

# 기후환경 분야 통합 전망 모형 개발과 응용: 건물 온실가스 총량 관리 기대효과

황인창

연구위원

이윤희

연구원

서울연구원 정책리포트는 서울시민의 삶의 질을 향상하고

서울의 도시 경쟁력을 강화하기 위해 도시 전반의 다양한 정책 이슈를 발굴하여 분석함으로써  
서울시의 비전 설정과 정책 수립에 기여하고자 작성된 정책보고서입니다.

#### 제394호

기후환경 분야 통합 전망 모형 개발과 응용: 건물 온실가스 총량 관리 기대효과

발행인 오 균

편집인 이신해

발행처 서울연구원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

02-2149-1234

www.si.re.kr

ISSN 2586-484X

발행일 2024년 4월 8일

※ 이 정책리포트의 내용은 연구진의 견해로 서울특별시의 정책과 다를 수 있습니다.

## 기후환경 분야 통합 전망 모형 개발과 응용: 건물 온실가스 총량 관리 기대효과

황인창 연구위원  
02-2149-1096  
ichwang@si.re.kr

이윤혜 연구원  
02-2149-1270  
yhyi@si.re.kr

요약	3
I. 기후환경 분야 통합 전망 모형(ICE 모형)	4
II. 개별 건축물 온실가스 총량 관리 방안	10
III. ICE 모형을 통한 건물 온실가스 총량 관리 기대효과 분석	13
IV. 정책제언	19

## 요약

현대 사회 대부분의 경제활동은 하나 이상의 오염물질을 배출하는 다중 오염원이다. 최근 기후환경 분야에서는 다중 오염원의 복합영향에 대한 통합적 관리 필요성이 높아지고 있다. 이 리포트는 서울연구원이 개발한 기후환경 통합 데이터베이스와 전망 모형(ICE 모형)을 소개하고, 응용 사례로서 서울의 건물 온실가스 총량 관리 기대효과를 살펴본다. 정부와 지자체는 기후환경 분야 통합적 접근을 촉진하기 위해 통합 데이터베이스와 모형을 구축하고 통합적 의사결정을 제도화할 필요가 있다.

---

### 기후환경 분야 통합적 접근을 위한 데이터베이스와 배출량 산정 도구(ICE 모형) 개발

온실가스, 대기오염물질, 폐기물, 하수, 폐수 등 기후환경 분야의 주요 오염물질은 사회 경제 활동과 에너지소비를 매개로 하여 배출되며, 불특정 다수의 사람에게 부정적 영향을 미칠 수 있다는 점에서 상호 관련성이 높다. 이 연구에서는 분야별로 흩어져 있는 정보를 모아 하나의 통합 데이터베이스를 구축하고, 기후환경 분야 오염물질 배출량을 종합적으로 산정하고 전망할 수 있는 상향식 통합 모형(ICE 모형)을 개발하였다. ICE 모형은 인구와 경제 등 사회경제적 요소의 변화와 분야별 세부 정책의 효과를 분석하고 정책 도입에 따른 기대효과(공편익, 상쇄효과 포함)를 예측하는 데 유용하다.

### ICE 모형 활용, 건물 분야 온실가스 총량관리 방안의 기대효과를 공편익 측면에서 분석

최근 국내외 주요 지자체에서는 탄소중립 목표를 수립하고 구체적인 실행 수단을 계획하고 있다. 건물은 지자체 단위에서 탄소중립을 달성하는 데 있어 가장 중요한 분야이다. 신축 건물 에너지 성능향상과 자발적 참여 등 기존 정책만으로는 건물이 배출하거나 유발하는 온실가스를 줄이는 데 한계가 있다. 뉴욕과 도쿄에서 시행하고 있는 건물 온실가스 총량 관리의 건물 분야 탄소중립을 위한 효과적인 방안이 될 수 있다. 서울에서도 2021년부터 건물 온실가스 총량관리 시범사업을 시행하고 있는데, ICE 모형은 탄소중립과 대기오염 물질 감축을 위해 총량관리 제도를 더욱 확대해야 함을 정량적으로 보여준다.

### 기후환경 분야 통합적 의사결정 제도화 필요

국가와 지자체의 기후환경 분야 통합관리를 위해서는 기후환경 통합 데이터베이스를 구축하고 정량적 분석 도구(의사결정 지원 모형)를 개발할 필요가 있다. ICE 모형은 이러한 통합 시스템이 기후환경 분야 통합적 의사결정 과정에 유용하게 활용될 수 있음을 보여 준다. 또한 기후환경 분야의 통합적 의사결정을 촉진하기 위해서는 다양한 제도적 접근을 병행할 필요가 있다. 기후예산제를 확대 개편하여 기후환경 분야 전체를 포괄하는 녹색 예산제(green budgeting)를 도입하거나, 정부와 지자체의 행정과 사업영역(산하기관 포함)에 대한 ESG 보고서를 발간하는 것 등이 좋은 사례일 수 있다.

---

# I. 기후환경 분야 통합 전망 모형(ICE 모형)

## I 기후환경 분야 통합관리 필요성

현대 사회 대부분의 경제활동은 하나 이상의 오염물질을 배출하는 다중 오염원

- 산업화 이후 경제활동 과정에서는 화석연료를 기반으로 하는 에너지원에 대한 의존도가 높아짐
  - 2019년 기준으로 화석연료는 전 세계 1차 에너지 공급량의 80.9% 차지<sup>1)</sup>
- 화석연료 사용은 경제성장, 편리성 증대와 함께 오염물질 배출과 같은 부정적 영향도 유발
  - 원유, 석탄, 천연가스 등 1차 에너지를 석유제품, 도시가스, 전력, 열 등 최종에너지로 전환하거나, 최종에너지를 소비하는 과정에서는 온실가스, 대기오염물질, 기타 환경에 부정적인 영향을 미치는 고체, 액체, 기체상의 오염물질이 하나 이상 배출
- 서울의 경우, 총 온실가스 배출량 중 90% 이상이 에너지소비 과정에서 배출되며 대기오염물질도 대부분 에너지소비 과정에서 배출<sup>2)</sup>
  - 대기 중에서 광화학반응을 통해 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 생성하는 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 황산화물(SO<sub>x</sub>)도 96% 이상 에너지소비 과정에서 배출
  - 다만, 입자가 큰 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 휘발성유기화합물(VOCs), 암모니아(NH<sub>3</sub>) 등은 대부분 비산먼지, 원료물질 사용, 농업 등 비에너지원에서 발생

다중 오염원의 복합영향을 고려한 통합관리 필요성 높아

- 기후환경 분야 오염물질은 기후변화에 영향을 미치는 물질, 대기오염에 영향을 미치는 물질, 기타 환경(폐수, 악취 등)에 영향을 미치는 물질, 2개 이상 분야에 영향을 미치는 물질로 구분 가능
  - 예를 들어 블랙카본(black carbon)이나 오존(O<sub>3</sub>)은 대기오염물질이면서 동시에 기후변화도 유발하는 단기 체류 온실가스(short-lived climate pollutants)
  - 온실가스는 지구 평균기온 상승 등을 통해 오존 생성을 촉진하거나 대기 정체를 유발하여 대기질을 악화시킬 수 있음
  - 대부분 다중 오염원은 화석연료 사용과 밀접하게 관련되어 있어 화석연료 관리를 중심으로 통합접근 가능
- 대기관리 정책, 기후변화 정책, 폐기물 정책 등 개별적으로 시행할 때 정책효과 상충 가능
  - 다중 오염원에 대한 통합관리는 중복투자를 방지하고 상충 효과를 억제한다는 점에서 비용효과적인 접근이 될 수 있음.<sup>3)</sup>

1) IEA(2023), World Energy Balances (database), International Energy Agency, Paris.

2) 서울특별시(2022), 서울시 온실가스 인벤토리 보고서(2020년도분); 환경부 국가미세먼지정보센터(<https://www.air.go.kr/main.do>)

- 분야별 정책을 연계하여 통합적으로 접근하면, 사업 초기 단계에서부터 공편익을 고려한 설계와 정책 실행이 가능해 사회경제적 편익은 더 커질 수 있음
- 특정 오염물질 감축에만 집중한 정책을 시행하면 다른 오염물질 배출이 더 증가할 수 있음
  - 예를 들어 자동차에서 발생하는 대기오염물질과 온실가스는 차종·규모·연료 등에 따라 다른데, 온실가스 감축에만 집중한 자동차 대책은 대기오염물질 배출을 높일 수 있음

## I 통합 데이터베이스와 전망모형 개발을 통해 기후환경 분야 통합관리 지원

### 기후환경 분야 통합적 접근을 위한 데이터베이스와 배출량 산정 툴 개발

- 황인창·이윤희(2023)는 중앙정부와 서울시가 추진하는 기후환경 분야 정책의 효과를 종합적으로 평가하고 장래 배출량을 전망할 수 있는 정량적 분석 도구(ICE 모형) 개발
  - ICE(Integrated assessment model of Climate and Environment) 모형은 인구, 가구, 경제, 산업구조, 기술, 정책 등 변화에 따라 에너지 소비량과 온실가스, 대기오염물질, 폐기물, 하수, 폐수 등 기후환경 분야 주요 오염물질 배출량이 어떻게 변화될지 전망할 수 있도록 설계된 세부 부문별 상향식 모형
  - 모형의 지리적 범위는 서울, 경기, 인천, 비수도권, 전국이며, 시간적 범위는 2005년부터 2050년까지 연도별 값
  - 스프레드시트(spreadsheet) 기반 재고-회전(stock-turnover) 모형과 LEAP(Low Emissions Analysis Platform) 플랫폼 기반 상향식 모형 연성 결합
    - LEAP 플랫폼 기반 상향식 모형은 UNEP(2023) 모형 수정·보완<sup>4)</sup>
    - 재고-회전 모형은 내구연수 등을 반영해 시간의 흐름에 따라 기존 재고가 일부 소실되고, 신규 재화가 유입되는 과정을 수리적으로 분석하는 방식
  - 인구, 가구, 경제, 산업구조 등 사회경제 요소에 대한 시나리오 구축. 자동차 대수, 건물 연면적, 매립지 유기탄소 등 서울의 환경에 영향을 미치는 주요 요소들을 재고로 정의하고 시나리오·연도별로 산출

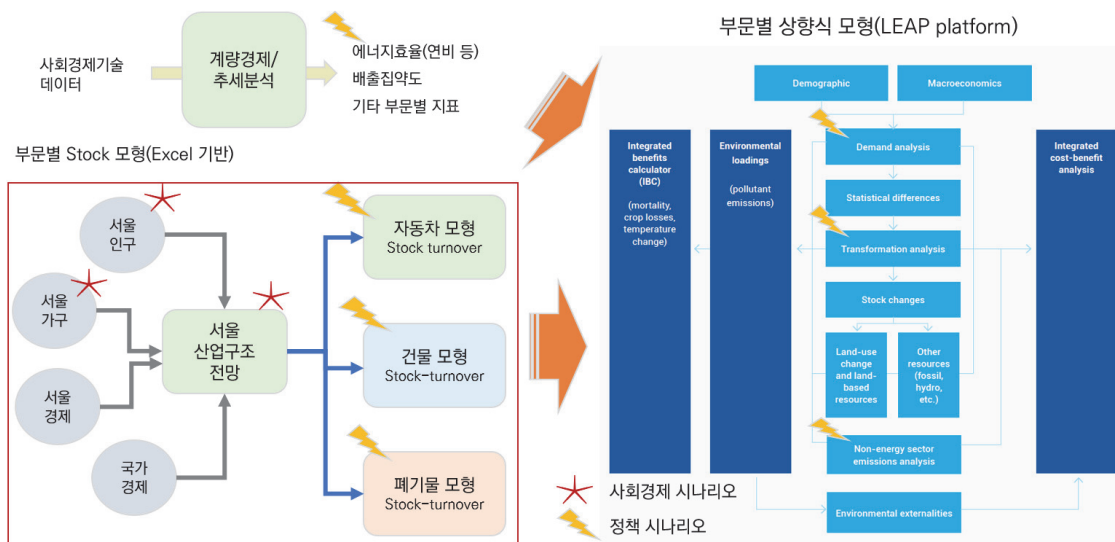
### ICE 모형은 통합분석에 따른 이중 계산 방지, 사용자의 이해도 높아 정책효과 예측에 유용

- 모든 부문이 구조적으로 연계되어 있어 특정 부문을 넘어서는 공편익이나 상쇄효과 반영
  - 부문별 단독 모형에서는 모형이 다루는 특정 부문을 넘어서는 영향을 확인하기 어려움
    - 공편익, 상쇄효과 등 산정 구조적 한계, 이중 계산 문제 발생 가능

3) IPCC(2014), AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014, Intergovernmental Panel on Climate Change.

4) UNEP(2023), Achieving clean air for blue skies in Seoul, Incheon and Gyeonggi, Republic of Korea, United Nations Environment Programme.

- 세부 부문별 정책의 효과를 분석하고 정책 도입에 따른 기대효과를 산출하는 데 유용
  - ICE 모형에서는 재고-회전 방식을 바탕으로 부문별 상세 활동의 변화를 반영하여 세부 정책 변화가 기후환경 분야에 미치는 영향을 상세하게 살펴볼 수 있음
    - 건물 온실가스 총량제, 도심 자동차 운행제한, 자원회수시설 현대화 사업 등 주요 정책이 기후환경 분야 오염물질 배출에 미치는 영향 분석 가능<sup>5)</sup>
  - 인구, 경제성장, 산업구조 등 사회경제 변화가 기후환경 분야에 미치는 영향도 분석 가능
- 사용자의 이해도가 높은 방법론과 자료를 사용하며 공식 오염물질 인벤토리와도 연계 가능
  - IPCC 가이드라인, 지자체 온실가스 인벤토리 가이드라인, 국가 대기오염물질 배출량 산정 방법론(Clean Air Policy Support System) 등 국내외 가이드라인 방법론 사용<sup>6)</sup>
    - IPAT 항등식( $\text{Impact} = \text{Population} \times \text{Affluence} \times \text{Technology}$ )과 관련 응용 모형에 기초해 개별 오염물질 배출량 산정<sup>7)</sup>. 활동도와 배출계수는 자료 이용가능성을 기준으로 부문별 세분화
  - 국가와 지자체의 공식 통계를 바탕으로 통합 데이터베이스 구축<sup>8)</sup>

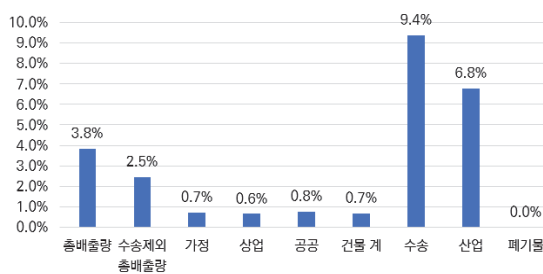


[그림 1] ICE 모형 기본 구조

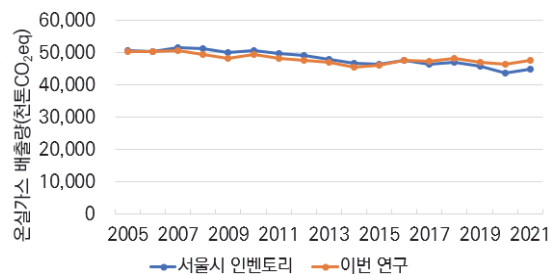
- 5) 세부 정책에 대해서는 다음의 문헌 참고: 황인창 외(2021), 서울시 건물 온실가스 총량제 시행방안 학술용역, 서울특별시; 황인창 외(2018), 지자체 교통부문 미세먼지 관리방안, 서울연구원; 황인창 외(2023), 자원회수시설 현대화 사업 재원조달 방안, 서울연구원.
- 6) IPCC(2006), 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories; 한국환경공단(2017), 지자체 온실가스 배출량 산정 지침; 서울시(2022), 서울시 온실가스 인벤토리 보고서(2020년도분); 국가미세먼지정보센터(2020), 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(Ⅳ) 등.
- 7) Hwang(2016), A stochastic Kaya model and its implications for climate policy, 환경정책, 24(1): 1-26.
- 8) 활동도 자료는 국가통계포털(<https://kosis.kr/index/index.do>)과 서울열린데이터광장(<https://data.seoul.go.kr/>)에 공개된 값을 기본으로 하되, 서울시 건물 온실가스 모니터링 시스템, 서울시 온실가스 인벤토리, 국가미세먼지정보센터 등의 부문별 세부 자료도 활용. 배출계수는 대부분 서울시 온실가스 인벤토리 보고서, 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람에서 제시된 값 사용

## ICE 모형은 과거 값에 대해 서울시 공식 인벤토리 결과 재현 가능

- ICE 모형에서 산출한 2005년부터 2020년까지 결과를 서울시 공식 인벤토리와 비교
  - ICE 모형은 온실가스 인벤토리 경향성을 잘 반영하며 최근 5개년 평균 오차율은 3.8%, 건물 부문의 평균 오차율은 0.7%에 불과
    - 수송 부문에서는 배출량 산정 방식 차이로 인해 ICE 모형 배출량이 9.4% 높음. ICE 모형은 주행거리와 연비를 기반으로 도로수송 배출량을 산정하는 데 반해 인벤토리에서는 주유소 판매량을 기초로 배출량 산정
    - 산업 부문에서는 산업분류 방식의 차이로 인해 ICE 모형의 배출량이 6.8% 높게 산출



[그림 2] 부문별 최근 5개년 평균 배출량 비교



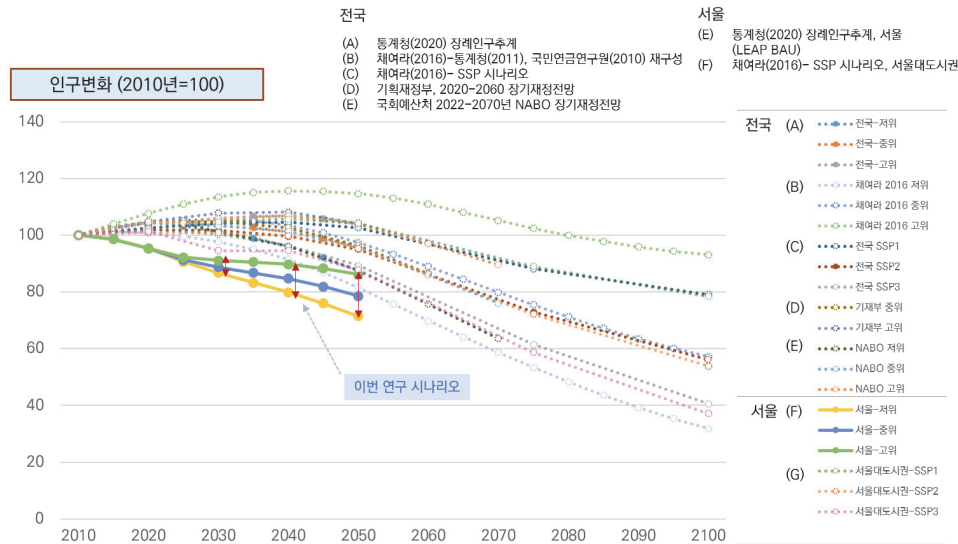
[그림 3] 연도별 배출량 비교

## I 사회경제적 요소와 정책 실천 시나리오 구축

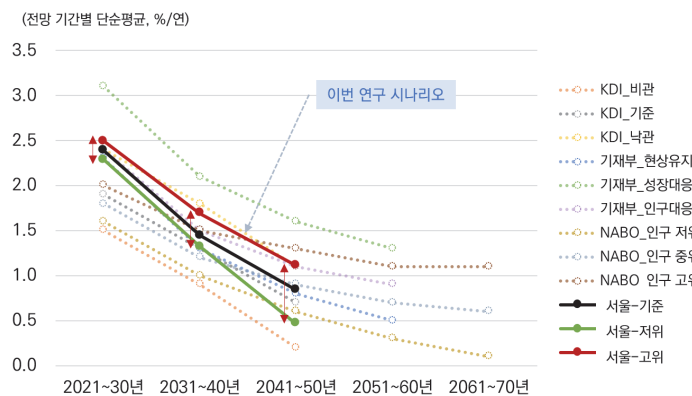
### 사회경제 시나리오와 정책 시나리오

- 인구, 가구, 경제 수준에 따라 3가지 사회경제 시나리오(기준, 저위, 고위) 구축
  - 인구 시나리오는 통계청 장래인구추계 시도(2020년 기준) 자료 활용, 가구 시나리오는 통계청 장래가구추계 시도(2020년 기준) 자료를 이용해 자체 산출
  - 경제 시나리오는 국민연금(2023)과 한국개발원(2022)의 국가 총생산 전망, 산업연구원(2018)의 업종별 부가가치 전망을 활용해 서울시 산업별 부가가치 전망자료 자체 산출
- 탄소중립 정책 실천 여부에 따라 2가지 정책 시나리오(현재 수준 유지, 탄소중립) 구축
  - 현재 수준 유지(Business As Usual) 시나리오에서는 부문별 활동도는 사회경제 시나리오에 따라 변하지만, 에너지집약도와 배출계수 등 기술 요소는 과거 추세에 따라서만 변한다고 가정
    - 에너지집약도와 배출계수는 IPAT 항등식에서 오염물질 배출을 줄이는 기술 요소(T)
  - 탄소중립 시나리오에서는 정부와 서울시의 탄소중립 계획에 따라 부문별 에너지집약도와 배출계수가 달라진다고 가정





[그림 4] 인구 시나리오



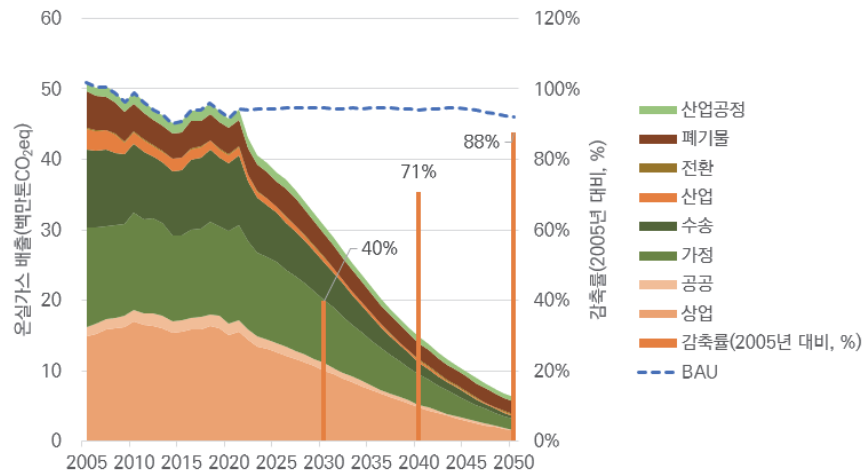
[그림 5] 경제 시나리오

- 국가 탄소중립 시나리오(탄소중립위원회, 2021)와 서울시 탄소중립 전략(황인창, 2020; SMG, 2021) 이행 시 서울의 탄소중립 목표(net zero) 달성 가능<sup>9)</sup>
  - 모든 대책 이행 시 서울의 2050년 배출량은 2005년 대비 88% 감축 가능
- 건물 부문 탄소중립 시나리오에서는 다음과 같은 세부 정책 반영
  - 정부의 제로에너지건축물(Zero Energy Building) 제도에 따른 신축건물 에너지 원단위 변화 적용
  - 서울시의 건물 온실가스 총량제에 따라 모든 대상 건물의 온실가스 원단위 변화 적용
  - 정부의 발전부문 탄소중립 계획에 따라 전력 간접 배출계수가 연도별로 [그림 7]과 같이 감소한다고 가정. 구체적으로 탄소중립 시나리오 B 적용<sup>10)</sup>

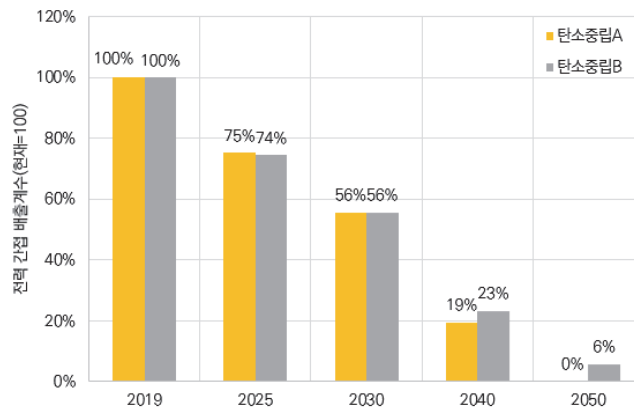
9) 탄소중립위원회(2021), 2050 탄소중립 시나리오, 탄소중립위원회; SMG(2021), 2050 Seoul Climate Action Plan. Seoul Metropolitan Government; 황인창 외(2020), 파리협정 이행 위한 서울시 '2050 탄소중립' 전략, 서울연구원.

10) 탄소중립위원회(2021), 2050 탄소중립 시나리오, 탄소중립위원회.

- 정부의 탄소중립 계획에 따라 건물 부문에서도 [표 1]과 같이 전력화가 진행된다고 가정
  - 전력화를 위해서는 에너지이용 설비 변화가 동반되어야 하므로 에너지원별로 단위면적당 에너지 소비(에너지 원단위) 변화 적용



[그림 6] ICE 모형의 서울 온실가스 배출량 전망



[그림 7] 탄소중립 시나리오 전력 간접 배출계수

자료: 탄소중립위원회(2021) 발전부문 시나리오에 기초해 자체 계산

[표 1] 탄소중립 시나리오 건물 에너지 원단위(단위면적당 에너지 소비) 변화(현재=100%)

연도	전력	가스	열	기타 화석연료
2025	100%	100%	100%	현재 연료별 원단위가 선형적으로 감소하여 2050년에는 0이 된다고 가정
2030	104%	80%	100%	
2040	112%	40%	100%	
2050	116%	20%	100%	

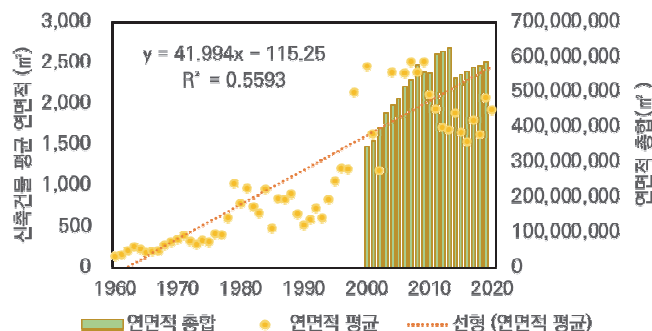
자료: 탄소중립위원회(2021) 탄소중립 시나리오에 기초해 자체 계산

## II. 개별 건축물 온실가스 총량 관리 방안

### I 건물 온실가스 총량 관리 필요성

#### 서울 건축물 총수는 감소하나 중대형화로 인한 총 연면적 증가<sup>11)</sup>

- 서울의 총 건축물은 2022년 기준 581,257동으로 2005년 대비(684,787동) 15.1% 감소
  - 주거용 건물이 74.1%를 차지하며, 상업용 건축물은 21.9% 차지
  - 공업용, 주거용, 상업용 건물은 각각 33.8%, 16.7%, 12.7% 감소한 데 반해, 교육 및 사회용 건물은 34.8% 증가
- 3천㎡ 이상 건물과 11층 이상 건물은 2022년 기준으로 2005년 대비 각각 46.9%, 72.4% 증가
  - 동일 기간 연면적 1천㎡ 미만 소형건물과 5층 이하 건물은 각각 18.9%, 30.4% 감소
- 신축건물의 평균 연면적 증가와 함께 건축물 총 연면적 증가
  - 2020년 기준 서울 소재 건축물의 총 연면적은 600백만㎡로 2005년 대비 25.1% 증가, 신축건물 평균 연면적은 경제성장과 함께 증가 추세. 1960년 이후 연평균 42㎡ 증가



[그림 8] 서울 건물 평균 연면적 변화

자료: 황인창, 백종락(2020), 온실가스와 미세먼지 저감 위한 경제적 수단 도입 방안, 서울연구원.

#### 건물의 화석연료 기반 에너지 사용에 대한 수요관리는 도시 탄소중립의 핵심

- 글로벌 대도시는 대부분 2050년까지 탄소중립 달성 목표 제시
  - 글로벌 도시 간 협의체인 C40에서는 회원 도시가 2020년까지 탄소중립 계획을 수립하도록 권고(Deadline 2020 선언)<sup>12)</sup>

11) 서울특별시, 건축물 통계. 서울열린데이터광장(<https://stat.seoul.go.kr/>) 자료 활용(2024.1.10. 접속)

12) C40(2020), Deadline 2020: How cities will get the job done, C40 cities.

- 건물 부문 온실가스 관리는 글로벌 대도시의 탄소중립 핵심 전략
  - 글로벌 대도시에서 건물 부문은 온실가스 배출량의 대부분(60~70%) 차지<sup>13)</sup>
    - 도시와 지역 단위 온실가스 인벤토리에는 국가 단위 온실가스 인벤토리와 달리 전력과 열 소비로 인한 간접 배출, 폐기물 배출로 인한 간접 배출 포함(Scope 2 배출)
  - 뉴욕과 도쿄는 신축건물 중심 에너지성능 규제(building code)와 자발적 감축만으로는 온실가스 감축이 어려움을 확인, 의무 방식인 건물 온실가스 총량관리 제도 도입<sup>14)</sup>
    - 도쿄는 2010년부터 총량할당 및 거래 방식으로 건물 온실가스 배출권 거래제도를 시행하고 있으며, 뉴욕은 2024년 1월부터 건물 온실가스 총량 관리제도 시행 중
- 서울의 온실가스 배출량은 감소하고 있으나 건물 온실가스 감축을 위한 혁신적인 노력 필요
  - 서울은 C40 회원도시로서 2050 탄소중립 계획을 수립하고 국제사회에 발표<sup>15)</sup>. 서울 온실가스 배출량 대부분은 건물 부문이 차지(2020년 기준, 71%)
  - 서울 온실가스 배출량은 2005년 대비 2020년에 13% 감소했지만, 상업용과 공공용 건물 배출량은 오히려 각각 6%와 4% 증가
    - 코로나19의 영향을 제외하면 상업용과 공공용 건물의 온실가스 배출량은 2005년부터 2019년까지 각각 15%, 12% 증가. 코로나19로 인한 상업과 공공용 건물 온실가스 배출 감소는 사회적 거리두기 해제와 함께 2022년 대부분 회복<sup>16)</sup>
- 지역에너지 계획 측면에서도 지자체의 권한과 책임은 화석연료 기반 에너지원 수요 관리에 집중
  - 에너지 공급 체계 특성상 에너지 수입, 생산, 공급, 전환, 손실, 에너지가격 부문은 대부분 국가 관리
  - 지자체는 에너지 소비 과정에서 발생하는 기후환경 분야 외부효과, 에너지접근성과 에너지 빈곤 등 형평성 관리 권한과 책임 보유. 외부효과의 부문별 비중을 고려할 때 건물에서의 화석연료 기반 에너지원 수요 관리가 지자체의 에너지 계획 핵심

## I 건물 온실가스 총량 관리 표준배출기준 설정

### 12개 건물 유형별 단위면적당 표준 배출량 설정

- 코로나19 직전 3개년(2017~2019년) 동안 개별 건물의 에너지 소비와 온실가스 배출 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 건물 유형별 단위면적당 표준 배출량(표준 원단위) 산정

13) C40 Knowledge Hub (<https://www.c40knowledgehub.org>)

14) 황인창, 백종락(2020), 온실가스와 미세먼지 저감 위한 경제적 수단 도입 방안, 서울연구원.

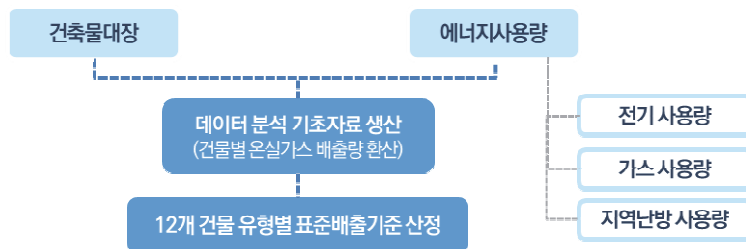
15) SMG(2021), 2050 Seoul Climate Action Plan. Seoul Metropolitan Government.

16) 백종락·황인창·이현정 (2024), 코로나19 감염병이 건물 유형별 온실가스 배출에 미친 영향 실증 분석, Journal of Climate Change Research (발간 예정)

- 서울 소재 전체 건물을 대상으로 개별 건축물의 건축물대장 정보와 에너지원별 월간 소비 정보를 매칭하여, 3개년 평균 단위면적당 온실가스 배출량(원단위, tCO<sub>2</sub>eq/㎡) 산출
- 건물을 12개 유형으로 구분하여 유형별 표준 원단위(단위면적당 표준 배출량) 산정. 건축물 대장 상의 건축물 주 용도별로 온실가스 원단위 분포도를 산출하여 평균과 분산 등 기초 특성을 파악하고, 주 용도의 유사성을 고려하여 12개 유형으로 구분

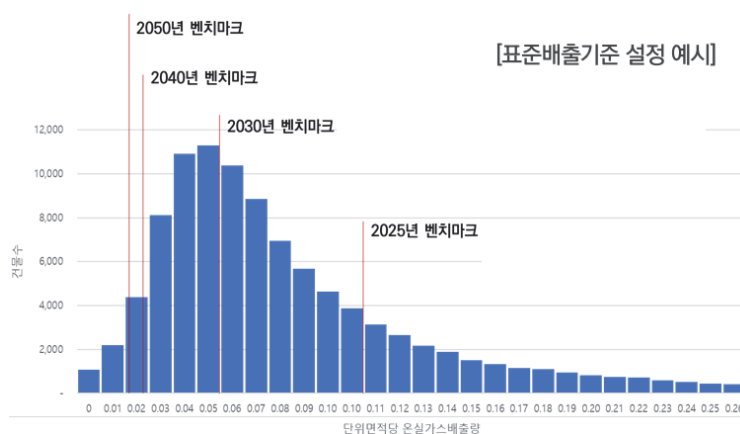
## 표준배출기준(벤치마크) 설정<sup>17)</sup>

- 서울의 건물부문 탄소중립 로드맵을 고려하여 12개 유형별 표준배출기준(벤치마크) 설정
  - 서울에서는 건물 온실가스 배출량을 2050년까지 2005년 대비 80% 감축 목표<sup>18)</sup>. 연도별로는 2030년까지 36%, 2040년까지 68% 감축 목표
  - 벤치마크 방식을 활용해 12개 유형별 단위면적당 배출허용량 산정. 벤치마크 값은 연도별 온실가스 감축 로드맵을 고려해 5년 단위 이행기간 별로 강화. 제도 도입 이전부터 온실가스 감축 노력을 해왔던 건물은 현재의 배출 원단위가 연도별 벤치마크보다 낮을 수 있으며, 이 경우 추가적인 감축 없이도 표준배출기준 달성 가능



[그림 9] 건물 유형별 표준배출 기준 산정 절차

자료: 황인창 외(2021), 서울시 건물 온실가스 총량제 시행방안 학술용역, 서울특별시



[그림 10] 건물 유형별 표준배출기준 산정 방법 예시

자료: 황인창 외(2021), 서울시 건물 온실가스 총량제 시행방안 학술용역, 서울특별시

- 17) 구체적인 이행방안 등에 대해서는 다음 문헌 참고: 황인창 외(2021), 서울시 건물 온실가스 총량제 시행방안 학술용역, 서울특별시
- 18) 황인창 외(2020), 파리협정 이행 위한 서울시 '2050 탄소중립' 전략, 서울연구원.

### Ⅲ. ICE 모형을 통한 건물 온실가스 총량 관리 기대효과 분석

#### Ⅰ 재고-회전 방식(Stock-turnover)을 활용한 건축물 연면적 전망

건물의 연면적을 재고(stock)로 정의하고 장래 연면적 변화를 재고-회전 방식으로 전망

- 서울에서는 건물의 수 자체보다는 건물의 총 연면적이 건물 에너지 소비량에 직접 영향
  - 신규 택지나 상업 지구를 건설하기보다 이미 개발된 지역을 재개발하는 형태가 많은 특성
  - 최근 서울에서는 총 건물 수는 줄어드는 반면 건물의 총 연면적은 증가. 내구연한이 다해 폐쇄되고 새로 지어지는 건물을 중심으로 중대형화 경향이 크기 때문
- 시간에 따라 기존 연면적(건물)은 사라지고 신규 연면적(건물)이 유입되는 과정을 모형화
  - <식 1>에서 K는 서울의 건물 총 연면적, I는 신규 건물 연면적,  $\delta$ 는 연간 연면적 소멸률, t는 시간(연도)을 의미

$$K_{t+1} = K_t(1 - \delta) + I_t \quad \text{<식 1>}$$

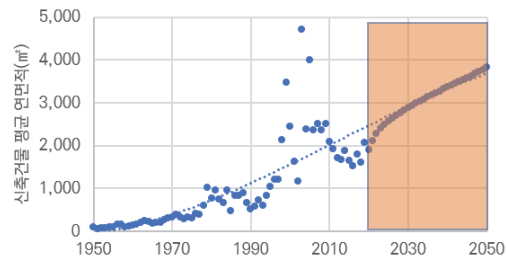
- 개별 건물의 건축물대장 정보를 활용해 건물이 폐쇄되고 건축되는 시점 추정
  - 건축물의 내구연한은 건물의 재질에 따라 대체로 40~50년<sup>19)</sup>. 건물이 폐쇄되고 건축되는 과정이 내구연한만으로 결정되는 것은 아니라는 점에서 한계가 있지만, 건축물의 생애 주기에 대한 보다 정밀한 정보가 구축되기 전까지는 내구연한을 이용한 분석은 의미 있는 결과 제공
  - 서울시 소재 모든 개별 건물은 내구연한이 지나면 폐쇄되고 그 자리에 같은 용도의 새로운 건물(단, 연면적은 변화)이 건축된다고 가정

#### 용도별 연면적 전망

- 신축건물 평균 연면적은 지속적으로 증가할 것으로 전망
  - 과거 자료를 이용해 인구, 부가가치 등 사회경제적 요소와 신축건물 용도별 평균 연면적의 관계를 추정한 계량경제모형 활용<sup>20)</sup>
  - 2050년에 신축되는 건물의 평균 연면적은 3,825㎡로 2020년에 신축되는 건물보다 2배 이상 클 것으로 전망. 신축건물 평균 연면적이 가장 높았던 2003년(4,716㎡)보다는 낮은 수준

19) 한국감정원(2013), 건물 용도-구조별 내구연수 표, 서울특별시, 건축물 통계(서울열린데이터광장, <https://stat.seoul.go.kr/>)를 활용해 자체 추정해보면, 서울시 전체 건물, 주거용 건물, 상업용 건물의 연평균 소멸률은 각각 1.9%, 2.2%, 2.4%이며, 이를 내구연한으로 환산하면 각각 54년, 46년, 43년

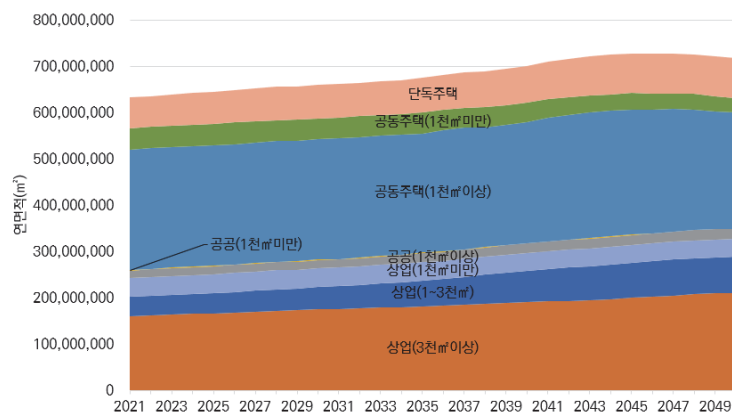
20) 황인창 외(2021), 서울시 건물 온실가스 총량제 시행방안 학술용역, 서울특별시



[그림 11] 서울 신축 건축물 평균 연면적 전망

자료: 황인창 외(2021), 서울시 건물 온실가스 총량제 시행  
방안 학술용역, 서울특별시

- 기존 건물을 포함한 서울의 건물 총 연면적은 2040년대 중반까지 증가할 것으로 전망
  - 정책 시나리오 분석을 위해 모든 건축물을 단독주택, 공동주택, 공공용, 상업용으로 구분. 연면적에 따라 상업용은 1천㎡ 미만, 1천~3천㎡ 미만, 3천㎡ 이상으로 구분하고, 공공용과 공동주택은 1천㎡ 미만, 1천㎡ 이상으로 구분

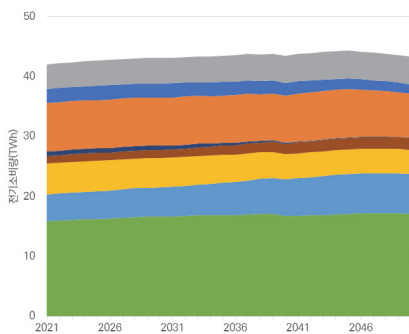


[그림 12] 건축물 용도별 연면적 전망(기준 시나리오)

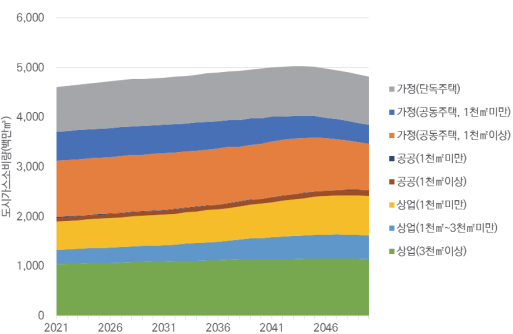
## I 제로에너지건축물(ZEB) 제도만으로는 온실가스 감축 한계

### BAU 시나리오에서 온실가스 배출량은 소폭 증가하다가 2040년대 중반부터 감소 전망

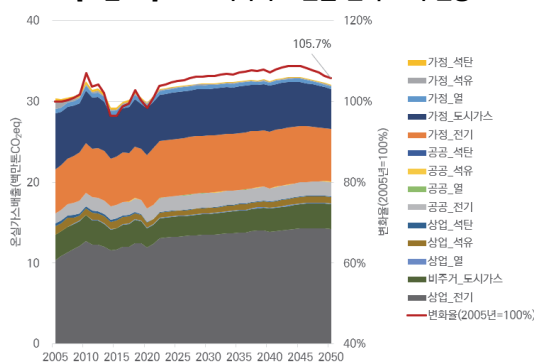
- 에너지 원단위가 높은 오래된 건물은 점차 줄어들지만, 새로 지어지는 중대형 건물로 인한 연면적 증가 효과가 에너지 수요에 더 큰 영향을 미치기 때문
  - 건물 부문 전력과 도시가스 소비는 2050년까지 2021년 대비 각각 3%와 5% 증가 전망
- 건물 온실가스 배출량은 점차 증가하여 2050년에는 2005년 대비 약 6% 증가 전망
  - 주거용 건물 배출은 15% 감소하는 반면, 비주거용 건물 배출은 24% 증가 전망
- 사회경제 시나리오에 따라 2050년 건물 온실가스 배출량은 기준 시나리오 대비  $\pm 7\%$  변동 전망
  - 사회경제 시나리오는 인구, 가구, 경제성장과 관련하여 고위(HS) 시나리오, 저위(LS) 시나리오, 기준 시나리오로 구분



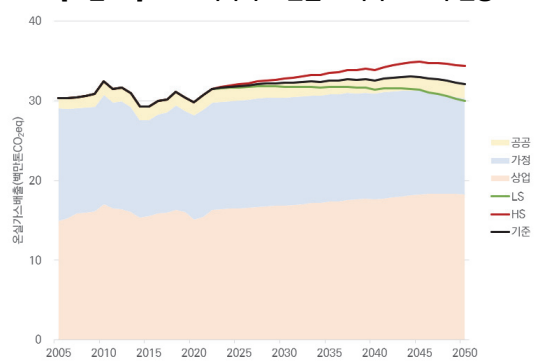
[그림 13] BAU 시나리오 건물 전력 소비 전망



[그림 14] BAU 시나리오 건물 도시가스 소비 전망



[그림 15] BAU 시나리오 건물 온실가스 전망

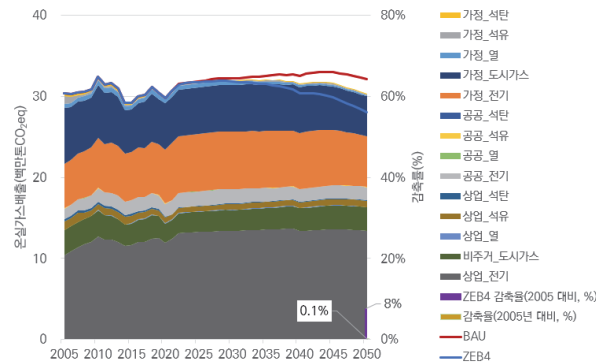


[그림 16] 사회경제 시나리오에 따른 건물 온실가스 전망



## 정부 로드맵에 따라 제로에너지건축물(ZEB)을 도입한다고 하더라도 온실가스 감축량 부족

- 단계별로 신축건물에 ZEB 5등급이 도입된다고 가정할 때, 2050년 건물 온실가스 배출량은 2005년 대비 0.1% 감축에 그침. 2050년 BAU 배출량에 대비해서는 6% 감소
  - ZEB만의 효과를 분석하기 위해 전기 간접 배출계수는 현재 수준을 유지한다고 가정
  - ZEB 4등급이 도입된다고 가정하더라도, 2050년 배출량은 2005년 대비 8% 감축에 그침

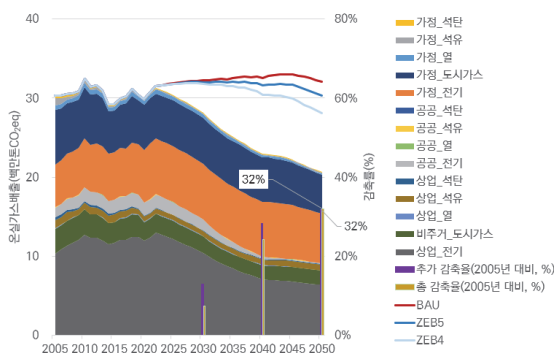


[그림 17] ZEB 도입에 따른 건물 온실가스 전망

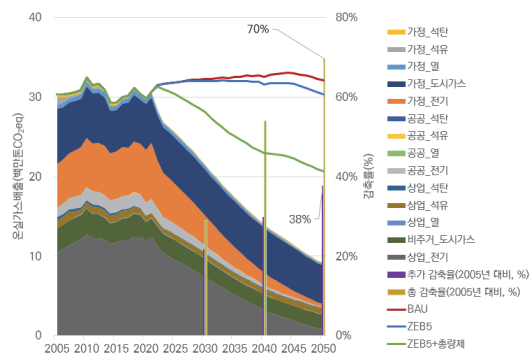
## I 온실가스 총량제와 발전연료 전환이 건물 탄소중립 목표달성 핵심

### 정부의 노력(발전연료 전환)과 서울의 노력(건물 온실가스 총량제)이 병행할 때 탄소중립 가능

- 전기 간접 배출계수가 현재 수준에서 유지된다고 하더라도, 건물 온실가스 총량제 도입만으로도 2050년 건물 온실가스 배출량은 2005년 대비 32% 감축 전망
  - ZEB 4등급 도입 시 대비 24% 포인트 추가 감축
- 총량제 도입과 함께 발전부문 탄소중립 달성 시에는 2050년 건물 온실가스 배출량이 2005년 대비 70% 감축 전망
  - 전기 간접 배출계수가 현재 수준으로 유지되는 경우 대비 38% 포인트 추가 감축

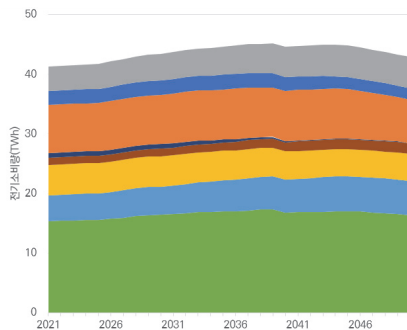


[그림 18] 총량제 도입 효과

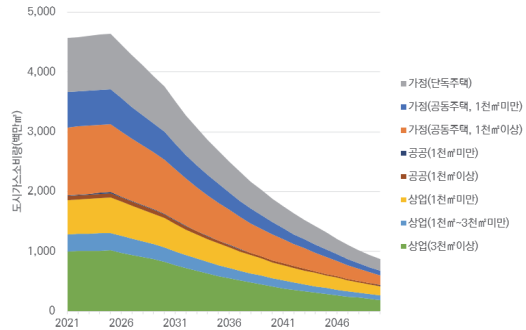


[그림 19] 총량제 도입과 발전 부문 탄소중립 효과

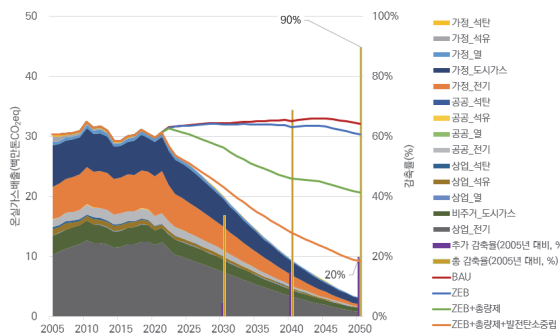
- 건물 부문에서의 전력화까지 더해지면, 2050년 건물 온실가스 배출량은 2005년 대비 90% 감축 전망(건물 부문 탄소중립 목표 초과 달성)
  - 전력화로 인해 전력 소비는 BAU 시나리오 대비 증가하지만, 전력 간접 배출계수가 큰 폭으로 감소하기에 전력 소비 증가 영향은 대부분 상쇄
  - 전력화로 인해 도시가스와 기타 화석연료 소비는 큰 폭으로 감소. 정책 시나리오에서는 사회경제 요소 변화에 따른 배출량 편차가 거의 사라짐



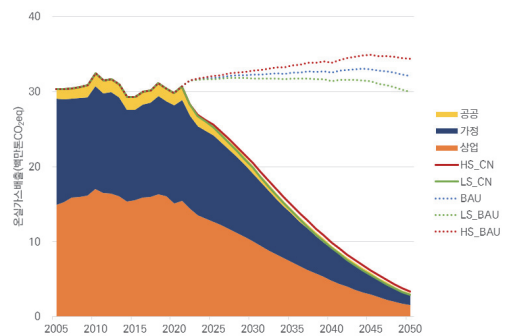
[그림 20] 전력화에 따른 건물 전력 소비 전망



[그림 21] 전력화에 따른 건물 도시가스 소비 전망



[그림 22] 모든 정책(총량제, ZEB, 발전탄소중립, 전력화) 효과 종합

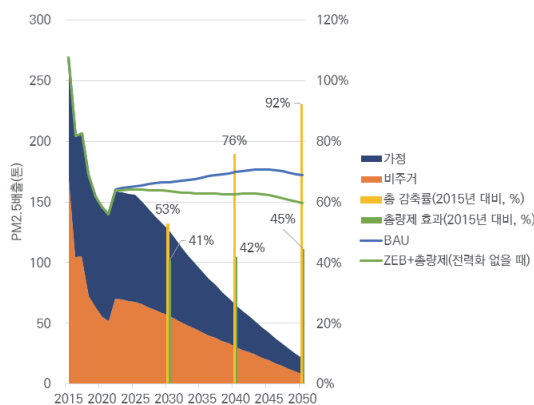


[그림 23] 시나리오별 모든 정책 효과 종합

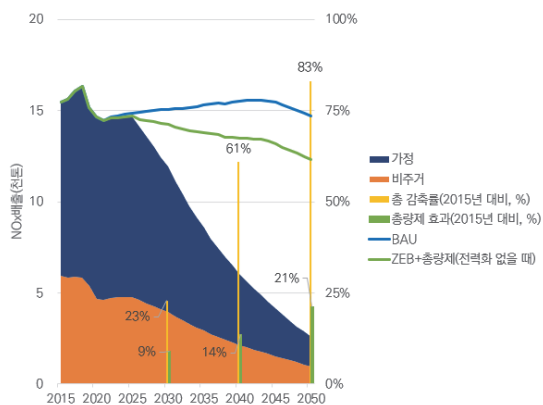
## I 전력화로 인한 대기오염물질 감축 공편익 상당히 높아

발전 탄소중립 자체는 대기오염물질 배출에 큰 영향이 없지만, 전력화는 큰 영향

- 건물 온실가스 총량제 시행으로 대기오염물질 배출량은 상당 수준 감소 전망
  - 2015년 대비 2050년 배출량은 초미세먼지 45% 감소, 질소산화물 20% 감소
  - 건물 부문에서 발생하는 대기오염물질은 대부분 총량제 비대상 건물, 비대상 에너지원에서 배출되기 때문에 온실가스보다는 감축 효과가 낮음. 가정용 건물의 도시가스, 비주거 건물의 석유와 석탄 등이 주요 대기오염물질 배출원
- 정부 탄소중립 계획에 따라 전력화가 이뤄지면 대기오염물질 배출량은 큰 폭으로 감소 전망
  - 2015년 대비 2050년 배출량은 초미세먼지 92% 감소, 질소산화물 83% 감소



[그림 24] PM<sub>2.5</sub> 배출 변화



[그림 25] NO<sub>x</sub> 배출 변화

## IV. 정책제언

### I 기후환경 분야 통합접근을 위한 제언

#### 기후환경 통합 데이터베이스와 분석모형 등을 바탕으로 통합적 의사결정 제도화

- 기후환경 통합 데이터베이스 구축
  - 기후환경 통합 모니터링 시스템 구축과 통합 인벤토리 작성
    - 서울시가 운영 중인 건물 온실가스 모니터링 시스템을 확대 개편하여 사회경제 데이터, 에너지 데이터, 오염물질 데이터를 통합한 데이터베이스 구축
    - 통합 데이터베이스를 바탕으로 온실가스, 대기오염물질, 하수와 폐수 포함 폐기물 정보를 모두 종합한 기후환경 통합 인벤토리 작성
- 기후환경 통합 분석모형 고도화
  - ICE 모형 고도화와 단순화된 형태의 의사결정 지원 모형 개발
    - 온실가스 흡수와 상쇄, 비산먼지, 생물성연소, 블랙카본, Scope 3 배출량 등 분석을 위한 자료와 방법론 추가, 발전 부문에서는 시간 단위 배출 모델링 모듈 추가
    - 사회경제적 영향, 비용편익, 물리적 기후변화, 탄소가격제, 에너지가격, 도시 광역화 등 거시적 변화의 영향을 고려할 수 있도록 단순화된 형태의 의사결정 지원 모형 개발
- 의사결정 반영 제도화
  - 통합 시스템을 바탕으로 녹색예산제 도입, 서울시 환경·사회·지배구조(ESG) 보고서 발간
    - 현행 기후예산제를 확대 개편하여 기후환경 분야 전체를 포괄하는 녹색예산제 도입
    - ESG 경영 도입과 확산을 촉진하기 위해 서울시 ESG 보고서 발간

#### 주요 추진전략

주요 과제	추진전략
기후환경 통합 데이터베이스 구축	- 기후환경 통합 모니터링 시스템 구축과 통합 인벤토리 작성 · 사회경제, 에너지, 오염물질 데이터 통합 데이터베이스 구축 · 기후환경 분야 통합 인벤토리 작성
기후환경 통합 분석모형 고도화	- ICE 모형 고도화와 단순화된 형태의 의사결정 지원 모형 개발 · ICE 모형 배출원과 분석 대상 지역 확대 · 단순화된 형태의 의사결정 지원 모형 개발
의사결정 반영 제도화	- 통합 시스템을 바탕으로 녹색예산제 도입, ESG 보고서 발간 · 기후환경 분야 전체를 포괄할 수 있는 녹색예산제 도입 · 통합 시스템을 바탕으로 서울시 ESG 보고서 발간

## I 기후환경 분야 통합 데이터베이스 구축

### 사회경제, 에너지, 오염물질 데이터 통합 데이터베이스 구축

- 분야별로 산재해 있는 데이터를 종합하여 기후환경 통합 데이터베이스 구축
  - 국가 통계포털과 서울시 열린데이터광장의 사회경제 데이터, 에너지경제연구원의 에너지 통계, 한국환경공단 폐기물 발생 및 처리 통계, 국가미세먼지정보센터의 발전과 산업부문 활동도와 굴뚝모니터링시스템 자료, 한국부동산원의 건물 데이터, 기타 관련 기관이 작성하고 국가통계포털에 공개하는 자료 등 종합
  - 오염물질별로 산정 범위가 다른 경우 통합 데이터베이스에서는 이에 대한 조정 필요. 현재 온실가스, 대기오염물질, 폐기물 데이터는 산업 구분 등 배출원 구분이 다름. 온실가스는 간접배출(Scope 2)을 포함하지만, 대기오염물질은 직접배출만 포함

### 기후환경 분야 통합 인벤토리 작성

- 서울시 온실가스 인벤토리 보고서를 확대 개편하여 기후환경 통합 인벤토리 작성
  - 서울시는 온실가스 인벤토리 보고서를 매년 자체 발간하고 있는데, 통합 데이터베이스를 바탕으로 대기오염물질 인벤토리, 폐기물 발생 및 처리 데이터(하수 및 폐수 포함)를 포함한 통합 인벤토리 보고서 작성 및 발간

## I 기후환경 통합 분석모형 고도화

### ICE 모형 배출원과 분석 대상 지역 확대

- 현재 ICE 모형에서 포함하고 있지 않은 부분에 대한 모듈 추가
  - 온실가스 흡수와 상쇄, 비산먼지, 생물성연소, 블랙카본 등의 분야 자료와 방법론 추가
  - ESG 경영과 관련해 관심이 높아지고 있는 Scope 3 간접배출량 산정 모듈 추가
  - 수도권과 이외 지역에 대해서도 지역단위 상세 데이터를 구축해 모형 확장. 도시 광역화 논의에 활용 가능
  - 발전 부문에서 시간 단위 배출 모델링을 도입하고 향후 대기오염 농도 모델링과 연계

### 단순화된 형태의 의사결정 지원 모형 개발

- ICE 모형을 보다 단순한 형태로 변환하고, 사회경제 분야 의사결정 모형과 결합
  - ICE 모형은 상향식 모형으로서 비교적 방대한 데이터를 바탕으로 상세한 부문별 자료를 생산하는데, 모형 유지관리를 위해서는 상당한 시간과 노력이 요구된다는 단점이 있음

- 단순화한 형태의 의사결정 지원모형을 개발하면, 시민과 정책결정자들이 필요로 하는 정보를 빠르게 제공할 수 있을 것으로 기대. 노벨경제학상 수상자인 William Nordhaus 교수는 기후과학 분야의 방대한 모델과 사회경제 의사결정 모델을 단순한 형태로 결합해 DICE 모형 개발<sup>21)</sup>
- 국제기구와 독일 등이 협업하여 개발한 ecoBudget, CLEAR 프레임워크 등 참고<sup>22)</sup>

## I 의사결정 반영 제도화

### 기후환경 분야 전체를 포괄할 수 있는 녹색예산제(Green budgeting) 도입

- 녹색예산제는 국가와 지역이 기후환경 분야 목표를 달성할 수 있도록 예산 관련 의사결정 도구와 다양한 오염물질 배출량 정보를 연계(tagging)하는 절차와 제도
  - 예산과 재정 투입의 환경영향, 국가, 지역, 조직의 기후환경 목표와의 정합성 등이 주요 평가 요소이며, 증거기반의 과학적 의사결정을 돕고 지속가능 발전에 기여함을 목표로 함. 1989년 노르웨이에서 처음 도입하였으며 유럽과 OECD를 중심으로 확산 중<sup>23)</sup>
  - 국내의 기후예산제는 온실가스에 초점을 둔 녹색예산제의 일종이라고도 할 수 있는데, 대기오염물질, 폐기물, 자원사용 등으로 범위를 확대할 필요가 있음. 기후환경 분야 통합 데이터베이스는 녹색예산제 도입을 위한 기초자료로 활용 가능

### 통합 시스템을 바탕으로 서울시 ESG 보고서 발간

- 캐나다 토론토를 비롯해 도시 수준에서의 ESG 경영에 대한 관심이 높아지고 있음<sup>24)</sup>
  - 토론토는 매년 도시 단위에서의 ESG 경영과 관련한 지표를 생산하고 평가하며, ESG 보고서를 통해 발표하고 있음
- 서울에서는 지속가능성 보고서를 발간하고 있는데 보고서가 포함하는 내용 범위를 보다 구체화하고 확대할 필요가 있음
  - ESG 경영 핵심 개념 중 하나인 이중 중대성(double materiality) 관점에서 보고서 작성
  - 산하기관을 포함한 서울시의 행정과 사업영역에 대한 ESG 평가 포함
  - 기후환경 분야 통합 데이터베이스는 환경 분야와 관련한 ESG 경영 지표 작성과 평가에 기초자료로 활용 가능

21) 황인창(2015), 기후경제통합-지역평가모형 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구, 한국환경정책평가연구원.

22) <https://eastasia.iclei.org/activity/ecobudget/>; <https://webgate.ec.europa.eu/>

23) OECD(2020), OECD Green Budgeting Framework, OECD, Paris.

24) 황인창 외(2022), 환경·사회·지배구조(ESG) 경영 확대 위한 서울시 정책방안, 서울연구원.

06756

서울특별시 서초구  
남부순환로 340길 57

02-2149-1234

[www.si.re.kr](http://www.si.re.kr)