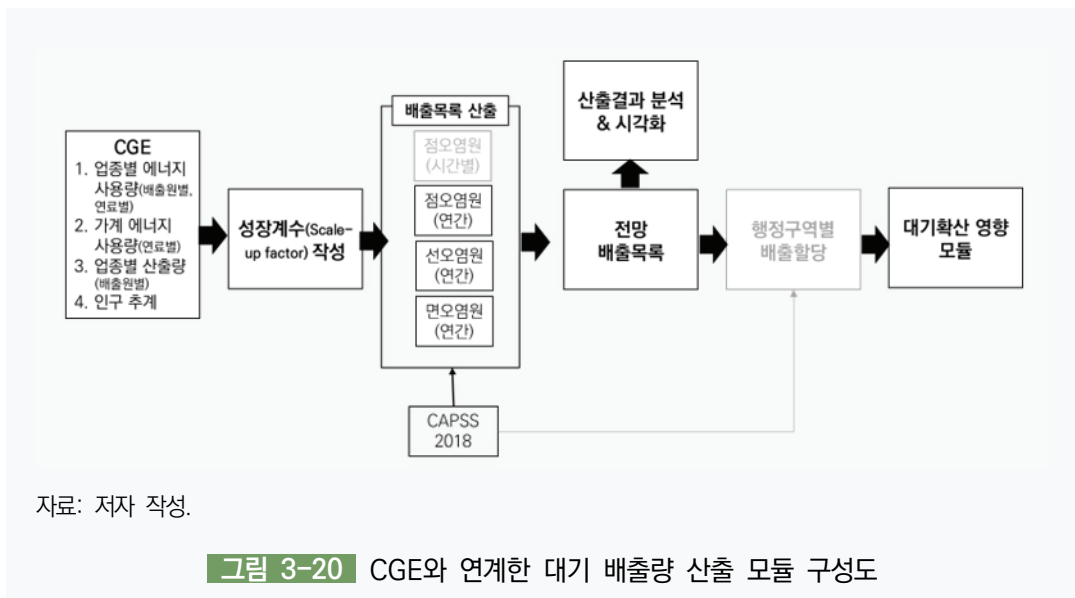
자료: 저자 작성.

본 연구에서 마련한 초기형의 CGE-대기 배출원 연계체계는 기본적으로 시나리오 분석 과정에서 기준연도 대비 그 변화량을 산출하는 것이 목적이며, CGE 모형의 단일연도 산출물을 바탕으로 대기오염물질 배출량을 추산하는 것에는 적합하지 않다. 또한 비연소 부문에서의 탄소중립 수단에 대해서는 해당 산업 추이만을 따르도록 하여 이를 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 아울러 대기오염 저감기술 발전에 따른 변화는 추정하기 어려우며, 미래 성장 전망에 따른 변화나 에너지 및 산업 변화에 따른 영향 등 탄소중립으로의 전환에 따른 영향을 분석하는 것에 목적을 두고 개발하였음을 밝혀둔다.

다. 대기 배출량 산출 모듈 개발

본 연구에서는 국내 토양 대기 배출량 산출 모듈은 대기 배출원 분류체계에 맞추어 연계된 CGE 모형 및 전력 모형의 결과를 바탕으로 뒤에 이어질 대기질 영향 분석에 활용될 수 있도록 대기오염물질 배출목록을 산출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 산출 모듈의 구성 방식은 세부적으로 두 가지로 나누어지며, 첫 번째는 시나리오별 국가 대기오염물질 배출량을 산정하는 것, 두 번째는 국가 단위의 대기오염물질 배출량을 필요한 수준의 지자체별(시군구 수준) 배출량으로 공간 할당하는 과정으로 구성된다. 단 발전부문에서는 직접 연계되는 경우 전력 모형에서 점오염원 단위로 배출량이 산출됨에 따라 이 과정은 생략된다.

<그림 3-20>은 CGE 모형과의 대기 배출원 연계와 이에 기반한 대기 배출량 산출 과정의 모식도를 나타낸 것으로, 기준연도 배출량 자료로 국가 공식 배출량 자료인 CAPSS 2018 재산정 자료(국가미세먼지정보센터, 2023)를 활용하였다. 회색 음영은 차후에 반영이 계획된 것으로 이번 연구에서는 대상에서 제외되었다.



CGE 모형에서는 기본적으로 기준연도 산출 결과와 시나리오에 따라 전망한 결과를 가져와 성장계수(scale-up factor)화하여 연계된 각 대기 배출원별 배출량에 적용하며, 이를 통해 국가 단위 대기 배출원별 대기오염물질 배출량을 전망한다. 일부 필요한 경우 개별 산업 분류별 산출 결과를 합산하여 상위 분류체계 성장계수를 작성하여 사용하도록 하였다.

대기오염물질 배출원 분류체계와 CGE에서 사용하는 산업 분류체계는 일치하지 않는다. 대기 배출목록은 대기 오염원으로서의 특성, 산출 방법 등에 따른 고유 분류방식을 채용하고 있어 CGE의 산업분류와 다른 구성을 갖는다. 이에 개별 배출원에 대한 산업분류 및 에너지원(연료)

매핑 표를 작성하여 이를 기반으로 상호간 연계가 이루어지도록 구성하였다. 이를 기반으로 대기 배출량 산출 모듈에서는 CGE에서 도출된 결과를 기반으로 목표연도 배출량을 산출한다.



전망된 결과는 이어 지자체별(시군구 단위)로 공간 할당을 시행하여 시군구별, 배출원별 배출량을 갖추고 하나로 배출목록화하는 과정을 수행한다. 각 지자체별 공간 할당을 위한 대리자(surrogates)는 기준연도의 지자체별 배출량 분포를 대기오염물질별로 나누어 활용하였다. 이러한 가정은 국가 단위 전망 과정에서 적합한 배출 위치를 합리적으로 배분하는 데 있어 비교적 손쉽게 해결할 수 있다는 장점이 있으나, 미래 전망에서 공간적인 변동에 따른 영향을 평가하기 어렵다는 한계가 존재한다. 다만 지자체별 할당 과정은 차후 과제에서 필요에 따라 활용할 수 있도록 계획된 것으로, 금년도 연구에서는 반영하지 않았다.

현 버전의 배출량 산출 모듈에서는 구조상 비에너지 분야 정책, 기술변화 등에 대해서는 반영이 어려우며, 저감기술 기반의 대기환경 정책 역시 반영하기 어렵다는 한계점을 가지고 있다.

라. 대기확산 영향 분석 모듈 개발

본 연구의 국내 토양 금년도 연구에서는 미래 전망 과정에서 대기질 영향을 분석하기 위하여 축약형 대기확산 모듈(reduced form air quality module)을 개발 및 적용하였다. 축약형 모듈은 상세 대기질 모형에 비해 정확도는 다소 떨어질 수 있으나, 빠르게 시나리오별 대기질 영향 분석을 수행하고 그 결과를 준 실시간으로 피드백할 수 있다는 장점이 있다. 축약형 대기확산 모듈의 개발과 활용은 기존 연구(Van Dingenen et al., 2018; Woo et al., 2024)를 통해 그 가능성 및 가치를 확인한 바 있다.

대기확산 영향 분석 모듈 개발을 위해서는 기본적으로 실제 대기질 모형을 기반으로 수많은 실험을 통해 필요한 확산영향 계수들을 도출해 나가는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 직접적인 개발보다는 기존에 이미 개발되었거나 개발할 수 있도록 기 수행된 모형 도출 결과들을 적극적으로 활용하고자 하였다. 이에 따라 최근에 수행된 대규모 모델링 연구(최기철 외,

2022)의 결과를 활용한 확산영향 모듈 기초를 개발하였다. <그림 3-22>는 수행되었던 대기 모형 연구의 조건을 요약하여 나타낸 것이다.

대기오염 배출자료

- 국외 KORUSv5, 국내 CAPSS 2018, 식생배출 MEGAN v2.1 모델 기반 산정 배출량 활용
- SMOKE 배출처리모델 기반 모델입력 배출자료 생산 수행

기상 모델

- WRF v3.9.1 모델 활용
- 기상 초기장: NCEP(National Centers for Environmental Prediction) FNL(Final) 자료 활용(수직층 35개)
- 수행 옵션: WSM3 Micro physics, Goddard Short wave radiation, NOAA Land-surface model, YSU PBL scheme

대기질 모델

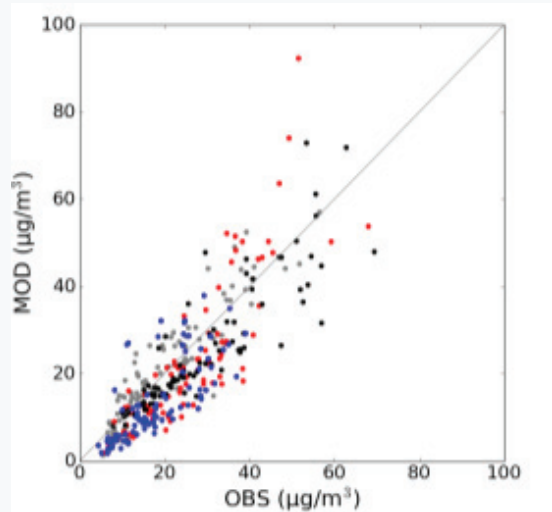
- CAMx v6.2 -PSAT 활용 (기본 농도 모사 및 부문별 감축 기여 평가용)
- 수행 옵션: EBI chemistry solver with SAPRC99 mechanism, ACM2 vertical diffusion, YAMO advection scheme, AERO5 aerosol module (세부사항 변경 여부 검토 수행)
- 모델링 수행 범위 및 공간해상도: 동아시아(27km 격자) 및 한반도(9km 격자) 영역 모사 수행

자료: 최기철 외(2022)를 참조하여 저자 작성.

그림 3-22 축약형 대기확산 모듈 개발에 활용된 대기질 모형 수행 조건

대기질 영향 분석을 위해서는 활용되는 도구에 대한 신뢰성 검증이 필요하다. <그림 3-23>은 PM_{2.5} 농도 모사 성능을 검증한 것으로, 모사 기준연도인 2018년에 관측된 도시대기측정망의 관측 농도와 모델의 모사 농도를 비교하여 나타낸 산포도로 전국 일평균 농도를 기준으로 하였다. 전국 관측농도 23.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 모델 모의농도 20.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NMB -10.9%, RMSE 7.8, IOA 0.92, R 0.86으로 전반적으로 약한 과소 모의의 경향을 보이긴 하나 우수한 모의 성능을 나타낸 것으로 평가된다(NMB \pm 10%, R>0.7).²⁹⁾ 이에 따라 본 연구에 활용된 모델링 모사 체계의 성능은 미세먼지 농도확산 영향 모듈을 개발하는 데 있어 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 판단하였다.

29) Emery et al.(2016): 최기철 외(2018), p.308에서 재인용.



주: 산포도 내 흑색 점은 겨울철, 적색 점은 봄철, 청색 점은 여름철, 회색 점은 가을철 기간의 값을 의미함.
 자료: 최기철 외(2022), p.95 참조.

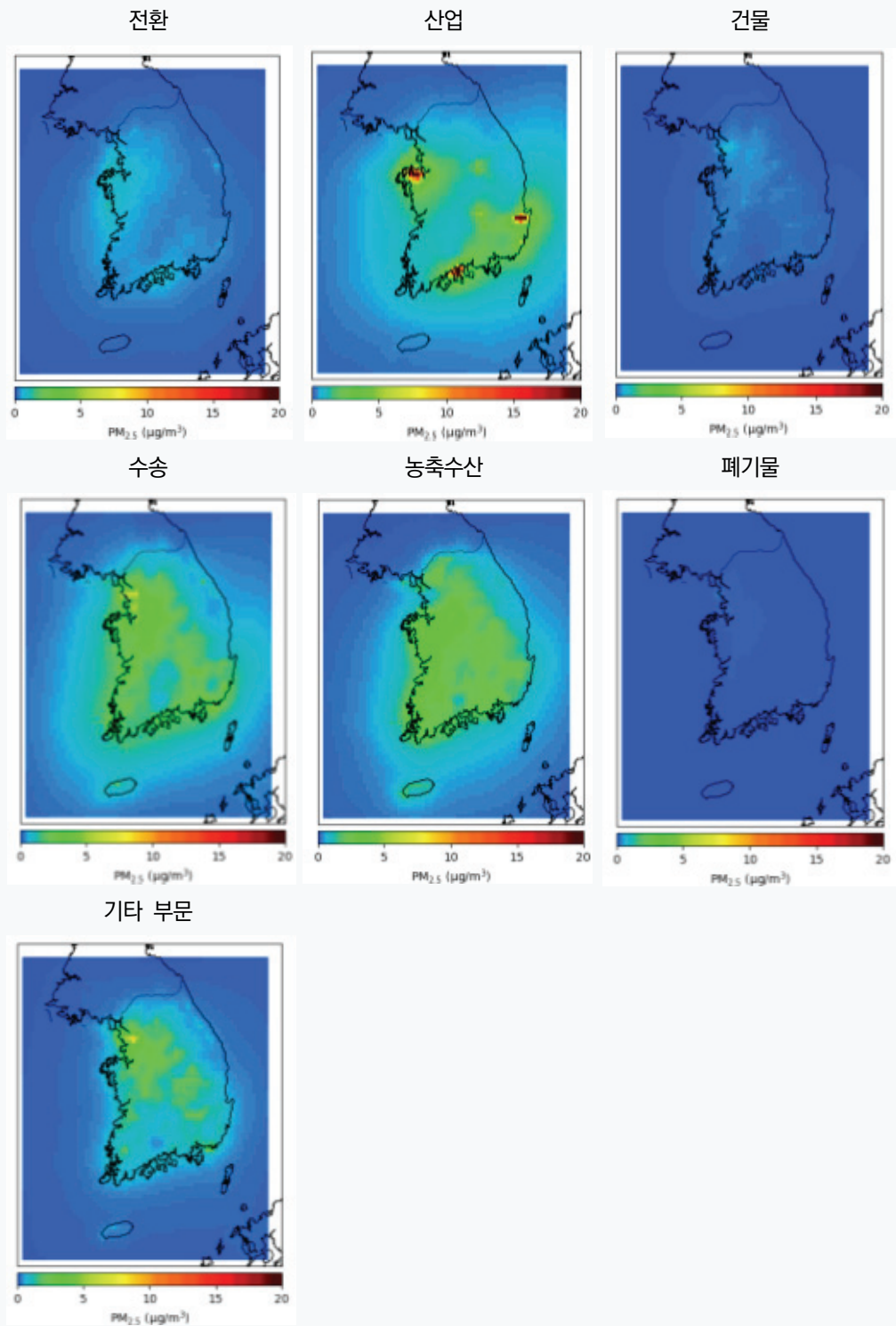
그림 3-23 기준연도(2018년) 전국 일평균 PM_{2.5} 관측농도(OBS)와 모델 모의농도(MOD)의 산포도

주요 배출원별, 전구물질별 배출-농도 전환계수를 도출하고 이를 배출량 산출 모듈의 결과에 적용하여 농도를 추정하는 과정을 수행한다. 금년도 연구에서는 초미세먼지 농도를 국가 전체 평균으로 산출하여 연도별, 시나리오별, 부문별로 상호 비교 결과까지 도출할 수 있도록 구성하였다. 농도 도출 과정에서 국내에 영향을 미치는 국외 영향에 대해서는 현재 기준연도 수준이 유지될 것으로 가정하고, 국내 배출 변화에 따른 농도 변화 결과만을 제시한다. 농도 전환을 위한 전환계수는 발전, 산업, 수송, 건물, 농축산, 폐기물, 기타 부문으로 분류하여 적용하였다. 또한 물질별로 직접 배출되는 미세먼지와 2차 생성에 기여하는 전구물질별로 별도로 분리하여 개별적인 전환체계를 마련하였다. <표 3-8>은 전구물질 배출량과 미세먼지 성분 농도와의 연계 부분을 나타낸 것이다.

표 3-8 전구물질 배출량과 미세먼지 성분 농도와의 연계

전구물질 배출량	미세먼지 성분 농도
PPM(PEC, POA, PSO ₄ , PNO ₃ , PMOTHER)	PPM(PEC, POA, PSO ₄ , PNO ₃ , PMOTHER)
SO _x	SO ₄ ⁻
NO _x	NO ₃ ⁻
VOCs	SOA
NH ₃	NH ₄ ⁺
기타	국외 영향, 식생 배출 영향 기본 배경농도 처리

자료: 저자 작성.

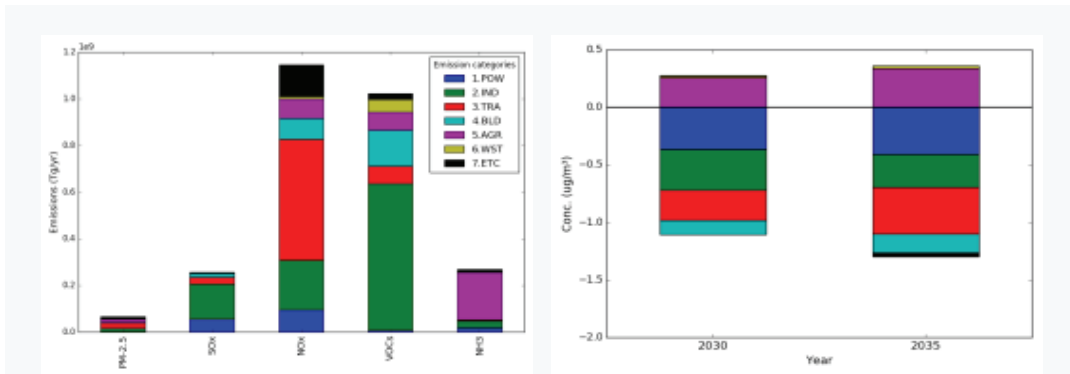


자료: 저자 작성.

그림 3-24 부문별 배출량에 의한 PM_{2.5} 농도확산 영향 분석 예시

〈그림 3-24〉는 기준연도인 2018년 배출량을 활용하여 부문별 배출량에 의한 연평균 PM_{2.5} 농도확산 영향을 분석한 예시를 나타낸 것이다. 본 연구에서 분류한 7개 배출원별 농도확산 결과를 공간분포 그림으로 나타냈으며, 각 배출원별 위치 및 배출 강도에 따른 특성이 잘

드러난 것으로 파악된다. 전환 및 산업부문의 경우 각각 주요 배출원 위치를 중심으로 높은 농도 분포를 보이고 있으며, 특히 산업부문의 경우 충남 지역의 주요 산단과 광양, 여수산단, 포항을 중심으로 높은 수준의 농도 분포를 나타내고 있다. 배출원 인근에서 높은 농도를 보여주고 있는 부분은 산업이며, 국내 전체적으로 높은 수준의 농도 기여를 나타내는 부문은 수송과 농축수산 부문으로 보인다. 농축수산의 경우 특히 암모니아로 인한 초미세먼지 2차 생성에 기여하면서 전반적으로 높은 수준의 기여를 보이는 것으로 파악된다. 기타 부문 역시 높은 수준의 농도 기여를 보여주고 있어 이에 대한 정책적 관리가 역시 중요할 것으로 판단된다.



자료: 저자 작성.

그림 3-25 초기 구축된 배출모형 기반 배출량 산정 결과(좌) 및 시나리오에 따른 농도 변화(우) 분석 예시

〈그림 3-25〉는 초기 구축된 배출모형을 활용하여 도출된 배출량 자료에 대한 분석 결과와 기준연도 대비 시나리오 전망에 따른 농도변화 분석 결과를 나타낸 예시를 보여준 것이다. 각 대기오염물질별 배출량 수준과 함께 부문별 기여도 분석이 가능하며, 시나리오 분석의 경우 이로 인한 변화와 배출원별 특성까지 분석할 수 있도록 하였다. 농도 전망의 경우, 앞서 기술한 바와 같이 국외 요인 등의 불확실성과 초기 모듈의 완성도를 고려하여 시나리오에 따른 농도 변화를 분석하는 것을 기본으로 하여 구축하였으며, 농도 수준에 대한 전망은 제외하였다. 축약형 모듈을 활용한 농도 전망은 전국 단위 연평균 농도를 평가하며, 부문별 영향에 대해서도 함께 분석 가능하도록 구성하였다. 개발된 모듈을 활용한 분석은 제4장에서 제시하였다.

제4장

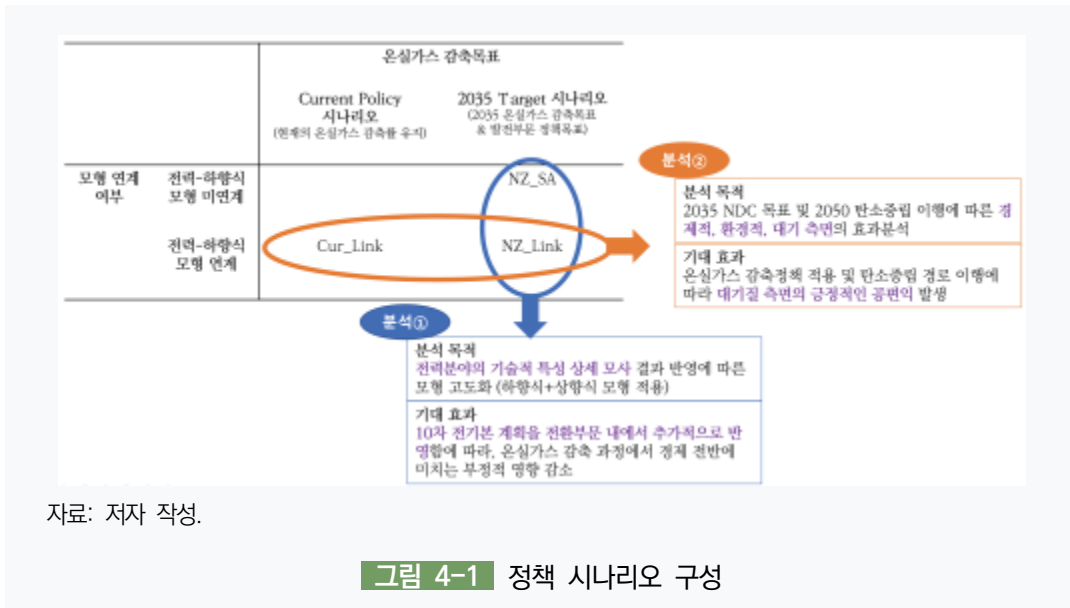
정책 시나리오 설계 및 분석

1. 시나리오 구성
2. 모형 연계에 따른 효과 분석 결과
3. 2035 온실가스 감축목표 시뮬레이션 분석 결과

1. 시나리오 구성

본 장의 시나리오 분석의 목적은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째 분석 목적은 모형 연계에 따른 효과를 비교하는 것이다. 즉 상향식 전력 모형인 KICAT-UNICON-Power 모형과 하향식 모형인 KICAT-UNICON-CGE 모형의 연계를 통해 경제 전반에 미치는 영향 및 대기질 측면에 미치는 영향이 유의적으로 바뀌는지를 분석하는 과정이 필요하다. 기존 시나리오인 NZ_SA 시나리오는 전력 모형과 연계하지 않고 단독으로 하향식 모형을 운영할 때의 결과이다. 반면 NZ_Link 시나리오는 상향식 전력 모형과 하향식 모형을 연계하여 2035년 감축목표를 분석한 결과이다. 전력 모형의 경우 전력분야에 대한 상세한 기술적 특성 모사를 통해 기존의 하향식 모형에서 반영할 수 없는 발전설비 제약 등을 반영할 수 있다. 특히 『제10차 전력수급기본계획』의 전환부문 목표를 직접적으로 반영해 설명력을 개선하여 시나리오 분석을 시행하였다.

두 번째 분석 목적은 2035년 온실가스 감축목표(안)에 따라 온실가스를 감축할 때 경제 및 대기 측면의 공편익을 분석하는 것이다. 두 번째 분석에서는 현 상태의 시나리오(Current Policy)를 유지하는 경우(Cur_Link)와 2035년 감축목표(안) 적용 시나리오(NZ_Link)를 비교하는 방식으로, 온실가스 감축목표 달성에 따른 경제적, 대기 측면의 영향을 분석하였다. 이 두 시나리오 간의 분석을 통해 2035년 NDC 및 2050년 탄소중립 경로 이행에 따른 경제적, 환경적, 대기 측면의 효과를 분석하고자 하였다. 또한 이러한 온실가스 감축에 따른 대기질 측면의 공편익이 존재하는지를 비교하고자 하였다.



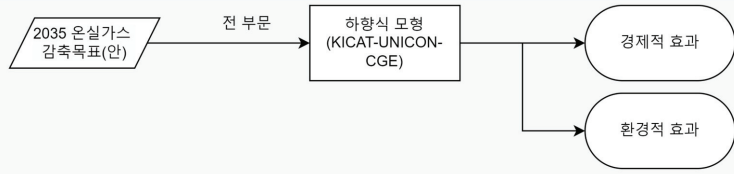
가. 미연계 시나리오(NZ_SA)와 연계 시나리오(NZ_Link) 비교

미연계 시나리오(NZ_SA)의 경우 하향식 모형인 KICAT-UNICON-CGE 모형만을 이용하여 2035년 감축목표(안)의 효과를 분석한 시나리오이다. 이 시나리오에서는 하향식 모형이 산업 전 부문을 분석하게 되며, 2035년 감축목표 경로에 따른 전반적인 경제적 효과를 분석한다. 이에 비해 연계 시나리오(NZ_Link)에서는 전력부문 모사에 특화된 전력 모형(KICAT-UNICON-Power)이 전력믹스 및 원별 발전량을 산정하여 하향식 모형에 전달하며, 하향식 모형은 전력부문 이외의 부문을 분석하는 방식으로 연계된 결과를 활용한다.

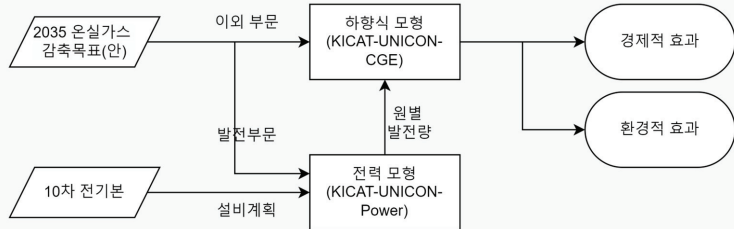
이를 도식화하여 표현하면 <그림 4-2>와 같다. 미연계 시나리오에서는 하향식 모형만을 통해 2035년 온실가스 감축목표(안)에 따른 경제적 효과와 환경적 효과가 분석되나, 연계 시나리오상에서는 발전부문의 감축목표는 전력 모형을 통해, 나머지 부문의 감축목표는 하향식 모형을 통해 반영된다. 또한 『제10차 전력수급기본계획』에 기반한 에너지원별 발전량이 하향식 모형으로 투입되면서 경제적 효과 및 환경적 효과가 함께 분석된다.

이렇듯 전력 모형과의 연계를 통해 『제10차 전력수급기본계획』에 예정되어 있는 발전원별 발전설비 전망이 반영되며, 이에 기반한 발전량이 산출된다. 또한 전환부문의 온실가스 감축 목표를 직접적으로 반영함에 따라 보다 상세한 분석이 가능하다.

미연계 시나리오



연계 시나리오



자료: 저자 작성.

그림 4-2 미연계 시나리오(NZ_SA)와 연계 시나리오(NZ_Link) 구조도

나. Current Policy 시나리오(Cur_Link)와 2035 Target 시나리오(NZ_Link) 비교

Current Policy 시나리오(Cur_Link)와 2035 Target 시나리오(NZ_Link)의 주요 가정을 비교하면 <표 4-1>과 같다. 두 시나리오 모두 2022년까지 국가 온실가스 총배출량 자료는 2024년 9월에 발표된 잠정치를 이용하였다. 다만 2023년부터 Current Policy는 지난 2018~2022년 연평균 온실가스 배출량 감축률인 2.59%를 적용하였다. 이에 비해 2035 Target 시나리오에서는 2030년까지는 탄소중립 기본계획 내 감축경로를 2031년부터 2050년까지는 2050 탄소중립 시나리오 B안에서 제시한 총배출량 목표치를 선형으로 따라가는 경로를 가정하였다.

표 4-1 Current Policy 시나리오와 2035 Target 시나리오의 온실가스 배출량 전제 비교

연도	Current Policy 시나리오 (Cur_Link)	2035 Target 시나리오 (NZ_Link)
2019~2022년	국가 온실가스 총배출량 자료(2024.9.10 잠정치 활용)	
2023~2030년	2018~2022년 연평균 감축률 (연간 2.59%) 적용	탄소중립 기본계획 내 2030년까지의 감축경로(총배출량 기준)
2031~2035년		2030년 감축목표에서 2050년 탄소중립 시나리오 B안 선형 감축경로 적용

자료: 저자 작성.

〈표 4-2〉는 두 시나리오 간의 주요 전제치를 비교한 결과이다. 앞서 소개한 온실가스 배출량 전제 이외에도 각 모형은 시나리오에 적합한 분석이 가능하도록 발전믹스 구조, 사회경제적 전망 및 대기 측면의 날씨 등의 변수를 가정하여 분석을 수행하였다. Current Policy 시나리오에서는 최근 5년간의 감축 추세 반영과 관련된 전제치를 활용하였다. 이를 위해 국가 온실가스 감축량 및 『제10차 전력수급기본계획』의 신재생에너지 발전량에 대한 가정을 부여하였다. 이에 비해 2035 Target 시나리오에서는 2030 NDC 및 『제10차 전력수급기본계획』의 모든 발전설비 목표, 2050년 탄소중립 경로 등을 고려하여 시나리오별 전제치를 구성하였다.

표 4-2 시나리오 간의 전제 비교

구분		Current Policy 시나리오	2035 Target 시나리오
전력 모형	온실가스 배출 전제	• '18~'22년 연평균 감축률이 '35년 까지 유지됨(연평균 2.59%)	• 2035년 온실가스 감축목표 (2030 NDC+'30년-'50년 선형 연장)
	발전믹스	• 태양광 제10차 전기분 반영 • 풍력발전은 제10차 전기분의 50% 보급 가정	• 제10차 전기분 발전믹스 및 발전량
하향식 모형	온실가스 배출 전제	• '18~'22년 연평균 감축률이 '35년 까지 유지됨(연평균 2.59%)	• 2035년 온실가스 감축목표 (2030 NDC+'30년-'50년 선형 연장)
	사회경제적 전망	• 경제성장률 전망(한국은행, 2023) • 통계청 인구전망 • 국제 에너지가격 전망(IEA)	
대기확산모형		• 모형 연계를 통한 에너지 및 산업 전망만을 반영 • 비에너지 분야 정책 및 기술 미반영 • 대기환경 정책 미고려	

자료: 저자 작성.

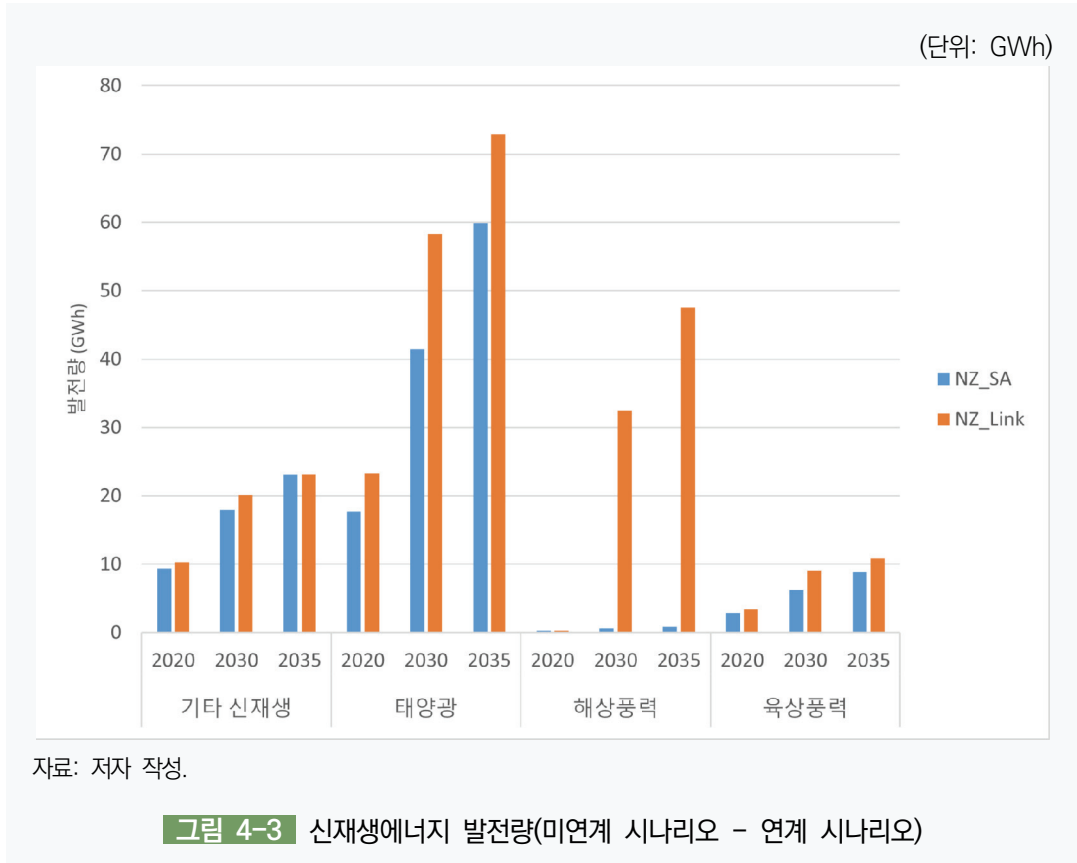
2. 모형 연계에 따른 효과 분석 결과

가. 경제적 측면

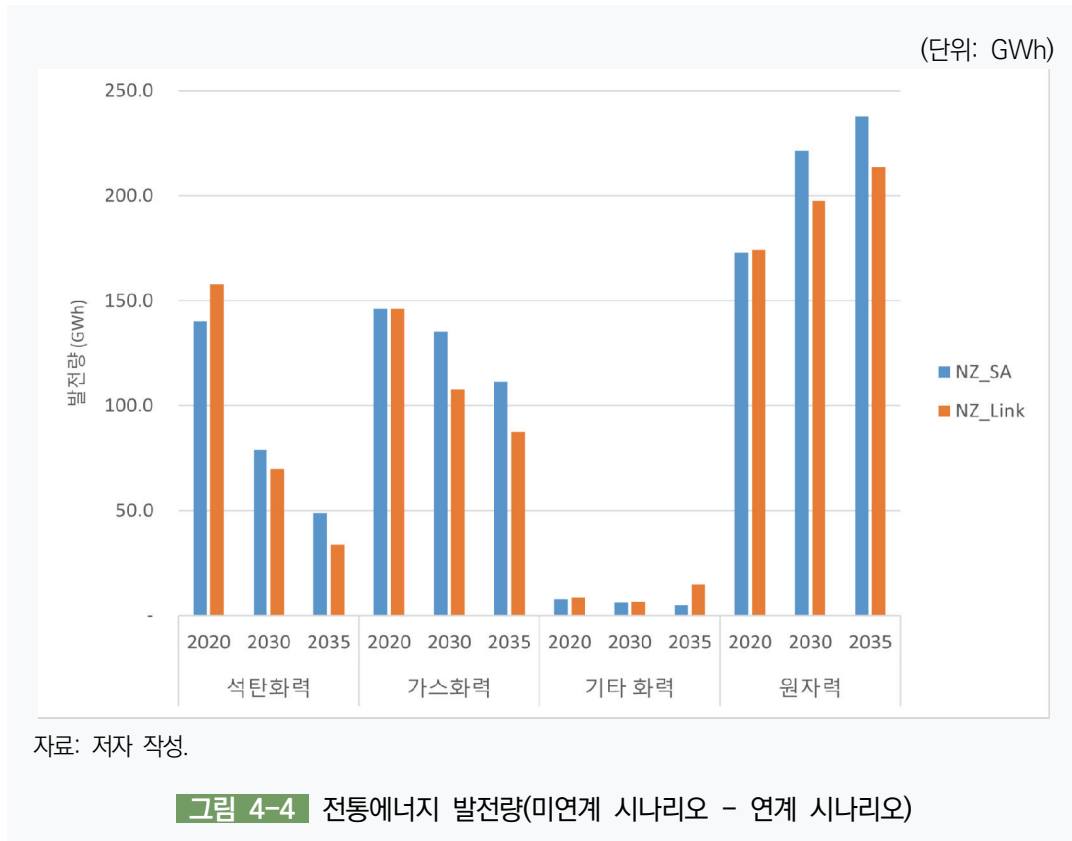
모형 연계 유무에 따른 가장 큰 차이는 상향식 전력 모형을 통해 분석한 발전믹스의 변화가 하향식 모형 내에 반영되는지의 여부이다. 이에 따라 모형 연계에 따른 차이는 주로 신재생 에너지 발전량 및 전통에너지 발전량의 변화로 인해 발생한다.

〈그림 4-3〉은 미연계 시나리오와 연계 시나리오의 주요 신재생에너지 발전원의 발전량 차이를 비교한 것이다. 전체적으로 미연계 시나리오의 결과에 비해 연계 시나리오의 결과에서 신재생 에너지 발전량이 증가한다. 2035년 신재생에너지 발전량은 미연계 시나리오에서 약 190GWh 수준인 반면, 연계 시나리오에서는 310GWh 수준으로 발전량이 증가하였다. 특히 풍력발전량

측면에서 차이가 크게 존재했다. 미연계 시나리오에서는 해상풍력 및 육상풍력의 발전량 증가가 크지 않았으나, 『제10차 전력수급기본계획』에 기반한 발전량 전망에서는 해상풍력 발전량이 급증할 것으로 전망되었다. 이 외에도 태양광 발전량 역시 미연계 시나리오 대비 20%가량 증가하는 것으로 나타났다.

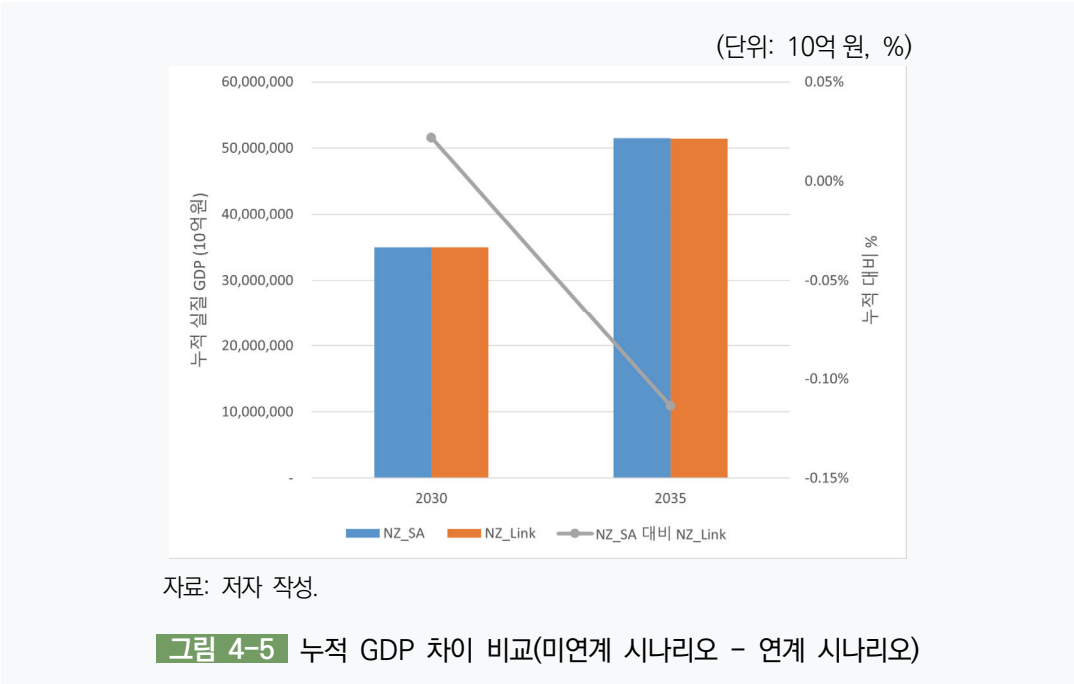


신재생에너지 분야의 급격한 성장에 따라 석탄화력 및 가스화력 등 전통에너지원의 발전량은 미연계 시나리오에 비해 2035년 약 94GWh 감소하는 것으로 나타났다. 하향식 모형만을 활용한 미연계 시나리오 분석에서는 석탄화력 및 가스화력 발전을 대신하여 원자력발전이 증가하고 신재생으로 대체되는 형태의 발전량 변화가 나타났으나, 『제10차 전력수급기본계획』에 기반한 연계 모형에서는 석탄화력뿐 아니라 가스화력 발전량도 빠른 속도로 감소하는 것으로 나타났다.



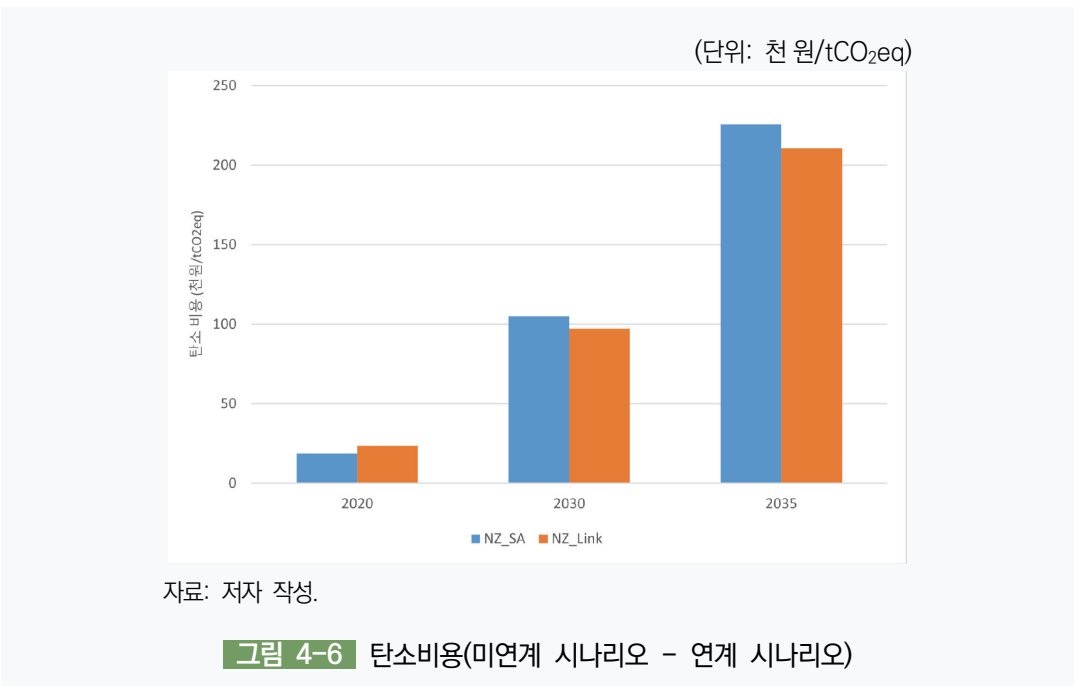
업종별 산출 및 GDP 측면에서는 미연계 시나리오와 연계 시나리오상의 차이가 크지 않았다. 연계 시나리오에서는 미연계 시나리오 대비 2035년 누적 GDP 기준 0.11% 정도의 차이가 발견되어, 모형 연계에 따라 경제 전반에 미치는 영향은 크지 않음을 확인할 수 있었다.

모형 연계에 따른 결과가 경제 각 부문에 미치는 영향은 복합적인 경로를 따라 이루어진다. 첫째, 비신재생 발전업의 산출이 감소함에 따라 전통적 발전원의 주요 투입물인 광업 등 에너지 원료의 수요처가 감소하여 해당 분야의 생산량이 감소될 수 있다. 둘째, 모형 연계 과정에서 발전량이 급속도로 증가하는 육상 및 해상풍력과 연관된 업종의 산출량 증가가 예상된다. 육상 및 해상풍력의 주요 투입물은 금속가공제품(C08) 및 전기장비(C10), 기계 및 장비(C11) 등의 업종으로, 이들 부문의 경우 모형 연계 시나리오상에서 산출량에 긍정적인 영향을 받게 된다. 마지막으로 신재생에너지 발전량 증가는 2035년 온실가스 감축목표(안) 이행에 필요한 비용(탄소비용)을 줄이게 되며, 탄소비용 하락은 산업 전반에 걸쳐 긍정적인 영향을 야기한다. 이에 따라 경제 전반에 미치는 영향은 전체적으로 크지 않은 것으로 판단된다.

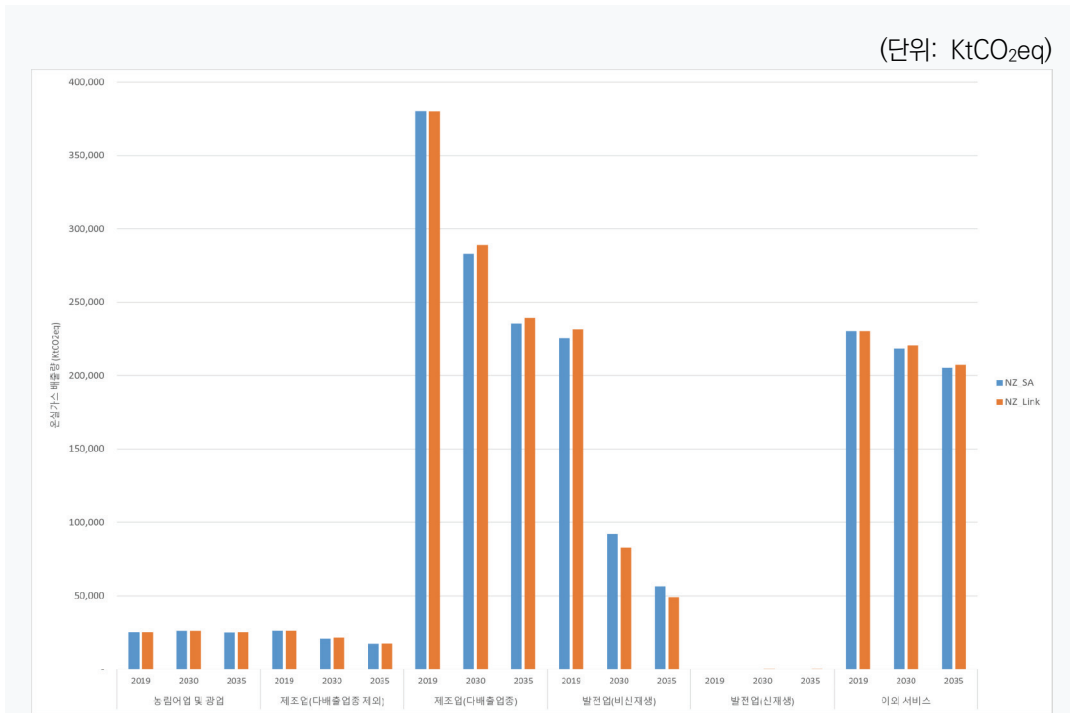


나. 온실가스 배출 및 탄소비용 측면

모형 연계 시나리오에서는 에너지 전환이 활발하게 이루어지며, 신재생에너지 발전량이 증가함에 따라 2035년 온실가스 감축목표(안) 달성을 위한 탄소비용이 전체적으로 감소한다. <그림 4-6>은 미연계 시나리오와 연계 시나리오의 탄소비용을 비교한 그래프이다. 연계 시나리오의 경우 에너지 전환이 보다 활발하게 이루어지기 때문에 미연계 시나리오 대비 2035년 기준 탄소비용이 약 6.8% 감소하는 것으로 나타났다.



〈그림 4-7〉은 주요 산업의 온실가스 배출량 변화를 도식화하여 나타낸 것이다. 감축목표 달성을 위해 제조업 다배출 업종 및 비신재생에너지 발전업에서 상당한 온실가스 감축이 발생하는 것으로 나타났다. 이들 업종의 경우 화석에너지 소비량 및 온실가스 배출량이 많은 부문으로, 탄소비용 상승에 따라 에너지 전환이 발생하며 온실가스 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 이 외에도 다배출 업종을 제외한 제조업과, 서비스업 등에서도 지속적인 온실가스 배출량 감소가 발견되었다.



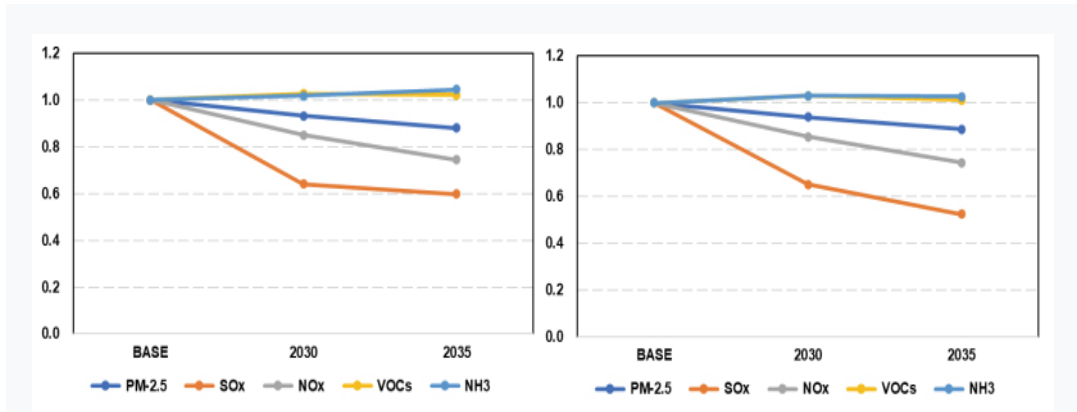
자료: 저자 작성.

그림 4-7 주요 산업 온실가스 배출량(미연계 시나리오 - 연계 시나리오)

다. 대기질 측면

온실가스 감축 시나리오를 기준으로, 모형 연계 유무에 따른 대기오염물질 배출 전망 결과를 비교하였다. 〈그림 4-8〉은 기준연도 대비 2030년, 2035년 대기오염물질 배출량의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 전체적으로 살펴보면, 2035년 최종연도 전망에서 유의미한 차이가 존재함을 확인할 수 있다. 특히 황산화물(SO_x) 배출량의 경우 비연계 시 기준연도 대비 2035년 약 52% 수준으로 계속 감소되는 것으로 전망된 반면, 연계 결과 약 60% 수준으로 감소 경향이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이는 주로 산업분야에서의 차이로 인한 것으로, 연계 후 산업부문의 탄소 감축 압력이 상대적으로 감소했고 타 부문 감축효과가 연계로 인해 추가 반영되었기 때문인 것으로 풀이된다.

VOCs와 NH₃ 배출량의 경우 다소 증가하는 모습을 보여주었다. 이러한 결과는 특히 비에너지 분야의 선장 전망에 따라 이에 기여가 높은 물질의 배출량이 증가하였기 때문인 것으로 확인된다. 다만 연계 유무에 따른 전망 결과의 차이는 소폭 존재하며, 이는 황산화물 배출량에 대한 변화 이유와 동일하다.



자료: 저자 작성.

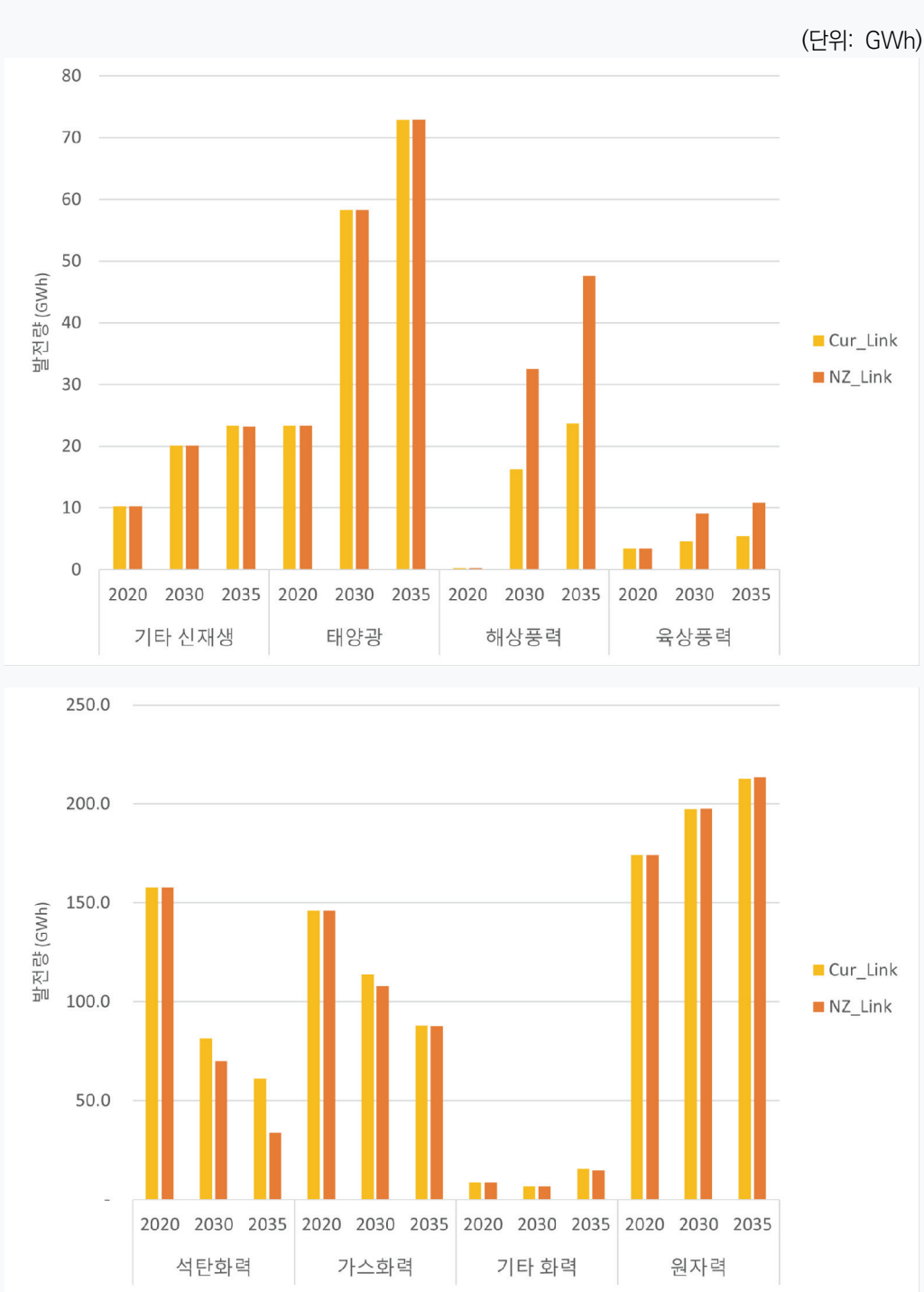
그림 4-8 온실가스 감축목표 시나리오에 대한 모형 연계(좌) 및 비연계(우)에 따른 2030년, 2035년 대기오염물질 배출 전망 비교

3. 2035 온실가스 감축목표 시뮬레이션 분석 결과

가. 경제적 측면

2035 Target 시나리오 도입에 따라 온실가스 감축 제약이 강화되면서 경제 전반적으로 저탄소 연료원으로서의 에너지 전환이 Current Policy 시나리오보다 더 적극적으로 이루어지게 된다.

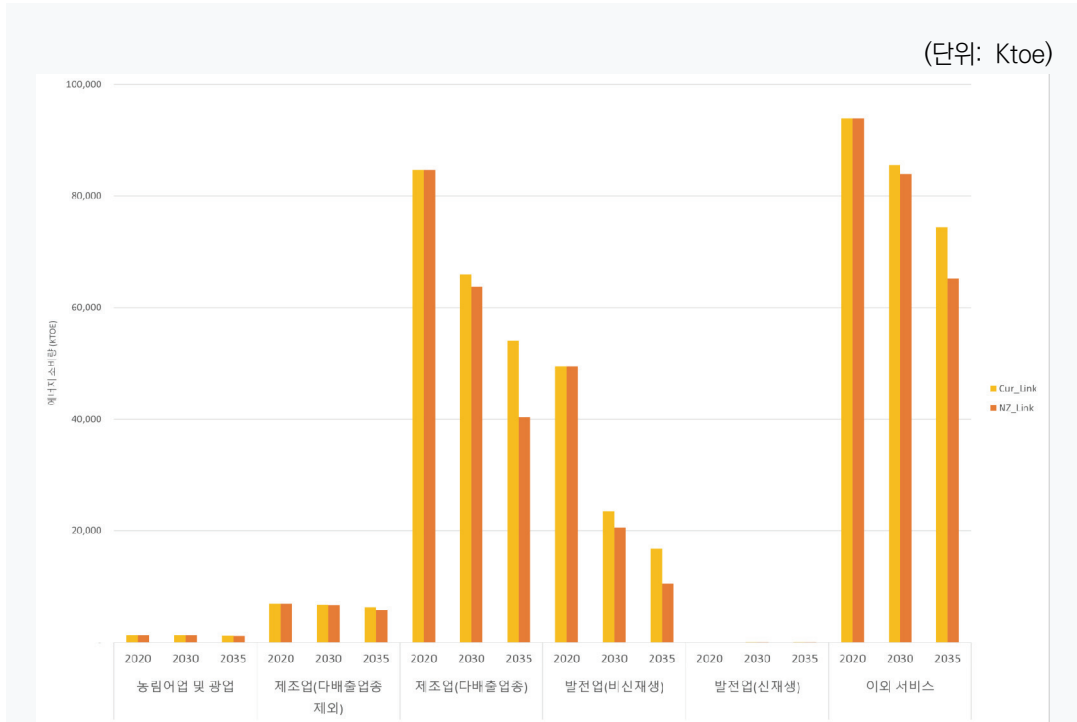
온실가스 감축목표 강화에 따른 가장 대표적인 변화를 확인할 수 있는 분야는 전환 부문이다. 2035 Target 시나리오에서는 온실가스 감축목표가 강화됨에 따라 경제구조뿐 아니라 발전량 측면에서도 상당한 변화가 나타난다. <그림 4-9>는 Current Policy 시나리오와 2035 Target 시나리오의 신재생에너지 발전량 차이를 비교한 그래프이다. 감축목표 강화 및 『제 10차 전력수급기본계획』 이행에 따라 해상풍력 및 육상풍력의 발전량이 상승하는 모습이 나타난다. 이와 달리 <그림 4-9>에서 확인할 수 있듯이, 전통에너지 발전량 중 석탄화력 발전량은 상당 부분 감소하는 것을 확인할 수 있다.



자료: 저자 작성.

그림 4-9 신재생에너지 및 전통에너지 발전량 비교(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)

전환부문 이외의 에너지 부문에서도 상당한 변화가 이루어질 것으로 전망된다. <그림 4-10>은 부문별 석탄 및 석유제품 소비량³⁰⁾을 전망한 그래프로, 모든 업종에서 공통적으로 석탄 및 석유제품 소비량이 감소하는 모습이 발견된다. 특히 제조업 다배출 업종의 경우 2035년 기준 약 16%의 에너지 소비량 감소가 예상되는 등 제조업 내에서 저탄소 에너지원으로서의 연료 전환이 발생할 것으로 전망된다.



자료: 저자 작성.

그림 4-10 석탄 및 석유제품 소비량(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)

온실가스 감축목표 강화는 경제 전반에도 영향을 미치게 된다. 2035 Target 시나리오의 경우 2035년까지 누적 GDP 기준 약 0.19%의 손해가 발생할 것으로 예상되며, 신재생에너지를 제외한 전체적인 업종에 마이너스 효과가 발생할 것으로 전망된다.

30) 여기서 석탄 및 석유제품은 석탄, 원유, 천연가스, 석탄제품, 석유제품을 의미함.

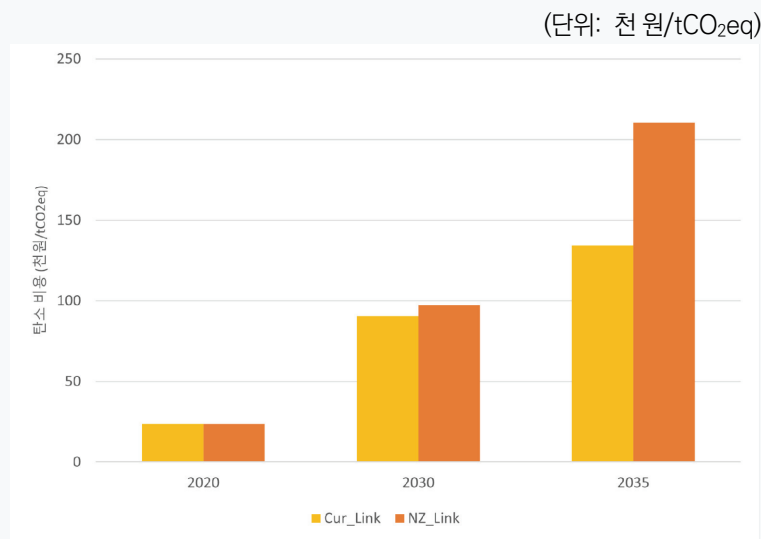


자료: 저자 작성.

그림 4-11 누적 GDP 차이 비교(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)

나. 온실가스 배출 및 탄소비용 측면

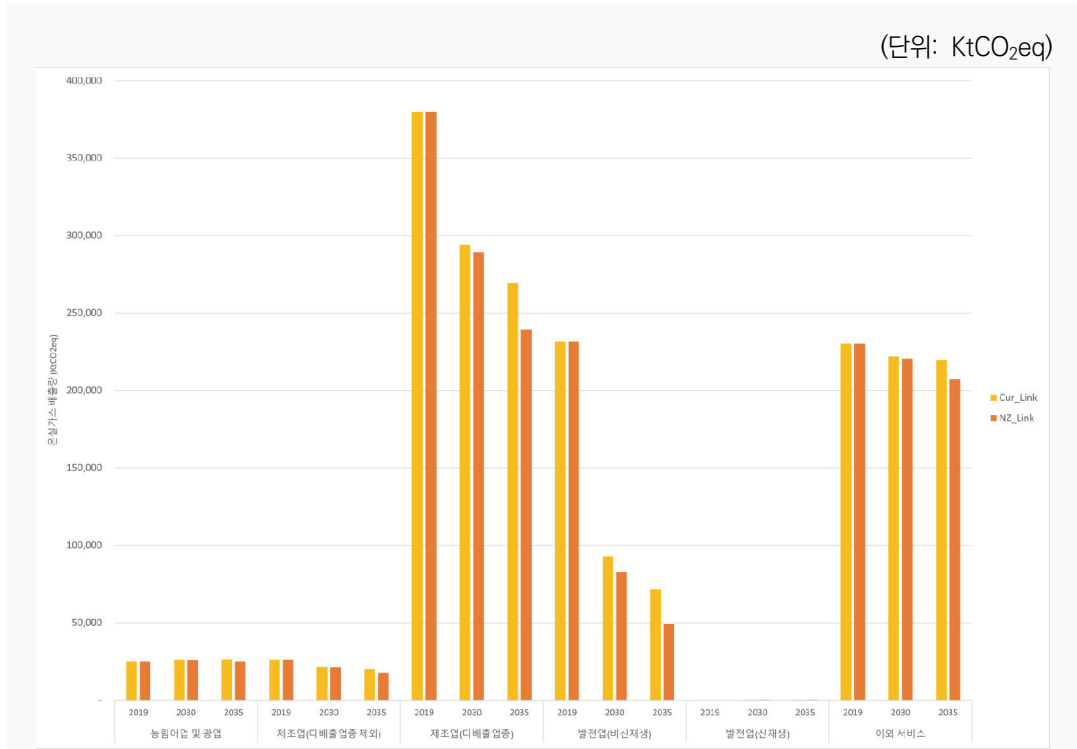
2035년 감축목표(안) 달성을 위해서는 추가적인 탄소비용 부과가 필요하다. Current Policy하에서 13.4만 원/tCO₂ 수준으로 예상되는 탄소비용은 2035 Target 시나리오상에서 약 21만 원/tCO₂ 수준으로 상승할 것으로 전망된다. 2030년까지는 두 시나리오의 탄소비용이 유사하게 나타나나, 이후 온실가스 감축을 위해 추가적인 탄소비용이 필요함을 확인할 수 있다.



자료: 저자 작성.

그림 4-12 탄소비용(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)

부문별 온실가스 배출량 변화를 살펴보면, 2035 온실가스 감축목표(안) 달성을 위해 제조업 다배출 업종의 온실가스 감축이 상당히 나타나는 것을 확인할 수 있다. <그림 4-13>과 같이 농림어업 및 다배출 업종을 제외한 제조업 부문에서는 온실가스 배출 감소가 발생하나, 그 폭이 크지 않았다. 반면 다배출 업종 및 비신재생에너지 발전업의 경우 상당한 온실가스 감축효과가 나타나는 모습이 발견되었다.



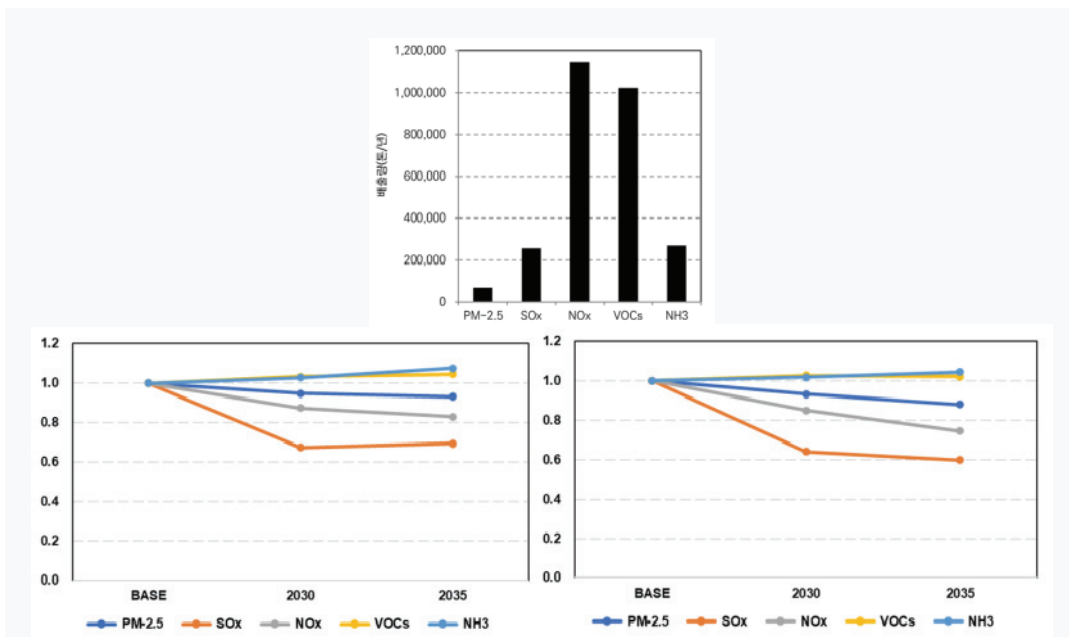
자료: 저자 작성.

그림 4-13 주요 산업 온실가스 배출량(Current Policy 시나리오 - 2035 Target 시나리오)

다. 대기질 측면

〈그림 4-14〉는 기준연도(2018년) 대기오염물질별 배출량 및 Current Policy 시나리오, 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 기준연도 대비 배출량 변화를 함께 비교하여 나타낸 것이다. 2035 온실가스 감축목표 시나리오에서 Current Policy 시나리오 대비 전반적으로 대기오염물질이 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 온실가스 감축목표에 따른 결과로, 2030년 뿐만 아니라 2035년 대기오염물질 역시 상대적으로 감소하는 것으로 분석되었으며, 특히 PM-2.5와 NO_x에서 두드러진다. 황산화물 배출량의 경우 그럼에도 불구하고 2030년 이후 약한 감소로 큰 변화 없이 유지되는 것으로 전망되었다. 이는 전반적인 감소 기조에도 불구하고 산업부문 성장 전망에 따라 일부 증가로 인한 것으로 추정된다.

반면 VOCs와 NH₃ 배출량의 경우 2개 시나리오 모두 증가하는 것으로 전망되었다. 이러한 결과는 특히 비에너지 분야의 성장 전망에 따라 이에 기여가 높은 물질의 배출량이 증가한 것으로 풀이된다. 다만 2035 온실가스 감축목표 시나리오에서는 소폭 증가 경향이 완화되었다.

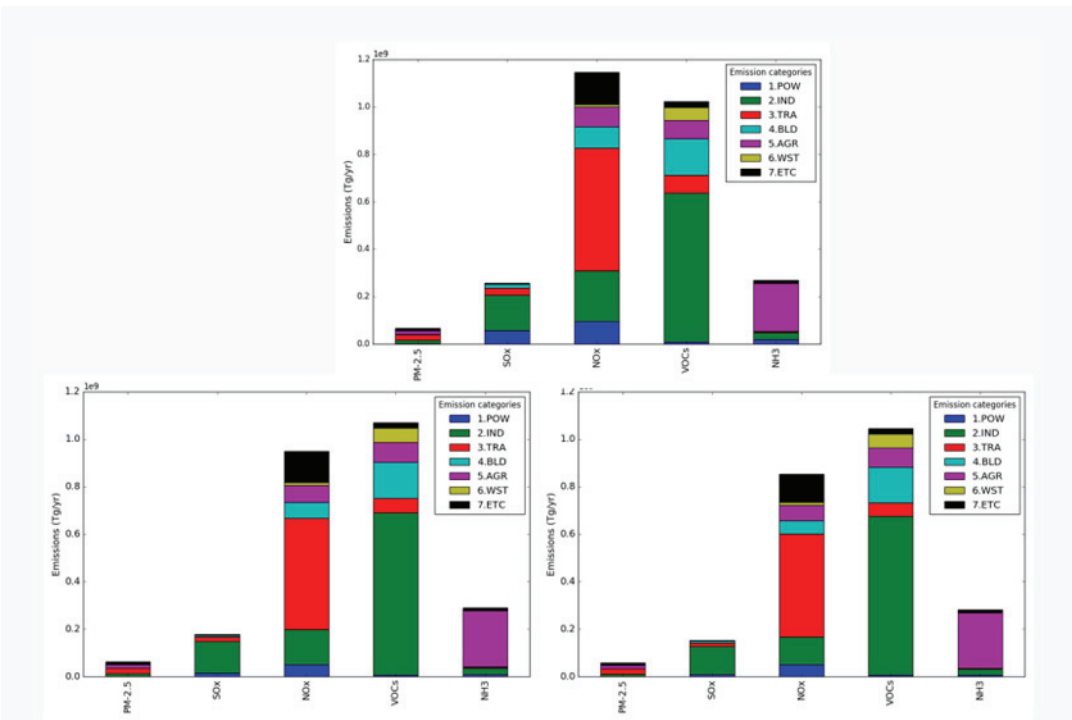


자료: 저자 작성.

그림 4-14 기준연도(2018년) 대기오염물질별 배출량(위)과 Current Policy 시나리오(좌), 2035 온실가스 감축목표 시나리오(우)에 따른 대기오염물질 배출량 변화 비교

<그림 4-15>는 기준연도(2018년) 및 Current Policy 시나리오, 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2035년 대기오염물질별 배출량 및 주요 부문별 기여를 함께 나타낸 것이다. SO_x와 함께 NO_x 배출량 역시 큰 폭으로 감소하는 것이 주요 특징으로 보인다. 이러한 결과는 주로 산업 및 수송 부문에서의 감소가 크게 기여한 것으로 확인된다. Current Policy 시나리오에서도 전체 감소분(약 195천 톤/년)의 약 59%를 산업 및 수송 부문에서 기여하였으며, 온실가스 감축 시나리오에서도 약 62%로 크게 기여하였다. 이는 온실가스 감축 시나리오의 추가적인 감축 결과가 산업 및 수송 부문에서 주로 발생하였음을 의미한다.

한편 VOCs와 NH₃ 배출량 증가의 주요 원인은 각각 산업 및 농축산 부문으로 확인된다. 각 부문의 성장 전망에 따라 비에너지 배출원의 기여가 큰 물질들은 배출량이 증가한 것으로 추정된다. 다만 온실가스 감축 시나리오에서 전반적인 추가 감축으로 증가 경향이 소폭 완화되었다.

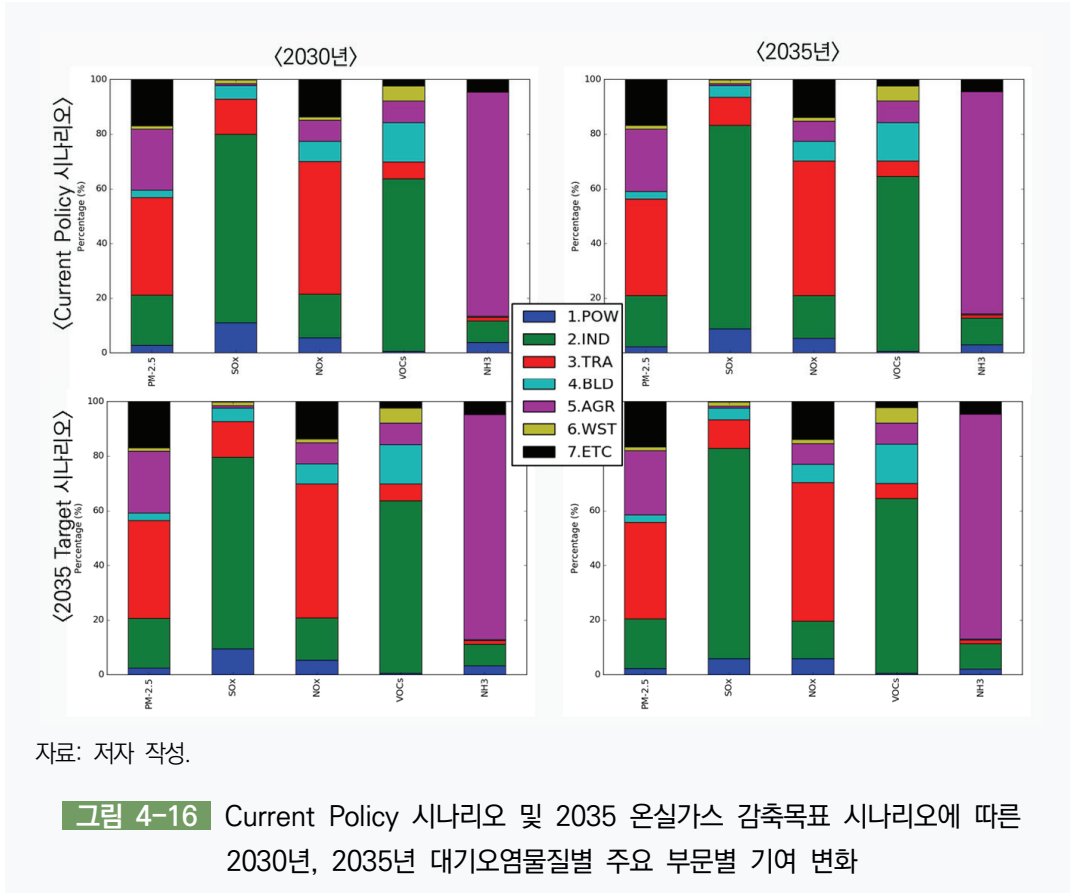


자료: 저자 작성.

그림 4-15 기준연도(2018년)(위) 및 Current Policy 시나리오(좌), 2035 온실가스 감축목표 시나리오(우)에 따른 2035년 대기오염물질별 배출량 및 주요 부문별 기여

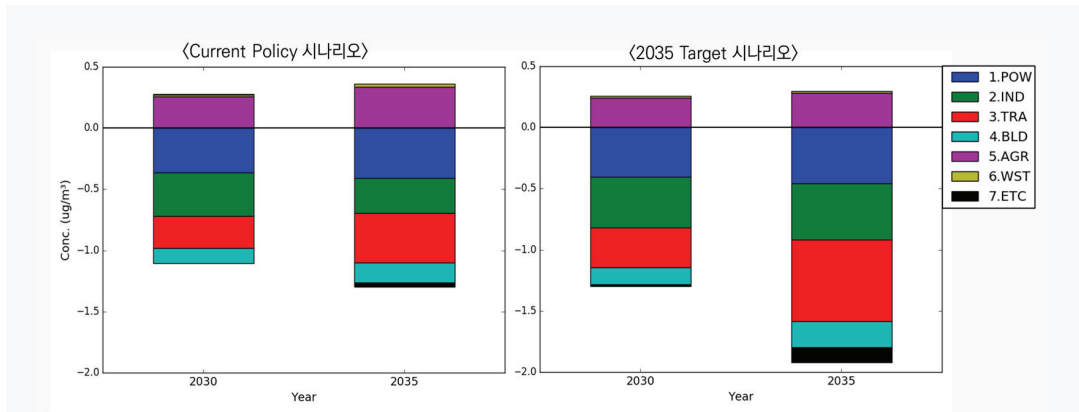
<그림 4-16>은 Current Policy 시나리오 및 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2030년, 2035년 대기오염물질별 주요 부문별 기여 변화를 함께 나타낸 것이다. 모든 부문에서 전반적인 배출 감소로 물질별, 배출부문별 기여에는 두드러진 차이는 없는 것으로 확인

된다. 다만 2035 온실가스 감축목표 시나리오에서 특히 발전 및 산업 부문의 SO_x 배출량이 크게 감소하였으며, 이로 인해 Current Policy 시나리오 대비 기여 수준 역시 감소된 것으로 확인된다.



〈그림 4-17〉은 기준연도인 2018년 대비 Current Policy 시나리오 및 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2030년, 2035년 초미세먼지 농도 변화 및 주요 부문별 기여를 함께 나타낸 것이다. 2035 온실가스 감축목표 시나리오에서 가장 큰 대기질 개선효과를 도출한 것으로 확인된다. 2030년까지는 발전 및 산업 부문에서 가장 큰 감소효과를 도출한 반면, 2035년으로 이어지면서 수송부문의 감축 기여가 크게 증가하여 전반적인 농도 감축을 주도하고 있는 것으로 풀이된다.

전반적인 초미세먼지 농도 감축 기조에도 불구하고 농축산 부문 및 폐기물 처리 부문의 기여 농도가 오히려 증가함을 확인할 수 있다. 이는 농축산 부문의 암모니아 배출 증가로 인한 2차 미세먼지 추가 생성을 유도하였기 때문으로 보이며, 폐기물 처리량 증가 전망에 따른 배출량 증가로 초미세먼지 농도 증가에 기여한 것으로 분석된다. 이러한 결과는 차후 비에너지 분야에 대한 관리방안 마련 역시 중요해질 수 있음을 시사한다.



자료: 저자 작성.

그림 4-17 기준연도(2018년) 대비 Current Policy 시나리오 및 2035 온실가스 감축목표 시나리오에 따른 2030년, 2035년 초미세먼지 농도 변화 및 주요 부문별 기여

제 5 장

결론

1. 결론
2. 연구의 한계점 및 추후 과제

1. 결론

기후변화와 대기오염 해결을 위한 정책 수립 및 평가를 지원하기 위해 본 연구는 부문별 배출전망모형과 대기확산모형의 개발 및 연계를 통해 통합적인 분석체계를 구축하였다. 이를 통해 탄소중립 정책의 효과를 정밀히 평가하고 실효성 있는 전략을 도출함으로써 기후변화 대응과 대기질 개선을 동시에 달성할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

본 연구는 총 6차 연도 과제로 계획되었으며, 당해연도인 2차연도 연구에서는 크게 수송부문 모형과 영향 모듈을 개발하였으며, 전력 모형과 CGE 모형, 대기 모형을 일방향(one-way) 연계함으로써 2035 온실가스 감축목표 시나리오(안)의 경제적·환경적 영향을 분석하였다.

수송 모형의 경우 도로부문의 승용차(자가용)와 화물부문을 시범적으로 개발하였다. 기초 모형 구축을 위해 기존 연구의 구조와 특징을 심층적으로 분석하고 비교하여 이론적 기반을 마련하였고, 기술적·경제적·환경적 측면에서 필요한 데이터를 수집하고 가공하여 실질적 기반을 구축하였다. 특히 화물차 부문의 경우 규모별 주행거리별 분포를 활용하여 그룹화함으로써 주행거리 패턴에 따라 차량 기술 선택이 달라짐을 확인하였다. 구축된 기초 모형을 바탕으로 BAU와 정책 시나리오를 통해 2030 NDC 및 2050 탄소중립 달성을 위한 주요 정책수단의 효과를 분석하였다. 정책 시나리오에서는 2050년까지 승용차의 무공해차 보급 비율을 달성하여 CO₂ 배출량이 약 91% 감축되는 것으로 분석되었다. 이로 인해 친환경차의 기술혁신이 수송부문의 온실가스 배출 감축에 핵심 요인임을 확인하였으며, 기술비용 감소 및 연비 개선을 위해 친환경차 전환 지원 정책의 지속적인 시행이 필요함을 시사한다.

영향 모듈의 경우 건강과 에너지 부문의 기온반응함수를 구축하였다. 기온반응함수는 사망자수와 전기사용량 같은 지표가 기온변화에 따라 어떻게 달라지는지를 보여주는 함수로 기후변화 영향 분석에 필수적이다. 분석 결과 건강과 에너지 부문 모두 기온변화에 뚜렷하게 반응하며 기온 상승 또는 하강 시 U자 형태의 증가 양상을 확인하였다. 구축된 기온반응함수는 향후 연구에서 기온변화와 시나리오를 반영한 기후변화 영향평가 모듈로 발전될 예정이다.

모형 간 연계를 위해 전력 모형과 하향식 모형의 고도화 작업을 수행하였으며, 대기확산모형과의 연계를 통해 탄소중립 정책의 대기오염 개선효과를 분석하였다. 하향식 모형의 경우 대기 모형 및 각종 상향식 모형과의 연계를 고려하여 기존 UNICON-CGE 모형을 개선하였다. 2차 연도 연구를 통해 일방향 연성 연계 방식을 채택하였으며, 발전부문 확대 및 CAPSS 자료와의 정합성을 고려하는 형태로 연계 모형을 재구축하였다. 더불어 모형 고도화 측면에서는 기존 모형에서 고려되지 못했던 CCS 및 수소 산업을 추가적으로 모형 내에 반영하였다. 이를 통해 모형 내 탄소중립 신산업이 확대되는 효과를 반영하고자 하였다.

전력 모형에서는 CGE와의 연계 및 2035 NDC 분석을 위해 기술분류를 재조정하고 연도별 재생에너지 공급 용량을 개선하였다. 전력 모형 단독 분석 결과, 2035 NDC 달성을 위해서는 재생에너지 도입이 확대됨에 따라 석탄발전량도 지속적으로 감소한다. LNG 발전이 2030년까지 유지되지만 장기적으로는 감소가 필요하다. 온실가스 감축목표와 재생에너지 확대는 대기오염물질 배출량(NO_x , SO_x , NH_3 , $\text{PM}_{2.5}$)의 지속적인 감소를 유도한다.

대기 모형은 전단에 위치한 부문별 모형들에서 도출된 시나리오 결과를 바탕으로 예상되는 대기오염물질 배출량과 그로 인한 미세먼지 농도 등 대기질 영향을 도출하는 것을 목적으로 개발하였다. 이를 위해 크게 배출목록 산출 모듈과 대기질 영향 평가 부분으로 구성하고, 대기질 영향 평가는 다시 상세 모형 기반 대기질 분석체계와 축약형 대기확산 모듈로 이원화하여 구성하는 것을 최종 목표로 한다. 이원화된 시스템을 바탕으로 다양한 시나리오에 대한 스크리닝과 양방향 연계는 축약형 모듈을, 상세한 시공간적 분석과 최종 결과 도출에는 상세 모형 기반 분석체계를 활용하고자 한다. 당해연도(2024년) 연구에서는 CGE 모형과 연계한 배출목록 산출 모듈과 축약형 대기확산 모듈에 대한 초기형을 개발하였다. 이를 기반으로 CGE에서 도출된 여러 시나리오에 따른 대기오염물질 배출 변화와 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선효과를 평가할 수 있을 것으로 기대되며, 시나리오에 따른 시범 분석 역시 수행하였다.

본 연구에서는 모형 간 연계에 따른 효과 분석과 2035년 온실가스 감축목표(안) 분석이라는 두 가지 목적을 바탕으로 시나리오를 설계하였다. 첫째, 모형 간 연계의 효과를 비교하기 위해 하향식 모형만을 이용하여 2035년 분석을 진행하는 미연계 시나리오(NZ_SA)와 전력 부문 상향식 모형과 연계를 통해 분석을 수행한 연계 시나리오(NZ_Link) 간의 비교를 수행

하였다. 둘째, 2035년 온실가스 감축목표(안) 분석을 위해서는 최근의 온실가스 감축 추세를 유지하는 Current Policy 시나리오(Cur_Link)의 결과와 2035년 온실가스 감축목표(안)을 반영한 2035 Target 시나리오(NZ_Link)를 비교하는 방식으로, 온실가스 감축목표 이행에 따른 경제적·환경적 공편의 영향을 분석하였다.

먼저 모형 간 연계 유무에 대한 시나리오 분석을 통해서 다음과 같은 시사점을 얻을 수 있었다. 전력부문 상향식 모형의 경우 『제10차 전력수급기본계획』에 기반한 에너지원별 발전량 자료를 제공하기 때문에, 모형 간 연계를 통해 『제10차 전력수급기본계획』에 따라 예정되어 있는 설비계획을 모형 내에 직접적으로 반영할 수 있었다. 이에 따라 2035년까지의 현실적인 발전량 모사가 가능했다. 특히 풍력 등 일부 신재생에너지 발전원의 경우 하향식 모형 단독으로는 모사하기 어려운 설비계획이 반영되어 있기 때문에 모형 간의 연계를 통해 정확도를 개선할 수 있었다.

다음으로 2035년 온실가스 감축목표(안) 부여에 따른 시나리오 분석에서는 각 모형별로 다양한 시사점을 얻을 수 있었다. 먼저 전력 모형에서는 현 추세에 비해 2035년 온실가스 감축목표가 상향됨에 따라 재생에너지 분야의 발전량이 증가하고, 고효율 LNG 발전기의 이용률이 상승하며, 석탄발전이 유의적으로 감소되는 모습이 전망되었다. 이러한 변화는 미세 먼지 전구물질 감소 측면에서도 상당한 공편익이 발생할 것으로 예상된다.

하향식 모형 분석 결과에서는 온실가스 감축목표 강화는 탄소비용 상승으로 이어지며, 다배출 업종에 부담으로 작동하는 현상이 나타났다. 다만 감축목표 강화에 따라 화석연료에서 신재생 에너지원으로의 에너지 전환이 활발하게 이루어졌고, 전 부문의 온실가스 감축효과가 예상되었다. 대기확산모형 측면에서는 온실가스 감축목표(안) 이행에 따라 대기오염물질 배출량이 전반적으로 감소하는 것으로 추정되었다. 특히 산업 및 수송 부문의 감축효과가 컸다.

정리하면 본 연구는 부문별 모형 개발과 모형 간 연계를 통해 탄소중립 정책의 다차원적 평가를 가능하게 하는 기반을 마련하였다. 특히 부문별 배출 전망에서 대기 확산에 이르는 과정을 포괄하는 분석체계를 구축함으로써, 기후-대기-경제 통합평가모형 개발의 초기 단계를 완성하였다. 이는 향후 정책 수립과 의사결정에 활용될 수 있는 강력한 도구로 기능할 것으로 기대된다.

2. 연구의 한계점 및 추후 과제

현재 구축한 수송부문의 상향식 모형은 기초 형태로 데이터 및 기술 선택 모듈의 개선이 필요하다. 일부 변수는 자료의 부재로 추정을 통해 보완된 측면이 있으며, 특히 몇몇 전기차와 수소차는 현재에는 없는 미래 기술로 데이터의 제한으로 인해 결과의 불확실성이 내포되어 있다. 또한 LP 모형의 구석해(corner solution) 문제로 인해 결과의 쏠림 현상이 크기 때문에, 이를 유연하게 대체하기 위해 다른 형태의 함수를 고려하며 차량선택에 있어서 비용 외의 요소를 반영할 수 있는 방안이 필요하다. 향후에는 현재 기초 모형을 개선함과 동시에 승합차 및 영업용 차량(택시, 버스 등)을 고려하여 도로부문의 온실가스 배출량을 포괄할 수 있도록 모형을 확장할 계획이다. 또한 전력 모형과 하향식 모형, 대기확산모형과의 연계를 위해 모형의 구조를 개선할 계획이다.

영향 모듈의 기온반응함수를 활용하여 향후 기후변화로 인해 발생할 수 있는 기온변화를 고려하여 기후변화의 영향을 시나리오별로 산정할 수 있도록 모듈을 개선할 계획이다.

모형 간 연계를 통해 일원화된 모형체계를 구축하여 정책 시나리오를 분석한 결과 보다 현실적인 결과를 확인할 수 있었다. 이번 분석에서는 우선적으로 전력부문을 연계하였으나, 향후 수송부문 등 신규 개발 중인 모듈과의 연계를 통해 하향식 모형의 정확도를 상당 부분 개선할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 현재 연계 모형은 탄소중립 신기술이 반영되지 않은 버전으로, 향후 CCS, 수소 등의 모듈이 추가적으로 고려된다면 감축목표 이행에 따른 비용 부담이 감소할 것으로 전망된다.

대기확산모형의 현재까지의 결과는 배출원의 특성에 대한 고려가 충분히 되지 못하고, 에너지 사용량 변화에 따른 영향에 대해서는 어느 정도 고려가 가능한 반면, 비에너지 분야의 경우 성장 전망에 기반하여 추산되고 정책효과를 반영하기 어렵다는 한계가 존재했다. 이러한 한계점은 향후 연구를 통해 개선할 예정이다.

탄소중립 전력시스템 분석 시에는 재생에너지 변동성 및 국내 송전망 용량에 대한 고려가 필요하다. 또한 전기차 V2G(Vehicle to Grid), 그린수소 생산, 수소 및 암모니아 혼소 등 전력과 타 부문과의 연계 방안과 그 효과에 대해 고려할 필요가 있다.

참고문헌

[국내문헌]

- 국가미세먼지정보센터(2023), 「2020 국가 대기오염물질 배출량 및 과거 연도 배출량 재산정」.
관계부처 합동(2019), 「미세먼지 관리 종합계획(2020-2024)」.
관계부처 합동(2021), 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안」.
관계부처 합동(2023), 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」.
권오상 외(2018), “자가용부문 차종선택 및 에너지소비량 전망모형의 개발”, 「환경정책」, 26(1), 한국환경정책·평가연구원, 한국환경정책학회, pp.195-221.
기상청(2022.2), 「MKPRISM 과거 기상자료」, 내부자료.
김규승 외(2023), 「도로화물수송부문 탄소중립 이행을 위한 정책 방안 연구: 친환경 수단 전환을 중심으로」, 한국교통연구원.
김대욱, 김종호(2015), “연비 정보의 변화가 소비자의 자동차 구매패턴에 미치는 영향에 관한 실증적 연구”, 「한국경제연구」, 33(3), 한국경제연구학회, pp.127-153.
김재경 외(2020), 「시장 주도형 수소경제 조기 정착을 위한 전략 연구(1/3)」, 에너지경제연구원.
김지연 외(2022), “장기경제성장률 전망과 시사점”, 「KDI 경제전망」, 2022년 하반기, 한국개발연구원.
김채현, 김건우, 김한상(2023), “수소 산업 발전을 위한 국내외 정책 및 기술 동향 분석”, 「한국수소및 신에너지학회 논문집」, 34(2), pp.122-131.
박상준, 우승국(2012), 「온실가스 저감모형을 활용한 교통부문 감축량 산정 및 활용방안 연구」, 한국교통연구원.
산업통상자원부(2022), 「2020년 에너지총조사보고서」.
산업통상자원부(2023), 「제10차 전력수급기본계획(2022-2036)」.
숙명여자대학교 지구환경연구소(2023.12), 내부자료.
신동원 외(2022), 「탄소중립 혁신기술 비용 DB 구축체계 및 도입전략」, 한국환경연구원.
에너지경제연구원(2018), 「국내외 환경변화에 따른 CCS 정책 추진계획 수립 연구」. 국무조정실, 과학

기술정보통신부, 산업통상자원부, 해양수산부.
 여영준, 안영환(2024), “도로수송부문의 2050 탄소중립 정책 Well-to-Wheel GHG 분석”, 「90th 대한교통학회」, 3월 28일, 서울: 한국과학기술회관.
 오인하(2011), “소비자 선호 및 소득 수준을 고려한 한국 자동차 시장의 제품 효율성 분석”, 「한국혁신학회지」, 6(1), pp.3-24.
 이근대, 임덕오(2022), 「재생에너지 공급확대를 위한 중장기발전단가(LCOE)전망시스템 구축 및 운영」, 에너지경제연구원, p.56.
 이성원 외(2016), 「교통부문의 장기적 탈탄소화 연구」, 한국교통연구원.
 이정은, 신동원(2023), 「탄소중립과 미세먼지 감축을 위한 도로 수송부문 상향식 모형 개발 기초연구」, 한국환경연구원.
 이혜진, 강윤영, 김윤경(2019), “CCU 기술 도입의 경제적 파급효과 분석”, 「에너지경제연구」, 18(1), 에너지경제연구원, pp.113-136.
 임형우 외(2022), 「2050 탄소중립 전략 이행을 위한 수송분야 정책 방향 연구」, 한국환경연구원.
 임형우 외(2024), 「2050 탄소중립을 고려한 기후대응기금의 효과적 운용방안 연구」, 한국환경연구원.
 장한별 외(2022), 「전기·수소차 보급 확대에 따른 교통·에너지·환경세 개편방안」, 한국교통연구원.
 전력거래소(2020), 「2019 주택용 가전기기 보급현황 조사」.
 최기철 외(2022), 「탄소중립 전략 이행에 따른 2030 미세먼지 대기질 전망 및 동시 감축 정책 방향 연구(1)」, 한국환경연구원.
 최기철, 최형식 외(2023), 「기후대기 통합평가모형 개발연구」, 한국환경연구원.
 최도영 외(2012), 「전기자동차 보급의 에너지수급 영향분석」, 에너지경제연구원.
 한국에너지공단(2023), 「2023 자동차 에너지소비효율 분석집」.
 한국전력공사(2024), 「제93호 2023년 한국전력통계」.
 환경부(2022), 「제3차(2023~2032년) 대기환경개선 종합계획」.
 환경부, 환경산업기술원(2021), 「한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발」.
 2050 탄소중립위원회(2021), 「2050 탄소중립 시나리오」.

[국외문헌]

Berry, S., J. Levinsohn, and A. Pakes(1995), “Automobile Prices in Market Equilibrium”, *Econometrica*, 63(4), pp.841-890.
 Carleton, T. et al.(2022), “Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits”, *The Quarterly Journal of Economics*, 137(4), pp.2037-2105.
 Chepeliev, M. et al.(2024), “Implications of the Net Zero Transition Scenarios on SDG Indicators: Linking Global Energy System, CGE and Atmospheric Source-Receptor Models”, M. Labriet et al., Eds., *Aligning the Energy Transition with the Sustainable*

- Development Goals: Key Insights from Energy System Modelling*, Cham: Springer Nature Switzerland, pp.41-66.
- Christian, B. et al.(2019), *Transport Energy Air pollution Model (TEAM): Methodology Guide*, UK Energy Research Centre.
- Davis, L. W. and P. J. Gertler(2015), “Contribution of Air Conditioning Adoption to Future Energy Use under Global Warming”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), pp.5962-5967.
- Deschênes, O. and M. Greenstone(2011), “Climate Change, Mortality, and Adaptation: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the US”, *American Economic Journal: Applied Economics*, 3(4), pp.152-185.
- Fattahi, A. et al.(2023), “Soft-linking a National Computable General Equilibrium Model (ThreeME) with a Detailed Energy System Model (IESA-Opt)”, *Energy Economics*, Vol.123: 106750.
- Huppmann, D. et al.(2019), “The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix Modeling Platform (ixmp): An Open Framework for Integrated and Cross-cutting Analysis of Energy, Climate, the Environment, and Sustainable Development”, *Environment Modelling and Software*, Vol.112, pp.143-156.
- IPCC(2023), “Climate Change 2023: Synthesis Report”, H. Lee and J. Romero, Eds., *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Kim, H. G.(2021), “Effects of Climate Change on Electricity Consumption: A Decomposition of Industrial, Residential, Agricultural, and Commercial Sectors”, *Climate Change Economics*, 12(04): 2150014.
- Lanzi, E. et al.(2022), “The Economic Benefits of International Co-operation to Improve Air Quality in Northeast Asia: A Focus on Japan, Korea and China”, *OECD Environment Working Papers*, No.197, OECD Publishing..
- Loulou, R. et al.(2005), *Documentation for the TIMES Model: Part I, 2005*.
- Markets and Markets(2020), CCUS Global Market Size.
- Mayer, J. et al.(2024), “Economy-wide Impacts of Socio-politically Driven Net-zero Energy Systems in Europe”, *Energy*, Vol.291: 130425.
- Mishra, G. S. et al.(2013), *Transportation Module of Global Change Assessment Model (GCAM): Model Documentation*, Institute of Transportation Studies, University of California at Davis; and Pacific Northwest National Laboratory.
- Muratori, M. et al.(2021), *The Transportation Energy and Mobility Pathway Options(TEMPO) Model: Overview and Validation of V1.0*, NREL.

- OECD(2016), *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*.
- OECD/ITF(2020), *The ITF Urban Passenger Model - Insights and Example Outputs*.
- Pisoni, E. et al.(2023), “Modelling the Air Quality Benefits of EU Climate Mitigation Policies using Two Different PM2.5-related Health Impact Methodologies”, *Environment International*, Vol.172: 107760.
- Rauner, S. et al.(2020), “Air Quality Co-benefits of Ratcheting up the NDCs”, *Climatic Change*, Vol.163, pp.1481-1500.
- Reynes, F. et al.(2021), *ThreeME Version 3-Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy Policy*, Observatoire Français des Conjonctures Économiques: OFCE.
- Van Dingenen, R. et al.(2018), “TM5-FASST: a Global Atmospheric Source-Receptor Model for Rapid Impact Analysis of Emission Changes on Air Quality and Short-lived Climate Pollutants”, *Atmospheric Chemical and Physics*, 18(21), pp. 16173-16211.
- Ščasný, M. et al.(2015), “Quantifying the Ancillary Benefits of the Representative Concentration Pathways on Air Quality in Europe”, *Environmental and Resource Economics*, 62(2), pp.383-415.
- Stone, R. and A. Brown(1962), *A Computable Model of Economic Growth*, Chapman and Hall.
- Teter, J.(2018), “The IEA Mobility Model: an Introduction and Considerations on ACES”, *Automation, Connectivity, Electrification, and Sharing (ACES): Transforming Road Transport Services*, June 14, Paris: IEA, CEM, EVI.
- Vandyck, T. et al.(2020), “Quantifying Air Quality Co-benefits of Climate Policy across Sectors and Regions”, *Climatic Change*, 163(3), pp.1501-1517.
- Woo, J. H. et al.(2024), “Development of a Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies Model for Korea (GAINS-Korea)”, *Scientific Reports*, Vol.14: 3372.

[온라인 자료]

- 국가물류통합정보센터, “적재량별 화물차 등록현황”, <https://www.nlic.go.kr/>, 검색일: 2024.8.12.
- 국가법령정보센터, “자동차관리법 시행규칙”, [별표 1], https://www.law.go.kr/법령/자동차관리법_시행규칙/, 검색일: 2024.5.18.
- 국가교통 통계누리, “용도별 차종별 유형별 규모별 자동차주행거리”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?sso=ok&returnurl=https%3A%2F%2Fkosis.kr%3A443%2FstatHtml%2FstatHtml.do%3Fconn_path%3DI3%26tblId%3DDT_42601_N002%26orgId%3D426%26, 검색일: 2024.5.18.

국토교통 통계누리, “자동차등록현황보고”, <https://stat.molit.go.kr/portal/cate/statMetaView.do?hRsId=58>, 검색일: 2024.4.30.

국토교통 통계누리, “자동차주행거리통계”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=426&tblId=DT_42601_N003&conn_path=I2, 검색일: 2024.5.18.

네이버, “자동차”, https://search.naver.com/search.naver?where=nexearch&sm=top_hty&fbm=0&ie=utf8&query=%EC%9E%90%EB%8F%99%EC%B0%A8, 검색일: 2024.4.30.

무공해차 통합누리집, “구매보조금 지원”, <https://ev.or.kr/nportal/buySupprt/initBuySubsidySupprtAction.do#>, 검색일: 2024.8.18.

수소경제 종합정보포털 홈페이지, “국내 수소차 등록현황(연도별)”, <https://www.h2hub.or.kr/main/yard/domestic-hydrogen-vehicle-registration-status-yearly.do>, 검색일: 2024.9.29.

오피넷, “국내유가통계-주유소 평균판매가격”, <https://www.opinet.co.kr/user/dopospdrg/dopOsPdrgSelect.do>, 검색일: 2024.8.18.

월간수소경제(2020.7.2), “부생수소에 주목한다 ① 수소경제 포문 연 ‘부생수소’”, <https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=8340>, 검색일: 2024.9.29.

이트럭스, “트럭”, <https://etrucks.co.kr/kr/truck/>, 검색일: 2024.9.2.

일렉트릭파워(2023.1.12), “2036년 풍력 등 재생에너지 발전 비중 28.9% 목표”, <https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=31848>, 검색일: 2024.9.29.

전력데이터 개방 포털시스템, “발전·판매-판매전력량”, <https://bigdata.kepco.co.kr>, 검색일: 2024.9.6.

전력데이터 개방 포털시스템, “발전·판매-고객호수”, <https://bigdata.kepco.co.kr>, 검색일: 2024.9.6.

지표누리, “국내총생산”, <https://www.index.go.kr/unity/potal/indicator/IndexInfo.do?popup=Y&clasCd=2&idxCd=5001>, 검색일: 2024.9.6

카이즈유, “자동차”, <https://www.carisyou.com/car/>, 검색일: 2024.8.19.

통계청 보도자료(2023.12.14), “장래인구추계: 2022~2072년”, https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301020600&bid=207&act=view&list_no=428476, 검색일: 2024.5.30.

한국은행 경제통계시스템, “국민소득(명목, 시장가격)”, <https://ecos.bok.or.kr/#/SearchStat>, 검색일: 2024.6.18.

한국은행 경제통계시스템, “산업연관표”, <https://ecos.bok.or.kr/#/SearchStat>, 검색일: 2024.6.18.

한국자동차모빌리티산업협회, “자동차등록통계월보(2010.1~2023.12)”, <https://www.kama.or.kr/>, 검색일: 2024.5.30.

한국전력거래소(2024.6.10), “지역별 시간별 태양광 및 풍력 발전량”, <https://www.kpx.or.kr/menu.es?mid=a10107020000>, 접속일:2024.11.19.

환경부 국가미세먼지정보센터, “CAPSS-부문별 배출량”, <https://air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30>, 검색일: 2024.4.25.

- EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼 홈페이지, “수소에너지 생산”, https://tips.energy.or.kr/carbon/Ggas_statistics04.do, 검색일: 2024.9.29.
- IP 분류본부 홈페이지, “CPC Y02C”, <https://cls.kipro.or.kr/classification/cpc/search#Y02C>, 검색일: 2024.8.10.
- KOSIS 국가통계포털, “인구동향조사: 시군구/월별 사망자 수(1997~)”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B82A01&conn_path=I2, 검색일: 2024.5.11.
- KOSIS 국가통계포털, “주민등록인구현황: 행정구역(시군구)별, 성별 인구수”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B040A3&conn_path=I2, 검색일: 2024.5.5.
- NREL, “Transportation Annual Technology Baseline (ATB) Data”, <https://atb.nrel.gov/transportation/2022/data/>, 검색일: 2024.8.2.
- OMEGA 홈페이지, “OMEGA Documentation”, <https://omega2.readthedocs.io/en/2.1.0/>, 검색일: 2024.3.7.
- US EPA 홈페이지, “Optimization Model for reducing Emissions of Greenhouse Gases from Automobiles (OMEGA)”, <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/optimization-model-reducing-emissions-greenhouse-gases>, 검색일: 2024.3.7.

부록

I. 수송모형 선행연구 사례

I. 수송모형 선행연구 사례

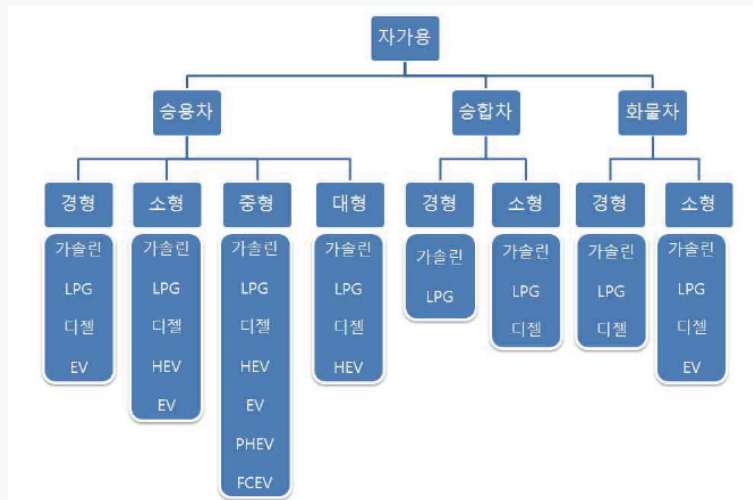
1. 국내 선행연구

1) Calibration 중첩 로짓 모형³¹⁾

Calibration 중첩 로짓 모형을 이용한 국내 연구로는 권오상 외(2018)가 있다. 권오상 외(2018)는 자가용 부문의 에너지 사용량을 전망하고 정책효과를 분석하기 위해 총 32개의 차종 선택 문제와 연간 운행거리 결정 분석 모형을 개발하였다. 이 모형은 ASIF(Activity, Structure, energy Intensity, Fuel use) 구조를 기반으로 하며, 자동차 운행거리(activity), 자동차 소유 구조(structure), 즉 자동차 보유대수와 차종별 구성을 반영하여 차종별 연비(intensity)를 적용해 최종에너지 소비량(fuel use)을 도출하는 방식이다. 이 모형에서는 운행거리가 주요 경제변수에 의해 내생적으로 결정되고, 차령분포와 연비 변화로 인한 에너지 효율성 변화가 최종에너지 소비량에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다.

권오상 외(2018)의 차종별 비중 결정 모형은 자료를 통해 파라미터를 추정하는 Calibration 로짓 모형을 기반으로 하고 있다. 이를 승용차, 승합차, 소형트럭 세 가지 유형으로 분류하고, 각 유형 내에서 개별 차종별 점유율을 추정하기 위해 중첩 로짓 모형으로 확장하였다. ① 유형 내 로짓 모형을 적용하여 차종별 점유 방정식을 도출하고, ② 유형 내 점유율을 가중치로 하는 유형별 연간비용을 도출한 후, ③ 승용차, 승합차, 소형트럭 비중 방정식을 도출하는 형태로 모형을 확장하였다.

31) 권오상 외(2018)의 연구를 참조하여 작성함.



자료: 권오상 외(2018), p.205.

부록 그림 1-1 권오상 외(2018)의 차종구분

$$s_i = \frac{c_i b_i^\gamma}{\sum_{j=1}^n c_j b_j^\gamma} \quad \text{부록 식(1-1)}$$

유형내 차종별 점유방정식은 부록 식(1-1)과 같다. 차종별 연간비용(P)은 차령 분포, 신차 가격, 연료비와 세금, 신차의 연비 등을 고려하여 계산된다. 가중치(c)는 부록 식(1-1)을 기준연도의 관측되는 점유율 s 와 연간비용 P 를 반영하는 n 개의 방정식을 풀어 도출하였다. 탄력성(γ)은 다른 연구에서는 특정 수치를 가정하여 적용하였으나 해당 연구는 자료를 이용하여 도출한 값을 적용하였다.

$$P^i = \sum_j (s^{j|i} \times P^{j|i}) \quad \text{부록 식(1-2)}$$

부록 식(1-1)을 통해 도출된 i 번째 유형에서 j 번째 차종이 차지하는 비중인 점유율($s^{j|i}$)을 가중치로 하여 유형 i 내 차종 j 의 연간비용($P^{j|i}$)을 가중 합계하면 유형 i 의 연간비용(P)을 도출할 수 있다(부록 식1-2 참조). SW^i 와 $SW^{j|i}$ 를 각 유형과 각 세부차종에 부여되는 가중 파라미터로 하여 아래 부록 식(1-3)과 같이 중첩 로짓 모형을 구축하였다.

$$s^i = \frac{SW^i (P^i)^{-\gamma}}{\sum_h SW^h (P^h)^{-\gamma}}, \sum_i SW^i = 1, i = [\text{승용차, 승합차, 트럭}] \quad \text{부록 식(1-3)}$$

$$s^{j[\text{승용}]} = \frac{SW^{j[\text{승용}]} (P^{j[\text{승용}]})^{-\gamma}}{\sum_h SW^{h[\text{승용}]} (P^{h[\text{승용}]})^{-\gamma}}, j = 1, \dots, 20$$

$$s^{j[\text{승합}]} = \frac{SW^{j[\text{승합}]} (P^{j[\text{승합}]})^{-\gamma}}{\sum_h SW^{h[\text{승합}]} (P^{h[\text{승합}]})^{-\gamma}}, j = 1, \dots, 5$$

$$s^{j[\text{트럭}]} = \frac{SW^{j[\text{트럭}]} (P^{j[\text{트럭}]})^{-\gamma}}{\sum_h SW^{h[\text{트럭}]} (P^{h[\text{트럭}]})^{-\gamma}}, j = 1, \dots, 7$$

권오상 외(2018)는 신차의 연비차이 반영을 위하여 비중방정식을 적용하여 각 유형별, 차종별, 차령별 점유율을 계산하였다. 차령분포 파악을 위해서 국토교통부 자료를 이용하여 각 유형별로 균제상태(steady state)를 가정한 차령분포함수를 추정하였다. 고펜페르츠함수와 로지스틱 함수를 이용하여 차령 i 의 비중(*share*)을 추정하는 차령분포함수를 추정하였다(부록 식1-4, 부록 식1-5 참조). 인구 천명당 자동차 등록대수와 연간 주행거리를 모형 내에서 추정하였는데 이들은 모두 고펜페르츠함수를 이용하여 추정하였다. 부록 식(1-6)을 이용해 인구 천명당 자동차 등록대수를 추정하는 경우, y 는 인구 천명당 자동차 등록대수이고, \bar{y} 는 포화점, 설명변수 x 는 1인당 GDP이다. 연간 주행거리를 부록 식(1-6)을 이용해 추정하면 y 는 연간 주행거리이고 \bar{y} 는 포화점, 설명변수 x 는 자가용의 경우 1인당 자가용 보유대수, 승합차와 트럭의 경우는 상업활동과 관련이 있으므로 1인당 GDP 혹은 추세치인 연도변수를 사용하였다.

$$share_i = b_1 \exp(-\exp(-b_2(i - b_3))) \quad \text{부록 식(1-4)}$$

$$share_i = b_1 / (1 + \exp(-b_2(i - b_3))) \quad \text{부록 식(1-5)}$$

$$y = \bar{y} \exp(-\exp(-\alpha(x - \beta))) \quad \text{부록 식(1-6)}$$

권오상 외(2018)에서 고려한 정책시나리오는 신차가격 하락 및 보조금, 에너지 효율 및 연비 개선이다. 전기차의 정부지원 및 기술발전에 따른 가격하락 효과를 모형 내에 반영하기 위해서 신차가격을 외생적으로 변화시켜 분석을 수행하였다. 에너지 효율 및 연비개선의 경우 신차에만 적용되어야 함에 따라 자동차 유형별 차령분포함수 추정치에 연비변화를 축차적으로 반영하는 방식을 적용하였다. 이를 통해 전체 등록 자동차의 연비구조 변화를 매년 새로이 계산하도록 하여 에너지 효율 및 연비개선 정책에 대한 효과 분석을 수행하였다.

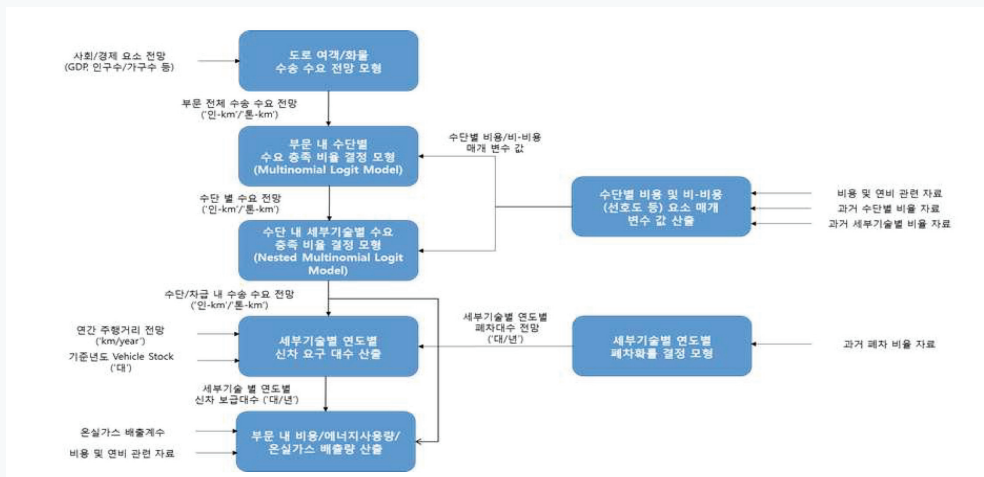
2) UNICON-수송모형³²⁾

UNICON-수송 모형은 수송부문을 도로여객, 도로화물, 철도여객, 철도화물, 항공, 해운 등 세부 부문별로 구성되어 있고, 도로여객/도로화물 부문은 수요전망 모듈, 수단 사이 대체효과 분석 모듈, 기술선택 결정 모듈, 기술별 폐차량 및 신차도입 결정 모듈, 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 산출 모듈과 같이 크게 다섯 가지 모듈로 구성되어 있다. 수요전망 모듈은 자가용(일반), 자가용(승합), 택시, 시내버스, 시외버스의 연간수요를 개별 추정한 후 합산하는 형태로 도로여객 수요를 전망하였다. 전망 단위는 연간 인-km이고, 2003~2013년의 실적 자료를 이용하여 2050년까지의 수요를 전망하였다.

부록 표 1-1 UNICON-수송모형 도로여객 수요전망

구분		내용
자가용 (일반), 택시	등록대수 추정	곰페르츠 함수: $\ln(\ln(s_o/z_t)) = b_0 + b_1 x_t$ s: saturation level(대/천명), z: 인구 천 명당 등록대수, x: 1인당 GDP
	연간 수요 추정	$y_t = z_t \times \eta \times \tau$ y: 연간수요(인-km), 연간주행거리(km/년), τ : 평균 승차인원(명/대)
자가용 (승합)	연간수요 (2003-2013 실적)	$y_t = \sum_{i=1}^3 [z_{ti} \times \eta_i \times \tau_i]$ y: 연간수요(인-km), 연간주행거리(km/년), τ : 평균 승차인원(명/대)
	연간 수요 추정	지수함수: $y_t = b_o \exp(b_i x_t)$, x: 1인당 GDP
시외버스, 시내버스	연간수요 추정	곰페르츠 함수: $\ln(\ln(s_o/z_t)) = b_0 + b_1 x_t$ s: saturation level(대/천명), z: 인구 천 명당 등록대수, x: 1인당 GDP

자료: 환경부, 환경산업기술원(2021), pp.457-458을 참조하여 저자 작성.



자료: 환경부, 환경산업기술원(2021), p.479.

부록 그림 1-2 UNICON-수송모형 도로여객 및 도로화물 세부부문 모형 구조

32) 환경부, 환경산업기술원(2021)을 참고하여 작성함.

수단 사이 대체효과 모듈은 근거리 수송과 장거리 수송에 대한 대체효과 분석하는 모형 2개를 구현하였고, 이때 자가용의 수송수요를 근거리 수송수요와 장거리 수송수요로 구분하였다. 각각의 운송수단이 전체 주행거리에서 차지하는 비율을 2050년까지 구하기 위해 로짓모형을 사용하였다. 인-km로 표현된 각 운송수단별 기준비용(reference cost)과 평균 운송수단 1단위에 탑승하는 인원수를 나타내는 수송률(load factor)이 파라미터로 활용되었다.

부록 표 1-2 UNICON-수송모형 도로여객 구분

구분	내용
근거리 여객	자가용(근거리), 택시, 시내버스
장거리 여객	자가용(장거리), 시외버스

자료: 환경부, 환경산업기술원(2021)을 참조하여 저자 작성.

$$prob_i = \frac{p_i \exp\left(-c \frac{EAC_i}{\min(EAC_i)}\right)}{\sum_{j=1}^m p_j \exp\left(-c \frac{EAC_j}{\min(EAC_j)}\right)} \quad \text{부록 식(1-7)}$$

부록 식(1-7)의 수단 사이 기술선택모형(modal shift)은 영국 옥스퍼드 대학에서 개발한 UKTCM 기술선택모형과 같은 구조인 Calibration 로짓 모형이다. EAC 는 세부 운송수단 i 의 인-km 비용을 뜻하며, 이를 도출하는 방법은 부록 식(1-8)과 같다.

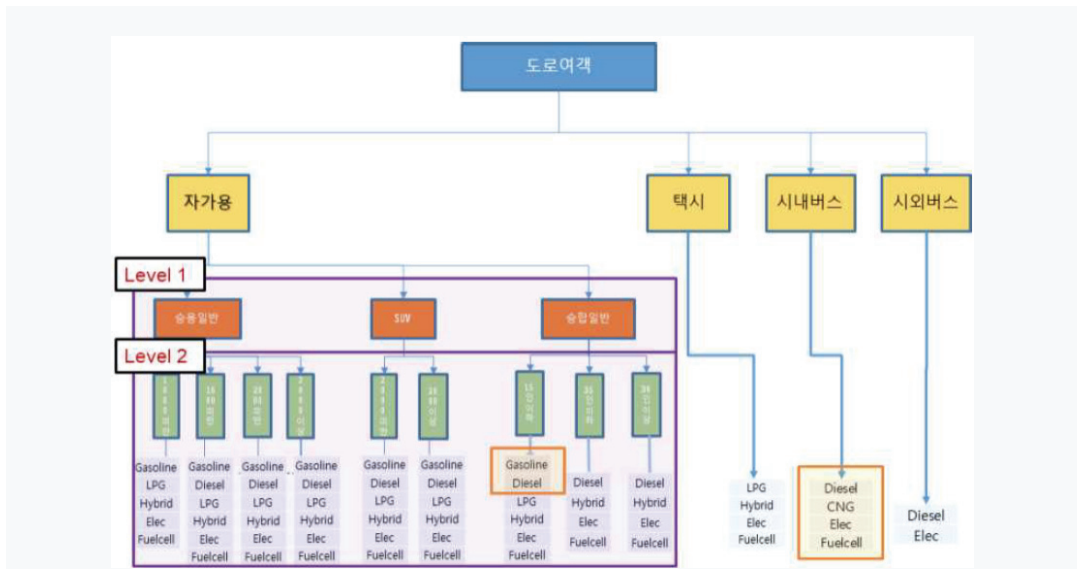
$$EAC_{car_{urban}} = \frac{\sum_i D_{km}(i) \frac{P_{fuel}(i)}{EFF_{new,real}(i) Loadfactor(i)} + \frac{r(1+r)^{L_i}}{(1+r)^{L_i} - 1} \frac{P_{car}(i)}{\frac{D_{km}(i)}{Number(i)} Loadfactor(i)}}{\sum_i D_{km}(i)} \quad \text{부록 식(1-8)}$$

$EFF_{new,real}(i)$ 는 각 연도에 출시된 자가용 i 의 실연비, $P_{fuel}(i)$ 는 자가용 i 의 평균 연료가격, $Loadfactor(i)$ 는 자가용 i 의 수송률, L_i 는 자가용 i 의 평균수명, $P_{car}(i)$ 는 자가용 i 의 평균 자동차 가격, r 은 할인율, $Number(i)$ 는 자가용 i 의 등록대수, $D_{km}(i)$ 는 자가용 i 의 연간 주행 거리를 뜻한다.

부록 식(1-7)에서 c 는 가격탄력성을 의미하며 UKTCM에서는 c 의 값을 10으로 정성적으로 결정하였으나 UNICON-수송모형은 분할자료 회귀분석법을 이용하여 추정하였다. 기존 운송 수단 J 의 로짓 식을 다른 운송수단에 대해 나누어 부록 식(1-9)와 같이 도출하고 이를 이용하여 주행거리비율과 각 운송수단의 비용의 과거데이터를 통해 c 를 도출한다.

$$\ln(prob_i/prob_j) = -c \left(\frac{EAC_i}{\min(EAC_i)} - \frac{EAC_j}{\min(EAC_j)} \right) \quad \text{부록 식(1-9)}$$

세부부문 내에서의 기술선택은 자가용의 경우 승용 일반, SUV, 승합 일반의 3개 네스트로 구분되고, 각 네스트 내에서 다시 차급별·유류별로 구분하는 2-레벨 기술분류를 하였다. 택시, 시내버스, 시외버스는 하나의 레벨로 구분하였다. 이러한 구조를 모형화하는 과정에서 권오상 외(2018)와 같이 중첩 로짓 모형을 사용하였는데, 파라미터를 기준연도의 연립방정식을 풀어 도출하는 Calibration 중첩 로짓 모형을 적용하였다(부록 식1-10 참조).



자료: 환경부, 환경산업기술원(2021), p.481.

부록 그림 1-3 UNICON-수송모형 도로여객 최종 기술 도식도

$$prob_{B_k} = \frac{P_k \exp(\lambda_k I_k)}{\sum_{j=1}^K P_j \exp(\lambda_j I_j)} \quad \text{부록 식(1-10)}$$

$$I_k = \ln \sum_{j \in K} \exp\left(-\frac{EAC_j}{\lambda_j}\right)$$

$$P_{i|B_k} = \frac{P_i \exp\left(-\frac{EAC_i}{\lambda_i}\right)}{\sum_{j \in B_k} P_j \exp\left(-\frac{EAC_j}{\lambda_j}\right)}$$

P_k 는 유형 B_k 를 선택하는 Calibration 파라미터이고, P_i 는 유형 B_k 내에서 차종 i 를 선택하는 Calibration 파라미터, EAC_i 는 차종 i 의 기준비용(원/인-km), λ_k 는 탄력성으로 수단 간 기술선택 방식과 같이 부록 식(1-11)처럼 선형으로 변형하여 회귀분석을 통해 구하며, 이를 위해 과거 2010~2015년 EAC 값을 이용하였다.

$$\ln\left(\frac{prob_{ilk}}{prob_{jlk}}\right) = -\frac{1}{\lambda_k}(EAC_i - EAC_j) \quad \text{부록 식(1-11)}$$

UNICON-수송모형은 연식을 반영함에 있어 폐차대수 전망 방법론을 도입하였다. 수정 웨이블 분포($f_{y,a,v,k}$)를 이용하였으며 차량 v 의 y 연도의 연식 값과 실패 기울기, 특성서비스 수명 값을 이용하여 추정하였다. 추정한 수정 웨이블 분포를 이용하여 폐차확률산식을 도출할 수 있다. 승용, 승합, 화물차의 연도별 차량등록대수 자료를 기반으로 폐차확률을 계산하여 특성 서비스 수명(γ)과 실패기울기(δ)를 결정하고 이를 바탕으로 부록 식(1-12)를 이용하여 연식별 폐차확률과 누적폐차확률을 도출한다.

$$f_{y,a,v,k} = \exp\left(-\left(\frac{A_{v,y} + \delta_v}{\gamma_v}\right)^{\delta_v}\right) \quad \text{부록 식(1-12)}$$

$$v = -\frac{f_{a,v,k}}{f_{a-1,v,k}}$$

UNICON-수송모형은 입력 파라미터 값을 변화시켜 탄소세, 기술변화, 연료가격 변화 관점에서 정책시나리오 분석 수행이 가능하다. 탄소세의 경우 탄소세를 부과할 경우 각 연료별 배출계수에 따라 연료가격이 증가하는 형태로 모형 내에 반영된다. 기술변화는 친환경 자동차 보급 확대 및 평균 연비 개선을 모형 내에 반영할 수 있다. 수소가격 변화와 같은 연료가격의 외생적 변화를 가정한 분석 수행이 가능하다.

3) METER³³⁾

METER 모형은 선형계획법(Linear Programming) 모형으로 특정 에너지 부문에 대한 비용 최적화를 통해 개별 기술특성을 반영한 에너지 수요량과 온실가스 배출량을 분석한 모형이다. 즉 투자비용, 운영비용, 연료비용을 포함한 총비용을 최소화하면서 동시에 자동차 등록대수 수요와 주행거리를 만족하는 기술 보급량 조화를 구성하는 분석 모형이다.

METER 모형의 RES(Reference Energy System)는 에너지 기술인 승용차, 승합차, 화물차에 연료가 공급되어 최종 서비스 수요인 주행거리를 생산하는 흐름으로 구성된다. 수송도로 부문을 구성하는 기술은 용도별·차종별·연료별·기술별로 구분하여 총 84개 기술로 세분화하였다. 용도는 비사업용과 사업용 두 가지로 구분하고, 차종은 승용차, 승합차, 화물차 세 가지로 구분하며, 크기에 따라 승합차는 소형, 중대형으로, 화물차는 소형, 중형, 대형으로 세분화되어 있고, 승용차의 경우 차급에 따른 구분은 하지 않았다. 연료는 휘발유, 경유, LPG, CNG,

33) 숙명여자대학교(2023.12); 여영준, 안영환(2024)을 참고하여 작성함.

전기, 수소 총 여섯 가지로 구분하였으며, 기술은 내연기관, 하이브리드, 프로그인 하이브리드, CNG차, 전기차, 수소차로 구분하였다.

목적함수는 모델링 기간(2020~2050년) 동안의 총비용 최소화이며, 총비용은 연간화된 투자비용($AIC_{t,y}$), 운영비용($AFOC_{t,y}$), 연료비용($AFC_{t,y}$)을 더한 비용이다(부록 식 1-13 참조).

$$Total\ Cost = \sum_{t,y} (AIC_{t,y} + AFOC_{t,y} + AFC_{t,y}) \quad \text{부록 식(1-13)}$$

연간화 비용을 추정하는 과정에서 투자비용은 연초에 발생한다고 가정하여 DFV 를 적용하고, 그 외 운영비, 연료비는 연중 발생을 가정하여 DFO 를 적용하였다. 또한 투자비용은 자본회수 계수(CRF)를 적용하여 투자비용을 연간화하여 모델링 연도 마지막에 가까워질수록 비용최소화를 위한 신규투자를 최소화하는 마감효과를 예방하였다. 부록 식(1-14)는 연간화 투자비용 추정식으로 $IC_{t,y}$ 는 에너지기술 t 에 대한 y 연도 단위당 투자비용이고, $IV_{t,y}$ 는 에너지기술 t 에 대한 y 연도 신규투자 규모이다.

$$AIC = \sum_{t,y} (IC_{t,y} \times IV_{t,y} \times CRF \times DFV_{t,y}) \quad \text{부록 식(1-14)}$$

신차의 투자비용 5%를 운영비용으로 가정하고 폐차될 때 까지 매년 지불하는 것으로 가정하였다. 부록 식(1-15)는 운영비용 추정식으로 $SR_{t,y}$ 는 생존확률 분포이다. 자동차 생존확률은 부록 식(1-16)과 같이 추정하며, 신규차량의 수명을 자동차 등록대수의 분포를 추정하여 사용하고, 분포는 웨이블 분포를 따르는 것으로 가정하였다.

$$AFOC = \sum_{t,y} \left(\sum_{k=y} (IC_{t,y} \times DFO_{t,y} \times SR_{t,k-y+1}) \times 0.05 \times IC_{t,y} \right) \quad \text{부록 식(1-15)}$$

$$SR_{t,py+y} = \exp\left(-\left(\frac{py+y}{\gamma}\right)^\beta\right) \quad \text{부록 식(1-16)}$$

연료비용은 해당연도의 기술별 연비($SOT_{t,y}$), 주행거리($MDDO_{t,k-y+1+py}$), 연료비($fpte_{t,k}$)에 의해 결정되며 주행거리와 연료가격은 매해 변화하는 값을 반영하였다(부록 식 1-17 참조). 연비는 신규차량이 도입된 해의 값이 수명을 다할 때까지 유지하는 것으로 가정하였다.

$$AFC = \sum_{t,y} \left(\sum_{k=y} (SOT_{t,y} \times MDDO_{t,k-y+1+py} \times SR_{t,k-y+1} \times fpte_{t,k}) \right) \times IV_{t,y} \quad \text{부록 식(1-17)}$$

서비스 수요를 유지하면서 비용최소화 문제를 풀기 위하여 에너지 서비스 총량 제약을 제약식으로 적용하였다. 시나리오 분석에 앞서 서비스 수용(자동차 등록대수, 주행거리)나 차량 기술별 투자비용, 연비 등의 기본 전제조건을 가정하였다. 자동차 등록대수는 용도별·차종별·연료별로 분류하여 로그선형함수를 통해 전망하였다. 입력자료로는 국토교통부의 연료별 등록현황 자료와 통계청 장래 인구 및 가구 추계 데이터를 활용하였다. 주행거리는 용도별·차종별·연료별로 분류된 해당 주행거리 실적과 주요 설명변수(GDP, 등록대수)와의 상관관계에 따른 회귀분석 통해 전망하였다. 연비의 경우 미국 NREL의 Mid, Advanced 시나리오 활용하여 반영하였다.

METER 모형은 수요관리 강화, 친환경자동차 전환 등의 전제조건을 반영하여 정책 시나리오 개발하였다. 수요관리 강화 시나리오의 경우 승용차 통행량 15% 감축을 예상하여 이에 따른 주행거리 감소를 모형에 반영 후 분석하였다. 또한 바이오 디젤 함유량 증가의 경우 이에 따른 배출계수를 조정하여 분석하였다. 친환경차 전환 시나리오는 내연기관차의 퇴출 시점을 모형에서 제약년으로 설정하여 분석하였다.

4) 랜덤계수 이산선택모형(BLP)

랜덤계수 이산선택모형을 이용한 국내 연구로는 오인하(2011)가 있다. 오인하(2011)는 차 시장의 효용함수 복원을 위하여 Berry, Levinsohn and Pakes(1995)에서 제시한 랜덤계수 이산선택모형(이하, BLP)을 사용하였다. BLP는 수요와 공급 측면 모두 고려하며 과거의 관측된 데이터만을 사용하여 효용함수를 복원하기 때문에 현실적이며, 설문조사 등을 수행하지 않아도 되기 때문에 자료확보가 용이하다는 장점이 있다. 소비자 취향의 이질성을 고려, 가격의 내생성 및 관측되지 않는 품질특성 고려, 현실적인 가격 수요탄력성 도출, 인구통계학 데이터 사용, 과점적 시장 고려 또한 BLP의 장점이다.³⁴⁾

BLP는 제품 j 를 구입함으로써 제품의 품질특성으로부터 소비자 i 가 얻는 효용은 선형효용 함수라는 가정하에 부록 식(1-18)과 같이 도출할 수 있다.

$$u_{ij} = x_j\beta + \xi_j - \alpha_i p_j + \sum_k \sigma_k x_{jk} \nu_{ik} + \epsilon_{ij} \quad \text{부록 식(1-18)}$$

x 는 관찰된 제품 특성이며, p 는 가격, ξ 는 브랜드, 광고효과, 평판 등 소비자와 생산자는 인지하나 연구자는 관측할 수 없는 특성으로 평균은 0이다. ϵ 은 오차항으로 이중지수분포를 가정하였고, k 는 k 번째 제품 특성, σ 는 소비자 취향 분산, α 는 가격 민감도이며 소비자 소득 수준에 반비례한다고 가정하였고, ν 는 소비자 취향 분포로 정규분포를 따른다고 가정한다.

34) 오인하(2011), p.9. 재인용.

개인 취향의 이질성은 $\sum_k \sigma_k x_{jk} \nu_{ik}$ 부분을 통해 고려하게 된다. 평균효용은 부록 식(2-18)에서 개인 취향의 이질성 및 오차항을 제거한 $\delta_j = x_j \bar{\beta} - \alpha p_j + \xi_j$ 로 나타낼 수 있고, 개인 취향의 이질성과 오차항은 평균효용의 편차($\mu_{ij} = \sum_k \sigma_k x_{jk} \nu_{ik} + \epsilon_{ij}$)로 나타낼 수 있다.

BLP는 로짓 모형을 사용하여 제품 j 가 소비되는 확률을 해당 제품이 소비자에게 가장 큰 효용을 주는 확률과 같다고 판단하여 효용 수준의 대리변수로서 제품 j 의 시장점유율 s_j (부록 식 1-19 참조)를 사용하였다. 오차항이 이중지수분포를 따르므로 점유율과 효용과의 관계는 로짓모형에 의해 부록 식(1-20)과 같이 정리된다. s_0 는 시장 바깥의 점유율, 즉 다른 재화를 선택하는 비율을 뜻한다. BLP를 적용한 다른 연구인 김대욱, 김종호(2015)에서는 잠재적인 자동차 수요로서 연도별 운전면허 소지자 수에서 연도별 전체 자동차 판매대수가 해당 연도의 운전면허 소지자 수에서 차지하는 비율로 정의했다.

$$s_j(\nu_i, \delta, p, x, \theta) = \frac{\exp(\delta_j + \mu(x_j, p_j, \nu_i, \theta))}{1 + \sum_{j=1}^J \exp(\delta_j + \mu(x_j, p_j, \nu_i, \theta))} \quad \text{부록 식(1-19)}$$

$$\ln\left(\frac{s_j}{s_0}\right) = x_j \beta - \alpha_i p_j + \xi_j + \mu_{ij} \quad \text{부록 식(1-20)}$$

생산함수는 과점시장을 가정하여 부록 식(1-21)과 같이 나타낼 수 있다. mc 는 한계비용이고, w 는 관찰된 제품특성, ω 는 관찰되지 않은 제품특성, γ 는 추정해야 할 파라미터이다.

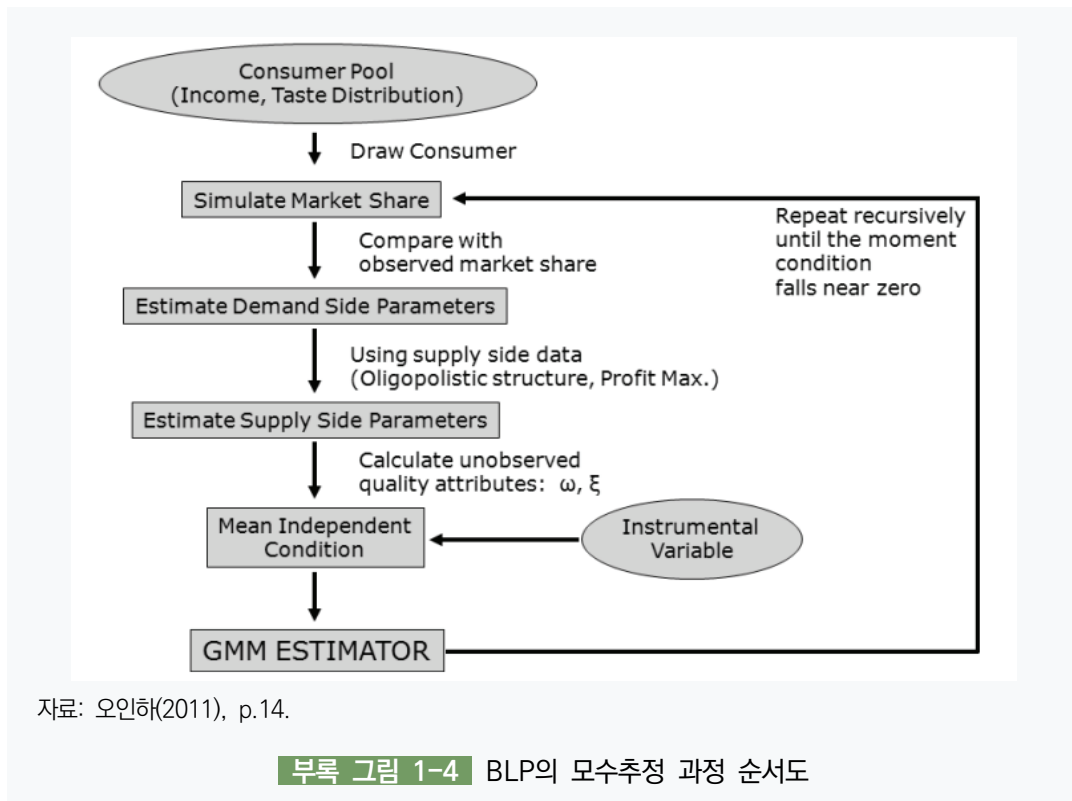
$$\ln(mc_j) = w_j \gamma + \omega_j \quad \text{부록 식(1-21)}$$

부록 식(1-20)과 부록 식(1-21)을 이용하여 부록 식(1-22)과 같은 기업이윤식을 도출할 수 있으며 여기서 M 은 전체 시장 크기(전체 가구 수)이다.

$$\Pi_f = \sum_{j \in J_f} (p_j - mc_j) M s_j(p, x, \xi, \theta) \quad \text{부록 식(1-22)}$$

p_j 로 미분하여 이윤극대화 조건(일계조건)을 구하면 부록 식(1-23)과 같다.

$$s_j(p, x, \xi; \theta) + \sum_{r \in J_f} (p_r - mc_r) \frac{\partial s_r(p, x, \xi; \theta)}{\partial p_j} = 0 \quad \text{부록 식(1-23)}$$



i 과 j 가 같은 회사에서 나온 경우 $-\frac{\partial s_r(p, x, \xi; \theta)}{\partial p_j}$ 가 0이 아니게 되어 가격에서 한계비용을 뺀 마진 $b(p, x, \xi; \theta)$ 를 점유율과 점유율을 비용으로 미분한 값의 역수를 곱하여 도출할 수 있다. 즉 시장점유율을 알면 가격과 마진 그리고 한계비용까지 알 수 있게 된다.

파라미터 추정 과정에서 관측되지 않는 특성 ξ 와 ω 는 가격, 시장점유율과 상관관계가 있는 내생성 문제가 있어, 이를 해결하기 위해 ξ 와 ω 와는 상관관계가 없으나 가격 및 시장점유율과는 상관관계가 있는 도구변수를 사용한다. 관찰된 제품의 품질특성, 기업에서 나온 타 제품들의 동일 품질특성의 합, 타 기업에서 나온 제품들의 동일 품질특성의 합, 즉 기업의 경쟁의 강도를 도구변수로 사용하였다. 그리고 관측되지 않는 품질특성은 가격과 점유율을 제외한 제품의 특성과는 평균적으로 독립적인 관계에 있다고 가정한다. BLP를 이용한 모수 추정 과정은 다음 <부록 그림 1-4>와 같다.

5) 기타 모형

박상준, 우승국(2012)은 대표적인 상향식 온실가스 감축모형인 MESSAGE와 LEAP을 활용하여 수송부문의 온실가스 감축수단의 감축 잠재량을 분석하였다. MESSAGE 모형의 경우 상향식 최적화 방법으로 최소 비용으로 외생적 에너지 수요를 충족하는 에너지 기술을 선택하는 반면, LEAP 모형은 에너지 기술 시나리오 기반으로 에너지 수요를 전망한다. 이성원 외(2016)에서는 도로부문의 에너지 소비량을 전망하고 온실가스 배출계수를 활용하여 도로

부문의 중장기 온실가스 배출량을 예측하였다. 우선 에너지 소비량을 전망하기 위해 과거 자료를 바탕으로 성장함수와 사회경제적 변수(1인당 GDP, 자동차 구매가격, 연료비용) 변화를 적용한 Quasi-Logarithmic 함수를 통한 회귀분석으로 차종별 차량대수를 전망하고 연평균 주행거리 증감률을 곱하여 산정하였다. 장한별 외(2022)에서는 전기차와 수소차의 등록대수를 전망하기 위해 로짓 함수 기반의 시계열 모형을 활용하였다. 차종별 등록대수를 전망하기 위한 변수로 차종별 대폐 및 내구연한, 기술 전제조건, 정부 계획 등을 활용하였다.

2. 국내 선행연구

1) OECD/ITF(International Transport Forum) UPM³⁵⁾

OECD/ITF의 도시 여객수송 모형(UPM: Urban Passenger Model)은 정책과 기술 추세가 도시 교통수요, CO₂ 배출, 접근성 지표에 미치는 영향을 평가하는 전략적 도구이다. 5년 단위로 2050년까지의 전망치를 제공하고 있으며, 다양한 출처의 데이터를 통합하여 15가지 교통수단³⁶⁾을 모형화하고 있다.

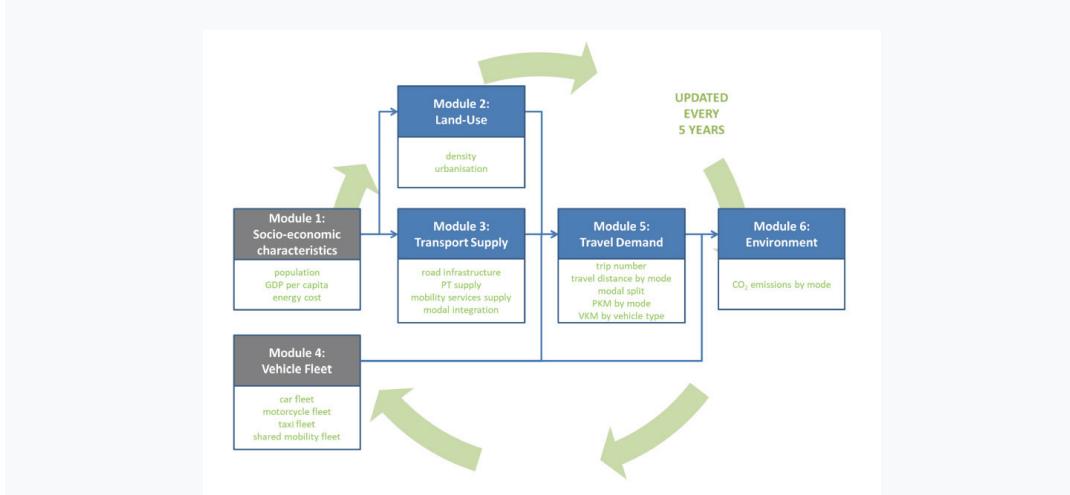
OECD-ITF는 사회경제적 특성 모듈, 토지이용 모듈, 교통공급 모듈, 차량대수 모듈, 교통수요 모듈, 환경 모듈의 총 6개 모듈로 구성되어 있으며, 이들 모듈은 상호 관련되어 있다(부록 그림 1-5 참조). 사회경제적 특성 모듈은 외부 출처로부터 인구, 1인당 GDP, 에너지 비용에 대한 데이터를 토지이용 모듈과 교통공급 모듈에 제공한다. 토지이용 모듈은 밀도 및 도시화에 대한 정보를 환경 모듈에 전달한다. 교통공급 모듈은 도로 및 대중교통 인프라 및 대중교통 요금을 전망하며 이 정보를 교통수요 모듈에 전달한다. 차량대수 모듈은 자동차, 오토바이, 택시 및 공유 모빌리티의 구성을 추정한다. 교통수요 모듈은 모드별 평균 주행거리와 여행 횟수를 추정하여 결과적으로 인-km, 대-km를 추정한다. 환경 모듈은 토지이용 모듈, 차량대수 모듈, 교통수요 모듈의 정보를 기반으로 IEA와 ICCT의 배출계수를 이용하여 연료소비와 배출량(NO_x, SO₄, PM, CO₂)을 포함한 환경적 영향을 평가한다.

OECD-ITF의 주요 모듈인 차량대수 모듈과 교통수요 모듈을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 차량대수 모듈은 전체 차량 소유율, 차량 수송률(load factor), 차량 유형과 기술 구성을 전망하며, 차량 유형 및 기술 구성에 대한 가정은 IEA의 MoMo 시나리오에 기반하여 설정한다. 인구 천 명당 자동차 수로 나타내는 자동차 소유율은 부록 식(1-24)와 같이 1인당 GDP 및 도시화율을 고려한 시그모이드 로지스틱 함수(sigmoid logistic function)를 기반

35) OECD/ITF(2020)을 참조함.

36) 개인 교통수단: 자가용, 오토바이, 택시, 도보, 자전거 5개 종류, 대중교통 수단: 3륜차, 버스, BRT, 철도 4개 종류, 공유 교통수단: 공유 자전거, 공유 스쿠터, 택시-버스, 카풀, 카셰어링, 오토바이셰어링 6개 종류.

으로 추정한다³⁷⁾. s^{wt} 은 지역별(wt) 포화 자동차 밀도값이고, α_{urb} 는 도시화 파라미터를 뜻한다. $GDPcap$ 은 1인당 GDP를 뜻하며, α_{grad}^{GDPcap} 은 1인당 GDP 임계값에 따른 기울기 파라미터, μ^{GDPcap} 은 1인당 GDP 임계값에 따른 평균 로지스틱 파라미터이다.



자료: OECD/ITF(2020), p.11.

부록 그림 1-5 OECD ITF 모형 구조도

$$Car\ Ownership_t = 0.75 Car\ Ownership_{t-1} + 0.25 \frac{s^{ur} + \exp(\alpha_{urb} urbanisation)}{1 + \exp(-\alpha_{grad}^{GDPcap} (GDPcap - \mu^{GDPcap}))} \quad \text{부록 식(1-24)}$$

교통수요 모듈은 모드별 평균 주행거리와 인-km, 대-km를 추정한다. 교통수요 모듈의 하위 모듈인 여행생성 모듈은 인구당 일일 여행 횟수(daily number of trip, T_i)를 1인당 GDP 및 기타 사회적 요인을 기반으로 부록 식(1-25)와 같이 추정한다³⁸⁾. α_{TR} 과 $\alpha_{GDP,TR}$ 은 여행생성함수의 고정 파라미터이고, α_{driver} 와 α_{fuel} 은 자율주행 및 전기차 발전 등에 따라 변화하는 운전자 및 연료 요인이다. $GDPcap$ 은 전망연도의 1인당 GDP 전망치이며, γ_{tw} 는 원격근무 가설을 기반으로 원격근무가 여행 횟수를 줄이는 효과를 반영하는 파라미터로 문헌의 값을 사용하였다.

$$T_i = \gamma_{tw} (\alpha_{TR} (1 + 0.05\alpha_{drive,i} + 0.1\alpha_{fuel,i})^{1.25} + 2.25\alpha_{GDP,TR} \frac{GDPcap}{1,000}) \quad \text{부록 식(1-25)}$$

교통수요 하위 모듈인 주행거리 모듈은 각 모드별 평균 주행거리($dist_{im}$)를 예측한다. 이는 도시의 평균 반경과 여행의 평균 길이(length)를 기반으로 추정하며, 여러 여행 설문조사에서

37) OECD/ITF(2020), p.13.

38) OECD/ITF(2020), p.14.

수집된 데이터를 이용하여 보정되었다. 수단 분할(modal split)은 수단별 점유율(MS_{im})을 제공한다. 교차 중첩 로짓 모형(cross-nested logit model)을 사용하여 수단 선택을 모형화 하며, 이는 공유 수단과 대중교통 수단 간의 상호작용을 반영한다. 각 수단의 효용함수에는 사회경제적 변수, 토지이용 변수, 대중교통 제공 파라미터, 차량 소유율, 에너지 가격, 대중 교통 요금 등이 포함된다.

교통수요 하위 모듈인 여행거리 모듈은 각 수단별 인-km(PKm_{im})를 예측한다. 이는 각 수단별 평균 주행거리($dist_{im}$), 여행 횟수(T_i), 수단별 점유율(MS_{im}), 인구(POP_i) 및 전 세계 평균 연간 근무일수를 반영한 고정계수(310)를 반영하여 부록 식(1-26)과 같이 계산된다.³⁹⁾ 대-km는 차량대수 모듈을 통해 얻은 각 국가 또는 지역별 차량 수송률(load factor)를 이용하여 추정한다.

$$PKm_{im} = 310 \times dist_{im} \times T_i \times MS_{im} \times POP_i \quad \text{부록 식(1-26)}$$

OECD-ITF 모형은 수단별 차별화된 도로요금을 부과하는 혼합요금제, 대중교통 개선에 따른 대중교통 공급량 증가, 교통 관리에 따른 도로기반 대중교통 빈도/속도 증가, 공유차 대체 비용 감소에 따른 카셰어링 인센티브, 저공해차량 인센티브, 전기차와 같은 정책 시나리오 구성이 가능하다.⁴⁰⁾

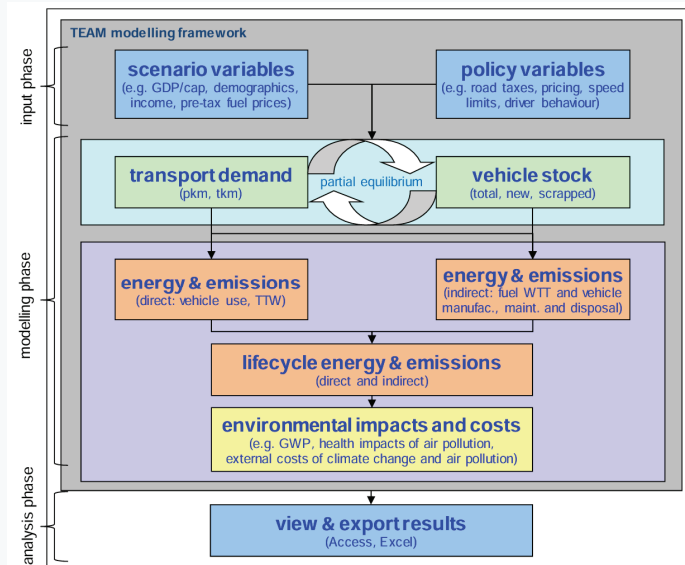
2) UK TEAM(Transport Energy Air pollution Model)⁴¹⁾

UK TEAM은 수송, 에너지, 배출, 환경영향 등을 종합적으로 다루는 시스템 모형으로 교통 수요, 자동차 스톡(차종 선택), 배출, 생애 전 주기 및 환경적 영향 모형의 네 가지 모듈로 구성되어 있다(부록 그림 1-6 참조). 교통수요 모듈은 시뮬레이션 접근 방식(여객)과 계량경제 모형(화물, 국제항공)을 이용하여 2100년까지의 주행 목적, 거리, 수단에 따른 교통수요와 수단별 점유율을 전망한다. 교통수요 예측은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 첫 번째 단계에서 시나리오 변수(인구, 소득, 연료가격 등)을 기반으로 총 여객 및 화물수송 수요를 계산하고, 이를 바탕으로 두 번째 단계에서 각 수단별 소유 및 운영비용의 상대적 변화를 기반으로 수단 분할을 계산한다. 공급비용의 상대적 변화는 교통량의 상대적 변화를 가져오게 된다. 세 번째 단계는 앞선 두 단계에서의 결과를 종합하여 내부 일관성을 확인하고 최종적으로 각 수요 세그먼트에 대한 수단 점유율을 추정한다.

39) OECD/ITF(2020), p.14.
 40) 이정은, 신동원(2023), pp.21-22.
 41) Christian et al.(2019)을 참조함.

여객수송은 수단,⁴²⁾ 주행 구간,⁴³⁾ 주행 목적,⁴⁴⁾ 거리 범위⁴⁵⁾에 따라 수요를 구분할 수 있다. 기준 시나리오는 여행 패턴에 변화가 없음을 기반으로 시뮬레이션한다. 교통수요를 결정하기 위해 필요한 파라미터는 각 수요 세그먼트에 대한 소득탄력성과 인구성장 탄력성, 주행 빈도, 평균 주행거리 및 주행 길이에 따른 수단 전환(modal shift)에 대한 값, 교통수요 공간(도심, 비도심, 고속도로), 차량 유형별(자동차, 버스, 오토바이, 비행기 및 트럭) 평균 주행길이에 대한 연간 값, 교통수요의 비용탄력성이다.

차량재고 모형은 차량 유형별, 크기별, 기술별, 차령별 차량대수 정보와 주행거리를 차량 유형별, 크기별, 기술별, 차령별로 세분화한 값을 제공한다. 차량재고 모형은 정책효과로 인한 차량 구성 변화를 관측할 수 있다. 차량재고 모형은 교통수요 모형에서 계산된 인-km와 톤-km를 대-km로 변환하고 이 값을 이용하여 총 필요 차량대수를 계산한다. 실패 기율기와 특성수명 정보를 이용한 수정 웨이블 분포를 기반으로 폐차확률함수를 추정하고 추정된 함수를 이용하여 폐차되는 총 차량수를 계산한다. 이를 통해 필요한 신규 차량 대수를 추정할 수 있다. 폐차확률함수는 앞서 살펴본 UNICON-수송 모형과 동일한 구조를 사용하였다(부록 식 1-12 참조).



자료: Christian et al.(2019), p.13.

부록 그림 1-6 UK TEAM 모형 구조도

- 42) 도보, 자전거, 자동차 운전자, 자동차 승객, 오토바이, 버스, 우등버스, 철도 및 지하철, 택시, 국내항공, 기타 공공수단 등.
- 43) 도심, 비도심, 고속도로 등.
- 44) 통근, 비즈니스, 장거리 여가, 근거리 여가, 교육, 쇼핑, 기타 등.
- 45) 1마일 이하, 1~2마일, 2~5마일, 5~10마일, 10~25마일, 25~50마일, 50~100마일, 100마일 이상 등.

기술비용 및 정책변수를 기반으로 각 기술별 차량 운행 비용을 추정하여 신규 차량을 크기 및 소비자 세그먼트별로 세분화한 후 이를 다시 기술별로 세분화한다. 대-km를 기술별로 세분화하고 세분화된 차량 수와 대-km 정보를 기반으로 차량 유형별 평균비용을 계산하는 형태로 추정된다. 신규차량 구입과 관련한 기술선택 문제는 Multinomial 로짓 모델을 이용하여 각 소비자 세그먼트별 파워트레인의 시장점유율을 추정하였다. 차량 특성[비용, 급유/충전 접근성 및 시간, 모델(브랜드), 기술 선호도 등], 급유 인프라, 정책 인센티브·규제·기준, 사회경제적 요소 및 인구통계적 요소 그리고 소비자의 기술 선호를 반영한 WTP를 반영하여 파워트레인의 시장점유율을 추정한다. 부록 식(1-27)은 개인 구매자(private buyer)의 차량 선택 효용함수와 시장점유율이며, $Attribute_{i,j}$ 는 차량특성 정보이고, ASC_i 는 기술선호도이다. 밴과 트럭은 부록 식(1-27) 효용함수에서 ASC_i 항을 제외하고 개인 구매자 차량선택 효용함수가 구성된다. 기타 차량 유형(오토바이, 버스, 트레인, 항공 등)은 UNICON-수송 모형의 수단선택 모듈식(부록 식 1-7)과 같은 형태의 기술선택 확률함수를 이용하였다.

$$U_i = \sum_j \beta_j \times Attribute_{i,j} + ASC_i \quad \text{부록 식(1-27)}$$

$$Market\ share_i = \frac{\exp(U_i)}{\sum_k \exp(U_k)}$$

배출 모형은 연료 및 에너지 사용량과 속도-배출 곡선과 속도 프로필을 사용하여 도로 유형별, 차량 유형별 배출을 모형화한다. 생애 전 주기 및 환경적 영향 모형은 에너지 사용 및 배출을 수명 전 주기를 기반으로 인프라, 발전믹스, 사고 비용, 인구밀도 등의 변수를 포함하여 시뮬레이션 분석을 수행한다.

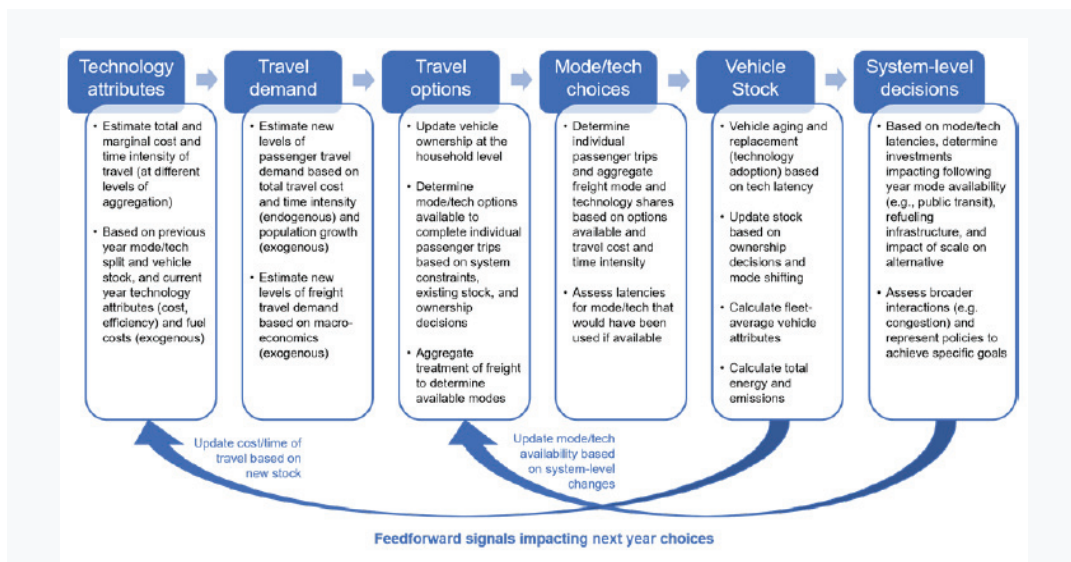
3) NREL TEMPO(Transport Energy and Mobility Pathway Option) model⁴⁶⁾

미국 국립재생에너지연구소(NREL: National Renewable Energy Laboratory)의 TEMPO 모형은 교통수요와 에너지 사용, 배출 시나리오를 장기적으로 예측하기 위한 종합적인 통합 교통에너지 모형이다. 새로운 기술과 비즈니스 모델, 정책의 영향을 분석하는 것을 목적으로 설계되었다. TEMPO 모형은 통합 프레임워크 내에서 여러 상향식 기술 모형의 기능을 연계하여 가구 유형별(소/대규모, 소득수준, 도시/농촌) 여행 수요, 차량 소유, 기술 속성 및 소비자 선호도에 따른 수단 및 기술선택을 수행하며, 내생적 표본 외 예측을 통해 새로운 추세를 추정하고 기술혁신과 사회경제적 영향을 포착한다.

46) Muratori et al.(2021)을 참조함.

TEMPO는 여객과 화물을 포함한 전체 수송부문을 포괄하며 기존 기술 및 신기술에 대한 분석을 2050년까지 수행하는 모형이다. 카운티별 데이터(가구·인구 통계, 연료비용, 인프라 가용성 등)를 입력하는 카운티 단위로 해상도를 높여 분석이 가능하며, 시간 단위로 에너지 수요를 추정한다.

TEMPO는 ① 기술별 특성 모듈, ② 교통수요 모듈, ③ 교통옵션 모듈, ④ 수단/기술선택 모듈, ⑤ 차량재고 모듈, ⑥ 시스템 레벨 결정 모듈의 흐름을 지닌다. 기술별 특성 모듈은 직전년 수단/기술 구성과 차량 재고, 현재 연도 기술특성(비용, 효율)과 외생적으로 고려되는 연료비용을 기반으로 총비용, 한계비용, 여행의 시간집약도 등을 추정한다. 교통수요 모듈은 여객수요의 경우 기술별 특성 모듈에서 추정된 총 여행비용과 시간집약도와 외생적으로 고려되는 인구성장을 고려하여 추정하고, 화물수요는 외생적으로 고려되는 거시경제 요소에 의해 추정한다. 교통옵션 모듈은 각 가계 수준에서 차량 소유에 대한 값을 업데이트하는데, 이는 제도적 제약, 차량 재고, 소유 결정 등을 바탕으로 개별 승객의 여행을 종합하여 가능한 수단과 옵션을 결정한다. 수단/기술선택 모듈은 가능한 옵션과 여행비용 그리고 시간집약도를 바탕으로 수단과 기술의 점유율을 결정한다. 차량재고 모듈은 앞서 추정한 소유 결정과 수단 대체를 바탕으로 차량 재고를 업데이트한다. 차량재고 모듈에서는 차량 유형별 평균 차량 속성(연비, 배출계수)과 총에너지 사용량 및 배출량을 계산한다. 마지막으로 시스템 수준의 결정 모듈은 수단/기술 지연(latency)을 바탕으로 다음 해 수단의 가용성, 연료공급 인프라, 대체수단 규모 영향 등 투자 영향에 대한 결정을 내리고, 목표를 달성하기 위한 정책수단을 제시한다.



자료: Muratori et al.(2021), p.14.

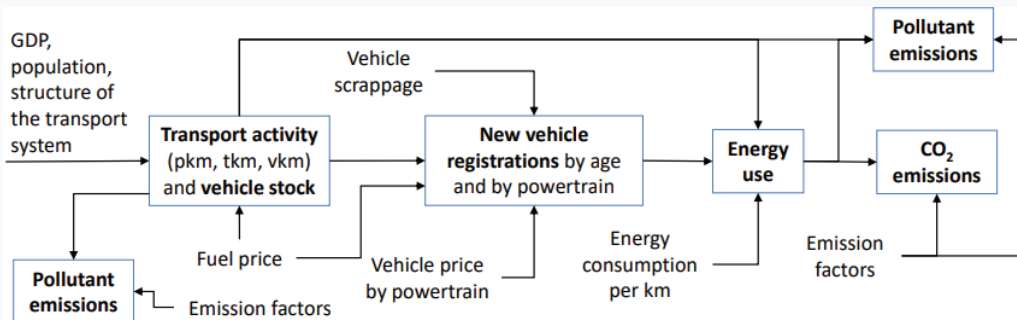
부록 그림 1-7 NREL TEMPO 흐름도

4) IEA MoMo(Mobility Model)⁴⁷⁾

IEA MoMo는 스프레드시트 형태의 글로벌 수송 모형으로 차량, 수송 활동과 에너지 사용에 초점을 맞추고 있다. 더불어 배출량과 수송 인프라, 자재 사용에 대한 분석을 포함하고 있다. 2060년까지 백캐스팅과 가정(what-if)에 기반한 시나리오 및 전망 분석 결과를 제시한다. 지역 구분은 사우디아라비아를 제외한 모든 G20 국가를 포함하여 29개 지역으로 구분하고 있다.

MoMo는 앞서 설명한 권오상 외(2018)와 같이 ASIF 구조를 지니고 있다. 계산은 라스페이어 아이덴티티를 기반으로 하며, 이는 부록 식(1-28)과 같다. F 는 총 연료 사용량이고, A 는 차량 활동량으로 주행거리로 표시된다. 하첨자 i 는 차량 유형(서비스, 수단, 파워트레인별 세그먼트 등)을 나타내며, S_i 는 부문별 구조, I_i 는 vkm당 연료소비량을 나타낸다.

$$F = \sum_i F_i = A \sum_i \left(\frac{A_i}{A}\right) \left(\frac{F_i}{A_i}\right) = A \sum_i S_i I_i = F \quad \text{부록 식(1-28)}$$



자료: Teter(2018), p.14.

부록 그림 1-8 IEA MoMo 모형 구조도

MoMo는 GDP, 인구, 운송시스템 구조, 연료가격을 기반으로 주행거리와 차량재고를 계산하고, 주행거리, 차량재고 및 차량폐차 정보와 차량가격 정보를 기반으로 유형별·차령별 신차 등록대수 정보를 도출한다. 이렇게 도출한 정보와 연비 정보를 기반으로 에너지 사용량을 추정하고 배출계수를 적용하여 온실가스 및 대기오염물질 배출량을 추정하는 구조를 지니고 있다. MoMo는 파리협정 목표 달성을 위한 각 수단별 감축량과 감축수단을 제시하고 있다.

47) Teter(2018)을 참조함.

5) PNNL GCAM(Global Change Assessment Model)⁴⁸⁾

GCAM은 PNNL에 의해 개발된 글로벌 시장균형 모형으로 1990년에서 2100년까지를 5년 단위로 구동하는 모형이다. GCAM은 자원 생산, 에너지 전환, 최종 에너지 캐리어 그리고 최종사용단(end-use)로 크게 구분할 수 있는데, 최종수요단은 건물부문, 산업부문 그리고 수송부문으로 구성되어 있다. GCAM의 수송 모듈은 여객과 화물로 구분되며, 이는 자동차, 이륜차, 버스 등 하위 수단으로 세분화된다. GCAM의 교통서비스 여객 수요는 부록 식(1-29)를 통해 추정된다. r 은 지역이고, t 는 미래 시점, σ 는 기준연도의 Calibration 파라미터, Y 는 1인당 GDP, P 는 총 교통수단 이용 비용, N 는 인구이다. α 는 소득탄력성, β 는 가격탄력성을 뜻한다.

$$D_P^{r,t} = \sigma^r (Y_I^{r,t})^\alpha (P_I^{r,t})^\beta (N_I^{r,t}) \quad \text{부록 식(1-29)}$$

각 수단의 시장점유율은 부록 식(1-30)의 Calibration 로짓 모형을 이용하여 추정된다. S 는 시장점유율이고, SW 는 비중가중치, P 는 수단 i 의 교통수단 이용 비용, λ 는 로짓 지수이다. SW 는 Calibration 파라미터이고, 로짓 지수는 미래의 가격변화가 수단 전환에 얼마나 영향을 주는지를 나타내는 파라미터이다.

$$S^{i,r,t} = \frac{(SW^{i,r})(P^{i,r,t})^{\lambda_i}}{\sum_i (SW^{i,r})(P^{i,r,t})^{\lambda_i}} \quad \text{부록 식(1-30)}$$

GCAM 수송 모듈은 교통 에너지 수요 및 배출량을 추정하고 이를 개선하기 위한 교통 정책 수단을 제시한다.

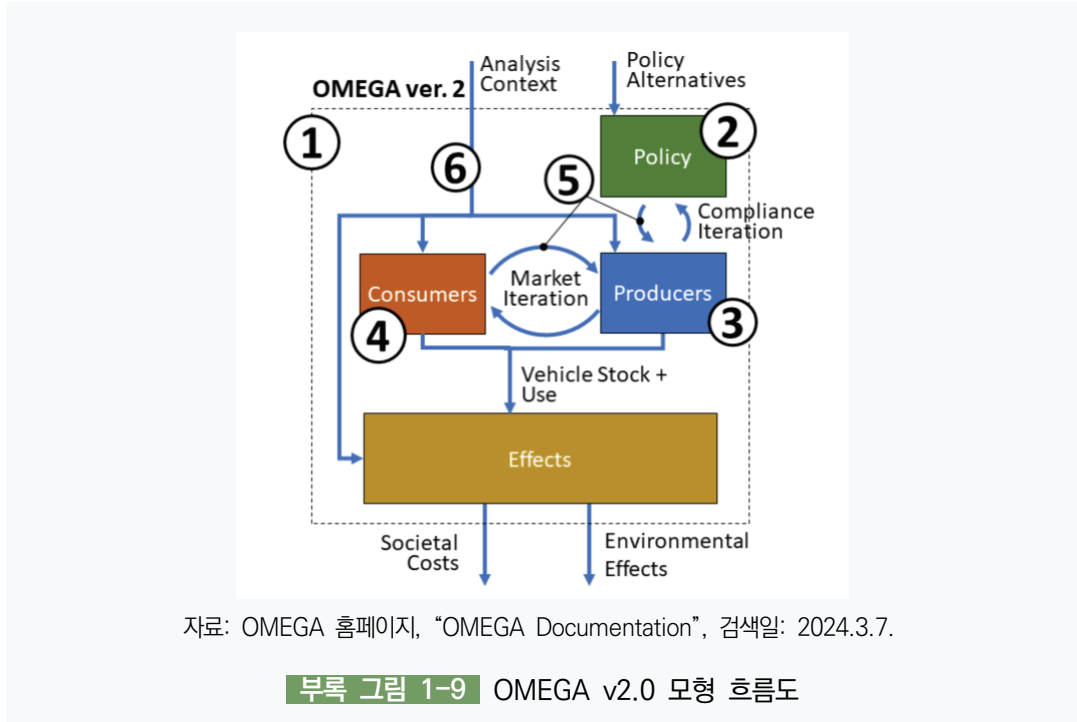
6) US EPA OMEGA⁴⁹⁾

US EPA에서는 최적화 모형인 OMEGA(Optimization Model for reducing Emissions of Greenhouse Gases from Automobiles)를 활용하여 자동차의 온실가스 배출을 전망한다. 이 모형은 수송부문의 대표 정책인 자동차 연비 및 온실가스 배출 규제 프로그램의 효과를 분석하는 데 주로 활용된다. 목적함수로서 생산자, 소비자 및 정책 요구 사항을 충족시키는 동시에 생산자의 비용을 최소화하는 해를 구한다. 모형은 크게 생산자 모듈과 소비자 모듈, 정책 모듈과 효과분석 모듈로 구성된다. 우선 생산자 모듈에서는 소비자의 수요를 고려하면서

48) Mishra et al.(2013)을 참조함.

49) US EPA 홈페이지, "OMEGA Documentation", "Optimization Model for reducing Emissions of Greenhouse Gases from Automobiles (OMEGA)", 검색일: 2024.3.7.

정책을 준수하여 차량 설계 및 공급을 결정한다. 소비자 모듈은 차량 가격, 소유 비용 등 차량 특성 변화에 대응하여 차량 판매 및 소유, 사용에 대한 수요를 예측한다. 정책 모듈은 생산자가 보유할 수 있는 신차 기술에 대한 규정 등을 결정하며, 마지막으로 효과 모듈에서는 생산자, 소비자 및 정책 모델링으로 인한 환경적, 비용 효과를 예측한다.



자료: OMEGA 홈페이지, “OMEGA Documentation”, 검색일: 2024.3.7.

부록 그림 1-9 OMEGA v2.0 모형 흐름도

Development of an Integrated Modeling Framework for Assessing Climate and Air Quality (II)

Chang, Hoon et al.

1. Model Development

1.1 Transportation Model

PanelA bottom-up model for the transportation sector was developed with a focus on passenger cars and freight vehicles. The framework was designed based on an in-depth analysis of the structure and key features of major bottom-up models from Korea and abroad. The transportation model comprises four main modules:

- ① Estimating vehicle demand (total vehicles and mileage) using vehicle registration data, population, and GDP projections.
- ② Determining new vehicle sales and retirements through vehicle survival probability.
- ③ Optimizing new vehicle selection based on a cost-minimization function that considers purchase costs, operating costs, and fuel expenses.
- ④ Projecting energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions based on the resulting vehicle stock.

The initial model was constructed using data on vehicle registration, mileage, technology, and costs. The model was applied to estimate changes in the vehicle fleet and GHG emissions for passenger and freight vehicles. For passenger cars, GHG emissions in 2030 are expected to decrease by approximately 24% compared to 2019, assuming a relatively low adoption rate of eco-friendly vehicles. Under the 2050 Carbon Neutrality Scenario (Scenario B), improvements in the fuel efficiency and cost reduction of electric and hydrogen vehicles result in a 91% reduction in emissions by 2050 compared to 2019.

For freight vehicles, small trucks are expected to transition largely to electric vehicles, while medium- and heavy-duty trucks shift to hydrogen-powered options, reducing emissions by approximately 72% by 2050 compared to 2019. The policy scenario analysis underscores that transitioning to eco-friendly vehicles is essential for achieving carbon neutrality in the transportation sector.

1.2 Climate Change Impact Module

A module was developed to assess the impacts of climate change, such as changes in temperature and precipitation, on health and energy consumption. Preliminary research was conducted to review prior studies and derive methodologies and data requirements for module development. Using econometric techniques, temperature response functions were developed to demonstrate the effects of temperature changes on health and electricity consumption.

The results revealed that both health and energy sectors are highly sensitive to temperature variations, following a U-shaped temperature response curve. In the health sector, mortality rates increase more significantly due to cold waves than heat waves. In the energy sector, residential electricity usage spikes in summer, while commercial electricity usage increases at similar rates in both summer and winter. Temporal changes (early vs. late periods) in response patterns were more pronounced than spatial differences (urban vs. rural areas).

These temperature response functions are expected to serve as foundational data for analyzing climate change impacts in future module developments. Based on the results from 2024, future research in 2025 will integrate climate change scenarios to analyze changes in mortality and electricity consumption and develop a systematic framework.

2. Model Enhancement and Integration

2.1 Top-Down Model

The top-down model (KICAT-UNICON-CGE) was improved to enable integration with atmospheric and bottom-up models. Following a one-way soft-link approach, widely adopted in previous studies, the integration preserves the unique features of individual models while enabling scenario analysis. The top-down model was enhanced by expanding the power generation sector to include ten technologies, previously limited to five, and by aligning sectoral classifications with the CAPSS database for compatibility with air dispersion models. Additionally, the model's data structure was updated using the 2019 input-output table, energy balance, and GHG emissions data.

Enhancements also included developing additional modules for CCS and hydrogen industries. CCS technology data were restructured using the Cooperative Patent Classification (CPC Y-Code) framework, while hydrogen production was categorized into green, by-product, and reforming hydrogen technologies.

2.2 Power Model

The UNICON-K-Power model simulates cost-optimal technology investment pathways to achieve long-term GHG reduction targets, providing rapid approximations using linear programming. Inputs include annual power demand, hourly demand patterns, generator efficiencies, technology and fuel costs, and renewable energy utilization rates. Temporal resolution was simplified from 8,760 hours to 672 hours using K-means clustering, while accounting for marginal cost increases with renewable energy supply expansion and resource constraints.

The model was calibrated with power generation and sales data from the Korea Power Statistics Yearbook and incorporated renewable energy targets by year. To facilitate integration with the CGE model, detailed classifications for coal and LNG power technologies were consolidated, and only self-generated electricity sold by KEPCO was modeled as part of power supply.

2.3 Atmospheric Model

The atmospheric model has been developed to assess the expected emissions of air pollutants and their impacts on air quality, such as fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations, based on scenario results derived from sector-specific models. This model is primarily composed of an emissions inventory generation module and an air quality impact assessment module. The air quality impact assessment module is further bifurcated into a detailed modeling-based analysis system and a simplified atmospheric dispersion module, with the ultimate goal of establishing a dual-structured system.

Using this dual-structured system, the simplified module is intended for screening and bidirectional linkage across various scenarios, while the detailed modeling-based system will facilitate precise spatiotemporal analyses and final outcome assessments.

This year's research focused on the initial development of the emissions inventory generation module and the simplified atmospheric dispersion module, both integrated with the CGE model. Based on this framework, changes in air pollutant emissions and the resulting improvements in PM_{2.5} concentrations under different CGE-derived scenarios can be evaluated. A pilot analysis for selected scenarios was also conducted, demonstrating the potential applications of the framework.

3. Policy Scenario Design and Analysis

3.1 Scenario Composition

Two types of scenarios were analyzed. The first set focused on comparing the effects of model integration by analyzing a standalone 2035 reduction target scenario (NZ_SA) against an integrated scenario (NZ_Link), which combines the bottom-up power model (KICAT-UNICON-Power) with the top-down model (KICAT-UNICON-CGE).

The second set compared the outcomes of maintaining current policies with those of achieving the 2035 reduction targets. The scenarios included a current policy scenario (Cur_Link) and a scenario aligned with the 2035 reduction targets (NZ_Link), focusing on analyzing the economic and environmental benefits of additional GHG reductions.

3.2 Results

The comparison of the standalone (NZ_SA) and integrated scenarios (NZ_Link) revealed significant differences in power generation projections. In the integrated scenario, renewable energy generation surged, particularly offshore and onshore wind power, while coal and gas-fired generation declined, leading to reduced carbon costs. However, higher emissions were observed in high-emission industries due to the increased costs for carbon-intensive energy, although overall GHG reductions persisted.

Under the 2035 reduction target scenario, renewable energy generation increased, coal-fired generation decreased significantly, and the utilization of high-efficiency LNG improved. Additionally, the consumption of coal and petroleum products decreased, particularly in high-emission industries, despite higher carbon costs imposed by strengthened reduction targets. The analysis indicates that integrating CCS and other mitigation measures could alleviate these economic burdens.

Air quality benefits included reductions in SO_x emissions and fine particulate matter concentrations, particularly in the power and industrial sectors. However, further research is required to address the heterogeneity across emission sources and to incorporate sector-specific growth projections.

Keywords Integrated Assessment Model, Top-down Model, Bottom-up Model, KICAT

저자약력

장 훈(연구책임)

미국 Cornell University 도시 및 지역계획 박사
한국환경연구원 선임연구위원(현)
hchang@kei.re.kr

주요 연구실적

- 탄소중립 이행을 위한 글로벌 전력부문 모형 개발 (2024)
- KOICA 기후주류화 전략 및 액션플랜 수립을 위한 컨설팅 용역 (2024)

이정은

한국환경연구원 부연구위원(현)
jelee@kei.re.kr

임형우

한국환경연구원 부연구위원(현)
hwlim@kei.re.kr

최형식

한국환경연구원 부연구위원(현)
hschoi@kei.re.kr

최기철

한국환경연구원 연구위원(현)
kcchoi@kei.re.kr

김현규

한국환경연구원 부연구위원(현)
hgkim@kei.re.kr

양유경

한국환경연구원 전문연구위원(현)
ykyang@kei.re.kr

서정빈

한국환경연구원 연구위원(현)
jbseo@kei.re.kr

구윤모

서울대학교 교수(현)
yyounmo@snu.ac.kr

김만영

사단법인 히스트 부회장(현)
mannkim3803@gmail.com

고성민

서울대학교 박사과정(현)
sungmine03@snu.ac.kr

※ 본 책자는 환경표지 인증을 받은 용지로 인쇄되었습니다.



기후대기 통합평가모형 개발연구(Ⅱ)

KEI 한국환경연구원
Korea Environment Institute

(30147) 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799 www.kei.re.kr

