

대한민국 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 개선 경험과 시사점

(Achieving clean air for blue skies in Seoul, Incheon and Gyeonggi, Republic of Korea)



© 2023 United Nations Environment Programme

ISBN: 978-92-807-4045-5
Job number: ROAP/2543/BA

복제

본 출판물은 출처를 명시할 경우 저작권자의 특별한 허가 없이 교육 또는 비영리 목적을 위해 전체 또는 일부를 어떤 형태로든 복제할 수 있습니다. 본 출판물을 출처로 사용하는 모든 출판물은 유엔환경계획으로 사본을 보내주시기 바랍니다.

이 출판물은 유엔환경계획의 사전 서면 허가 없이 재판매 또는 기타 상업 목적으로 사용할 수 없습니다. 관련 허가를 얻기 위한 신청서는 복제 목적과 범위를 명시하여 UNEP 아시아 태평양 지역 사무소 소장 및 대표 (태국 방콕 10200, UN Building Rajdamnern Avenue)에게 보내주시기 바랍니다.

면책 조항

이 출판물에 사용된 명칭과 자료의 표현은 국가, 영토, 도시, 지역 또는 그 당국의 법적 지위 또는 국경 및 경계의 구분과 관련하여 유엔환경계획의 특정한 의견 표명을 의미하지 않습니다.

이 보고서/출판물에 표현된 견해는 저자의 견해이며 유엔환경계획 또는 중앙 및 지방 정부의 견해를 반드시 반영하는 것은 아닙니다.

이 보고서에 명시된 의견, 수치 및 추정치는 저자의 책임이며, 유엔환경계획의 견해를 반영하거나 유엔환경계획의 승인을 받은 것으로 간주되어서는 안 됩니다.

본 출판물에 포함된 링크는 독자의 편의를 위해 제공되었으며 발행 시점을 기준으로 하였습니다. 유엔환경계획은 해당 정보의 지속적 정확성이나 외부 웹사이트의 콘텐츠에 대해 책임을 지지 않습니다.

© 지정 사진 및 삽화

인용

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

제작

United Nations Environment Programme (UNEP)
<https://www.unep.org>

대한민국 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 개선 경험과 시사점

(Achieving clean air for blue skies in Seoul, Incheon and Gyeonggi, Republic of Korea)

감사의 말씀

유엔환경계획(UNEP)은 이 보고서를 작성한 저자 및 검토자 분들의 기여와 노고에 깊은 감사를 표합니다.

보고서 작성에 참여한분들은 다음과 같습니다(호칭생략).

스톡홀름 환경 연구소, 환경 지리부, 요크 대학교

크리스토퍼 말리(Christopher S. Malley), 엘레니 미칼로포울루 (Eleni Michalopoulou), 요한 C.I. 큐렌스터나(Johan C.I. Kuylenstierna)

서울연구원

황인창, 김경도, 백종락, 이소진

인천연구원

조경두, 문보경

경기연구원

김동영, 최민애, 장혜지

유엔환경계획

이지현, 이형섭, 무슈탁 메몬(Mushtaq Memon), 마리아 카테리나 팻두 (Maria Katherina Patdu), 서은영, 정예지

이와 더불어 전문가적 식견으로 보고서에 대한 의견을 아낌없이 나누어 주신 외부 검토자 여러분들에게 감사의 말씀을 전합니다.

건국대학교:

선우영, 우정현

경기도:

김동성, 홍영준, 김진구, 권다영

국립농업과학원:

김민욱

국제노동기구(ILO):

손성길

국제응용시스템분석연구소(IIASA):

즈비그뉴 클리몬(Zbigniew Klimont)

글로벌환경전략연구소(IGES):

에릭 주크만(Eric Zusman)

기후 및 청정대기연합(CCAC):

발렌틴 폴테스크(Valentin Foltescu)

바이탈 스트레티지스(Vital Strategies):

린탕(Lynn Tang), 비엔드라 잉골(Vijendra Ingole), 미나크쉬 쿠쉬와하 (Meenakshi Kushwaha)

서울대학교:

홍윤철

서울연구원:

김고운

서울특별시:

김덕환, 서점숙, 김대영, 여세바기별

서울특별시 보건환경연구원:

신용승

수원대학교:

장영기

송실사이버대학교:

곽재식

아시아 공과대학(AIT):

에크보르딘 위니지쿨(Ekbordin Winijku)

아주대학교:

이규진

워싱턴 대학교(Washington University):

제이 터너(Jay Turner)

온실가스종합정보센터:

서흥원

유엔개발계획(UNDP):

김영우

유엔식량농업기구(FAO) 한국 파트너십연락사무소:

김정현

유엔아시아태평양경제사회위원회(UNESCAP):

매튜 퍼킨스(Matthew Perkins), 김성은, 홍민경

유엔환경계획(UNEP):

버트 파비앙(Bert Fabian), 진화 장(Jinhua Zhang), 마리아 휴즈(Maria Hughes), 미츠구 사이토(Mitsugu Saito), 사미르 만 싱(Sameer Man Singh), 소라야 스메운(Soraya Smaoun) 베라 아리아드네 파코니(Vera Ariadne Pokorny), 허영란

금호석유화학:

박영우

이클레이 동아시아 사무소(ICLEI East Asia Office):

쉬안 시에(Xuan Xie)

인천광역시:

정낙식, 김달호, 윤은주, 김승현, 김형문

중앙일보:

강찬수

한국에너지기술연구원:

박년배

한국환경연구원:

채여라

환경부:

유소정, 이서연

편집: 바트 얼스틴(Bart Ullstein)

디자인: 마르디아 밀러(Mardiyah Miller)

번역: 변주경, 이상은, 박길생

저자 수: 남(9명), 여(9명)

검토자 수: 남(37명), 여(15명)

주 저자(스톡홀름 환경연구소)는 보고서를 작성하는 동안 성인지적 관점을 적절하게 반영하였습니다. 저자팀은 초안 작성시 유엔환경계획 아시아태평양지부 기후변화 젠더, 및 인권 부전문가인 베라 포코니 (Vera Pokorny)에게 보고서 전반에 걸쳐 양성평등 적용 사안에 대한 검토를 의뢰하였습니다.

약어

AMP	육상전원공급장치 Alternative Maritime Power
AP	대기오염 Air Pollution
APCAP	아시아태평양 청정대기 파트너십 Asia Pacific Clean Air Partnership
BC	블랙 카본 Black Carbon
C	섭씨 Centigrade
CAPSS	대기정책지원시스템 Clean Air Policy Support System
cc	세제곱 센티미터 Cubic Centimetres
CCAC	기후&청정대기연합 Climate and Clean Air Coalition
CFC	염화불화탄소 Chlorofluorocarbon
CH ₄	메탄 Methane
CLRTAP	대기오염 장거리 이동에 관한 협약 Convention on Long-Range Transport of Air Pollution
CN	탄소중립 Carbon Neutrality
CNC	탄소중립녹색성장위원회 Carbon Neutrality and Green Growth Commission
CNG	압축천연가스 Compressed Natural Gas
CO	일산화탄소 Carbon Monoxide
CO ₂	이산화탄소 Carbon Dioxide
CO ₂ eq	이산화탄소 상당량 Carbon Dioxide Equivalent
EA.NET	동아시아 산성 강하물 모니터링 네트워크 Acid Deposition Monitoring Network in East Asia
EEA	유럽환경청 European Environment Agency
e.g.	예시 Exempli Gratia
EMEP	유럽 모니터링/평가 프로그램 European Monitoring and Evaluation Programme
ESG	환경, 사회, 지배구조 Environmental, Social and Governance
EU	유럽연합 European Union
GDP	국내총생산 Gross Domestic Product
GHG	온실가스 Greenhouse Gas
GRDP	지역내총생산 Gross Regional Domestic Product
GW	기가와트 Gigawatt
HCFC	수소염화불화탄소 Hydrochlorofluorocarbon
HFC	수소불화탄소 Hydrofluorocarbon
HNO ₃	질산 Nitric Acid
H ₂ SO ₄	황산 Sulphuric Acid
IBC	통합 편익 산출기 Integrated Benefit Calculator
i.e.	즉 Id Est
IPCC	기후변화에 관한 정부간 협의체 Intergovernmental Panel on Climate Change
K-ETS	한국 배출권 거래제 Korean Emissions Trading Scheme
KAC	한국공항공사 Korea Airport Corporation
KEA	한국에너지공단 Korea Energy Agency
KEPCO	한국전력공사 Korea Electric Power Corporation
kg	킬로그램 Kilogram
km	킬로미터 Kilometre
km ²	제곱킬로미터 Square Kilometre
KNOC	한국석유공사 Korea National Oil Corporation
KOSIS	국가통계포털 Korea Statistical Information Service
KOTEMS	교통부문 온실가스 관리시스템 Korea Transport Emission Management System
KPX	전력거래소 Korea Power Exchange
KRW	대한민국 원화 Republic of Korea Won
LEAP	대기오염과 기후변화 통합분석 The Low Emissions Analysis Platform
LNG	액화천연가스 Liquefied Natural Gas
LPG	액화석유가스 Liquefied Petroleum Gas
LTO	이착륙 Landing and Take Off
m ³	세제곱미터 Cubic Metre
MRV	탄소배출 측정, 보고, 검증 Monitoring, Reporting and Verification
Mt	백만 톤 Million Tonnes
MWh	메가와트시 Millionwatt Hour
μm	마이크로미터 Micro Metre
N	질소 Nitrogen

NAIR	국가미세먼지정보센터 National Air Emission Inventory and Research Center
NASA	미국항공우주국 National Aeronautics and Space Administration
NDC	국가 온실가스 감축목표 Nationally Determined Contribution
NEASPEC	동북아 환경협력계획 Northeast Asian Sub-regional Programme for Environmental Cooperation
NETIS	국가 온실가스 배출량 종합정보 시스템 National Greenhouse Gas Emission Total Information System
NF ₃	삼불화질소 Nitrogen Trifluoride
NFR	보고용 명명법 Nomenclature for Reporting
NH ₃	암모니아 Ammonia
NH ₄ NO ₃	질산암모늄 Ammonium Nitrate
(NH ₄) ₂ SO ₄	황산암모늄 Ammonium Sulphate
(NH ₄) ₃ PO ₄	인산암모늄 Ammonium Phosphate
NLIC	국가물류통합정보센터 National Logistics Information Center
NMVOC	비메탄 휘발성 유기화합물 Non-methane Volatile Organic Compounds
NO	일산화질소 Nitrogen Oxide
NO _x	질소산화물 Nitrogen Oxides
N ₂ O	아산화질소 Nitrous Oxide
O ₃	오존 Ozone
P	인 Phosphorus
Pb	납 Lead
PFC	과불화탄소 Perfluorocarbon
pm	오후 Post Meridien
PM	입자상물질 Particulate Matter
PM _{2.5}	초미세먼지 Fine Particulate Matter with a Diameter of 2.5 µm or less
PM ₁₀	미세먼지 Coarse Particulate Matter with a Diameter of 10 µm or less
POP	잔류성 유기 오염물질 Persistent Organic Pollutant
ppb	십억분율 Parts Per Billion (10 ⁹)
ppm	백만분율 Parts Per Million
RV	레저용 차량 Recreational Vehicle
S	황 Sulphur
SDG	지속가능개발목표 Sustainable Development Goal
SF ₆	육불화황 Sulphur Hexafluoride
SIG	서울, 인천, 경기 Seoul, Incheon and Gyeonggi
SLCP	단기체류 기후변화 유발물질 Short-Lived Climate Pollutant
SMR	수도권 지역 Seoul Metropolitan Region
SMS	미세먼지 계절관리제 Seasonal Management System for Particulate Reductions
SO ₂	이산화황(아황산가스) Sulphur Dioxide
SO _x	황산화물 Sulphur Oxides
TOE	석유환산톤 Tonnes of Oil Equivalent
TSP	총부유먼지 Total Suspended Particulates
TW	테라와트 Terawatt
TWh	테라와트시 Terawatt Hours
UNEP	유엔환경계획 United Nations Environment Programme
UNFCCC	유엔기후변화협약 United Nations Framework Convention on Climate Change
USD	미국 달러화 United States Dollars
VOC	휘발성 유기 화합물 Volatile Organic Compounds
WHO	세계보건기구 World Health Organization

목차

약어	iii
그림 목록	vi
표 목록	ix
핵심 요약	xii
1 서론	01
1.1 배경	03
1.2 연구 목적 및 목표	05
1.3 평가 체계 및 보고서 구조	07
1.4 주요 고려 사항: 기후변화 완화와 대기오염 간의 연계성	11
2 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 현황 및 영향	15
2.1 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 관리	17
2.1.1 법제도	17
2.1.2 배출저감 정책	23
2.2 대기오염 농도	31
2.3 대기오염 노출	39
2.4 대기오염과 건강위해성	41
2.5 대기오염물질 배출	43
3 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출목록, 베이스라인 및 감축 시나리오 작성	49
3.1 서울, 인천, 경기 지역 배출량 추정	51
3.1.1 서울, 인천, 경기 지역 대기오염 저감 평가의 배경	52
3.2 전체 평가 프레임워크	73
3.2.1 과거 배출량 계산 방식	77
3.2.2 베이스라인 시나리오 미래 배출량 추정	90
3.2.3 배출저감 정책의 저감 효과 추정	95
3.3 대기오염 저감평가 결과	99
4 서울, 인천, 경기 지역 대기오염문제 해소	117
4.1 서울, 인천, 경기 지역에서 지난 수십 년간 대기오염이 개선될 수 있었던 여러가지 이유	119
4.2 미래 서울, 인천, 경기 지역 대기오염의 지속적 개선을 위한 권고 사항	128
참고문헌	137

그림 목록

그림 1.1: 배출부터 이로 인한 영향까지 “대기오염 사슬”의 4개 고리와 보고서 관련 내용	09
그림 1.2: 대기오염물질, 단기체류 기후변화 유발물질, 온실가스로 구분한 오염물질	12
그림 2.1: 1980-2016년 서울 대기오염물질 농도 변화	18
그림 2.2: 대한민국 대기질관리를 위한 국가 단위 법 및 지방 단위 시행계획 체계	19
그림 2.3: 2022년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기환경관리 개요	22
그림 2.4: 2003-2021년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기질 관리 기본틀의 주요 경과	24
그림 2.5: 주요 배출원 배출저감 핵심 완화대책을 포함한 ‘수도권 대기환경관리 기본계획’ 개요	26
그림 2.6: 2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 미세먼지(PM ₁₀) 농도(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	32
그림 2.7: 2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 초미세먼지(PM _{2.5}) 농도(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	33
그림 2.8: 2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 이산화질소 농도(단위: ppb)	33
그림 2.9: 2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 오존 농도(단위: ppb)	34
그림 2.10: 1999-2019년 대한민국의 미세먼지, 초미세먼지, 블랙 카본 배출량 - 비산 먼지 및 바이오매스 연소 포함(단위: 톤)	44
그림 2.11: 1999-2019년 대한민국의 미세먼지, 초미세먼지, 블랙 카본 배출량 - 비산 먼지 및 바이오매스 연소 제외(단위: 톤)	44
그림 2.12: 2005년 대한민국 단기체류 기후변화 유발물질 배출원별 비중(단위: %)	47
그림 2.13: 2019년 대한민국 단기체류 기후변화 유발물질 및 대기오염물질 배출원별 비중(단위: %)	47
그림 3.1: 2005-2020년 대한민국 지역별 가구 수(단위: 백만)	54
그림 3.2: 2005-2020년 대한민국의 유형별(A), 지역별(B) 차량 대수(단위: 천 대)	56
그림 3.3: 2005-2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 인구 1,000명 당 전 차종(A) 및 승용차(B) 차량 대수	56
그림 3.4: 2005-2020년 대한민국 크기별 승용차 대수(단위: 천 대) - 대한민국 자동차관리법에 따라 1000 CC 이하는 경형, 1600 CC 이하는 소형, 2000CC 이하는 중형, 2000CC 이상은 대형차로 분리	57
그림 3.5: 2005-2020년 대한민국 중형 승용차 배출 가스 등급별 비중(단위: %)	57
그림 3.6: 2005-2020년 대한민국 대형 자동차 배출 가스 등급별 비중(단위: %)	58
그림 3.7: 2005-2020년 대한민국 철도 사용, 여객 운송(단위: 10억명-km, 10억톤-km)	58
그림 3.8: 2005-2020년 대한민국 입항 선박 선박(A) 및 지역별(B) 현황(단위: 천 척)	59
그림 3.9: 2005-2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 건설기계(A) 및 농업기계(B) 현황(단위: 천 대)	60
그림 3.10: 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 제조업, 광업, 건설업의 주요 하위 부문별 부가가치 GDP 현황(단위: 조 원)	62

그림 3.11: 2020년 대한민국 제조업 연료 소비량(단위: MTOE)	63
그림 3.12: 2020년 대한민국 주요 제조업, 건설업, 광업의 연료 소비량(단위: MTOE)	63
그림 3.14: 2005년 및 2020년 대한민국의 공정별 철강 생산량(단위: 백만 톤)	64
그림 3.13: 2020년 대한민국 3대 연료 소비 산업의 총 연료 소비량 대비 연료별 비중(단위: %)	64
그림 3.15: 2005-2020년 대한민국의 연료별 발전량(단위: TWh)	66
그림 3.16: 2005-2020년 대한민국 발전용 연료 소비량(단위: MTOE)	66
그림 3.17: 대기오염 배출 저감 평가 실행 순서	75
그림 3.18: 'Low Emissions Analysis Platform (LEAP)' 모델링 프레임워크	76
그림 3.19: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 산업 부문 배출 모델 구축 구조	81
그림 3.20: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 가구 부문 배출 모델 구축 구조	82
그림 3.21: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 도로 수송 배출 모델 구축 구조	83
그림 3.22: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 비도로 수송 배출 모델 구축 구조	84
그림 3.23: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 서비스 부문 배출 모델 구축 구조	85
그림 3.24: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 발전 부문 배출 모델 구축 구조	86
그림 3.25: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 축산 부문 배출 모델 구축 구조	87
그림 3.26: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 작물 생산 배출 모델 구축 구조	87
그림 3.27: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 산업 공정 배출 모델 구축 구조	88
그림 3.28: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 폐기물 부문 배출 모델 구축 구조	89
그림 3.29: 2005-2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 거시경제 부문별 GDP 변화(단위: 조 원)	91
그림 3.30: 2005-2050년 대한민국의 지역별(A) 및 차량 유형별(B) 차량 대수 베이스라인 예측(단위: 천 대)	92
그림 3.31: 2005-2050년 중형 승용차 배출 가스 등급별 비중 베이스라인 예측(단위: %)	93
그림 3.32: 2020년과 2050년 대한민국 연료 유형별 최종 에너지 소비 베이스라인 예측(단위: 천 TOE)	94
그림 3.33: 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 주요 배출 부문별 1차 초미세먼지 총 배출량(A) 및 비중(B), (단위: 천 톤(A), %(B))	103
그림 3.34: 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 주요 배출 부문별 질소산화물 총 배출량(A) 및 비중(B), (단위: 천 톤(A), %(B))	104
그림 3.35: 2005-2020년 대한민국 주요 배출 부문별 이산화탄소 배출량 (A) 및 1차 초미세먼지 배출량(B), (단위: 백만 톤(A), 천 톤(B))	105
그림 3.36: 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 주요 배출 부문별 총 이산화탄소 배출량(A) 및 비중(B), (단위: 백만 톤(A), %(B))	107
그림 3.37: 2030년(A) 및 2050년(B) 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 베이스라인 시나리오 대비 탄소중립 시나리오(CN)의 대기오염물질 및 온실가스 배출 감소율(단위: %)	111
그림 3.38: 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 주요 배출 부문별 초미세먼지, 질소산화물, 이산화탄소의 베이스라인 시나리오 대비 탄소중립 시나리오(CN)의 배출 감소율(단위: %)	112

그림 3.39: 이번 평가에 포함된 모든 대책(탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오) 이행 후 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 베이스라인 시나리오 대비 초미세먼지 배출 감소량(단위: 천 톤)	113
그림 3.40: 이번 평가에 포함된 모든 대책(탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오) 이행 후 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 베이스라인 시나리오 대비 질소산화물 배출 감소량(단위: 천 톤)	114
그림 3.41: 이번 평가에 포함된 모든 대책(탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오) 이행 후 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 베이스라인 시나리오 대비 이산화탄소 배출 감소량(단위: 천 톤)	114

표 목록

표 2.1: 국가 대기환경기준	20
표 2.2: 2007-2020년 서울, 인천, 경기 지역 대기환경 관리에 소요된 재정(단위: 백만 원)	28
표 2.3: 2021년 위치별 대한민국 대기질 관측소 현황	32
표 2.4: 2005년 대한민국 배출원별 대기오염물질 배출 현황(단위: 톤)	46
표 2.5: 2019년 대한민국 배출원별 대기오염물질 배출 현황(단위: 톤)	46
표 2.6: 2019년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 총 배출량(단위: 천 톤)	48
표 2.7: 2019년 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 전국 총배출량 대비 비중(단위: %)	48
표 3.1: 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 주요 인구 및 거시경제 현황	52
표 3.2: 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 가구당 전기 및 천연가스 사용량(단위: 전기-MWh, 가스-TOE)	54
표 3.3: 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 주요 산업 및 서비스 부문 부가가치 GDP 현황(단위: 조 원)	62
표 3.4: 2005년 및 2020년 대한민국과 경기 지역 가축 유형별 마릿수	68
표 3.5: 2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 쌀 및 기타 작물 생산량(단위: 천 톤)	68
표 3.6: 2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 경작지(단위: 천 헥타르)	69
표 3.7: 2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 비료 사용(단위: kg N/헥타르)	69
표 3.8: 2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 매립, 소각, 비료화/재활용된 생활 및 산업 고형 폐기물 양(단위: 천 톤)	71
표 3.9: 2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역에서 발생한 생활 및 산업 폐수량(단위: 백만m ³)	71
표 3.10: 배출 목록에 포함된 배출 부문과 명명코드(NFR)	74
표 3.11: 서울, 인천, 경기, 대한민국 배출 부문별 배출량 추정에 사용된 자료 출처	79
표 3.12: 베이스라인 시나리오 개발에 사용된 인구 및 거시경제 변수 예측치	91
표 3.13: 2005-2050년 대한민국 주요 산업별 산업 및 서비스 부가가치 GDP 베이스라인 추정치(단위: 조 원)	93
표 3.14: 베이스라인 시나리오에 포함된 정책	95
표 3.15: 탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오에 포함된 정책	96
표 3.16: 2005년 및 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 및 온실가스 배출량(단위: 천 톤)	100
표 3.17: LEAP 분석에 따른 2019년 대한민국 대기오염물질 배출량 추정치와 CAPSS 추정치 비교(단위: 천 톤)	101
표 3.18: LEAP 분석에 따른 2019년 대한민국 주요 배출 부문별 대기오염물질 배출량 추정치와 CAPSS 추정치 비교(단위: 천 톤)	102
표 3.19: 2010-2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 초미세먼지, 이산화탄소, 질소산화물 배출량 베이스라인 시나리오에 따른 추정(단위: 천 톤)	109
표 3.20: 2020, 2030, 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 초미세먼지, 이산화탄소, 질소산화물의 베이스라인 및 모든 대책 이행을 가정한 감축 시나리오 상의 총 배출량(단위: 천 톤)	111

표 3.21: 2050년 대한민국 주요 배출 부문별 초미세먼지, 질소산화물, 이산화탄소의 베이스라인 대비 배출 감소량(단위: 천 톤, %)	112
표 3.22: 2050년 대한민국 개별 완화 조치 이행에 따른 베이스라인 시나리오 대비 배출 감소량(단위: 천 톤)	113
표 4.1: ‘2019 아시아 태평양 지역 대기오염: 과학기반해법’ 보고서의 청정대기 우수 대책(전통적인 관리대책, 차세대 관리대책, 대기오염 편익 동반 개발대책으로 분류)	129



핵심 요약

서울, 인천, 경기 세 지역은 총 인구 2,600만명으로 대한민국 북서쪽의 12,000 평방 킬로미터 면적을 차지하는 세계 최대 규모의 대도시 구역이다. 세계은행에 따르면 2016년 대한민국 전체 GDP의 48%를 이들 세 지역이 차지했다. 서울, 인천, 경기 지역의 대규모 인구와 경제 활동은 대기오염 물질의 배출을 야기하는 교통, 산업, 폐기물 배출, 전력생산 등의 활동들을 증대시켜 왔다. 그 결과 미세먼지(PM)와 같이 인체에 심각한 영향을 끼치는 대기오염물질의 농도는 15년 전 이미 한국의 국가대기환경기준 및 세계보건기구(WHO) 가이드라인을 초과했다. 지난 15년 동안 서울, 인천 및 경기 지역의 대기오염 수준은 상당히 감소하였는데 이는 이 지역의 강력한 대기오염 관리 정책과 거버넌스 추진, 대기오염 배출저감 대책 이행 및 서울, 인천, 경기 지역에 유입되는 주변 지역의 대기오염물질 배출저감에 따른 결과이다.

현재 전 세계의 다른 여러 지역들도 그 지역 주민들의 건강에 상당히 심각한 영향을 주는 대기오염 문제를 해결하기 위해 고심하고 있다. 전세계적으로 대부분의 사람들이 대기오염에 노출되어 있으며 이는 세계보건기구(WHO) 가이드라인을 초과한 수준이다. 이로 인해 매년 수백 만명이 조기 사망할 뿐만 아니라 비치명적 건강 영향을 받게 된다. 많은 사람들이 깨끗한 공기로 숨쉬기 위해 선결해야 할 과제는 지역차원에서 어떻게 대기오염관리 시스템을 구축하고 오염의 정도를 파악할 수 있을 것인지, 대기오염을 줄이기 위해서는 어떤 대책을 쓰고 필요한 자원은 어떻게 마련할 것인지, 또 대책의 효과는 어떻게 모니터링할 것인가와 같은 사안들이다. 그러므로 이 보고서의 목적은 서울, 인천, 경기 지역에서 대기오염 문제를 해소하고 건강을 지키기 위해 시도했던 여러가지 대책들과 그 과정에서 얻은 경험을 공유함으로써 아시아 태평양 지역의 도시 대기오염 문제 해결 활동을



돕는 데 있다. 이러한 목표는 2005년부터 2020년까지 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 감축 실태와 지역 내 대기오염 물질의 농도를 줄이기 위해 이 세 지역이 어떠한 저감 정책을 시행했는지, 대기오염의 진행상황을 추적할 수 있는 도구와 프로세스를 어떻게 마련했는지 등을 살펴봄으로써 달성될 수 있을 것이다. 또한 이 보고서는 2050년까지 어떻게 이 세 지역의 대기오염물질 배출을 추가로 감축할 수 있을지를 평가할 것이다. 이 보고서는 서울, 인천, 경기도가 과거 수십년간 대기오염 문제를 해결하기 위해 기울였던 노력의 주요 하이라이트 및 대기질 개선 효과를 지속시키기 위한 정책적 제안을 다음과 같이 제시한다.

서울, 인천, 경기도는 견고한 법적 제도를 구축하고 제도 이행을 위한 적절한 재원을 투입하였다

보고서 전반부는 2005년에서 2020년까지의 대기오염 현황을 담고 있다. 기본적으로 규제 제도의 측면에서 서울, 인천, 경기 지역의 대기질은 3단계 정책 계획을 통해 관리된다. 먼저, **기본법**은 국가 차원에서 특정 사안에 전반적으로 적용되는 기본틀을 제공한다. 다음으로, 국가 차원에서 **기본 계획**을 수립하여 기본법을 어떻게 적용할 지에 대한 개괄적인 내용을 제시한다. 최종적으로, 지역 차원에서 **시행 계획**을 수립하여 각 지역에서 조건, 환경 및 우선순위를 감안하여 기본법을 구체적으로 어떻게 이행할 지 계획한다. 이와 관련된 법들은 2005년에서 2020년까지 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 문제 해결을 위한 실질적인 대책 이행으로 이어졌다. 먼저 2007년부터 2020년까지 이 세 지역의 대기질 관리에 총 90억 달러 상당의 재정적 투자가 이루어졌다. 이와 같은 대규모 투자를 통해 서울, 인천, 경기 지역에서 실효성 있는 저감대책을 시행할 수 있었으며, 총 투자금액의 56%는 교통부문 배출저감을 위한 대책 이행에 사용되었다.

서울, 인천, 경기도는 공식적으로 누구나 접근가능한 장기적인 대기오염 관측자료를 제공한다

전 세계에서 대기질 연구가 가장 많이 이루어진 지역 중 한 곳이 바로 서울, 인천, 경기 지역이라는 사실은 앞서 언급한 투자의 결과라고 할 수 있다. 조밀한 대기질 관측망 덕분에 국가 대기환경기준과 비교가 가능하고, 서울, 인천, 경기도의 여러 배출원의 기여 정도를 알 수 있는 배출목록이 있기 때문에 저감 우선순위를 파악할 수 있다. 이와 같이 적절한 투자와 관리 체계를 통해 서울, 인천, 경기 외 지역의 대기오염도 저감되었고 과거 수십년 동안 대기질이 상당히

개선될 수 있었다. 실제로 2021년의 연평균 미세먼지(PM_{10}) 농도는 2005년 대비 30~40% 낮은 수준이었다. 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출 역시 상당히 감소하였다. 특히 주요 배출원인 도로수송 부문에서 2019년 미세먼지 배출량은 2005년 대비 77% 감소하였다. 대기오염물질 농도와 배출에 관한 정밀한 데이터의 정기 보고 체계 덕분에 이러한 경향성을 평가할 수 있었다.

과거 15년 동안 대기오염 저감과 온실가스 감축 경향은 동일하지 않았다

대기오염 물질과 온실가스의 배출원은 중복되는 경우가 많고 양측을 모두 저감 시킬 수 있는 수단들이 있기 때문에, 사실 대기오염과 기후변화가 동시에 완화될 실질적인 기회가 있다. 하지만 서울, 인천, 경기 지역에서 2005년부터 2020년까지 시행한 대기오염 저감정책은 온실가스 감축 보다는 특정 대기오염물질을 대상으로 시행되었다. 이 보고서는 동일 기간 동안(2005~2020년) 대한민국의 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 1차 배출은 19%가 감소한 반면, 이산화탄소 배출은 25% 증가했음을 보여준다. 주요 대기오염물질의 배출 감소 경향과 달리 인천과 경기 지역의 이산화탄소 배출은 각각 7%, 10% 증가하였다. 서울의 경우 이산화탄소 배출이 14% 감소했으나 89% 까지 달하는 주요 대기오염물질 감소 수준과 비교해 보면 감소폭이 매우 낮다.

향후 이 지역의 기후변화 대응계획이 지속적으로 이행되면 지역 내 대기오염물질 감소에 더욱 기여할 수 있다

전기차 확대보급, 엄격한 에너지 효율 관리, 산업 부문 청정연료 사용 확산과 같은 대한민국의 탄소중립계획이 이행되면 온실가스 배출 저감과 함께 서울, 인천, 경기도와 한국의 기후변화 대응 목표 달성에도 기여할 수 있을 뿐만 아니라 세 지역의 대기오염물질 배출도 줄일 수 있다. 2050년까지 이 프로젝트의 평가 내용을 포함하여 모든 탄소중립 정책이 완전히 이행된다면, 국가 총 이산화탄소 배출은 베이스라인 시나리오 대비 88% 저감할 수 있고, 서울, 인천, 경기 지역에서도 비슷한 수준의 저감 효과를 달성할 수 있다. 또한 초미세먼지 배출은 베이스라인 시나리오 대비 2050년 서울에서 78%, 인천에서는 88%, 경기도에서는 58% 정도 감축할 수 있다. 이산화탄소와 같은 배출원에서 나오는 기타 오염물질의 감소폭은 훨씬 더 클 것이다. 질소산화물 배출 역시 서울 76%, 인천 81%, 경기도 83% 정도 감소가 예상된다.

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 개선관련 경험들은 아시아의 인구밀집도가 높은 대도시에서도 대기오염 개선이 가능하다는 것을 보여주고 있다. 하지만 그러한 결과를 얻기 위해서는 고도로 집중된 노력과 투자가 필요하다는 것을 알 수 있다.

그럼에도 주요 대기오염물질 배출량을 줄이기 위해서는 추가적인 대책이 요구된다.

이번 평가 과정에 포함된 탄소중립 시나리오는 이산화탄소의 주요 배출원을 중심으로 구성되어 있다. 탄소중립 대책을 이행한 이후에도 남아있을 주요 배출원은 **비도로 수송부문**이다. 건설, 농업, 기타 산업에서 사용하는 기계류가 비도로 부문에 해당하는데, 과거 이 부문에 배출 저감 정책들이 적용되긴 하였으나(예: 비도로 차량의 전기화), 이 정책들 이외에도 비도로 부문 배출원의 배출을 추가 감축할 수 있는 수단들을 발굴할 수 있다. 마지막으로 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도를 심화시키는 주요 오염물질 중에서 과거 대기오염물질 저감 대책의 대상이 되지 않았거나 탄소중립 정책을 통해서 관리되지 않은 물질이 있다. 바로 농업 부문에서 주로 배출되는 **암모니아**로, 합성 및 유기 비료를 사용하는 과정에서 배출되며 대기 중 초미세먼지 생성에 주요 역할을 하고, 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도에 지대한 영향을 끼친다. 과거 연구를 살펴보면 한국의 전반적인 대기질 개선을 위해 암모니아 배출 관리가 필요하다는 내용이 강조되어 있다. 하지만 베이스라인 시나리오 상에서 암모니아 배출 저감 조치 이행을 통해 2050년까지 감소할 수 있는 암모니아 총배출량은 전국적으로 1.2%에 불과하다. 서울, 인천, 경기 지역에서 유일하게 농업이 활발한 경기도의 경우, 추가적인 배출 저감 대책이 없으면 2050년까지 암모니아 배출량은 최대 3% 감소에 그칠 것으로 예상된다. 그러므로 서울, 인천, 경기 지역의 대기질관리 체계 내에서 현재까지 고려되지 않고 있는 오염물질에 대한 추가적인 배출 저감 대책 및 성인지 정책 등을 찾아야 할 필요성이 있다.

대기질 개선은 전 지구적으로 인류 건강 개선을 위한 최우선 과제이지만, 현재 많은 국가, 지역 및 도시는 인류 건강에 도움이 될 수 있는 대기오염 저감조치 시행에 필요한 규제와 과학적 근거 및 재원을 갖추지 못하고 있다. 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 개선관련 경험들은 아시아의 인구밀집도가 높은 대도시에서도 대기오염 개선이 가능하다는 것을 보여주고 있다. 하지만 그러한 결과를 얻기 위해서는 고도로 집중된 노력과 투자가 필요하다는 것을 알 수 있다.

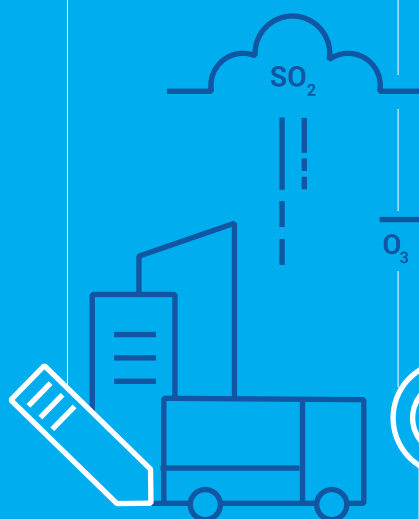
마지막으로 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염은 20여년 간 실질적 개선을 이끌어낸 정책과 조치, 그리고 향후 어떻게 더 개선될 수 있는지에 있어 중요한 기로에 서있다. 다른 지역과 마찬가지로, 과거의 대기질 개선은 오염물질별 저감 조치를 통해 달성되었기 때문에, 대기오염 저감이 온실가스 감축으로 이어지지는 않았지만, 서울, 인천, 경기 지역에서 대기오염과 기후변화를 함께 대응할 수 있는 미래 지향적 대책이 확인되었다. 대기질 문제를 완화할 수 있는 방법을 고심하고 있는 전 세계의 다른 지역들 역시 이 보고서에서 제시된 것처럼 다양한 정책 수단을 발굴하고 효과를 극대화하는 방법을 통해 정책 이행에 필요한 폭넓은 지원을 확보할 수 있을 것이다.



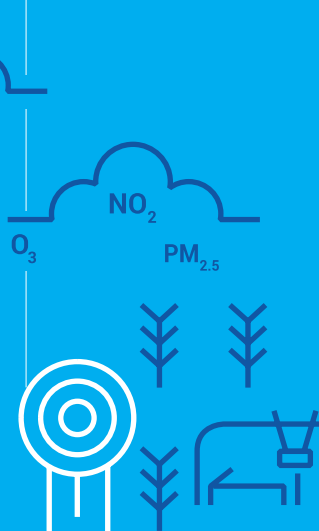
01

서론

1.1 배경



1.2 연구 목적 및 목표



1.3 평가 체계 및 보고서 구조



1.4 주요 고려 사항: 기후변화 완화와 대기오염 간의 연계성



대기오염은 인간의 건강을 위협하는 가장 큰 환경 위험 요인 중 하나로, 세계적으로 연간 650만명의 조기 사망을 유발하는 원인이다(Murray et al. 2020). 고농도 대기오염에 장기간 노출되는 경우 호흡기 및 심혈관 질환, 암 그리고 기타 질병의 발병 위험이 높아지기 때문에 조기 사망률에 큰 영향을 미치게 된다(WHO 2021).



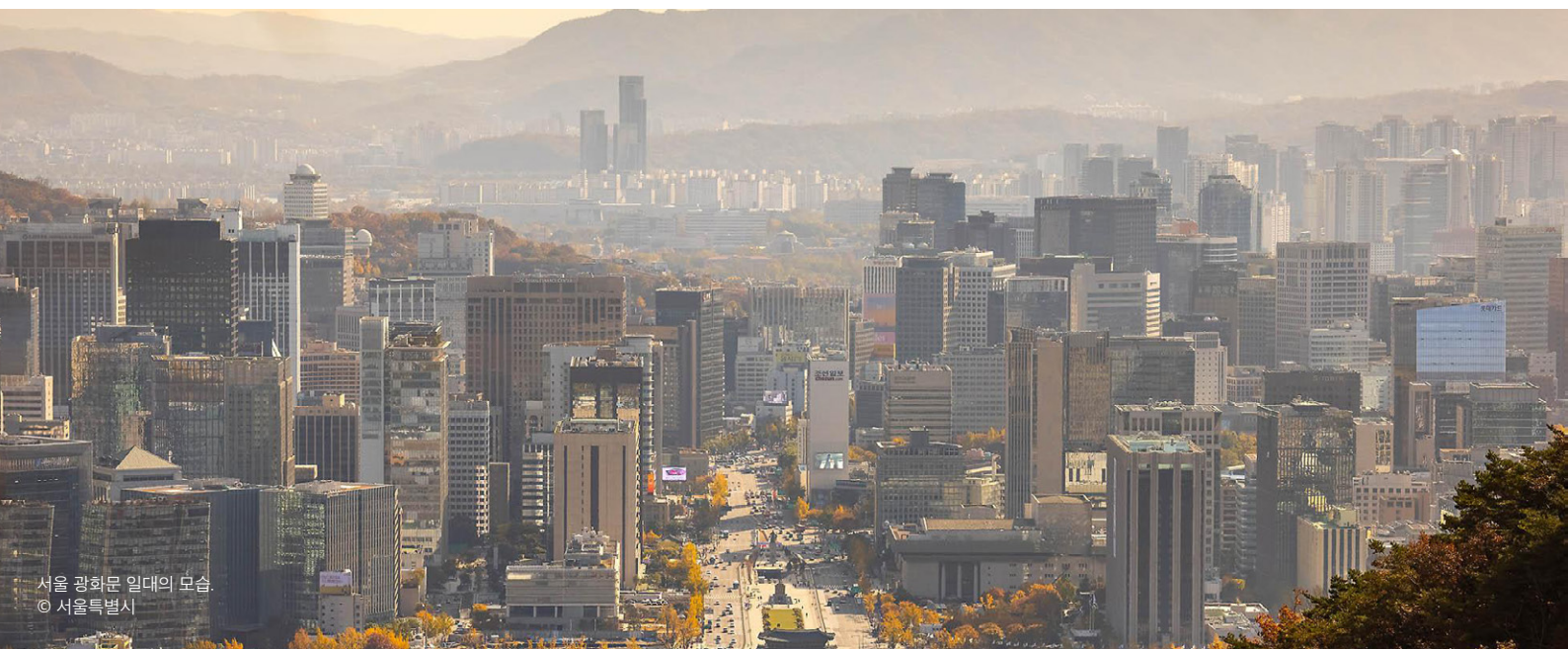
1.1 배경

대기오염은 인간의 건강을 위협하는 가장 큰 환경 위험 요인으로, 세계적으로 연간 650만명의 조기 사망을 유발하는 원인이다(Murray *et al.* 2020). 고농도 대기오염에 장기간 노출되는 경우 호흡기 및 심혈관 질환, 암 그리고 기타 질병의 발병 위험이 높아지기 때문에 조기 사망률에 큰 영향을 미치게 된다(WHO 2021). 뿐만 아니라 대기오염 노출은 호흡기 및 심혈관 질환 치료를 위한 입원, 천식 악화 및 임신부와 태아에 미치는 부정적인 영향 등 '비치명적 건강영향(non-fatal health outcomes)'을 유발한다(Malley *et al.* 2017; Anenberg *et al.* 2018).

대기오염이 악화된다면 지구상의 거의 모든 사람들이 오염에 노출될 수밖에 없으므로 대기오염은 인류 건강에 지대한 영향을 미치는 큰 부담 요소로 작용한다. 유감스럽게도 이미 세계 인구의 99%는 인류의 건강 보호를 위해 세계보건기구(WHO)가 마련한 초미세먼지(PM_{2.5}) 권고 가이드라인¹을 상회하는 수준의 환경에 노출되어 있다(WHO 2021). 한편 거의 모든 사람이 위해한 대기오염에 노출되어 있지만 모두가 동일한 피해를 입는 것은 아니다. 즉 산업현장이나 조리과정 중에 발생하는 주요 대기오염원에 가까이 위치한 취약계층 및

여성들이 대부분 가장 높은 수준의 대기오염에 노출되어 있다(Malley *et al.* 2020).

대기오염물질을 배출하는 배출원이 무수히 많을 뿐만 아니라 대기 중으로 일단 배출된 대기오염물질의 물리화학적 과정 역시 상당히 복잡적이기 때문에 대기오염에 대한 노출과 건강에 미칠 부정적인 영향을 줄이는 과정은 복잡할 수밖에 없다(Fuzzi *et al.* 2015; Monks *et al.* 2015). 특히 특정장소에서의 대기오염 노출은 인접한 배출원뿐만 아니라 원거리에 위치한 배출원에서 배출되는 오염물질로 인해 발생할 수도 있기 때문이다. 참고로 원거리 배출원에서 발생한 오염물질은 대기 중에서 이동하며 화학적 반응으로 인해 다른 오염물질로 변형될 수 있다. 건강에 부담을 초래하는 대표적인 오염물질로는 초미세먼지(PM_{2.5}) 및 오존(O₃)이 있으며, 이 두가지 오염물질은 배출에서부터 대기오염 농도, 노출 및 건강에 미치는 부정적인 영향 등이 사슬처럼 복잡하게 얽혀 있는 전형적인 사례이다. 입자상 물질(Particulate Matter, PM)이란 대기 중에 떠다니는 고체 상태의 미세입자를 의미하며, 여러 화학성분으로 구성되어 있다. 특히 대기로 직접 배출되는 입자상 물질은 1차 미세먼지(primary PM)



서울 광화문 일대의 모습.
© 서울특별시

1 세계보건기구 국제 대기질 가이드라인(WHO global air quality guidelines): <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

라 하며 질소산화물(NO_x), 아황산가스(SO_2), 암모니아(NH_3) 및 휘발성유기화합물(VOC) 등 기체 상태의 전구 오염물질이 대기 중 특정 조건에 반응하여 입자화 되는 것을 2차 미세먼지(secondary PM)라 한다(Heal et al. 2012). 입자상 물질(secondary PM)은 몇 일 동안 대기 중에 부유상태로 존재하기 때문에 수백 킬로미터를 이동할 수 있고, 배출원에서 상대적으로 멀리 떨어진 장소의 대기질에도 영향을 미칠 수 있다. 오존은 대기 중의 질소산화물과 휘발성유기화합물, 메탄 및 일산화탄소가 광화학 반응을 일으켜 생성된다. 참고로 한번 생성된 오존의 수명은 최대 3주이기 때문에 대기 중 이동하며 전 세계로 확산될 수 있고 다른 대륙의 대기 질에도 영향을 미칠 수 있다(Royal Society 2008; Monks et al. 2015).

사람들에게 노출되는 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)를 유발하고 오존 농도를 증가시키는 대기오염 물질의 배출원은 다양하다. 따라서 여러 부문을 아우르는 대책을 시행할 필요가 있다. 참고로 이러한 대기오염물질은 교통(도로, 철도, 항공 및 해운), 가정, 산업, 발전, 석유, 가스 및 석탄 생산, 폐기물 및 생물성 연소 등 다양한 부문에서 배출된다(IEA 2016). 한편 배출량을 저감하기 위해 시행할 수 있는 대책은 부문별로 다르며 차량 배기가스 제어기술(예: 유로 배출기준(Euro standards²) 적용), 연료전환(예: 바이오매스가 아닌 LPG 또는 전기와 같이 보다 더 청정한 연료를 사용하는 조리기구로 전환), 또는 행동 변화(예: 농업 잔재물의 노천소각 지양) 등도 대책의 일환으로 활용된다. 이와 같은 대부분의 대책은 저비용이거나 마이너스 비용(negative costs)이며, 경제 성장, 지속가능한 에너지 사용, 지속가능한 도시 발전 등의 우선순위를 달성하는데 기여한다(Haines et al. 2017; UNEP 2019a).

주요 배출원을 대상으로 대책을 시행하여 여러 지역에서 대기질을 개선하는 성과를 달성하였음에도 불구하고 지난 수십 년 동안 여전히 많은 지역, 국가 및 도시에서 대기오염 및 건강 피해는 심화되고 있다. 특히 아시아에 위치한 도시의 경우 대기오염으로 인한 피해는 상이하게 나타난다. 대기오염이 세계 도시에 미치는 영향을 조사한 결과, 아시아 주요 도시의 경우 매년 수백만 명이 조기 사망하는 것으로 나타났다. 세계 여러 지역 중 특히 아시아에 위치한 도시에서 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 노출

관련 사망률이 가장 높은 것으로 추정되었으며, 동아시아, 남아시아 및 중앙아시아 도시의 사망자 수 중앙값은 각각 10만명 당 106명, 86명 및 78명으로 조사되었다(Anenberg et al. 2019).

이에 따라 아시아뿐만 아니라 전 세계 모든 도시에서 건강 증진을 위해 취할 수 있는 가장 효과적인 조치는 바로 주요 배출원의 배출량을 저감하여 대기오염에 대한 노출을 줄이는 정책을 시행하는 것이다.

서울특별시, 인천광역시, 경기도(이하 서울, 인천, 경기 지역)는 대한민국 북서쪽에 위치한 3개의 행정구역이다. 참고로 서울은 특별시이고 인천은 광역시이며 경기도(道)로 지정되어 있다. 비록 각기 다른 행정구역으로 관리되고 있으나 서울, 인천, 경기 지역은 2,600만 명의 인구가 거주하는 세계에서 다섯 번째로 큰 수도권을 형성하고 있다. 지난 15년 동안 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 문제는 크게 개선되었으며, 이는 곧 국가 및 지역 차원에서 이행한 정책이 대기오염의 농도 및 노출 저감에 어떻게 기여할 수 있는지를 보여준 실질적인 사례라 할 수 있다. 그러나 건강을 해치는 수준의 대기오염에 지속적으로 노출되어 있어 서울, 인천, 경기 지역의 건강에 미치는 부담은 여전히 상당하다. 건강영향연구소(Health Effects Institute)에서 발표한 분석에 따르면 서울의 인구 가중 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도는 $27.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 이로 인해 매년 9,000명의 조기 사망이 발생한다. 즉 인구 10만명당 40명이 사망하는 셈이다(Health Effect Institute 2020; Health Effects Institute 2022).

따라서 지난 수십년 동안 달성한 성과를 토대로 대기오염 저감에 있어 대기질 관리의 효과성을 가늠할 수 있는 아주 유용한 사례가 바로 서울, 인천 및 경기를 아우르는 수도권이라 할 수 있다. 또한, 시민의 건강을 보호하기 위해 대기오염 저감을 추가적으로 달성해야 하는 대도시 권역의 표본이기도 하다.

2 유로배출기준(Euro standards): EU의 승용 및 상용차에 적용되는 새로운 배출기준, <https://dieselnet.com/standards/eu/> ld.php

이 보고서의 목적은 서울, 인천, 경기지역에서 대기오염 문제를 해소하고 건강을 지키기 위해 추진했던 여러가지 대책과 그 과정에서 얻은 경험을 공유함으로써 아시아 태평양 지역의 도시 대기오염 문제 해결 활동을 돕는 데 있다.

1.2 연구 목적 및 목표

목적

이 보고서의 목적은 서울, 인천, 경기지역에서 대기오염 문제를 해소하고 건강을 지키기 위해 추진했던 여러가지 대책과 그 과정에서 얻은 경험을 공유함으로써 아시아 태평양 지역의 도시 대기오염 문제 해결 활동을 돕는 데 있다. 또한 2005년부터 2020년까지 서울, 인천, 경기 지역에서 달성한 대기오염 감축 성과를 정리하여 2050년까지 이 지역의 대기오염이 얼마나 더 감축될 수 있는 지 알아보고, 서울, 인천, 경기 지역이 어떻게 대기오염물질 농도를 의미 있는 수준으로 줄일 수 있었는지, 구체적인 배출저감정책을 이행하고 이를 위한 도구들을 개발할 수 있었던 방법은 무엇이었는지, 또 어떻게 지역의 대기오염 개선을 추적할 수 있었는지를 보여줌으로써 앞서 기술한 보고서의 목적에 부합할 수 있을 것이다.

이 보고서는 전반적인 목표 달성을 위해 다음과 같은 하위 목표를 설정하였다.

- + 2005년부터 2020년까지 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출량, 농도 및 건강에 미친 영향 상의 변화에 대한 기존 정보 평가
- + 서울, 인천, 경기 지역의 과거 배출량(2005년-2020년) 및 베이스라인 시나리오 배출량(2021-2050년)에 대한 분석을 토대로 대기오염물질, 단기체류 기후변화 유발물질(SLCPs) 및 온실가스(GHG) 배출량에 대한 통합 평가

- + 2050년 대한민국 탄소중립 목표 달성을 통해 저감할 수 있는 대기오염물질 배출량을 포함해 향후 서울, 인천, 경기 지역에서 구체적인 대책을 시행하여 감축 가능한 대기오염물질 배출량에 대한 평가
- + 서울, 인천, 경기 지역별로 대기질 관리를 강화하고 향후 배출량 감축을 최대한 달성할 수 있도록 우선순위를 반영하여 저감조치를 시행할 수 있도록 서울, 인천, 경기 지역을 대상으로 구체적인 일련의 권고사항 제시

대상

이 보고서를 통해 정보를 전달하고자 하는 독자층은 두 부류이다. 첫번째는 서울, 인천, 경기 지역의 향후 대기오염 저감 방안에 대한 구체적인 권고사항을 제시하여 이를 참고할 수 있는 한국의 의사 결정자들이다. 다음 대상은 지역, 국가 및 도시 차원에서 대기오염 개선 정책을 마련하기 위해 노력하고 있는 타 지역의 정책 담당자 및 의사 결정자들이다.

범위

서울, 인천, 경기 지역에서 달성한 대기오염 저감 성과를 평가하는 과정에서 해당 지역 내 대기오염측정망 자료를 사용하였고, 서울, 인천, 경기 지역 및 전국적으로 모든 주요 배출원의 배출량을 파악하기 위해 대기오염물질 배출목록(emission inventories)을 활용하였다. 평가의 지리적 범위는 서울, 인천, 경기 지역이다.



대기질 목표를 달성하기 위해 가능한 많은 인구에게 가장 유익하면서도 널리 채택되고 있는 방식은 바로 배출원에서 발생하는 배출량을 직접 저감하는 것이다.

1.3 평가 체계 및 보고서 구조

여러 평가체계를 통해 특정 지역의 대기오염을 평가할 수 있다. 이 중 일부 체계는 배출량, 농도 또는 대기오염으로 인한 영향 등 대기오염물질의 구체적인 특성에 초점을 맞추고 있다. 대기오염과 관련해 이제까지의 변동사항과 향후 추가적인 대기오염물질 감축 기회를 최대한 포괄적으로 살펴보기 위해 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 평가체계는 4개의 연결고리로 이뤄진 “대기오염 인과관계 사슬”을 골자로 하기로 한다(그림 1).

대기오염 인과관계 사슬을 구성하는 첫 번째 연결고리는 **배출**이다. 즉 자연적이고 인위적인 요인으로 발생한 대기오염물질이 대기상 최초 배출되는 단계이다. 일단 배출된 오염물질은 대기 중으로 이동하여 화학반응 및 물리적 변화과정 등을 거쳐 각기 다른 장소 및 **농도**로 존재하게 된다. 이렇게 대기오염물질이 대기 중에 쌓여 농도가 높아진 상태에서 사람들은 호흡을 통해 대기오염물질에 **노출**되고, 시간이 지나면서 건강에 부정적인 **영향**을 미칠 수 있다. 대기오염 사슬을 구성하는 4개의 연결고리를 통해 대기질 관리의 다양한 측면을 살펴볼 수 있으며, 대기오염에 대한 다양한 시각 역시 도출할 수 있다. 다만, 서울, 인천, 경기 지역의 상황은 유동적으로 변화하고 있으며 향후에도 지속적으로 변화할 수 있다.

대기오염이 건강에 미치는 영향은 인류건강 보호증진을 위한 대기오염 저감 조치를 이행하는 근본적인 이유이자 원동력이다. 이를 추진하는 원동력은 대기오염이 건강에 미치는 영향에서 비롯된다. 또한, 이러한 영향이 경제적으로도 영향을 미칠 수 있기 때문에 정책 입안자들이 대기오염 관련 조치를 취하도록 동기를 부여할 수 있다. 그러나 건강에 미치는 영향을 바로 측정하는 것 보다 보통 대기 중 오염물질의 농도를 측정하는 것이 더 실용적인 접근방식이다. 따라서 전체적으로 대기 중 오염물질의 농도 허용치를 표시하여 대기질 목표를 설정하는 경우가 일반적이다. 이처럼 농도 허용치를 설정하여 관리하는 경우 대기질 관련 법적 기준 준수여부를 확인하는 것은 물론 오랜 시간에 걸쳐 상황을 모니터링하고 추적할 수 있게 된다. 마지막으로, 마스크 착용, 실내 공기청정기 사용, 주요 도로를 경유하지 않는 경로 선택 등 대기오염물질 배출량을 저감하지 않고도 대기오염 노출을 줄일 수 있는 조치를 이행할 수도 있지만, 대기질 목표를 달성하기 위해 가능한 많은 인구에게 가장 유익하면서도 널리 채택되고 있는 방식은 바로 배출원에서 발생하는 배출량을 직접 저감하는 것이다. 배출량 저감 대책이야말로 대기오염 개선 목표를 달성하기 위해 의사결정자들이 취할 수 있는 직접적인 조치이다. 대기오염물질의 농도와 건강에 미치는 영향을 줄이는데 정책이 미친 효과를 가늠하기 위해서는 배출원과 저감이 이루어진 지리적 위치가 중요한 역할을 한다.



경기도 안산시 시화 조력발전소.
© 경기도

따라서 이 보고서는 <그림 1.1>에서 설명한 대로 대기오염 인과관계 사슬을 구성하는 4개의 연결고리의 관점에서 서울, 인천, 경기 지역의 과거 대기오염 저감 성과를 문서화해서 기록하고 추가적인 감축을 위해 계획하고 있는 미래 전략을 평가하고자 한다.

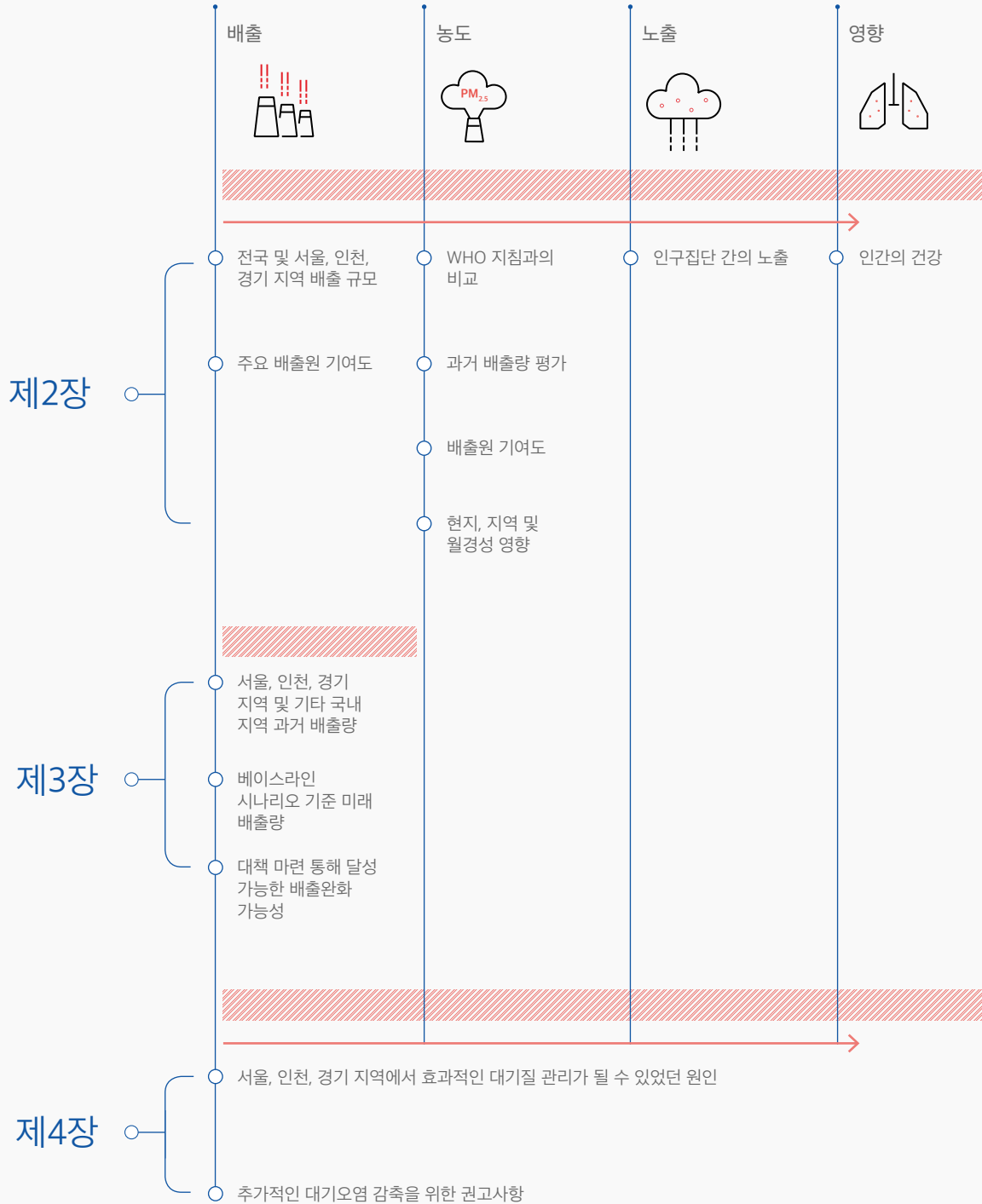
다시 말해 이 보고서를 통해 대기오염이 건강에 미치는 영향과 대기 중 대기오염물질의 농도 및 배출량 변화를 전반적으로 살펴보고자 한다. 보고서의 2장부터 4장까지 각 장은 대기오염 평가에 사용된 방법으로 구별되며, 서울, 인천, 경기의 ‘대기오염 인과관계 사슬’을 구성하는 특정 측면에 초점을 맞추어 작성되었다.

제2장: 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 현황 및 영향은 지역내 대기질 특성에 초점을 맞춘 보고서와 논문 등을 통해 기존의 정보를 취합, 검토하여 정리하였다. 2장은 서울, 인천, 경기 지역 대기질의 과거 변동사항 및 현황에 중점을 두고 있으며, 미래 변화는 3장과 4장에서 다루고 있다. 즉 대기오염 사슬의 세 가지 측면을 통해 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 현황을 살펴본다. 우선, 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염추정량을 통해 수집한 데이터를 바탕으로 초미세먼지($PM_{2.5}$)를 중심으로 대기오염물질의 농도 현황을 파악하였다. 이후 건강

보호를 위한 세계보건기구 대기질 관련 지침(WHO Air Quality Guidelines for the protection of human health)과 대조하여 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도를 비교하였다. 예를 들어 서울, 인천, 경기 지역 및 국내 기타지역에서 발생한 오염물질과 국외 기타지역에서 이동한 월경성 대기오염물질 등 서울, 인천, 경기 지역 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 영향을 주는 배출원에 대해 지역별 평가가 이루어졌다. 다음으로 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도가 사람들의 건강에 미치는 영향을 살펴보고, 다른 위험 요인과 비교하여 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 영향력 및 상대적 중요도를 함께 검토하였다. 뿐만 아니라 서울, 인천, 경기 지역 내 건강에 위해한 대기오염물질을 배출하는 주요 배출원을 파악하기 위해 권역 내 배출량 규모 역시 함께 살펴보았다. 물론 국내 기타 지역 또는 국외에서 발생한 대기오염물질이 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 상당한 영향을 미치고 있으나, 2장에서는 특히 전반적으로 서울, 인천, 경기 지역 내에서 발생하는 배출량에 초점을 맞추었다. 이는 당국의 관리대상 배출원이 위치하고 있는 곳이 서울, 인천, 경기 지역이기 때문이다. 마지막으로 서울, 인천, 경기 지역 내에서 대기오염 사슬의 각 연결고리 단계가 어떠한 방식으로 규제되고 있는지 파악하기 위해 권역내 대기질 관리 체계 역시 함께 검토하였다.

그림 1.1

‘배출’부터 ‘영향’까지 “대기오염 사슬”의 4단계 연결고리 및 단계별 보고서 내용과 구조



제3장: 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 및 기후변화 완화에 대한 통합평가는 이번 연구를 통해 새로 도출된 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질, 단기체류 기후변화 유발물질 및 온실가스 배출량에 대한 과거와 미래의 평가 결과를 제시한다. 즉 2005년부터 2020년까지 발생한 대기오염물질의 과거 배출량을 추정하고 지난 15년 동안의 배출량 변화 역시 함께 살펴보았다. 한편 대기오염물질의 배출 문제를 해결하기 위해 다양한 강도의 대책을 반영한 여러 시나리오를 설정하여 2050년까지의 서울, 인천, 경기 지역 배출량 역시 추정하였다. 미래 시나리오 중에는 새로운 정책이나 대책이 시행되지 않는다고 가정하고 추정한 베이스라인 시나리오와 함께 서울, 인천, 경기 지역에서 특정 대책이 시행될 것이라고 가정한 저감 시나리오 등도 포함되었다. 이 중 대한민국의 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해 계획하고 있는 대책도 포함되어 있다. 이러한 과정을 통해 기후변화 완화 노력이 대기오염과 관련하여 어느 정도의 성과를 도출할 수 있는지를 가늠할 수 있으며, 한국이 기후변화를 유발하는 온실가스 감축을 어느 정도까지 달성할 수 있는 지도 평가할 수 있다. 또한 기타 주요 배출원을 대상으로

이행하는 추가적인 조치를 고려하여 달성 가능한 감축 잠재력 역시 분석하였다. 결과적으로 대기오염물질 배출량 저감을 통해 농도, 노출 및 건강에 미치는 영향 모두를 줄일 수 있는 단계는 대기오염 사슬 연관고리 중에서도 배출 단계에 해당한다. 그러므로 3장에서는 배출 측면에 초점을 맞춰 기술하였다. 특히 3장에서는 대기오염물질 배출을 현재 수준 이하로 저감할 수 있는 구체적인 상세한 일련의 저감조치를 제시하였다.

제4장: 서울, 인천, 경기 지역의 푸른 하늘을 위한 청정대기는 지역 내 대기질 개선을 위해 취할 수 있는 추가적인 조치에 대해 이전 장에서 다루어진 내용을 토대로 일련의 권고사항을 제시한다. 특히 3장에서는 2021년부터 2050년까지 대기오염물질을 효과적으로 저감할 수 있는 우선순위 대책을 파악하였으며, 4장에서는 이를 이행하기 위한 구체적인 조치를 권고 사항에 담았다. 뿐만 아니라 서울, 인천, 경기 지역의 대기질을 더욱 더 잘 파악할 수 있도록 대기질 관리 체계 및 관리 도구 강화 방안에도 대한 권고사항 역시 검토하였다.



글로벌 및 지역 차원에서 실시한 여러 연구조사를 통해 단기체류 기후변화 유발물질(SLCPs)의 주요 배출원을 규제함과 동시에 국지 대기오염을 개선하고 기후변화를 유발하는 온실가스 감축을 위한 다양한 국가적 전략 및 조치가 파악되었다.

1.4 주요 고려 사항: 기후변화 완화와 대기오염 간의 연계성

앞서 설명한 바와 같이 이 보고서는 서울, 인천, 경기 지역 대기오염 현황 및 변화, 그리고 대기오염을 추가적으로 감소시킬 수 있는 향후 대책들을 평가하는 것을 목표로 작성되었다. 3장에서 요약된 바로는 서울, 인천, 경기 지역의 경우 대기오염물질 저감과 더불어 온실가스 감축이 동시에 수반되지 않는 것으로 파악되었다. 그러나 한국이 탄소중립을 목표로 구체적인 기후변화 완화 조치를 수립하여 이를 달성하게 된다면 파리 협정³ 이행을 위해 대한민국이 국제적으로 공약한 온실가스 저감 목표는 물론 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 저감 목표 역시 동시에 달성할 수 있을 것이다. 따라서 이 보고서는 기후변화와 대기오염 간의 연계성 및 서울, 인천, 경기 지역내에서 이러한 문제들이 물리적·정책적으로 어떻게 연동되어 있는지를 주된 고려사항으로 살펴보고자 한다. 기후변화와 대기오염 문제가 밀접하게 연관되어 있는 이유는 다음과 같다.

- + 많은 경우 온실가스 및 대기오염물질을 발생시키는 배출원이 동일하며,
- + 메탄(CH_4), 블랙카본(BC) 및 오존(O_3)과 같은 단기체류 기후변화유발물질(SLCPs)의 경우 기후변화와 대기오염을 동시에 유발하기 때문이다 (그림 1.2) (Shindell *et al.* 2012).

이러한 연계성을 십분 활용한다면 대기오염 저감 및 기후변화 완화를 동시에 달성할 수 있는 전략을 수립하여 실질적인 기회를 마련할 수 있다. 글로벌 및 지역 차원에서 실시한 여러 연구조사를 통해 단기체류 기후변화 유발물질(SLCPs)의 주요 배출원을 규제함과 동시에 현지 대기오염을 개선하고 기후변화를 유발하는 온실가스 감축을 위한 다양한 국가적 전략 및 조치가 파악되었다 (UNEP/WMO 2011; UNEP 2018; CCAC SNAP 2019; Kuylensstierna *et al.* 2020; Nakarmi *et al.* 2020).

예를 들어, 블랙카본(BC)과 메탄(CH_4)과 같은 단기체류 기후변화 유발물질(SLCPs) 감소를 위해 가장 효과적인 16 개의 대책을 이행할 경우, 전 세계적으로 베이스라인 대비 2030년까지 240만 명의 조기사망을 방지하는 효과가 있음은 물론 오존 노출로 인한 작물 피해가 줄어들면서 옥수수, 쌀, 밀, 콩 등 4대 주요 작물의 수확량이 5,200만 톤이 더 늘어날 것으로 보인다. 다만 대기질 측면에서의 편익은 배출량 감축이 이뤄진 국가 및 지역을 중심으로 두드러지게 나타났다.

그뿐만 아니라 상기 조치의 이행을 통해 0.5°C의 지구 평균온도 상승을 상쇄할 수 있기 때문에 신속하게 이산화탄소 저감조치와 병행한다면 온도 상승을 제한하는데 중요하게 작용할 수 있을 것으로 보인다. 블랙카본, 메탄, 오존 및 수소불화탄소(HFCs)를 단기체류

3 유엔기후변화협약 파리협정(The Paris Agreement): <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

그림 1.2

대기오염물질, 단기체류 기후변화 유발물질, 온실가스로 구분한 오염물질



기후변화 유발물질(SLCPs)로 칭하는 이유는 이 물질들이 일단 대기로 배출되면 수 일에서 20년까지 상대적으로 짧은 기간 동안 대기에 체류하는 성질을 가지고 있는 데다가 기후와 대기질에 영향을 미치기 때문이다(단, 수소불화탄소의 경우 기후에만 영향을 미침).

다만 이러한 편익을 달성할 수 있는 것은 다음 두 가지 이유 때문이라는 점에 주목할 필요가 있다. 첫째, 블랙카본 및 메탄의 경우 기후와 대기질 모두에 직접적인 영향을 미치기 때문에 SLCPs를 저감하는 것 자체만으로 편익이 달성된다. 뿐만 아니라 SLCPs의 배출원 다수가 온실가스(예, 이산화탄소) 및 기타 대기오염물질도 배출하는 배출원이라는 점도 편익 달성의 이유로 작용한다. 따라서 해당 부문을 대상으로 저감조치를 이행하게 된다면 SLCPs 뿐만 아니라 다른 온실가스 및 기타 대기오염물질의 배출 역시 감축할 수 있다.

한국은 대기오염물질 배출 저감까지 동시에 가능한 기후변화 완화 목표를 공약으로 발표하였다. 지난 2021년 한국은 유엔기후변화협약(UNFCCC) 사무국에 자발적 국가온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 조정하여 제출했다. 이렇게 상향 조정된 목표의 핵심은, 727.6 MtCO₂eq였던 2018년의 국가 온실가스 배출량을 2030년까지 40% 저감하는 것이다. 국가 온실가스 감축목표(NDC)는 대기오염물질 배출이 많은 발전, 산업, 건물, 교통, 농업 및 폐기물 등의 배출원 부문의 감축에 집중되어 있다.

2016년 한국은 2030 온실가스 감축 로드맵(2030 로드맵)을 발표하였다. 이를 통해 부문별 감축 목표를 확정하고 다음과 같이 9개의 세부 목표를 수립하였다.

- 01 발전, 산업 및 건설 등 8개의 부문을 대상으로 2016년 기준 대비 2030년까지 총 감축 목표량인 315백만 톤 중 219 MtCO₂eq의 감축 목표를 할당하였다.
- 02 발전 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 저탄소 발전원 도입, 전기 수요 관리, 송전 및 전기 공급의 효율성 제고 등의 노력을 통해 64.5 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 달성하고자 한다.
- 03 건물 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 35.8 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 달성하고자 한다.
- 04 폐기물 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 3.6 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 달성하고자 한다.
- 05 철강 및 석유화학을 비롯하여 기타 20개의 업종을 포괄하는 산업 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 에너지 효율 개선, 환경 친화적 방식의 가스 개발, 냉매 교체, 혁신 기술 및 폐기물 자원화 등의 노력을 통해 56.4 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 달성하고자 한다.
- 06 공공 및 기타 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 3.6 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 목표로 한다.
- 07 농업 및 축산업 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 1 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 목표로 한다.
- 08 신에너지 산업 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 28.2 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 목표로 한다.
- 09 교통 부문의 경우 2016년 기준 대비 2030년까지 25.9 MtCO₂eq의 온실가스 감축을 목표로 한다.

대한민국은 탄소중립기본법(기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법)에 따라 2030년과 2050년의 새로운 목표 달성을 가속화하기 위한 정책을 추진하고 있다. 참고로 탄소중립기본법은 기후변화 완화 및 적응 조치를 강화하는 한편 탄소중립 사회로의 전환 과정에서 발생할 수 있는 불평등 문제를 해결하기 위한 목적으로 2021년 9월 제정되었다. 이 법은 2050 탄소중립을 국가 비전으로 명확하게 정의하고 있으며, 2030 국가 온실가스 감축목표의 최저 감축 수준을 명시하고 있다. 이 밖에도 기후영향평가, 기후대응기금 편성, 배출권거래제(K-ETS), 기후위기 적응 대책, 정의로운 전환 지원센터 설립 및 특구 지정 등의 내용을 담고 있다. 탄소중립기본법은 탄소중립 경제 및 사회로의 전환 과정에서 한국이 적극적으로 국가 온실가스 감축목표를 달성할 수 있도록 뒷받침하는 법적 기반 역할을 한다. 기후변화 완화 전략은 대기질에 상당한 영향을 미칠 수 있으며 이에 따라 4장에서 탄소중립 시나리오 상의 기후변화 완화대책과 대기오염물질 감소 간의 관계성을 기술하고자 한다.



02

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 현황 및 영향

2.1

서울, 인천, 경기 지역의
대기질 관리

2.2

대기오염 농도

2.3

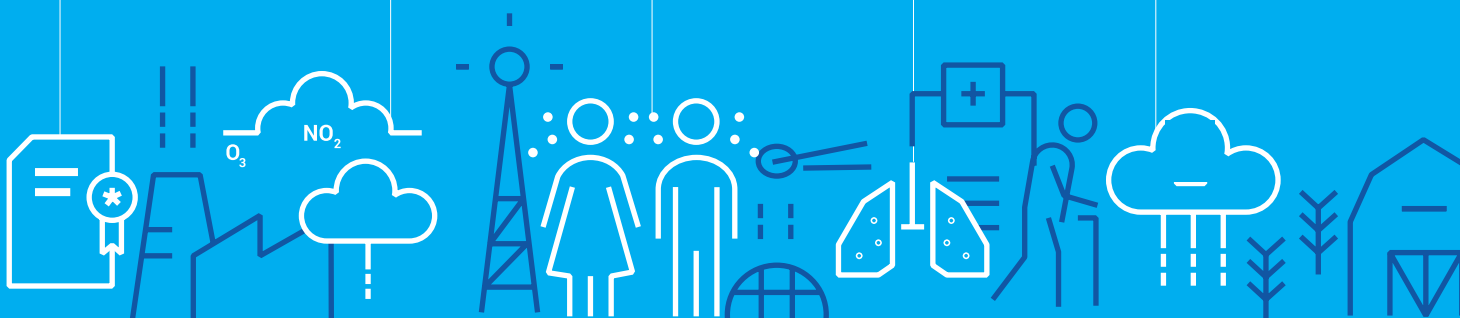
대기오염 노출

2.4

대기오염과
건강위해성

2.5

대기오염물질
배출



주요 결과

- 01 대한민국과 서울, 인천, 경기 지역은 대기질 관리를 위한 법제도를 체계적으로 마련하여 대기질 관리 목표 및 구체적인 저감 대책 수립, 각 지역의 대기질 관리 정책 이행 및 모니터링에 대한 역할과 책임을 법으로 정하고 있다.
- 02 지난 수십 년간 서울, 인천, 경기 지역은 대기오염 저감정책 이행, 과학기반 연구 및 대국민 소통 등 대기질 관리에 약 90억 달러의 재정을 투입하였다.
- 03 지난 15년간 서울, 인천, 경기 지역에서 미세먼지와 질소산화물 등 건강에 위협한 주요 대기오염물질 농도는 감소한 반면, 오존 농도는 증가했다.
- 04 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 수준은 주변지역과 대기오염물질의 월경성 장거리 국외 이동에 상당한 영향을 받고 있으며, 지난 20년간 서울, 인천, 경기 및 그 외 지역의 대기오염물질 배출저감은 대기오염물질 농도 감소에 기여했다.
- 05 서울, 인천, 경기 지역을 대상으로 행해진 역학조사들은 이 지역의 대기오염물질 노출 및 이로 인한 건강 위해성을 과학적으로 뒷받침한다.



대표적인 학술인용 데이터베이스인 스코푸스(Scopus)에서 서울, 인천, 경기 대기오염을 검색하면 1,000편이 넘는 과학논문을 찾을 수 있다.

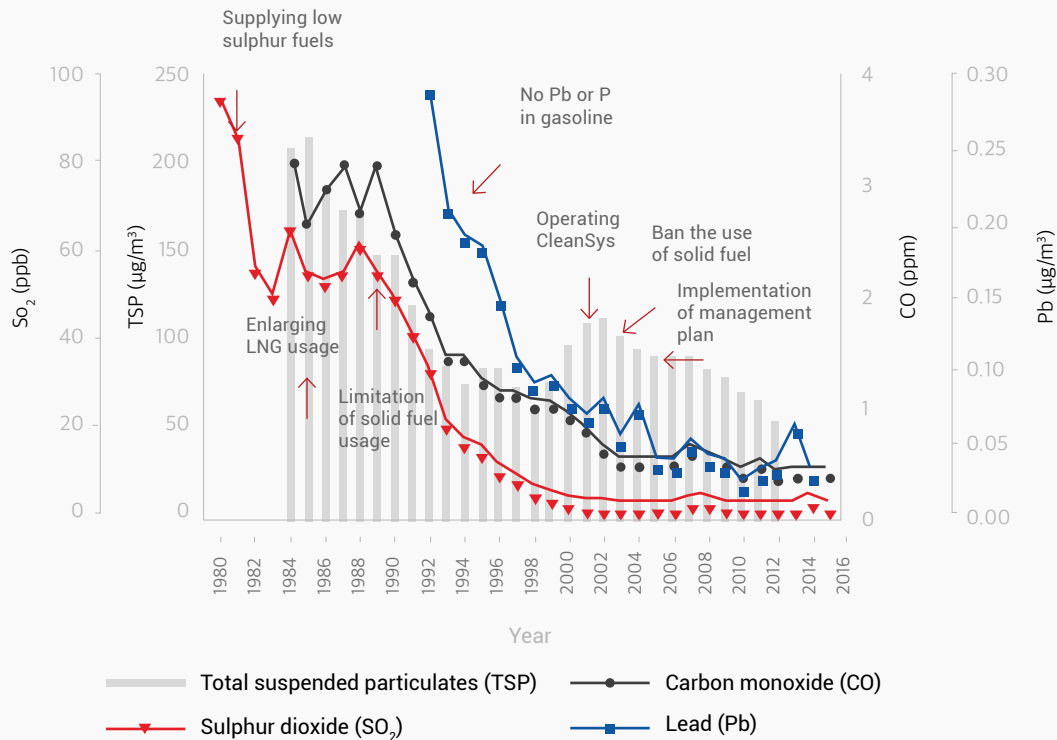
2.1 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 관리

지역 내 대기오염 현황과 관련하여 전세계적으로 가장 많은 연구가 이루어진 지역 중 하나가 바로 서울, 인천, 경기 지역으로 1,000편이 넘는 논문들이 세 지역의 대기오염을 주제로 발표되었다(대표적인 학술인용 데이터베이스인 스코푸스(Scopus)에서 ‘서울 대기오염’, ‘인천 대기오염’ 또는 ‘경기 대기오염’을 검색하면 1,000편이 넘는 과학논문을 찾을 수 있다). 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 관련 자료는 연구 논문뿐만 아니라 비학술적 정보도 포함된다. 예를 들어 고밀집 대기오염측정망을 통해 수집한 대기질 측정값 그리고 국가대기오염물질 배출목록 등이 이에 해당된다. 다음 절에서는 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염과 관련하여 수집한 학술 및 기타 정보를 요약하여 제시하였다. 이후에는 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도(2.2절), 이에 대한 노출(2.3절), 건강 위해성(2.4절) 그리고 대기오염물질 배출(2.5절) 등 대기오염 인과관계 사슬을 구성하는 4개의 연결고리(그림 1.1)를 순서대로 정리한 내용을 담고 있다.

2.1.1 법제도

1960년대 이후 한국은 경제발전을 우선시함으로써 산업화와 도시화가 빠르게 진행되었다. 그 결과 대기오염과 같은 몇 가지 환경문제가 1980년대부터 나타나기 시작했다. 한국의 본격적인 대기질 관리는 1980년대 연료 전환 정책과 배출허용기준 설정으로 시작되었다. <그림 2.1>의 서울 사례와 같이 석탄과 중유에서 디젤과 가스 연료로 전환하고, 사업장과 자동차 대기오염 배출기준을 강화하면서 1차 대기오염물질(직접 배출 대기오염물질) 농도는 줄어들었다. 하지만 2000년대 초반부터 1차 대기오염물질의 농도는 크게 바뀌지 않았다. 왜냐하면 각 오염물질별 배출량은 감소했음에도 불구하고 전체 오염물질의 수는 늘었기 때문이다(예. 차량 대수 증가). 이러한 한계점을 극복하기 위해 2003년에는 ‘수도권 대기환경개선에 관한 특별법’이 제정되었고 2005년에는 ‘수도권 대기환경관리 1차 기본계획’이 수립 및 시행되었다(그림 2.4). ‘수도권 대기환경관리 기본계획’은 오염물질의 배출 총량을 규제하는 것을 목표로 하였으며 주요 대책은 디젤차량의 미세먼지 배출 저감이었다. 그 결과 대기질은 지속적으로 개선되었고, 디젤차량에서 주로 배출된 원소탄소(검댕)와 이산화황 같은 다른 오염물질들도 또한 감소하였다(배출경향에 관한 더 자세한 정보는 2.5절 참고).

그림 2.1
1980-2016년 서울 대기오염물질 농도 변화



출처: 한국공해학한림원 2018

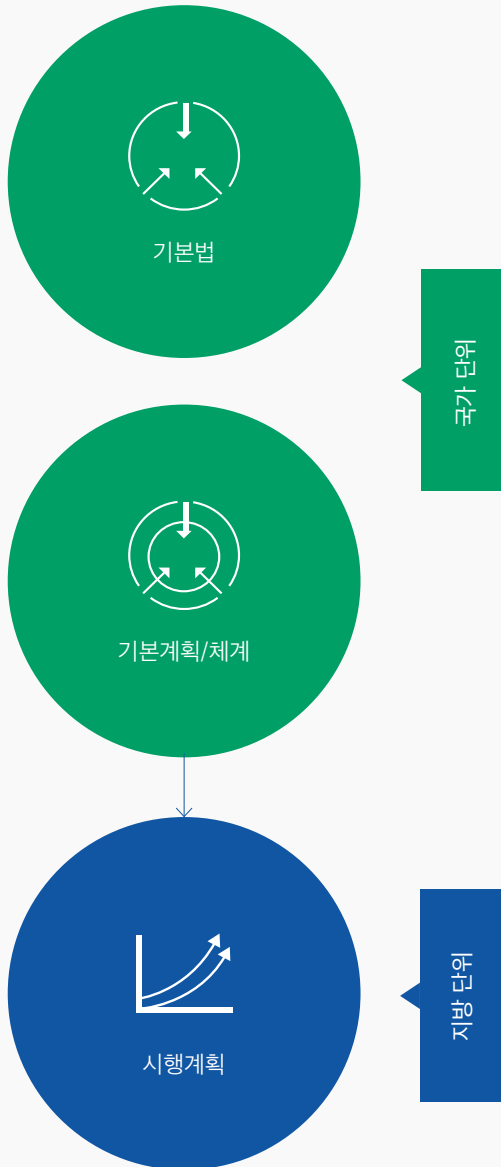
그러나 2013년 WHO는 미세먼지를 1급 발암 물질로 지정하여 국민적 불안이 가중되었고, 대응조치에 대한 국민적 요구도 거세어졌다.

2017년 신정부가 들어서면서 대기오염 관리를 우선 과제로 선정하고 ‘미세먼지관리 종합대책’을 발표했다. 2018년에는 ‘비상 및 상시 미세먼지관리 강화 대책’이 마련되었고, 그 이후 ‘미세먼지 관리 및 저감에 관한 특별법’, 2019년 ‘미세먼지 8법’ 등의 제정과 개정이 이루어졌다. 2020년 이후에는 탄소중립 사회로 이행하기 위한 여러가지 대책들이 본격적으로 시행되었다. 2020년 12월 정부는 ‘탄소중립 2050’ 정책을 발표하고 기후위기에 대한 세계적인 대응에 발맞춰 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 상향 조정하여 제출하였다.

현재 서울, 인천, 경기지역뿐만 아니라 전국적으로 대기질 관리에 필요한 법체계를 확립하여 지역 내 대기오염에 관한 방대한 양의 정보를 축적하고 있으며, 이렇게 수집된 정보는 대기질 관리 과정에서 유용하게 사용되었다. <그림 2.2>와 같이 대기오염을 포함한 대한민국의 대기질 관리 정책은 국가 차원의 정책수립과 지역 차원의 계획 및 시행계획 수립으로 이어지는 3단계의 틀이 마련되어 있다. 국가 단위에서 **기본법**은 특정 사안에 전반적으로 적용되는 기본 틀을 제공한다. 다음으로 기본법을 어떻게 적용할 지에 대한 전반적인 내용을 포함하여 국가 차원의 **기본계획**을 수립한다. 마지막으로 각 지역의 우선순위 및 여건을 감안하여 기본법을 구체적으로 어떻게 시행할 지 계획하고 지역 차원의 **시행계획**을 수립한다.

그림 2.2

대한민국 대기질관리를 위한 국가 단위 법 및 지방 단위 시행계획 체계



이러한 구조(그림 2.2)에서 현재 한국, 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 관리를 위한 기본법으로 환경정책기본법[법률 제17797호]이 있으며, 이 법의 목적은 다음과 같다.

‘이 법은 환경보전에 관한 국민의 권리·의무와 국가의 책무를 명확히 하고 환경정책의 기본 사항을 정하여 환경오염과 환경훼손을 예방하고 환경을 적정하고 지속가능하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있도록 함을 목적으로 한다.’

환경정책기본법은 대기오염뿐만 아니라 수질 오염과 같은 다른 유형의 환경 오염을 관리하기 위한 조항을 포함하고 있다. 또한 국가가 설정한 환경기준을 포함하여 성공적인 대기질 관리에 필수적인 중요 요건들을 규정하고 있으며, 이에 따라 7개의 대기오염물질에 대한 국가 대기환경기준을 설정하고 있다. 2022년 현재 국가 대기환경기준은 <표2.1>과 같다.

환경정책기본법에 따라 국가 및 지방자치단체는 환경기준 달성 및 시행을 위해 노력을 기울여야 한다. 예를 들어 국가 및 지방자치단체가 환경에 관계되는 법령을 제정 또는 개정하거나 행정계획의 수립 또는 사업 집행 시 환경기준이 적절히 유지되어야 한다고 명시되어 있다. 국가(중앙정부)는 ‘대기환경 보전에 관한 사항’에 관한 목표 설정, 단계별 대책 및 사업계획을 포함하여 ‘국가환경종합계획’을 수립 및 시행하여야 한다. 지방자치단체는 ‘국가환경종합계획’에 따라 관할 구역의 지역적 특성을 고려하여 해당 시·도의 환경계획을 수립 및 시행하여야 한다. 한편 특별시(서울)·광역시(예를 들어 인천)·자치도(예를 들어 경기도)는 해당 지역의 환경적 특수성을 고려하여 필요하다고 인정할 때에는 국가 환경기준보다 확대·강화된 별도의 환경기준을 설정 또는 변경할 수 있다고 명시되어 있다. 마지막으로 환경정책기본법은 목표 설정 및 계획 수립 이외에도 모든 국민에게 환경보전에 관한 지식과 정보를 보급하고 국민이 환경에 관한 정보에 쉽게 접근할 수 있도록 노력해야 한다고 명시하고 있다.

표 2.1

국가 대기환경기준

대기오염물질	평균기간	기준
이산화황(SO ₂)	연간	20 ppb
이산화황(SO ₂)	24 시간	50 ppb
이산화황(SO ₂)	1 시간	150 ppb
일산화탄소(CO)	8 시간	9 ppm
일산화탄소(CO)	1 시간	25 ppm
이산화질소(NO ₂)	연간	30 ppb
이산화질소(NO ₂)	24 시간	60 ppb
이산화질소(NO ₂)	1 시간	100 ppb
미세먼지(PM ₁₀)	연간	50 µg/m ³
미세먼지(PM ₁₀)	24 시간	100 µg/m ³
초미세먼지(PM _{2.5})	연간	15 µg/m ³
초미세먼지(PM _{2.5})	24 시간	35 µg/m ³
오존(O ₃)	8 시간	0.06 ppm
오존(O ₃)	1 시간	0.1 ppm
납(Pb)	연간	0.5 µg/m ³
벤젠(Benzene)	연간	5 µg/m ³

참고: ppb⁴: parts per billion; ppm: parts per million

<그림2.3>은 한국의 대기질 관리 체계를 보여준다. 대기질 관리 기본법인 “대기환경보전법”과 관련 법률이 있으며, 미세먼지 대응을 강화하고 심각한 미세먼지 상황을 사회적 재난으로 규정하기 위해 개정되었다. 또한 ‘대기관리 권역의 대기환경 개선에 관한 특별법’, ‘항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법’이 제정되었다. 대기환경보전법의 목적은 다음과 같다.

‘이 법은 대기오염으로 인한 국민건강이나 환경에 관한 위해(危害)를 예방하고 대기환경을 적정하고 지속가능하게 관리·보전하여 모든 국민이 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 수 있게 하는 것을 목적으로 한다.’

대기환경보전법은 국가 단위(환경부) 및 지역 단위(시·도지사)의 대기질 관리 책무를 규정하고 있다. 대기환경보전법은 환경정책기본법 대비 보다 실질적이고 세부적인 대기질 관리 조항을 다음과 같이 명시하고 있다.

- + **대기오염측정망:** 대기환경보전법에 따라 국가 및 지방자치단체는 대기오염 실태를 파악하기 위해 대기오염측정망을 설치해야 한다. 또한 관측소 설치 계획을 수립하고 재정적 지원을 제공할 수 있다. 관측소를 통해 수집한 측정결과는 인터넷 홈페이지를 통해 공개한다(<https://www.airkorea.or.kr/eng/>).
- + **대기오염 경보:** 대기환경보전법에 따라 시·도지사는 대기오염도가 주민의 건강에 심각한 위해를 끼칠 우려가 있다고 인정되면 그 지역에 대기오염경보를 발령할 수 있다. 또한 시·도지사는 대기오염경보가 발령된 지역의 대기오염을 긴급하게 줄일 필요가 있다고 인정되면 기간을 정하여 해당 지역의 차량 운행을 제한하거나 사업장의 조업 단축을 명하거나, 그 밖에 필요한 조치를 할 수 있다.

4 ppb는 10억분율의 약어로 ppm의 1/1,000을 의미한다. 즉, 1,000ppb = 1ppm

- + **배출 규제:** 대기환경보전법에 따라 대기오염물질 배출시설에 대한 배출허용기준은 환경부령으로 정한다. 지방자치단체는 환경기준 달성을 위하여 필요하다고 인정되면 더욱 강화된 배출허용 기준을 정할 수 있다. 대기오염물질 배출시설을 새로 설치하려는 자는 환경부 장관의 허가를 득해야 한다. 또한 대기환경보전법은 대기오염물질 배출원 관리 방법을 명시하고 있다. 예를 들어 환경부 장관은 황 함유 허용기준을 정할 수 있으며 차량을 대상으로 해당 기준의 준수 여부를 검사할 수 있다.
- + **대기오염물질 배출목록 구축:** 환경부 장관은 배출 허용기준을 정하는 것 외에도 전국의 대기오염물질 배출원 및 배출량을 조사하여야 한다. 국가 차원에서 대기오염물질의 배출목록을 구축하는 것은 환경부의 소관이지만, 시·도지사 역시 환경부령으로 정하는 바에 따라 관할 구역의 배출시설 등 대기오염물질의 배출원 및 배출량을 조사하여야 한다.
- + **대기환경개선 종합계획 수립:** 대기환경보전법에 따라 환경부장관은 대기오염물질의 배출 현황, 대기오염물질을 줄이기 위한 목표 설정과 달성을 위한 대책 등의 사항이 포함된 대기환경개선 종합계획을 10년마다 수립하여 시행해야 한다. 이러한 계획은 기후변화 완화와 연계하여 온실가스 배출량, 온실가스 배출 감축을 위한 목표 설정 및 달성을 위한 대책 등의 사항을 포함해야 한다.
- + **재정 지원:** 대기환경보전법에 따라 국가 및 지방자치단체는 대기환경개선 정책 시행을 위해 필요한 재정적 지원을 할 수 있다.
- + **지역 내 대기오염 방지:** 서울, 인천, 경기 지역에서 관찰되는 대부분의 대기오염은 배출원에서 비롯된 것이 아니다. 대기환경보전법에 따라 환경부장관은 대기환경개선 종합계획에 황사피해방지 대책을 포함해야 한다(예. 동북아시아의 사막 먼지에 의한 월경성 대기오염). 이러한 대책은 환경부에서 마련하되, '장거리이동대기오염물질' 대책위원회를 두어 '장거리이동대기오염물질' 피해 방지에 관한 사항을 심의 및 조정하도록 한다. 또한 종합계획에는 황사 발생 현황 및 전망, 황사피해를 줄이기 위한 국내외 협력에 대한 사항이 포함되어야 한다.

마지막으로 '대기관리권역의 대기환경 개선에 관한 특별법'에 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 관리를 위한 추가 기준을 구체화 한 내용이 들어있다. 이 법의 목적은 다음과 같다.

'대기오염이 심각한 지역 등의 대기환경을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고, 대기오염물질을 체계적으로 관리함으로써 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성함을 목적으로 한다.'

이 특별법은 대기환경보전법에 우선하여 적용하며, 이 법에서 규정하지 아니한 사항은 대기환경보전법에 정하는 바에 따른다. 환경부장관은 서울, 인천, 경기 지역의 대기환경 개선을 위하여 기본계획을 수립해야 하며, 기본계획에 포함되어야 하는 사항을 명시하고 있다. 즉, 질소산화물, 황산화물, 휘발성유기화합물, 먼지, 미세먼지, 초미세먼지, 오존 등과 같은 관리 대상 대기오염물질을 비롯하여 대기오염 현황 및 대기오염물질 저감 계획 등이 포함되어야 한다. 저감 계획은 매 10년마다 수립하는 것이 원칙이나 정책이 변경되면 이에 맞춰 수정, 변경해야 하며, 이 과정은 환경부 소관이지만 지방자치단체와 협의하여야 한다. 서울특별시와 여타 지방자치단체는 해당 관할 구역에서 기본계획을 시행하기 위한 세부 계획(이하 시행계획)을 수립하여 환경부장관의 승인을 받아야 하며, 매년 추진실적을 환경부장관에게 보고하여야 한다. 또한 사업장의 배출허용총량 할당 관리, 배출권거래제, 노후차량의 조기폐차 인센티브 제도, 선박 포함 비도로부문 미세먼지 배출 저감에 관한 조항들이 별도로 명시되어 있다. 마지막으로 이 법에 의거하여 국가는 특정 권역의 대기오염 저감을 위한 사업을 추진하는 지방자치단체 또는 사업자 등에게 필요한 재정적·기술적 지원을 할 수 있다.

<그림 2.3>에서 확인할 수 있듯이 이와 같은 법체계가 있었기에 국가 계획(기본계획)이 성공할 수 있었다. 서울, 인천, 경기 및 그 외 지역은 자체 시행계획을 수립하여 해당 지역 내에서 여러 법이 정한 목표를 달성할 수 있게 된다. 서울, 인천, 경기 지역 지자체도 시행계획 마련 및 이행을 위해 협력하고 있다. 각 지역의 시행계획에 포함된 배출저감 정책에 관한 자세한 정보는 아래 2.1.2절에서 확인할 수 있다.

서울, 인천, 경기 및 그 외 지역 지방정부들은 중앙정부의 기본계획에 따라 자체 시행계획을 수립하여 해당 지역 내에서 국가 기본법이 정한 목표를 달성할 수 있다.

그림 2.3

2022년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기환경관리 개요



2.1.2 배출저감 정책

21세기 들어 한국에서는 법제도를 포함하여 대기질 관리를 위한 다양한 노력이 이루어졌다. 특히 2005년에서 2020년 사이에 서울, 인천, 경기 및 전국에 주요 법과 정책이 효과적으로 시행되었다. 앞서 언급한대로 한국의 대기질 관리 체계는 대기오염 수준, 대기질 관측 요구사항 및 담당기관의 책무를 명시하고 있으며, 대기질 개선에 필요한 국가 정책 및 조치에 대한 지침을 제공한다. 그 중 대기질 관리 관련 지침은 주요 대기오염물질의 대기 중 농도를 낮추고 대기오염 노출과 인체에 미치는 영향을 감소시키는 목표 달성에 매우 중요하다.

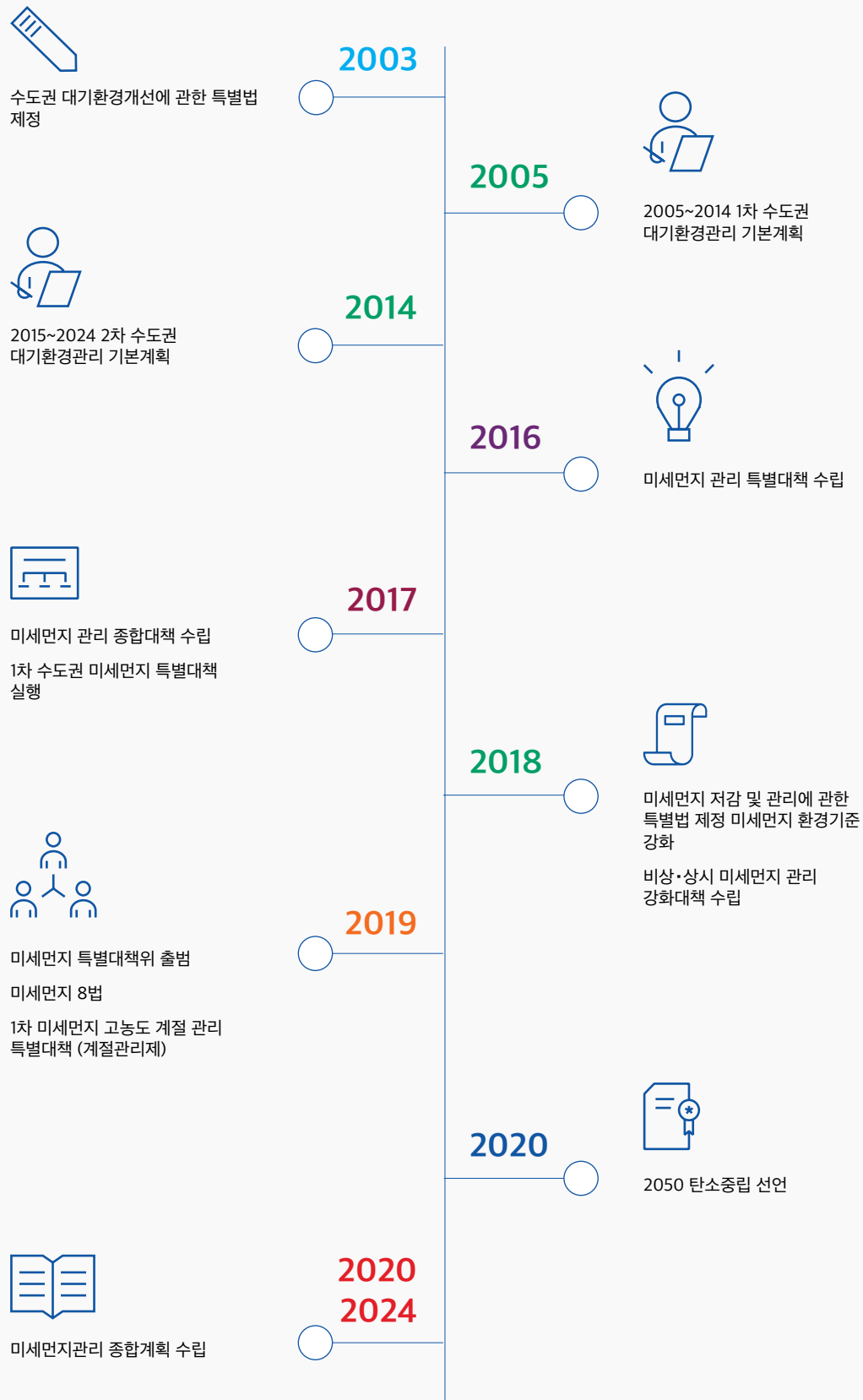
1장에서 기술한대로 대기오염은 광범위한 인간 활동과 자연으로부터 야기된 오염물질이 대기 중으로 배출된 현상이며 다차원적인 문제이다. 주요 대기오염 배출원은 연료 연소, 산업, 발전, 교통, 가정, 서비스 부문 활동 등이다. 또한 산업 공정, (고형 및 액체) 폐기물 관리, 농업 활동 역시 배출원에 포함된다. 각 배출원은 인체에 심각한 영향을 미치는 초미세먼지와 오존의 농도를 높이는데 기여하는 여러 오염물질을 배출할 수 있다. 따라서 전 세계적으로 대기오염물질 배출원으로부터 배출을 제어하기 위해 수많은 완화 대책을 모색해왔다. 완화 대책은 각각 배출을 감소시키는 방식에 따라 여러 유형으로 분류될 수 있는데, 대책 유형은 아래와 같다.

- + **기업:** 서울, 인천, 경기 지역 대기관리권역 내 기업은 배출허용총량관리제를 준수해야 하며 소기업은 오염방지시설 설치 지원 대상이다. 또한 저리의 융자 지원을 통해 기업들이 대기질 개선에 참여할 수 있도록 돕는다.
- + **교통:** 노후경유차 조기폐차 지원금 제도와 경유차량 취득세 및 보유세 제도를 개편하여 노후된 경유차량 폐기를 장려하고 경유 신차 판매를 억제하였다. 또한 경유차 수요억제 방안에는 연료 상대가격 조정, 신차 배출기준 강화, 생산자 책임 강화 등의 대책을 포함한다. 중소형 경유차량은 유럽연합(EU) 규정과 같이 일산화질소에 대한 엄격한 배출기준을 적용하고, 어린이 통학차량과 택배 운송차량의 경우 신형 경유 차량 사용을 금지한다. 비도로 부문 미세먼지 감축을 위해 2020년부터 선박 연료 품질 기준을 강화하였으며, 대형 항만을 중심으로 배출규제 해역을 지정하여 황함량이 0.1% 인 양질의 연료를 사용하는 선박들만 입항 허가를 받을 수 있도록 하였다. 또한 저속운항 프로그램을 통해 대형 항만 주변에 구역을 지정하는 한편, 항구에 있는 동안 육상에서 생성된 전력을 사용하여 선박에 전력을 공급하는 ‘육상전원공급설비(AMP)’를 확대하고 있다.



그림 2.4

2003~2021년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기질 관리 기본틀의 주요 경과



- + **발전 및 가구:** 30년 이상 된 노후화된 석탄 화력발전소 폐쇄를 2021년으로 앞당겼다. 안정적인 전력공급 유지가 확인된 경우, 석탄 발전소는 가동중지, 발전용량 한도 적용, 시설과 설비 개선 등 축소운영 정책의 대상이 된다. 그 외 농업 부문 암모니아 생성, 가구 부문의 휘발성 유기화합물 역시 관리 대상이다.
- + **국민 건강보호:** 미세먼지 농도 상승에 따라 국민 건강보호 대책을 강화한다. 12월에서 3월까지 미세먼지 농도 상승시기에는 미세먼지 계절관리제를 시행하여 엄격한 배출저감 및 국민 건강증진 대책을 이행한다.
- + **과학기반 정책 및 국민 소통:** 2020년부터 ‘지상-차량-선박-항공-위성’을 연계하는 3차원 입체 미세먼지 측정체계를 도입하여 미세먼지에 대한 정확도를 높였다. 또한 국가미세먼지정보센터를 설치하여 통계의 정확성을 높이고 투명하고 객관적인 정보를 제공하기 위해 정책 지원 기능을 보강하였다.

서울, 인천, 경기 지역은 대기환경기본법의 목표 달성을 위해 마련된 계획에 이와 같은 유형의 대책 사례들을 모두 포함시켰다. <그림 2.5>에서 볼 수 있듯이, 대기질 개선을 위해 서울, 인천, 경기 지역에서 이행된 정책은 상당부분 중복된다. 수도권 대기환경관리 기본계획에서는 ‘대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법’에 명시된 2024년까지의 대기질 목표를 설정하고 대기오염물질 배출 저감을 위한 중점 관리과제를 두어 서울, 인천, 경기 전 지역 내 일련의 공통된 완화대책을 마련하였다(그림 2.5).

주요 대기오염물질 배출원을 대상으로 한 조치들이 대책에 포함되어 있다(아래 2.5절 서울, 인천, 경기 대기오염물질 배출 추정치 참조). 수도권 대기환경관리 기본 계획에 포함되어 있는 도로수송 부문 완화대책에는 노후 경유차량의 단계적 폐기 조치가 포함되어 있다. 일반적으로 경유 차량은 미세먼지 배출 측면에서 가솔린 차량보다 오염물질 배출이 심각하며, 신차에 장착된 입자제거필터(배출제어기술)가 노후 경유차에는 장착되지 않은 경우가 있다. 따라서 기타 차량군 대신 노후 경유차량의 단계적 폐기 조치는 대기오염 저감에 매우 효과적일 수 있다.

그 외 전기차와 같은 무배출차량(ZEV) 보급 확대도 대책으로 포함되어 있으며, 이를 위해 공공부문 내 전기차 조달 장려, 서울, 인천, 경기 지역 내 충전시설 확충 등 다양한 정책들이 추진되고 있다. 건설 및 농기계 같은 비도로 이동배출원에 대해서도 배출기준이 마련되었다(그림 2.5).

산업 부문의 경우, 대형사업장을 대상으로 총량관리제를 도입하여 대형배출원의 배출을 제한하고 배출저감 인센티브 제도를 실시했다. 또한 서울, 인천, 경기 지역에서는 대형배출원에 ‘오염자 부담’ 원칙을 적용하는 한편, 배출저감기술을 도입할 재정적 여력이 없는 소규모 배출사업장에 대해서는 기본계획에 따라 대기오염 방지시설 설치 확대 비용을 지원하고, 배출한 만큼 부담할 수 있도록 한다. 그 외 가정, 농업, 폐기물 배출원 등 생활 배출원에 대한 대책들은 <그림 2.5>에서 확인할 수 있다.

서울, 인천, 경기 지역 내 무배출차량(ZEV) 보급 확대를 위해 공공부문 내 전기차 조달 장려, 충전시설 확충 등 다양한 정책들이 추진되고 있다.

그림 2.5

주요 배출원 배출저감 핵심 완화대책을 포함한 '수도권 대기환경관리 기본계획' 개요



서울, 인천, 경기 지역에 공통으로 시행된 수도권 대기환경관리 기본계획 외에 각 지역별 정책도 있다. 예를 들어 2007년 서울시는 ‘맑은 서울 2010’ 정책을 발표하고 서울의 대기질 개선 정책을 이행하였다. 그 결과 2006년 대비 2011년 연평균 서울의 미세먼지 농도는 22% 감소했으며($60 \mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 47 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 초미세먼지 농도는 2020년, 2021년 연속 최저치를 기록했다. 하지만 서울의 초미세먼지 농도는 2021년 연평균 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국가대기환경기준($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 미치지 못하며, 파리, 런던, LA 등 해외 주요 도시에 비해서 여전히 높은 편이다. 이에 서울시는 ‘더 맑은 서울 2030’ 정책을 발표하여 초미세먼지 농도를 세계 주요 도시와 대등한 수치로 낮추고 세계 대기질 순위 10위권에 진입하겠다는 계획으로 2030년까지 연평균 농도를 $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소한다는 목표를 설정하였다. ‘맑은 서울 2010’과 차별화되는 ‘더 맑은 서울 2030’ 정책의 주요 전략은 다음과 같다.

- + 노후 경유차량을 저배출 차량으로 조기 전환
- + 노후차량 운행제한 제도의 단계적 확대
- + 주요 배출원에 대한 상시관리체계 구축

‘더 맑은 서울 2030’ 정책은 자동차관리, 가정/사업장 관리, 공사장 관리, 생활권 관리, 대응역량 강화 등 5대 분야 11개 중점과제와 50개 세부사업으로 구성되어 있다.

또한 인천의 경우 국제공항과 대규모 항만 같은 주요 배출원이 위치하고 있어 이들 대형 인프라 시설에 대한 배출관리 대책을 포함하고 있다. 2020년에 마련된 인천광역시 수도권 대기환경관리 시행계획(2020~2024)을 살펴보면 공항 및 항만분야 대기질 관리 대책을 알 수 있다. 공항분야 대책으로는 공항특수차량 친환경화 추진, 항공기 지상전원 공급장치(AC-GPS) 운영 및 확충 등이 있으며, 항만분야 대책으로는 선박 연료유 황함유량 기준 강화(국제해사기구의 황함유량 기준에 맞춰, 한국은 2020년 외항선을 시작으로 2021년 연안선까지 국내선박연료 황함유량 기준을 3.5%에서 0.5%로 강화하였음), 하역 장비 친환경화(연료전환, 저감장치 부착), 친환경 선박보급, 항만출입차량 미세먼지 저감 대책 등이 있다.

경기도의 경우 대기오염물질을 배출하는 다수의 소규모 산업시설이 입지한 지역적 특징이 있기 때문에 처리시설 설치비와 운영 보조금을 제공하여 배출저감기술을 활성화하는 대책을 추진하였다. 2017년부터 2020년까지 1,640개 시설에 910억원이 투입되었으며 배출 시설별로 평균 60% 배출량이 감소한 것으로 추정된다(Kim 2021).

이러한 대책을 이행하기 위해서는 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 관리에 상당 수준의 재정 투입이 필요하다. <표 2.2>는 2007~2020년 서울, 인천, 경기 지역 대기환경 관리에 소요된 재정을 보여준다. 재정소요 분야는 크게 4가지로 구분되는데 도로수송, 산업 시설과 기업, 기타 완화대책 이행, 국민소통 및 과학적 관리기반 마련으로 나뉜다. 2007년에서 2020년까지 대기환경 개선에 총 12조 5천억원, 대략 89억 달러가 투자되었다. 수송부문 배출 저감을 위한 대책 이행에 이 금액의 약 56%(7조원, 총 50억 달러 이상)가 사용되었다. 산업 시설과 기업 부문의 배출 관리에는 1,980억원(1억 4천만 달러 이상), 생활오염원 관리에 8,500억원(6억 달러 이상)이 사용되었고, 과학적 관리기반 마련 및 대국민 홍보에는 4.4조원(32억 달러 이상)이 사용되었다. 시간이 지나면서 완화대책 이행에 비하여 과학적 연구조사 및 국민 소통 활동에 투자된 비용의 상대적 비중은 변동이 있었다. 2008~2010년을 살펴보면 대기환경 관리 기금의 상당부분이 과학적 연구조사와 국민소통에 할애되었다. 그 이후 해당 금액은 상당히 축소되었고, 완화대책 이행 기금(특히 수송부문)이 대폭 증가했다. 특히 노후경유차량 관리 대책 대신 전기차 보조금, 수소연료 차량 보조금 등 저탄소 차량 구입 관련 재정 지원이 확대되었다.

요약하면 기본법, 기본계획, 지역별 시행계획을 통해 서울, 인천, 경기 및 대한민국의 대기질 목표를 명확하게 수립하고, 주요 부문을 대상으로 한 배출저감 정책 및 적절한 재정 투자가 이루어졌다. 이 목표는 주요 부문을 대상으로 한 배출저감 대책으로 보완했으며, 실제 이행을 위한 재정투자가 이루어졌다. 다음 절에서는 배출, 농도, 노출, 건강 영향에 이르기까지 대기오염 사슬의 다양한 구성 요소에 대하여 서울, 인천, 경기의 대기환경 현황과 대기오염 저감 노력 대비 2005~2020년 사이 어떠한 변화가 있었는지를 살펴보겠다.

이러한 대책을 이행하기 위해서는 서울, 인천, 경기 지역의
대기질 관리에 상당 수준의 재정 투입이 필요하다.

표 2.2

2007-2020년 서울, 인천, 경기 지역 대기환경 관리에 소요된 재정(단위: 백만 원)

연도	총 집행실적	자동차 관리대책 (비도로 이동오염원)	배출시설 관리대책	생활오염원 관리대책	과학적 관리기반 마련 및 대국민 홍보
2007	874,092	481,420 (-)	6,092	3,774	382,806
2008	1,496,459	499,868 (-)	6,020	6,582	983,989
2009	1,349,533	384,431 (-)	13,566	16,322	935,214
2010	1,011,612	363,684 (-)	8,930	3,565	635,433
2011	843,831	507,768 (199)	10,698	10,791	314,574
2012	874,711	561,913 (380)	8,501	12,948	291,349
2013	869,853	495,496 (91)	8,120	5,598	360,639
2014	889,711	497,005 (2,330)	8,132	8,370	376,204
2015	512,015	427,153 (3,408)	12,224	66,688	5,950
2016	535,896	234,061 (14,556)	11,814	285,251	4,770
2017	330,608	285,577 (21,224)	6,146	27,380	11,505
2018	549,870	432,146 (33,587)	13,651	81,633	22,440
2019	982,863	836,257 (47,945)	19,592	107,725	19,289
2020	1,383,398	1,048,480 (55,121)	64,540	214,217	56,161
2007-2020	12,504,452	7,055,259	198,026	850,844	4,400,323

참고: 2007~2020년 사이 총 12조 5,044억 원 투자, 자동차 관리대책이 56% 차지
출처: 연도별 수도권 대기환경관리 시행계획 추진실적 평가보고서

< 박스 2.1 >

고농도 초미세먼지 대응: 계절관리제

계절 맞춤형 관리방식: 한국에서는 계절적 특성을 감안하여 시민의 건강 피해를 최소화하고 대기오염 감소에 도움이 될 수 있도록 ‘비상저감조치’와 ‘계절관리제’를 실시하고 있다. 비상저감조치는 2017년부터 시행되었으며 고농도 미세먼지가 발생한 경우 즉각 대기오염을 줄일 수 있도록 설계되었다. 계절관리제는 2019년부터 시행되어 12월부터 3월까지 고농도 미세먼지 강도와 빈도를 낮출 수 있도록 강화된 관리 및 저감조치로 운영되며, 수송, 난방, 사업장, 노출저감 등의 영역 조치로 시행된다. 계절관리제는 서울, 인천, 경기 지역의 고농도 초미세먼지 발생 횟수를 제한하는데 목적이 있다. 대상 시기는 고농도 초미세먼지가 발생할 가능성이 높은 겨울(12월~2월)과 봄(3월)이다. 이 제도는 고농도 초미세먼지 발생 가능성을 낮출 수 있는 선제적 조치와, 고농도 초미세먼지가 발생했을 때(또는 발생할 것으로 예보되었을 때) 시민들에게 정보를 안내하는 절차로 구성되어 있다.

고농도 발생을 예방하기 위해 다음 네 분야에 대한 선제 조치가 실시된다.

- + 수송: 모든 내연기관 차량에 대한 운행제한을 단계적으로 확장한다. 계절관리제 실시 기간 중에는 이러한 운행제한이 4등급과 5등급 차량(유로 III 차량)에 적용되며, 점차 더 엄격한 배출기준을 만족한 다른 등급 차량에도 확대시행 된다. 차량 운행거리를 축소하기 위한 인센티브 프로그램도 있다. 차량 마일리지를 정한 기준만큼 줄인 경우 돈처럼 사용할 수 있는 특별 포인트를 지급한다. 계절관리제가 시행되는 기간 동안 승용차 운행 자체에 대한 추가 포인트가 지급된다.

- + 난방: 난방은 그 수요가 최고조에 달하는 겨울철 대기오염물질의 주요 배출원이다. 난방분야의 선제적 조치로 보조금 지급 확대를 통해 친환경 보일러로의 교체를 장려한다.
- + 사업장: 사업장과 산업 부문에서는 건설기계 사용 제한, 대기오염저감 조치 시행 및 배출 저감을 위한 모니터링 시스템 운영 등이 선제조치에 포함되어 있다.
- + 노출저감: 주요 부문의 배출 저감 조치 외에도 고농도 초미세먼지 발생 시 사람들의 초미세먼지 노출을 최소화하기 위한 조치들도 실행된다. 지하철(서울, 인천, 경기의 고노출원: 아래 참조)에 실내공기질 관리기준을 강화하거나 도로 청소를 강화함으로써 도로 미세먼지 발생에 대한 노출을 줄일 수 있도록 한다.

이러한 조치들 외에도 대기질 예경보시스템을 두어 고농도 초미세먼지 발생 가능성을 알려준다. 대기질관측망과 더불어 예보 시스템은 세 지역(서울, 인천, 경기) 중 두 개 지역에서 다음 조건이 충족되면 지자체가 주체가 되어 예경보를 발령한다.

i) 초미세먼지 농도가 하루 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하고 다음날도 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과가 예상되는 경우 ii) 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 경보가 발령되고 그 다음날 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 예상되는 경우 iii) 다음날 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 예상되는 경우.



**2021년 말 현재 전국적으로 대기질 관측소는 636개이며,
서울 50개, 인천 37개, 경기도 123개가 설치되어 있다**

2.2 대기오염 농도

국가 대기오염측정망

앞서 기술한대로 한국에서 대기질 관련 기본법에 따라 주요 대기오염물질의 대기 중 농도를 측정하는 국가 대기오염측정망이 구축되었다. 대기환경기준 준수 여부를 판단할 수 있도록 서울, 인천, 경기 지역에는 상당히 조밀한 측정망이 구축되어 있다. 각 지방자치단체가 측정소 운영을 담당하고 있으나 데이터는 중앙에서 관리하는 대기정보 공개사이트인 에어코리아를 통해 일반에 공개되고 있다(<https://www.airkorea.or.kr/eng/>). 2021년 말 현재 전국적으로 관측소는 636개이며, 서울 50개, 인천 37개, 경기도 123개가 설치되어 있다(표2.3). 서울, 인천, 경기 지역 내에 위치한 관측소 대다수는 도시 구역에 설치되었고, 도로가에 설치된 경우도 있다. 인천과 경기 지역의 몇 군데 관측소는 농촌과 향만 근처에 설치되어 있다(표2.3). 이와 같은 종합 측정망은 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 정도를 파악하는 기초가 되며 아래에 기술된 내용과 같이 시간이 지나면서 어떻게 변화하는지 파악할 수 있는 자료를 제공한다.

서울, 인천, 경기의 현 대기오염 수준은 국내기준 및 국제적 기준을 상회한다

2.1절에서 설명한대로 서울, 인천, 경기 지역 및 그 외 지역의 전반적인 대기오염 관리 목표는 오염물질의 농도 허용치, 즉 대기환경기준을 수립하여 설정한다(표 2.1 참고). 지역별 측정망을 통해 수집한 데이터를 분석한 결과, 서울, 인천, 경기 지역의 연평균 미세먼지(PM_{10}) 및 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 <그림 2.6> 및 <그림 2.7>과 같다. 참고로 2021년 서울, 인천, 경기 지역의 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 약 $21\mu g/m^3$ 로 관측되었다. 특히 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도의 경우 기타 국내 대기환경기준 대비 약 25% 높은 것으로 나타났으며, 세계보건기구(WHO)의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 권고수준을 훨씬 상회하는 수준이다.

표 2.3

2021년 위치별 대한민국 대기질 관측소 현황

지역	도시대기	도로변	교외대기	항만	국가배경	계
서울	25	15	0	0	10	50
인천	24	6	2	2	3	37
경기	108	11	4	0	0	123
강원	24	1	8	2	0	35
충남	39	3	2	4	2	50
대전	11	2	0	0	0	13
충북	30	1	2	0	0	33
세종	4	1	0	0	0	5
부산	28	3	0	4	0	35
울산	18	2	0	1	0	21
대구	19	2	0	0	0	21
경북	46	1	3	1	1	52
경남	38	2	3	1	0	44
전남	39	0	1	5	3	48
광주	11	2	0	0	0	13
전북	38	2	2	1	1	44
제주	10	1	0	0	1	12
계	512	55	27	21	21	636

참고: 2022년 도시대기 측정소 신설: 인천(1), 경기(2), 울산(1), 경북(1), 전북(2)
출처: 에어코리아

그림 2.6

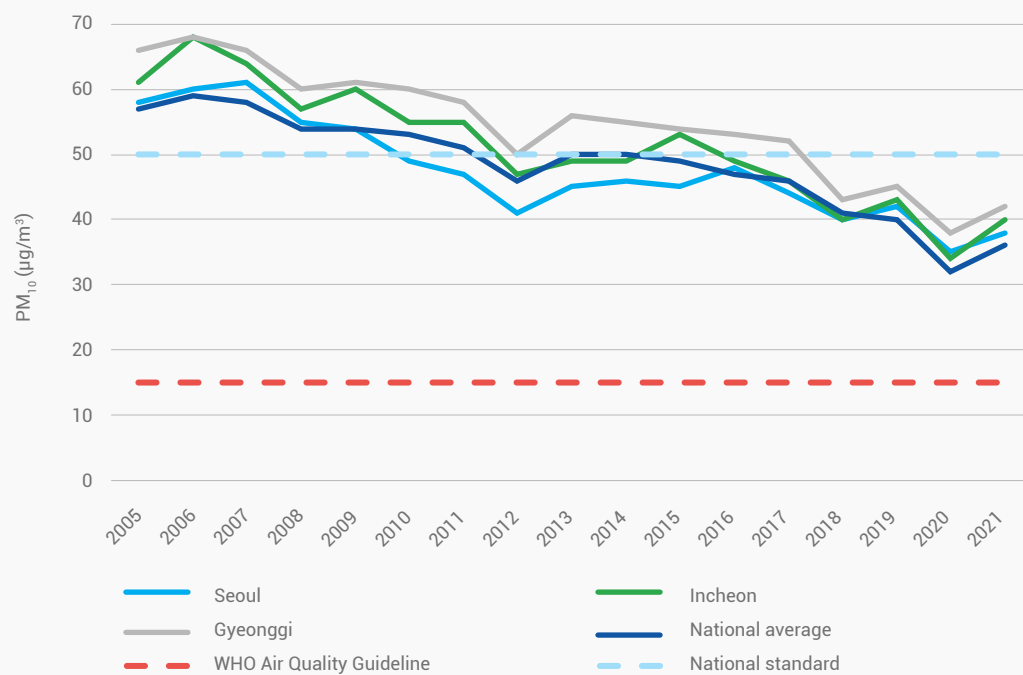
2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 미세먼지(PM_{10}) 농도(단위: $\mu g/m^3$)

그림 2.7

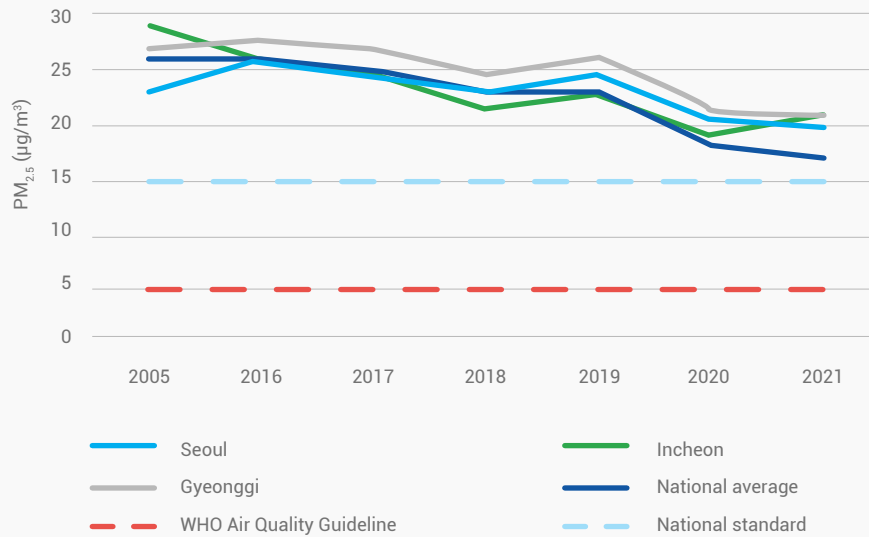
2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

그림 2.8

2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 이산화질소 농도(단위: ppb)

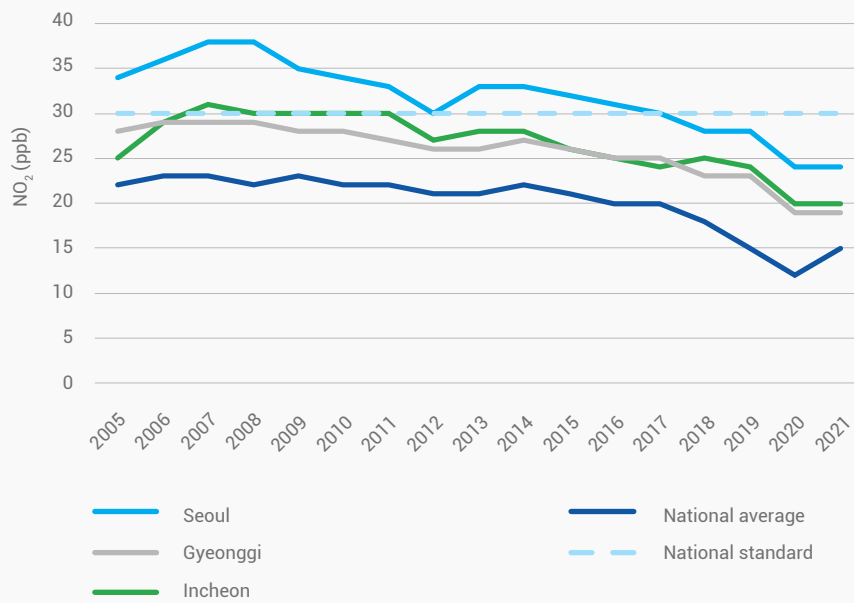
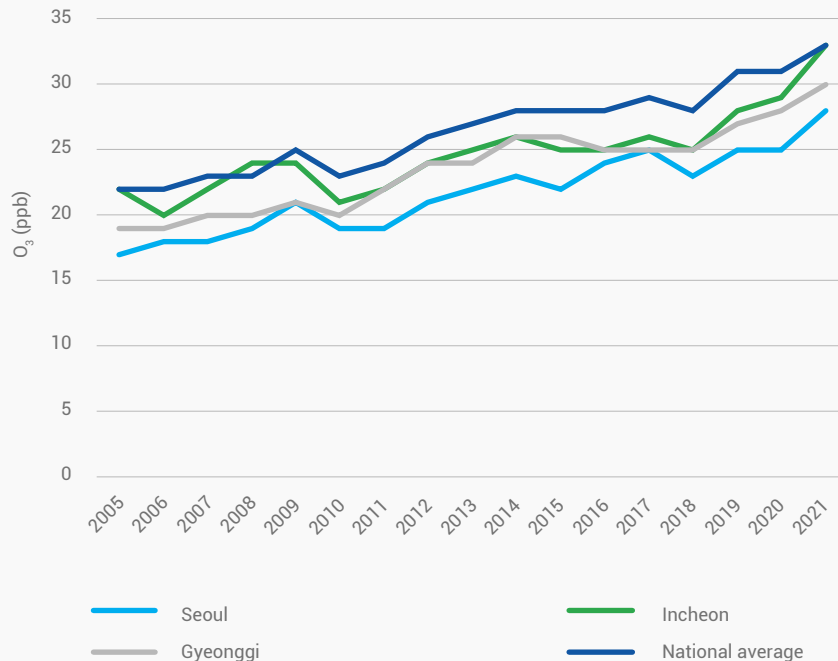


그림 2.9

2005-2021년 대한민국, 서울, 인천 및 경기 지역의 연평균 오존 농도(단위: ppb)



대기오염 수준은 위치에 따라 달라진다. 전국의 토지용도 유형(즉, 주거용, 상업용, 산업용 및 농촌(그린벨트) 지역)과 입자상 물질 및 기체 대기오염물질 간의 상관관계를 면밀히 분석한 결과 뚜렷한 차이가 발견되었다. 미세먼지(PM_{10}) 농도가 가장 높게 관측된 곳은 산업용지였으며, 연평균 $56 \mu g/m^3$ 를 기록하였다. 상업용지 및 주거용지의 연평균 미세먼지(PM_{10}) 농도는 각각 55 및 $53 \mu g/m^3$ 으로 약간 더 낮았으나, 농촌 지역의 미세먼지(PM_{10}) 농도는 더 낮게 관측되었다($49 \mu g/m^3$). 그러나 주요 배출원에서 멀리 떨어진 농촌 지역에서조차 미세먼지 농도가 높게 관측되었다는 것은 서울, 인천, 경기 지역 그리고 국내 전반에 걸쳐 월경성 오염물질 이동이 입자상 물질 농도에 크게 작용하고 있음을 나타낸다(Yoo et al. 2015).

이산화질소(NO_2)와 같은 기체상 대기오염물질의 경우 상업용지(25 ppb), 산업용지(23 ppb) 및 주거용지(21 ppb)에서 높은 농도가 관측된 반면 농촌 지역의 농도(12 ppb)는 현저히 낮은 수준으로 기록되었다. 이를 통해 이산화질소의 농도는 지역 요인의 기여도가 더 높은 것으로 판단된다. 반면 연평균 오존 농도는 다른 토지용도 유형(20-24 ppb) 대비 농촌 지역(31 ppb)이

더 높게 관측되었다. 이는 인접한 배출오염원 위치보다 주요 발생원의 풍하방향에 위치한 지역의 농도가 더 높게 나타나는 결과와 일치한다. 또한 질소산화물(NO_x)의 농도가 높은 도심지역의 경우 오존의 소모현상(titration)으로 오존 농도가 다른 지역 대비 낮게 나타나기도 한다(Yoo et al. 2015).

서울, 인천, 경기 지역에서 관측되는 입자상 물질로 인한 대기오염은 다수의 요인으로 인해 발생한다. 2014년부터 2015년까지 서울 도심에 위치한 관측소에서 2,215개의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 샘플을 채취하였다. 샘플 분석 결과 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 $42.6 \mu g/m^3$ 이었다. 농도는 겨울과 봄에 정점을 찍고 여름에 가장 낮게 나타나는 것으로 조사되었다. 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도를 증가시키는 최대 기여인자는 2차 무기 에어로졸이었으며, 질산염($6.9 \mu g/m^3$), 황산염($6.7 \mu g/m^3$) 및 암모늄($4.4 \mu g/m^3$)은 초미세먼지($PM_{2.5}$) 질량의 42%를 구성하는 성분으로 파악되었다. 그 외 성분으로는 유기탄소($6.4 \mu g/m^3$)가 상당한 비중을 차지하였으며, 이보다는 더 적은 비중의 원소탄소($1 \mu g/m^3$) 및 기타 미량금속 등이 있다(Park et al. 2020).

지난 수십년 동안 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 농도는 크게 감소하였다.

입자상 물질의 농도가 국내외 기준 및 지침을 상회하고는 있으나 지난 수십 년 동안 농도 저감에 있어 상당한 진전이 이루어졌다. 배출 저감 정책이 시행되면서 장기간에 걸쳐 PM 농도의 감소세가 관찰되었다. 예를 들어 2001년 기준 서울, 인천, 경기 지역의 미세먼지(PM_{10}) 농도는 평균 약 $70 \mu g/m^3$ 였으며, 이는 현재의 두 배 수준이다(Kim et al. 2017). 서울, 인천, 경기 지역 전역의 관측소를 중심으로 2000년대 및 2010년에 걸쳐 지역내 PM 및 기체상 대기오염물질의 추세를 분석한 다수의 연구조사가 있었다. 서울에 위치한 주거용지의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 2003년 $38 \mu g/m^3$ 에서 2017년 $31 \mu g/m^3$ 로 매년 2% 감소한 것으로 추정된다(Y. Kim et al. 2020). 용산에 위치한 관측소에서 측정한 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도의 경우 2004년 $33 \mu g/m^3$ 에서 2013년 $25 \mu g/m^3$ 로 감소한 것으로 나타났다(Ahmed et al. 2015).

최근 들어서는 코로나19 팬데믹 기간 동안 시행한 조치 덕분에 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도가 크게 감소하였다. 2019년 대비 2020년 기준 서울의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 평균 16% 감소하였다. 이는 동북아에서 배출하는 입자상 물질 및 전구물질이 감소했고, 이에 따라 서울, 인천, 경기 지역으로 유입되는 월경성 대기오염물질이 줄어든 것은 물론 한국에서 시행한 코로나19 팬데믹 대응 조치로 말미암아 현지에서 발생하는 배출량 자체가 감소한 것이 한데 작용한 결과이다(Uhm et al. 2021).

감소세는 초미세먼지($PM_{2.5}$) 구성 성분별로 다르게 나타났다.

예를 들어 2003년부터 2017년 사이 주거용지의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 추세를 분석한 결과 연평균 유기탄소 및 원소탄소의 경우 더 큰 폭의 감소세를 보이며 각각 3% 및 6%씩 줄어들었다(Y. Kim et al. 2020). 입자상 물질을 구성하는 화학성분을 광범위하게 조사한 결과 이동배출원이 줄어든 것이 부분적인 요인으로 작용하며 이러한 감소세가 나타난 것으로 파악되었다. 2003-2007년 그리고 2014-2015년의 기간 동안 서울 전역에서 채취한 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 샘플을 분석한 결과, 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 구성성분인 유기탄소(2003년-2007년 $9.9 \mu g/m^3$, 2014-2015년 $6.4 \mu g/m^3$), 원소탄소($3.2 \mu g/m^3$

vs $1.0 \mu g/m^3$), 질산염($7.2 \mu g/m^3$ vs $6.9 \mu g/m^3$), 황산염($8.6 \mu g/m^3$ vs $6.7 \mu g/m^3$) 및 암모늄($5.6 \mu g/m^3$ vs $4.3 \mu g/m^3$)의 연평균 농도가 모두 감소한 것으로 나타났다. 반면, 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 구성성분 중에서 지각 물질로 이루어진 조대입자의 농도는 증가하였다($2.0 \mu g/m^3$ vs $4.3 \mu g/m^3$) 이처럼 지각성분이 증가한 것은 아시아에서 황사 발생 빈도가 늘어났기 때문이며, 다른 구성성분의 농도가 감소한 것은 이동배출원이 줄어들었기 때문이다(Park et al. 2020). 미세먼지(PM_{10}) 농도의 감소세는 서울, 인천, 경기 지역을 비롯하여 전국적으로 토지용도 유형(주거용지, 상업용지, 산업용지, 농촌지역)에 관계없이 유사하게 관찰되었으며, 2002년부터 2013년까지 농도감소는 연간 약 $-1 \mu g/m^3$ 이었다.

지난 수십년 동안 서울, 인천, 경기 지역 전역에서 기체상 대기오염물질 농도 역시 크게 감소하였다.

예를 들어 서울, 인천, 경기 지역뿐만 아니라 전국적으로 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 및 이산화질소(NO_2) 농도 사이에서 높은 상관관계가 관찰되었다. 2001년부터 2018년까지 이산화질소(NO_2)의 연평균 농도는 전국적으로 24% 감소하였으며, 서울, 인천, 경기 지역도 마찬가지였다(Yeo and Kim 2022). 2004년부터 2013년까지 서울 도심지역의 일산화질소(NO) 및 이산화질소(NO_2)의 연평균 농도는 각각 38 ppb 및 40 ppb에서 21 ppb 및 36 ppb로 감소하였다(Vellingiri et al. 2015). 이처럼 서울, 인천, 경기 지역에서 이산화질소(NO_2) 농도가 감소한 데에는 천연가스차량 보급계획과 같이 도로 운송수단이 유발하는 질소산화물(NO_x)을 줄이기 위한 조치가 시행된 것이 주요 요인으로 작용하였다(Yeo and Kim 2022). 토지용도 유형별로 대기오염물질 농도 추이를 살펴본 결과, 2002년부터 2013년까지 주거지역의 이산화질소(NO_2) 농도 추이가 연간 약 -0.295 ppb 로 가장 눈에 띄었다. 이는 주거지역에서 차량 이용이 많다는 점이 반영된 결과일 것이다(Yoo et al. 2015).

2001년부터 2018년까지 일산화탄소 및 이산화황의 연평균 농도 역시 전국적으로 크게 줄어들며 39% 감소하였다는 조사 결과가 있었다(Yeo and Kim 2022). 참고로 1980년 서울의 이산화황 농도는 이보다 더 높은 수준인 최대 $20 \mu g/m^3$ 을 기록하였으나 1980년부터 2000년까지의 기간 동안 약 95% 감소하였다. 휘발성유기화합물 농도도 2004년부터 2016년까지의 기간 동안 50% 이상 크게 감소하였다(Kim and Lee 2018).

다른 대기오염물질은 감소하였으나 서울, 인천, 경기 지역의 대기 중 오존 농도는 증가하였다.

지난 수십년 동안 대부분의 대기오염물질 농도는 감소세를 보이고 있으나, 유일하게 하나의 오염물질만은 증가세를 유지하고 있다(그림 2.6-2.9 참조). 오존은 배출원에서 대기 중으로 직접 배출되지 않고 대기 중의 질소산화물, 휘발성유기화합물, 메탄 및 일산화탄소가 광화학 반응을 일으켜 생성된다. 참고로 한번 생성된 오존의 대기 중 수명은 최대 3주이기 때문에 장거리 이동이 가능하다. 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs), 메탄(CH_4) 및 일산화탄소(CO)가 배출되고 오존이 생성될 때까지 시간이 소요되기 때문에 배출원에 인접한 지역보다 풍하 방향에 위치한 지역에서 오존 농도는 더 높게 나타난다. 광화학 반응을 통해 생성되는 오존의 특성상 일반적으로 오존 농도는 여름에 가장 높고 겨울에 가장 낮다.

한편 질소산화물은 오존을 생성하기도 하지만 이와 동시에 오존의 소모현상을 유발하기도 한다. 오존의 대기 중 수명이 최대 3주이기 때문에 서울, 인천, 경기 지역의 ‘배경(background)’ 오존, 즉 권역내로 이동한 오존의 발생지가 다른 아시아 국가 및 대륙이었을 가능성이 있다. 질소산화물의 농도가 상대적으로 높은 지역의 경우 배경 오존이 소멸된다(오존의 소모현상). 이에 따라 질소산화물의 농도가 더 낮은 주변 지역 대비 주요 도심 지역의 오존 농도가 더 낮아질 수 있다. 오존의 이러한 화학적 특성은 서울, 인천, 경기 지역을 포함해 전 세계적으로 수십년 동안 관찰되고 있는 현상이다. 한편 서울, 인천, 경기 지역의 경우 지난 수십 년 동안 질소산화물의 배출량 및 농도는 감소하였으나, 오존 농도는 증가하였다. 예를 들어 서울 도심지역의 질소산화물 농도는 2004년 78 ppb에서 2013년 61 ppb로 감소하였다. 동기간 동안 오존의 평균 농도는 13 ppb에서 18ppb로 증가하였다(Vellingiri et al. 2015). 참고로 최대 25 ppb였던 서울, 인천, 경기 지역의 하루평균 8시간 오존농도는 2016년 최대 60 ppb로 증가하였다.

오존은 호흡기 계통에 악영향을 미치는 대기오염 물질이다. 2019년 국내에서 발생한 조기사망 1,500건은 오존 노출로 인한 것으로 추정된다(Murray et al. 2020). 입자상 물질만큼 유독한 것은 아니지만 장단기적으로 오존에 노출되는 경우 건강에 해로울 수 있다. 지난 20년 동안 서울, 인천, 경기 지역에서 대기오염물질의 농도가 전반적으로 감소세를 보이고 있으나, 배출저감정책의 시행으로 서울, 인천, 경기 지역으로 유입된 오존의 소모현상이 줄어들게 되면서 오히려 오존 농도는 증가하는 결과가 초래되었다.

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염은 특히 고농도일때 지역 외 배출로 인해 발생하는 경우가 상당수이다.

대기오염으로 인한 건강 피해는 고농도 대기오염에 장단기적으로 노출되며 발생한다. 건강 부담을 초래하는 경우는 대부분 장기간의 만성 노출로 인한 것이지만, 단기적 노출 역시 대기오염 농도를 줄이기 위한 긴급 대응 조치가 필요할 수 있다. 이처럼 건강 피해는 장단기 노출로 인해 발생하기 때문에 한국의 경우 단기(일일) 및 장기(연간) 노출에 대한 대기환경기준을 수립하였다.

한편 여러 연구에서 서울, 인천, 경기 지역 외부에서 유입되는 배출이 단기 및 연평균 대기오염물질 농도에 상당한 기여를 하는 것으로 나타났다. 따라서 서울, 인천, 경기 지역의 배출 저감조치를 통해 대기오염물질 농도가 상당히 감소했음도 불구하고 대기질 악화를 초래한 배출을 충분히 완화하지 못했다.

서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)농도에 장거리이동 대기오염물질이 크게 작용했다는 사실은 여러 관측 사례와 모델링 과정을 통해 평가되었다. 이러한 연구를 통해 단기적으로 발생하는 고농도 대기오염의 경우 장거리이동 대기오염물질이 주된 원인으로 지목되었다. 예를 들면 2008년부터 2019년까지 11년 동안 서울에서 발생한 고농도 미세먼지(PM_{10}) 사례($>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 조사한 결과, 장거리이동 대기오염물질과 현지에서 배출된 대기오염물질의 기여도는 매해 달라지는 것으로 추정된다.

평균적으로 고농도 미세먼지(PM_{10}) 사례 중 최대 30%는 서울, 인천, 경기 지역으로 유입되는 장거리이동 대기오염물질 그리고 최대 45%는 현지 배출 대기오염물질로 인한 것으로 추정된다(나머지는 분류하지 않음). 그러나 겨울철에 해당하는 10월부터 1월까지 발생한 고농도 미세먼지(PM_{10}) 사례 중 최대 40%는 장거리이동 대기오염물질로 발생하는 것으로 조사되었다(Park et al. 2021). 고농도 미세먼지(PM_{10}) 사례의 발생빈도는 서울, 인천, 경기 지역 내에서 시행하는 배출 저감조치를 통해 상당 수준 줄일 수 있으나 고농도 대기오염을 완전히 저감하기 위해서는 역외 배출의 감축 역시 반드시 필요함을 의미한다. 고농도 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 사례를 촉발하는 결정 인자에 대한 다른 연구에서는 이전 연구 결과와는 대조적으로 장거리 이동 대기오염물질의 기여도가 더 높다고 분석하였다. 2009년 5월부터 2013년 5월까지 서울에서 관측된 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 발생지를 조사한 결과, 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)를 구성하는 유기탄소, 원소탄소, 황산염 및 질산염의 70% 이상이 국경을 넘어 서울로 이동한 것으로 추정되었다(Lee et al. 2017).

한편 기상조건에 대한 다른 연구조사를 통해 서울의 미세먼지(PM_{10}) 농도가 높을 때 동북아, 특히 황해와 가까운 지역에 강한 고기압이 자리잡고 있는 것으로 확인되었다. 즉 강한 고기압으로 인해 해외에서 유입된 오염물질이 대기경계층에 갇혀 한국 전역으로 확산되며 지속적인 잔류 상태로 환기되지 못하기 때문에 서울, 인천, 경기 지역의 PM 농도 상승을 유발하는 것으로 확인되었다(Oh *et al.* 2015). 2019년 1월, 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 시간대별 농도가 최대 $188 \mu g/m^3$ 까지 상승하였으며 이는 역대 최고치 중 하나였다. 서해 바다에 위치한 관측소에서 측정한 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 역시 높게 나타났으며, 이는 서쪽 바람을 타고 국경을 넘은 오염물질이 한반도로 장거리 이동하고 있음을 시사한다. 또한, 2019년 1월 발생한 한국의 대기오염 사례를 대기 모델링을 통해 분석한 결과 서울의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도의 60-70%는 배출물질이 국경을 넘어 서울까지 장거리 이동하여 작용하는 것으로 나타났다(Oh and Park 2022).

서울, 인천, 경기 지역의 고농도 대기오염의 주된 요인인 장거리이동 대기오염물질과 해외에서 발생한 대기오염물질 배출 외에도 장기적인(연간) 대기오염 농도에 미치는 월경성 오염물질 배출에 대한 연구 조사도 있었다. 대기 중 입자상물질의 연평균 농도에 이러한 배출물질이 큰 영향을 미치는 것으로 추정된다. 참고로 2015년, 2016년 서울의 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 각각 47%, 43%로 해외로부터 유입된 것으로 조사되었다(Kumar *et al.* 2021). 오염 물질이 한반도 서쪽에서 국경을 넘어 이동한 배출은 겨울과 봄에 정점을 찍고 여름에 가장 적은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예를 들어 2015년 3월 관측된 월평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 총량의 최대 57%는 한반도 외부에서 발생하여 이동한 오염물질에 기인하였다(Kumar *et al.* 2021).

초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도(최고치와 연평균치)에 장거리 이동 대기오염물질이 큰 영향을 미치지만, 과거 몇 년 동안 이행된 이웃국가들의 배출저감 활동이 한국의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도를 줄이는 데 효과가 있었다. 에어로졸 농도를 정지궤도 위성으로 관측한 자료와 역궤적 분석 자료를 결합하여 장거리 이동 오염물질이 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 미친 영향을 평가했다

(Bae *et al.* 2021; Lee *et al.* 2021). 2015년부터 2018년까지 외부에서 유입된 장거리 이동 오염물질은 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 33% 정도 기여한 것으로 추정되었다. 하지만 장거리 이동이라는 ‘사건’이 발생하는 동안, 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 2015-2018년 연평균 농도보다 52% 더 높은 것으로 추정되었다(Lee *et al.* 2021). 2015년에서 2018년 사이 관측된 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 감소치는 기상학적 변화 대비 배출물질 감소량 효과를 파악하기 위해 유사한 방식을 사용해 평가하였다. 한국의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 감소량의 절반 정도는 2015년에서 2018년까지 기상학적 변화에 의한 것으로 보이며, 나머지 절반의 감소효과는 배출량 감소 때문으로 파악되었다. 이는 풍상지역의 배출량 저감효과를 포함하고 있고, 한국 전역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 감소에 큰 효과가 있었다(Bae *et al.* 2021).

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염은 다양한 배출원에 의해 유발된다.

여러 지역에 분포된 배출원이 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지를 유발한다는 것 말고도 이 지역의 대기오염 수준을 결정짓는 여러 부문들이 있다. 따라서 서울, 인천, 경기 지역에서 대기오염물질 농도를 낮추기 위해서는 해당 지역의 안팎 등 여러 지역적인 요소를 고려해야 할 뿐만 아니라 다양한 배출원 부문에서 발생하는 배출을 감소시켜야 한다. 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도를 형성하는 배출원은 시간과 공간 차원에서 다양하다(예. 특정 배출원과의 거리). 2014년과 2015년 서울의 한 지점에서 초미세먼지를 측정한 결과 대략 40% 정도는 질산암모늄과 황산암모늄 같은 2차 무기 에어로졸로 구성되어 있었다. 2차 무기 에어로졸은 질소산화물, 이산화황, 암모니아 같은 기체성 오염물질이 1차 배출 후 대기 화학반응에 의해 생성된다. 질소산화물은 교통부문에서 가장 많이 배출되며, 산업, 가정, 발전부문 역시 상당한 양을 배출한다. 이산화황은 고형 연료(석탄), 액상 연료(고황분 경유) 와 같은 황함량이 높은 연료를 연소했을 때 배출된다. 암모니아는 주로 농업부문의 합성비료, 분뇨관리, 유기비료 사용에서 배출된다(Park *et al.* 2020).

동일 지점에서 관측된 초미세먼지의 23%는 이동 배출원에서 직접 배출된 1차 입자상 분진이었다. 즉 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 수준은 수송부문이 큰 역할을 한다는 것을 의미한다. 산업활동을 위한 화석연료 연소가 가장 큰 원인으로 추정되었다. 초미세먼지 질량농도의 9%는 오일연소, 4%는 석탄연소 때문이었다. 바이오매스 소각은 초미세먼지 연간 질량농도의 12%, 토양입자는 8%를 차지하는 것으로 추정되었다. 해염에서 나온 에어로졸은 초미세먼지 질량농도의 1%로 나타났다(Park *et al.* 2020).

서울, 인천, 경기의 여러 지점에서 초미세먼지 배출원의 비중을 계량화했던 과거 연구에는 초미세먼지 농도를 형성하는 여러 배출원의 비중들이 유사하게 추정되어 있다(Park 2004). 2019년 서울의 초미세먼지 농도를 측정한 결과 2차 생성 질산염, 2차 생성 황산염이 해당 지점의 연간 초미세먼지 질량 기여비중이 각각 25.5%와 20.5%로 나타났다. 2014/2015년 측정 지점에서 이동 배출원의 비중은 초미세먼지 질량의 10% 미만으로 측정되어 더 낮았다. 하지만 오일 연소와 바이오매스 연소의 비중이 큰 편이었다. 소각은 동일 지점에서 추가로 파악된 배출원으로 이동형 배출원과 유사한 수준의 비중(최대 8%)을 나타냈다(Park *et al.* 2022).

해당 지역의 대기오염에 지대한 영향을 미치는 다른 배출원들도 있었다. 예를 들면 항공기 이착륙 주기, 인천국제공항의 지상활동, 서울, 인천, 경기 지역에 자리한 공항과 관련된 배출이 그 주변 지역의 대기오염을 악화시킨다. 특히 인천공항의 오존과 질소산화물 농도는 공항 배출 때문에 타 지역보다 월등히 높은 수준이다(Song *et al.* 2015).

코로나 19 대응 조치는 2020년 대기오염의 감소로 이어졌다.

세계적으로 대기질은 코로나 19 대응 조치와 무관하지 않았다. 많은 지역에서 대기오염물질 농도는 이동수요 감소와 산업활동 저하로 상당히 감소했다. 서울의 경우 코로나 대응 조치 이행은 대기오염물질 농도 감소로 이어졌다. 사회적 거리두기 실시 후 30일 동안 초미세먼지 농도는 조치 시행 전 30일 동안 관측한 수치보다 10.4% 낮았다. 이산화질소와 일산화탄소 농도 역시 각각 16%, 17%씩 감소했다(Han and Hong 2020). 팬데믹 기간 동안 서울의 초미세먼지 감소폭 수치를 더 크게 보고한 연구들도 있다. 그 전과 비교하면 2020년 1월부터 4월까지 서울의 초미세먼지 농도($25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 직전 4년 동안 동기간보다 $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮았다(Han *et al.* 2020). 2020년 3월 초미세먼지 농도는 2017-2019년 농도보다 36% 낮은 것으로 추정되었다(Seo *et al.* 2020). 팬데믹 기간 동안 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도 감소 역시 빈발한 북풍에서 원인을 찾을 수 있고, 이 때문에 동기간 서울, 인천, 경기의 대기오염에 국경을 넘어온 대기오염물질의 기여도가 상대적으로 낮아졌다.

2.3 대기오염 노출

2.2절은 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도를 분석한 여러 연구를 다루었다. 하지만 서울, 인천, 경기 지역 인구가 대기오염물질의 농도에 어떻게 영향을 받는 지에 대한 연구는 극히 드물다. 타 지역에서 실시한 과거 연구자료를 살펴보면 대기오염 농도 측정만으로 미세먼지에 노출된 사람들이 어떤 영향을 받는 지 파악하기 어렵다고 한다. 먼저 서울, 인천, 경기 지역을 포함하여 실내에서 대부분의 시간을 보내는 사람들은 평균 자신의 시간 90%를 실내에서 보낸다(Lim *et al.* 2012). 외기가 실내에 유입되어 표면에 입자상 물질이 쌓인다 하더라도 초미세먼지 농도는 실외보다 낮다(Dimitroulopoulou *et al.* 2006). 대신 실내 배출원이 있다면 실내 초미세먼지 농도는 실외보다 상승할 수 있다(Malley *et al.* 2020). 둘째, 사람들은 초미세먼지 농도가 다양한 여러 장소에 머물게 되는 데, 그 장소에 따라 체류 시간이 다르다. 그래서 직업, 거주지역, 이동 수단에 따라 미세먼지 노출에서 사뭇 다른 영향이 나타날 수 있다. 심지어 성별, 연령별, 사회경제적 지위에 따라 대기오염 노출에서 차이가 나기도 한다.

서울, 인천, 경기 지역의 경우 인구집단별 대기오염 노출의 영향에 관한 연구는 매우 제한적이다. 가장 포괄적인 연구는 서울의 10개 인구집단의 일상활동을 시뮬레이션 한 것으로, 2,000여 개의 활동패턴을 사용했다. 초미세먼지 농도 관측과 더불어 일상활동을 수행하는 주부, 20-40세 근로자, 10대 학생, 노인, 대학생, 남녀 서비스 종사자, 20-40세 실업자를 관찰했다. 이들은 가정이나 집이 아닌 건물의 실내나 실외에 머물거나 교통수단을 이용한다. 전체 인구집단의 일일 평균 미세먼지 노출량은 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 하지만 모집단을 세부적으로 살펴보면 많은 차이가 있었다. 사무실 근무자 집단들의 하루 미세먼지 평균 노출량 최고치는 $43.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최저치 $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정되었다. 사무실 근무자 집단들 사이에도 퇴근 후 식당을 방문한 사무실 근무자들은 최고 노출량을, 퇴근 후 바로 귀가한 사람들은 최저 노출량을 보였다. 퇴근 후 식당을 방문한 사무실 근무자는 식탁에서 숟가락을 직접 사용하여 조리된 음식을 섭취했는데, 이러한 식당의 평균 초미세먼지 농도는 $388 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 올라갔다. 이와 대조적으로 주방에서 음식을 조리하는 식당의 평균



서울시는 남산서울타워의 조명색으로 대기오염도를 4단계로 표시하고 있으며, 맑은 날은 파란색(좋음, $0 \sim 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 초미세먼지 농도가 높거나 미세먼지 주의보가 발령된 날은 빨간색(매우나쁨, $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)으로 표시.

초미세먼지 농도는 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상당히 낮은 편이었다. 주부와 학생 집단 역시 다른 인구집단 대비 초미세먼지 노출도가 상대적으로 낮았으며, 대학생, 노인 집단의 초미세먼지 노출도는 상대적으로 높게 나타났다.

두 번째 연구는 서울 거주민의 4,000시간 활동 패턴과 7개의 미시환경에서 초미세먼지 농도를 평가하여 인구 노출량을 알아보았다. 계절에 따라 인구의 평균 초미세먼지 노출량은 차이가 있다. 겨울이 최대 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고, 가을은 $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 서울 인구를 고노출군(초미세먼지 노출량 중간값 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 중노출군($28 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 저노출군($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 분류했다. 여러 사회경제적 특성과 노출도로 분류한 집단 구성원들과의 관계를 평가했으며, 연령, 성별, 근로 여부, 근무시간, 월소득, 건강상태 등은 노출도 집단 중 어디에 속하는 지에 따라 상당한 관련이 있는 것으로 나타났다. 고노출 집단에 속한 구성원은 남성이 더 많았으며, 고노출 집단의 평균 연령은 타 노출 집단보다 높았다. 노출도가 높을 수록 월소득이 높았고, 평균 근무시간이 길수록 노출도가 높은 집단에 속했다. 저노출 집단은 자신의 시간 중 평균 80% 정도까지 집에 머물렀다. 고노출 집단의 평균 집 체류시간은 60% 미만이었으며, 다른 건물의 실내에 머무는 시간이 상당히 길었다(예. 사무실) (Guak et al. 2021).

이러한 연구들은 공기 중 초미세먼지 농도 차이가 많이 나는 여러 미시환경의 초미세먼지 농도와 사람들이 각 미시환경에 체류하는 시간을 모두 고려하는 것이 중요하다는 것을 보여준다. 다른 여러 연구들을 살펴보면 특히 서울, 인천, 경기 지역의 미시환경 중의 하나인 대중교통시스템에서 초미세먼지 농도가 높다는 사실을 알

수 있었다. 또한 서울, 인천, 경기 지역의 지하철의 미세먼지 농도를 분석한 연구들도 있는데, 특히 지하철 역과 전동차의 환기 부족, 브레이크 마찰에 따른 초미세먼지 배출 때문에 초미세먼지 농도가 증가할 수 있음을 지적했다. 실제로 지하철 전반의 초미세먼지 농도는 승강장($129 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 운전석($129 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 객차($126 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 높게 측정되었으며, 권역 내($88 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 매표소($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 상대적으로 낮지만 그래도 높은 수치를 나타냈다(Kim et al. 2012). 따라서 초미세먼지 노출 수준을 보면, 서울 지하철을 사용하는 출퇴근자와 노동자들은 다른 교통수단 이용자들 보다 높은 초미세먼지 농도에 노출될 가능성이 있다. 일반 버스는 지하철보다 초미세먼지 농도가 낮았다(Lee et al. 2022).

2008년 서울 지하철의 초미세먼지 연구 이후 초미세먼지 농도 저감조치를 실시하여 농도가 높았던 구역의 농도가 낮아지는 효과가 나타났다. 2007년 지하철 승강장에 스크린도어가 설치되어 승강장 구역에서 전동차 안으로 초미세먼지 유입이 차단되는 효과가 있었을 것으로 본다(Kim et al. 2012). 스크린도어 설치는 역 승강장의 초미세먼지 농도를 설치 전보다 16% 낮춘 것으로 추정된다. 또한 일반 버스에 공기정화시스템을 장착함으로써 초미세먼지를 상당히 감축할 수 있었다. 공기정화시스템을 장착한 경기버스 3대를 관찰한 결과 설치 전보다 버스 내부의 초미세먼지 농도가 34-60% 감소했다. 이러한 연구들은 특정 미시환경 노출 감소의 목표가 명확한 접근방식은 초미세먼지 감소에 효과가 있으며 대중교통을 주기적으로 이용하는 사람들과 해당 미시환경에 체류하는 사람들의 대기오염물질 노출도를 줄이는 데 효과가 있음을 보여주었다.

서울, 인천, 경기 지역에서 실시된 다수의 역학조사 연구에 따르면 대기오염 수준과 건강위해 수준은 직접적인 관계가 있다.

2.4 대기오염과 건강위해성

대기오염의 건강위해성에 대해서는 전 세계적으로 많은 근거들이 제시되었다. 여러 자료들이 계속 보강되면서 세계보건기구와 같은 국제기구는 건강보호를 위한 대기오염 지침을 제정했다. 대기오염의 건강부담에 관한 문헌들을 보면 대기오염물질이 건강에 영향을 미치는 다수의 메커니즘이 있다. 호흡기 문제와 심혈관계 질환, 폐암, 제2형 당뇨병, 저체중아 출생, 조산 등을 일으키고 악화시킨다. 대기오염물질의 건강위해성은 사망률 증가, 유병률 증가를 꼽을 수 있는데, 모두 대기오염 장기노출, 고농도 단기노출, 반복노출과 같은 데서 야기된다. 여러 오염물질의 유독성이 이미 밝혀졌으며, 대기 중 오염물질 농도는 여러 지역에 걸친 다수의 발생원에서 나오는 배출 때문이다.

서울, 인천, 경기 지역 대기의 입자상 물질(PM), 질소산화물, 오존 농도 수준은 세계보건기구가 정한 건강보호지침 기준을 넘어선 상태이며, 한국의 국가 대기환경기준을 초과한 경우도 있었다.

서울, 인천, 경기 지역에서 실시된 다수의 역학조사 연구에 따르면 대기오염 수준과 건강위해 수준은 직접적인 관계가 있다. 서울, 인천, 경기 지역의 미세먼지 수준은 사망률과 유병률 증가 리스크와 유관하다. 미세먼지와 초미세먼지 노출은 급성 뇌졸중 사망(Hong *et al.* 2002), 폐암발병(Yang *et al.* 2021), 심장병(Kang *et al.* 2016), 순환기계 질환(Choi and Kim 2021), 호흡기 질환(Park 2019), 심혈관계 질환(Choi *et al.* 2019)과 연관성이 밝혀졌다. 서울의 한 연구는 특정

초미세먼지 구성 성분, 특정 발생원에서 배출된 입자상 물질(PM)과 전체 사망률이 관련되어 있다는 분석을 내놓았다. 전반적으로 초미세먼지의 양이 사망률과 상당히 연관되어 있었으나, 유기탄소, 원소탄소, 납과 같은 성분들도 사망률과 관련이 있었다. 이동배출원과 바이오매스 소각에서 배출되는 입자상 물질이 초미세먼지 발생원이고 사망률과 가장 관계가 높은 것으로 나타났다(Heo *et al.* 2014).

특히 오존 같은 오염물질 역시 서울, 인천, 경기에서 건강에 위해한 것으로 나타났다. 일일 오존농도 중간값을 2001년부터 2009년까지 일일 사망률과 비교한 자료를 통해 상당한 위해성을 확인할 수 있었다(Bae *et al.* 2020).

대기오염은 특히 저임금, 비양질의 직업, 문화 및 성 역할을 포함한 구조적이고 생물학적 차이들로 인해 임신부와 같은 여성 및 어린 아이들에게 더 위해하며 불균형적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 대기오염은 노인과 아동에게 특정 질병의 위험을 더 증가시켜 장기적인 건강 문제를 일으킬 수 있다.

서울의 대기오염물질 건강위해성의 직접 증거를 보면 배출과 노출을 줄이도록 설계된 정책 이행이 꼭 필요하다는 것을 알 수 있다. 건강위해성 분석 연구가 서울, 인천, 경기 지역에서 다수 실시되었는데, 이에 따르면 대기오염에 노출되었을 때 건강에 미치는 부정적인 영향과 건강부담은 서로 관계가 있다. 초미세먼지 노출과 국소빈혈형 심장질환,

만성 폐쇄성 폐질환, 폐암, 뇌출혈로 인한 사망의 건강부담을 추정한 연구였다. 서울, 인천, 경기 지역에서 인구가중 연간 초미세먼지 농도는 각각 $24.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $27.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정되었다. 이러한 농도 수준에 대한 노출은 2015년 서울, 인천, 경기 지역 각각에서 조기사망 1,763건, 309건, 2,352건 관련이 있는 것으로 추정되었다. 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염과 관련된 연 4,400건의 조기사망은 한국 전체의 대기오염으로 인한 건강부담 추정 수치의 37%로 파악되었다. 조기사망의 원인은 뇌출혈이 가장 많았고, 다음으로 심장병과 폐암 순이었다. 2006년부터 2015년까지 대기오염 노출 관련 조기사망 수치는 3개 지역에서 상당히 감소한 것으로 추정된다(Han *et al.* 2018). 2006년 서울의 연간 조기사망 수치는 2015년과 비교하면 거의 1,000건이나 더 많았던 것으로 추정된다. 경기와 인천에서는 연간 최대 600건, 최대 100건이 더 많았다.

앞서 거론한 건강위해성은 주로 성인, 대부분 노인/기저질환자의 상황이었다. 서울, 인천, 경기 지역에 실시된 다른 연구들을 보면 대기오염 노출은 아동에게도 영향을 미친다. 서울 지역에서 36만 건의 출생을 분석했더니 미세먼지와 초미세먼지 노출은 영아사망율과 상당한 관계가 있는 것으로 나타났다(Son *et al.* 2011). 초미세먼지 노출은 인천지역의 천식아동들의 최대 날숨 유량 감소와 관계가 있으며 서울 지역의 천식아동들의 천식발작 횟수 증가와 관련성이 나타났다(S. Kim *et al.* 2020). 임산부가 미세먼지에 노출된 경우 저체중아 출생과 상당한 관련성이 있었다. 서울과 인천 지역에서 저체중아 출생 중 7%와 11%는 임산부의 미세먼지 노출이 원인이었던 것으로 추정된다(Seo *et al.* 2010).



2.5 대기오염물질 배출

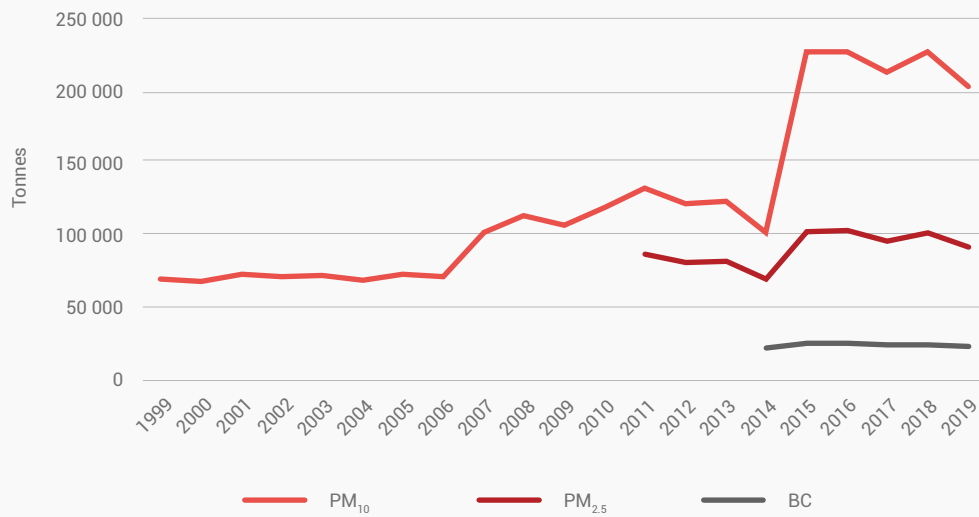
2.2절에서 기술한 대로 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도는 이 지역에서 배출한 대기오염물질과 타 지역에서 배출되어 유입된 대기오염으로 결정된다. 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 배출 추정치는 서울, 인천, 경기 지역에서 추정된 총 배출량의 일부에 해당한다. 그러나 중앙정부와 지방정부는 대기오염 감축 및 양성평등 정책이행을 통해 지역의 배출을 통제해야 하기 때문에 서울, 인천, 경기 지역의 배출치 규모를 과소 평가할 가능성이 있다.

2.1절에서 한국의 법제도 상 국가오염물질 배출목록을 작성하고 유지하는 등의 대기오염 개선 활동은 환경부 소관임을 밝혔다. 국가 미세먼지 정보센터(NAIR)는 대기정책 지원 시스템(CAPSS)을 통해 CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, VOC_s, NH₃의 연간 배출량을 추정한다. 배출량 계산은 각 배출원/연료의 배출계수와 관리효율을 각 배출원의 활동수준에 적용하는 방식이다. 비산먼지와 바이오매스 연소에 의한 배출은 2015년부터 대기정책 지원 시스템(CAPSS) 배출목록에 포함되었다.



그림 2.10

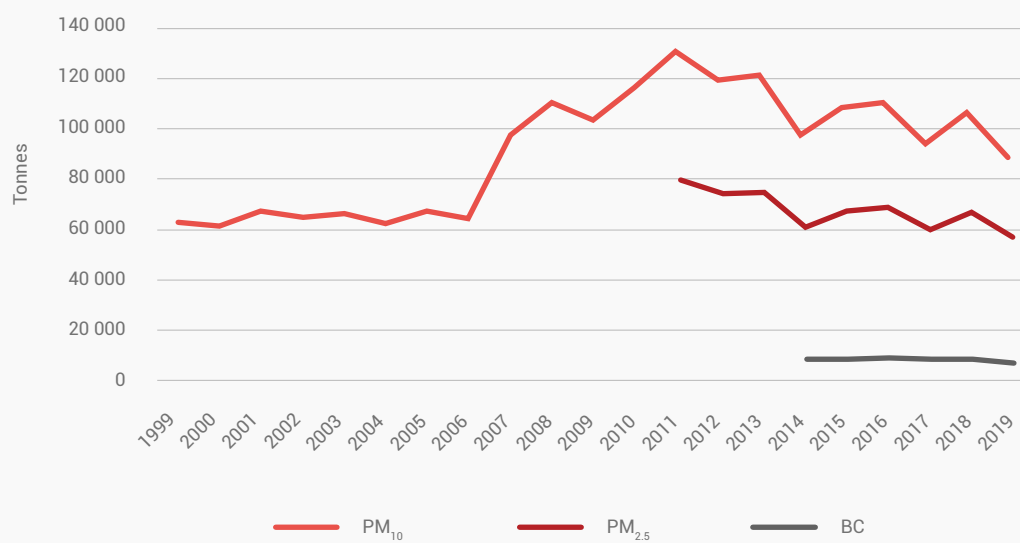
1999-2019년 대한민국의 미세먼지, 초미세먼지, 블랙 카본 배출량 - 비산 먼지 및 바이오매스 연소 포함(단위: 톤)



출처: 국가미세먼지정보센터 자료 활용

그림 2.11

1999-2019년 대한민국의 미세먼지, 초미세먼지, 블랙 카본 배출량 - 비산 먼지 및 바이오매스 연소 제외(단위: 톤)



출처: 국가미세먼지정보센터 자료 활용

다음으로 한국의 각 오염물질 총 배출량에 영향을 미친 여러 배출원이 다음 표에 표기되었다. 2005년과 2019년 오염물질 배출원의 배출비중은 <표 2.4-2.5>와 <그림 2.12-2.13>에 나와있다. 전국적으로 제조업이 1차 초미세먼지 배출에 가장 큰 비중(2019년 총 배출의 37%)을 차지한다. 비산먼지와 비도로 수송이 그 다음이다. 질소산화물은 도로 수송과 비도로 수송이 가장 비중이 큰 배출원으로 국가 전체 질소산화물 배출의 60%를 차지하고, 그 다음은 제조업이다(14%). 이산화황은 대부분 산업공정(31%)과 에너지생산(26%)에서 배출된다. 암모니아는 거의 대부분 농업부문에서 배출된다. <그림 2.10-2.11>은 비산먼지와 바이오매스 연소 포함 여부에 따른 미세먼지 배출량 변화 결과를 보여준다. <그림 2.10>에 따르면 2015년 이 배출원들이 배출량 집계에 포함된 이후 배출량이 상당히 증가한 것으로 나타난다. 이는 사실이 기간 동안 배출량 규모의 실제 변화를 보여주는 것이 아니라 배출목록 작성의 방법 업데이트를 반영한 것이다. <그림 2.11>에서는 비산먼지와 바이오매스 연소를 제외한 입자물질 배출의 시계열 변화를 보여준다. 이러한 배출원을 포함하지 않은 그림에서 초미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량은 2010년에서 2019년까지 감소했음을 알 수 있다.

2005년에서 2019년까지 대부분의 오염물질 배출은 감소했다. 특히 도로수송 부문의 감축이 가장 컸다. 도로수송 부문의 미세먼지 배출은 73%, 질소산화물 배출은 19% 감소했다. 2005년에서 2019년까지 제조업, 비도로 수송, 농업부문 등에서는 배출량이 증가했다.

여러 연구에서 국가대기오염물질 배출목록 자료를 활용하여 <표 2.4-2.5>, 그리고 <그림 2.12-2.13>에서 확인할 수 있듯이 배출원의 비중과 추이를 보여주었다. Choi et al. 2021의 논문은 2017년 CAPSS 평가자료를 제시하고 있다. 대략적으로 여러 배출원의 배출비중이 앞서 설명한대로 유사한 동향을 나타냈다. 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 2017년 제조업이 가장 큰 배출 비중(31%)을

보였고, 뒤를 이어 비산먼지(19%), 비도로 수송(16%), 바이오매스 연소(13%), 도로 수송(10%) 순으로 나타났다. 특히 위해성이 있다고 알려진 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 성분인 블랙카본은 총 배출량의 43%가 비도로 수송, 34%는 도로 수송에서 배출되었다. 이 배출원들은 질소산화물 배출의 대부분을 차지하기도 했다(도로 수송 37%, 비도로 수송 26%) 이산화황은 34%가 산업공정에서, 25%는 에너지 생산, 23%는 제조업에서 배출되었다. 휘발성 유기화합물의 54%는 유기용제, 18%는 산업공정에서 배출되었다. 마지막으로 암모니아의 79%는 농업부문에서 발생했다. 2016년과 비교하면 몇몇 주요 배출원에서의 배출은 2017년 감소했다. 에너지 부문 배출에서 다양한 오염물질이 3%에서 23% 정도 감소했다. 이는 공공 발전, 제조업에서의 감축이 포함된 수치이다. 도로 수송부문의 배출 역시 감소했다. 2016년 대비 질소산화물 배출은 4%, 초미세먼지 배출은 10% 감소했다. 비도로 부문의 배출은 증가했다. 그 이유는 해운부문 배출이 증가했기 때문이다(비도로 배출에서도 감소했던 이산화황 배출 제외).

<표 2.6>은 국가 총 배출량을 여러 지역별로 구분하고 있다. 2019년 서울, 인천, 경기 지역에서 배출하는 초미세먼지는 전국 총 배출량의 20% 이하였으나 다른 오염물질 보다는 상당히 큰 배출량이었다. 예를 들면 전국 블랙카본, 휘발성유기화합물 배출의 약 1/3, 질소산화물 배출의 27%까지는 이 지역 내에서 배출되었다. 이는 주요 배출원이 이러한 오염물질 배출에 차지하는 비중을 반영하는 것으로 주요 배출원은 한국 내 위치하고 있다. 블랙카본과 질소산화물은 주로 수송 부문에서 배출되었으며 서울, 인천, 경기 지역에 집중되어 있다. 초미세먼지는 산업부문 등 여러 배출원에서 발생하며 이들은 서울, 인천, 경기 지역 외부에 많이 위치하고 있다. 암모니아는 농업 비중이 적은 서울, 인천, 경기 지역에서 배출되는 양은 상대적으로 적다. 하지만 경기만 보면 전국 암모니아 배출의 15%를 차지하고 있으며, 도 단위 지역으로는 두 번째로 배출 비중이 큰 지역이다.

표 2.4

2005년 대한민국 배출원별 대기오염물질 배출 현황(단위: 톤)

배출원	PM ₁₀	SO _x	NO _x	VOCs	NH ₃	CO
에너지 생산	8 229	139 064	390 895	5 326	1 335	35 889
비산업	2 978	58 706	93 658	3 041	1 706	79 759
제조업	16 000	68 181	108 186	2 426	1 048	14 342
산업공정	6 888	82 371	55 327	134 493	44 701	22 882
송전과 저장				25 933		
유기용제 사용				432 828		
도로 수송	25 312	5 190	455 217	102 198	10 946	584 485
비도로수송	7 870	53 506	188 631	18 461	481	49 613
폐기물 처리	64	1 444	14 811	31 715		1 948
농업					174 738	
기타 표면 오염원					12 196	
총 계	67 341	408 462	1 306 725	756 421	247 151	788 918

출처: 한국환경공단, 국가미세먼지정보센터

표 2.5

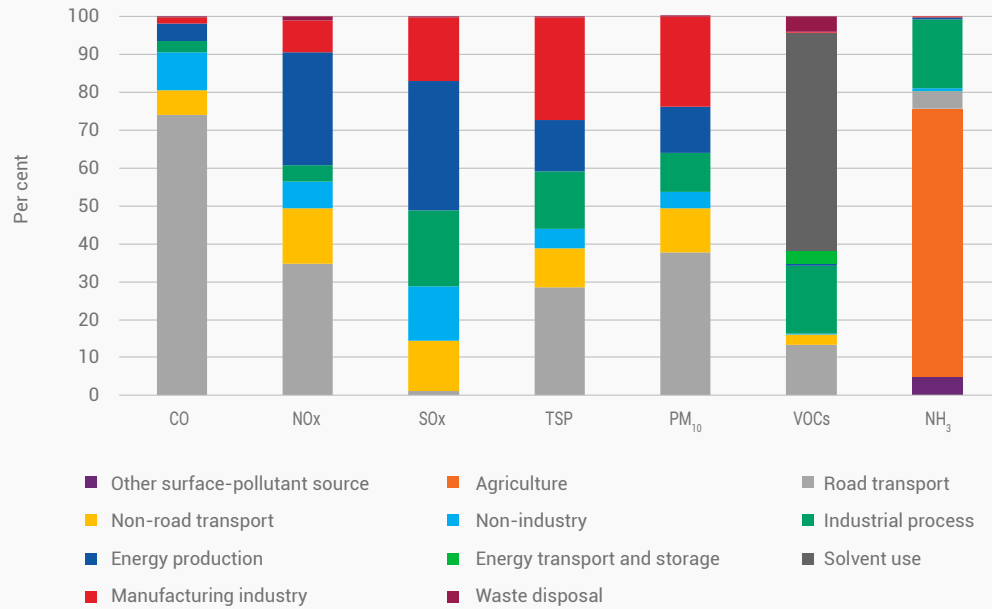
2019년 대한민국 배출원별 대기오염물질 배출 현황(단위: 톤)

배출원	CO	NO _x	SO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	BC
에너지 생산	64 327	75 513	45 297	3 365	2 813	8 434	1 422	372
비산업	47 629	85 814	15 869	1 177	857	2 828	1 350	180
제조업	19 737	169 221	65 730	52 932	27 118	3 404	717	623
산업공정	26 766	51 705	105 699	6 699	5 139	186 292	44 630	15
송전과 저장						29 062		
유기용제 사용						545 244		
도로 수송	180 489	371 851	308	6 719	6 182	36 663	2 615	3 801
비도로 수송	187 565	311 748	37 555	17 265	15 989	63 951	122	6 904
폐기물 처리	2 140	12 332	2 326	267	228	59 537	22	3
농업							252 444	
기타 표면 오염원	10 552	271		599	539	1 281	12 962	40
비산먼지				105 037	17 272			122
바이오매스 연소	218 642	8 407	75	13 806	11 482	83 521	15	2 151
총 계	757 847	1 086 862	272 859	207 866	87 619	1 020 217	316 299	14 211

출처: 한국환경공단, 국가미세먼지정보센터

그림 2.12

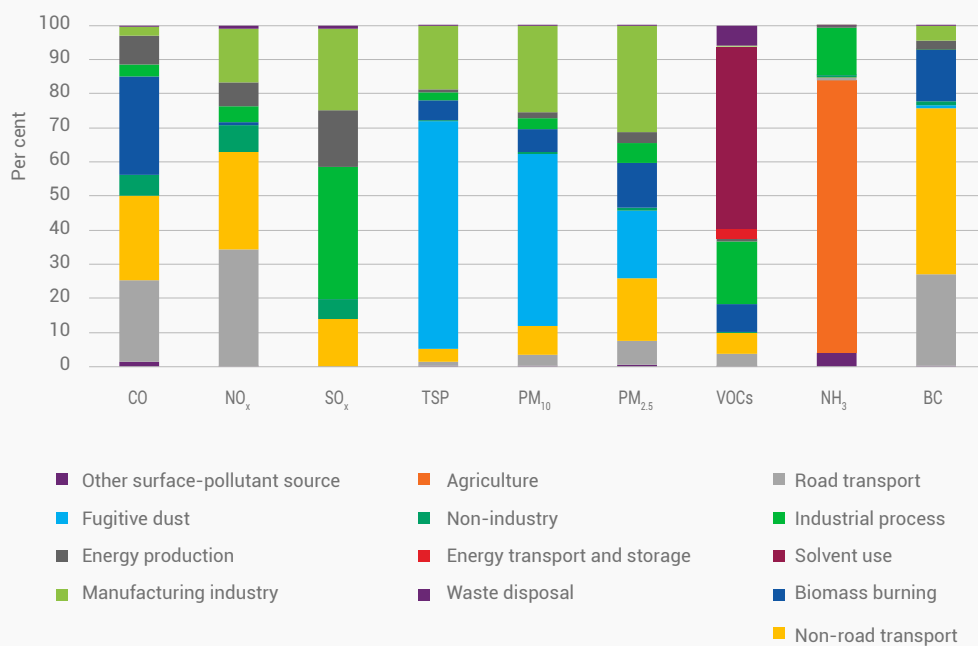
2005년 대한민국 단기체류 기후변화 유발물질 배출원별 비중(단위: %)



출처: 한국환경공단, 국가미세먼지정보센터

그림 2.13

2019년 대한민국 단기체류 기후변화 유발물질 대기오염물질 배출원별 비중(단위: %)



출처: 한국환경공단, 국가미세먼지정보센터

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도는 이 지역에서 배출한 대기오염물질과 타 지역에서 배출되어 유입된 대기오염으로 결정된다.

표 2.6

2019년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 총 배출량(단위: 천 톤)

	CO ₂	CO	CH ₄	NM VOC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂	NH ₃	PM _{2.5}
전국	643 767.2	757.8	1 297.6	1 020.2	1 086.9	207.9	272.9	316.3	87.6
서울	41 812.5	46.6	125.2	63.7	71.0	9.7	1.0	3.5	2.7
인천	52 989.6	39.2	-1.5*	52.9	52.9	7.2	11.3	6.7	2.5
경기	71 096.3	125.0	205.2	188.4	170.7	29.9	9.0	47.4	9.9

출처: 한국환경공단, 국가미세먼지정보센터

(*): 인천 CH₄는 음수 값으로 표기되어 있다. 그 이유는 인천에 매립된 타 지역 발생 쓰레기에서 나온 배출량을 제외했기 때문이다. 인천에 위치한 대규모 매립지(수도권 매립지)에서는 수도권에서 발생한 쓰레기를 수용하고 처리한다.

표 2.7

2019년 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 전국 총배출량 대비 비중(단위: %)

	CO ₂	CO	CH ₄	NM VOC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂	NH ₃	PM _{2.5}
서울	6.5	6.1	9.6	6.2	6.5	4.7	0.4	1.1	3.1
인천	8.2	5.2	-0.1*	5.2	4.9	3.5	4.1	2.1	2.9
경기	11.0	16.5	15.8	18.5	15.7	14.4	3.3	15.0	11.3

출처: 한국환경공단, 국가미세먼지정보센터

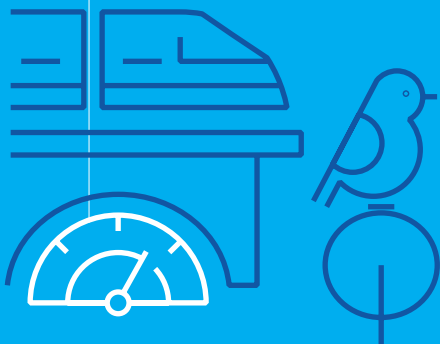
(*): 인천 CH₄는 음수 값으로 표기되어 있다. 그 이유는 인천에 매립된 타 지역 발생 쓰레기에서 나온 배출량을 제외했기 때문이다. 인천에 위치한 대규모 매립지(수도권 매립지)에서는 수도권에서 발생한 쓰레기를 수용하고 처리한다.

03

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출목록, 베이스라인 및 감축 시나리오 작성

3.1

서울, 인천, 경기 지역
배출량 추정



3.2

전체 평가 프레임워크



3.3

대기오염
저감평가 결과



주요 결과

- 01 지난 20년간 이루어 온 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 개선효과를 이어가기 위해서는 향후 수십 년 간 대기오염을 감축할 수 있는 가장 효과적인 정책이 무엇인지 평가하여 파악해내는 것이 필요하다.
- 02 서울, 인천, 경기 지역의 과거 배출량을 추정하고, 추가적인 저감 대책과 정책 시행 유무에 따른 베이스라인 시나리오 및 감축 시나리오의 미래 배출량을 추정하는 대기오염 저감 평가를 실시했다.
- 03 향후 20년간 서울, 인천, 경기 지역 대기질 관리 전망에 주요한 차이를 줄 수 있는 요인은 이산화탄소와 같은 온실가스 저감과 더불어 대기오염물질 배출을 추가로 저감할 수 있는 역량이다. 지난 15년간 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 물질 배출량은 감소하였으나, 이산화탄소 배출은 증가하였다.
- 04 재생에너지를 통한 전력생산확대, 무공해차(ZEV) 도입, 에너지 효율향상 등 대한민국 탄소중립 시나리오 대책이 약속한대로 충실히 이행된다면, 대기 오염물질 배출 저감뿐만 아니라 2050년까지 탄소중립 달성도 가능할 것이다.



서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출은 수송, 가정, 산업, 농업, 폐기물 등 여러 부문에서 발생한다.

3.1 서울, 인천, 경기 지역 배출량 추정

2장에서는 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 현황을 검토하고, 현재의 대기오염물질 농도가 국가 대기환경기준과 WHO 가이드라인을 초과했음을 밝혔다. 2장에 요약된 조사 결과에 따르면 한국의 초미세먼지 농도가 높아진 이유는 서울, 인천, 경기 지역과 그 외 지역의 대기오염물질 배출, 그리고 다른 나라의 배출물질들이 서울, 인천, 경기 지역으로 유입되는 현상 때문이었다. 비록 현재 대기오염물질 농도가 국가 기준과 WHO 가이드라인을 초과하는 수준이기는 하지만 서울, 인천, 경기 지역의 배출량 감축을 위한 정책을 시행하고 외부에서 유입되는 오염물질 배출감소 조치를 통해 그간 상당한 진전을 이루었다.

3 장에서는 2장에서 살펴본 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 현황 분석을 확대하여, 향후 사회경제적인 발전과 새로운 정책과 조치들이 시행될 경우 이 지역의 대기오염이 어떻게 변화할 수 있는지를 평가하려고 한다. 이 장은 서울, 인천, 경기 지역의 배출을 중심으로 작성되었다. 왜냐하면 대기오염물질 농도가 해당 지역의 건강 관련 영향을 결정하는 유일한 원인은 아니지만, 서울, 인천, 경기 지역 대기오염을 구성하는 요인으로 각 지자체 내에서 직접 통제할 수 있기 때문이다. 따라서

이번 평가작업에 포함된 서울, 인천, 경기 이외 지역과 타 아시아 국가에서의 대기오염물질 배출 감소는 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도를 건강위해성 기준 이하로 감소시키기 위한 필수 조건임을 전제로 하여, 이 지역 내 배출량이 향후 얼마나 감소될 수 있을 지를 평가했다. 배출 저감 목표 달성을 위한 지역간 협력에 대한 권고사항은 4 장에서 정리했다.

3장의 주요 목적과 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 배출저감 평가내용은 다음과 같다.

- + 2005-2020년 기간 동안 서울, 인천, 경기 지역과 그 외 지역의 과거 대기오염물질 배출량을 추정하고 변화 경향을 분석한다.
- + 추가적인 대기오염물질 배출저감 정책 이행을 가정하지 않는 베이스라인 시나리오를 통해 2021-2050년까지의 각 지역 대기오염물질 배출량을 추정한다.
- + 서울, 인천, 경기 지역의 배출량 감축 정책에 따른 잠재적 대기오염물질 저감효과를 평가하고 특히,

- » 대한민국의 탄소중립 정책을 통해 온실가스 및 대기오염물질 배출저감을 동시에 달성할 수 있는 방법을 평가하고,
- » 대책 실행 이후에도 주요한 배출원으로 남을 대기오염물질 배출 부문을 파악하여, 향후 대기오염관리 계획을 어디에 초점을 맞춰야 하는지 식별한다.

아래 절에서 평가 방식과 주요 특징을 다루고, 3.2절에서 서울, 인천, 경기 지역과 그 외 지역 대기오염물질의 과거 배출 및 미래 추정 관련 결과를 다룬다.

3.1.1 서울, 인천, 경기 지역 대기오염 저감 평가의 배경

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출은 수송, 가정, 산업, 농업, 폐기물 여러 부문에서 발생한다. 저감 평가를 설명하기 앞서, 이 절은 우선 이러한 부문들이 대기오염물질 배출에 기여하는 이유와 어떤 활동들이 궁극적으로 대기오염물질 배출을 일으키는 원인이 되는지 이해하는데 필요한 배경을 제시하고자 한다.

이 절은 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출에 기여하는 부문의 여러 가지 내용을 데이터로 제시한다. 데이터는 각 대기오염물질 배출원의 배경을 보여줄 뿐만 아니라 서울, 인천, 경기 지역 및 그 외 지역의 과거 대기오염물질 배출량을 추산할 수 있는 근거가 된다. 대기오염 저감 활동을 평가하기 위해 사용한 방법은 다음 절에서 다루게 된다.

인구구조와 경제 변수

2020년 대한민국의 인구는 약 5,200만명에 달한다. 이 중 절반 이상인 약 2,600만명이 서울, 인천, 경기 지역에 거주하며, 세계 최대 수준의 대도시 권역을 형성하고 있다. 대한민국의 경제 규모는 2020년 기준 1,800 조원, 또는 1조4천억 달러 수준이다. 서비스와 행정 부문이 한국 경제의 대략 57%를 차지하고 있으며, 그 다음으로 산업 부문, 그리고 농업은 작은 비중을 차지한다. 2020년 한국 경제의 48%는 서울, 인천, 경기 지역 활동에서 비롯된다. 서울은 서비스와 행정이 거시경제의 대부분을 구성하고, 인천과 경기도는 서비스와 행정이 부가가치 GDP의 대부분을 차지하고는 있지만 산업 부문 역시 경제 전체에서 차지하는 비중이 크다(표3.1). 산업 GDP를 구성하는 여러 부문의 기여도는 산업 부문 설명에서 다루기로 한다.

표 3.1

2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 주요 인구 및 거시경제 현황

	대한민국	서울	인천	경기
인구(백만명)	51.8	9.6	3.0	13.5
가구수(백만)	20.3	3.9	1.1	4.9
GDP(조원)	1 839	377	77.9	434
부가가치 GDP (조원) - 산업, 제조, 광업, 건설	575	26.5	26.2	195
부가가치 GDP (조원) - 농림수산업	31.8	0.38	0.28	3.14
부가가치 GDP (조원) - 서비스, 행정	1 044	348	47.4	230

서울, 인천, 경기 지역 취사와 난방의 경우 2005년부터 2020년까지 가스 장비의 교체로 에너지 효율성이 크게 개선되었다.

가구

대한민국 인구 5,200만명은 2,000만 가구를 구성한다(표 3.1, 그림 3.1). 가구당 평균 세대원 수(한국 평균 2.55명)는 서울(가구당 2.46명)이 인천(2.7명), 경기(2.8명)보다 적다. 가구 내 대기오염물질 배출의 주요 요인이 되는 에너지 소비는 주로 전기와 천연가스이다. 평균 전력 사용량은 인천과 경기 지역이 서울보다 조금 높은

편이며, 2005년부터 2020년까지 인천과 경기 지역의 가구당 전력 사용량은 증가한 반면 서울은 평탄하게 유지되었다. 전기보급과 에너지 효율성 개선으로 같은 기간 세 지역 모두 가구당 천연가스 사용량은 감소했다(표 3.2). 또한 취사와 난방의 경우 이 기간 동안 도시가스 장비가 전기장치로 교체되어 상당한 진전이 있었고 보일러 등 주요 가전장치의 에너지 효율성도 크게 개선되었다.



표3.2

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 가구당 전기 및 천연가스 사용량(단위: 전기-MWh, 가스-TOE)

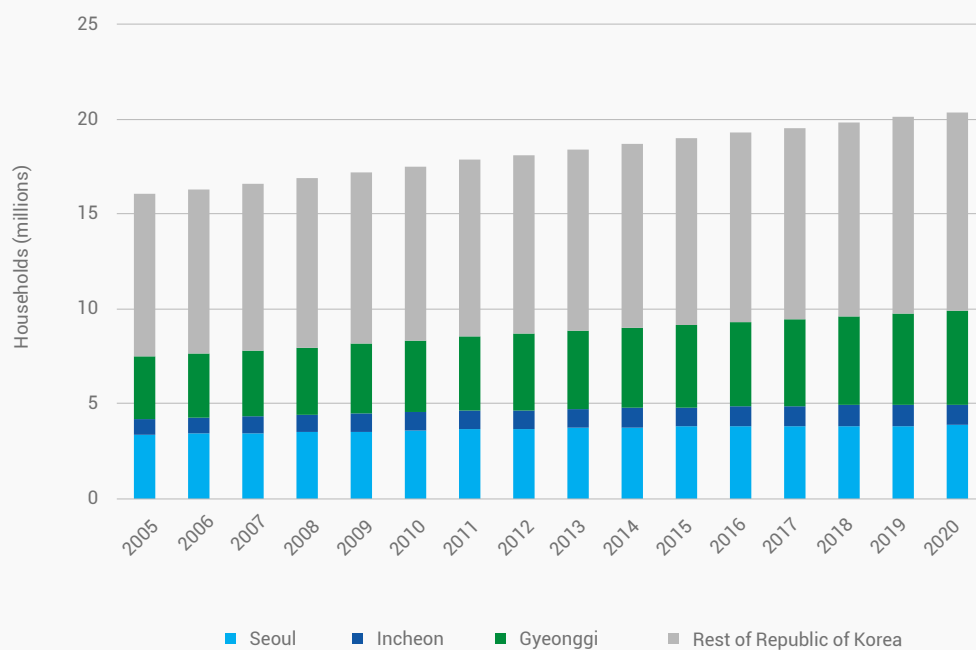
가구당 전력 사용량 (가구당 MWh ⁵)	2005	2010	2015	2020
전국	3.17	3.50	3.36	3.65
서울	3.46	3.66	3.43	3.65
인천	3.15	3.51	3.53	3.85
경기	3.51	3.81	3.58	3.92

가구당 가스 사용량 (가구당 TOE)	2005	2010	2015	2020
전국	0.52	0.52	0.44	0.51
서울	0.87	0.77	0.59	0.65
인천	0.77	0.66	0.50	0.53
경기	0.65	0.58	0.45	0.46

참고: MWh: megawatt hour; TOE: tonnes of oil equivalent

그림 3.1

2005-2020년 대한민국 지역별 가구 수(단위: 백만)



5 Megawatt = 1 million watts

서울, 인천, 경기 지역 전체 차량 보유량의 급격한 증가가 이루어졌고 동시에 훨씬 엄격해진 차량배출기준이 도입되었다.

수송

수송 부문은 본 평가 범위에 해당하는 기간 동안 상당한 변화를 보였다. 도로 수송의 경우 2005년부터 2020년까지 대한민국의 총 차량 대수는 56% 증가로 매년 거의 4%씩 증가했다(그림 3.2). 전국 도로 운행 차량 2,400만대 중 서울, 인천, 경기 차량이 44%를 차지하지만 각 지역의 차량 증가율에는 차이가 있다. 서울의 경우 같은 기간 차량 대수가 14%로 소폭 증가한 반면, 인천은 2배 이상 증가했다. 경기도의 경우 차량 대수는 65% 증가했다(그림 3.2).

개인 승용차가 대한민국 차량의 절반 이상을 차지하고 있으며, 레저용 차량(RV)이 두번째, 트럭이 그 다음이다. 서울의 경우 전체 차량의 62%가 승용차이고 트럭의 비중은 상당히 낮은 편이다. 인천과 경기의 차량 구성비는 전국 평균과 거의 비슷하다.

대한민국과 서울, 인천, 경기 지역 전체 차량 대수가 크게 증가한 이유는 차량 보유량이 증가했기 때문이다. 2005년과 비교하면 1인당 승용차 수는 모든 지역에서 상당 폭 증가했으며 인천의 증가폭이 가장 크다(그림 3.3). 또한 소형 승용차 수는 감소하고 중대형 승용차 수는 증가하는 등 보유 차량 크기도 증가했다(그림 3.4).



그림 3.2

2005-2020년 대한민국의 유형별(A), 지역별(B) 차량 대수(단위: 천 대)

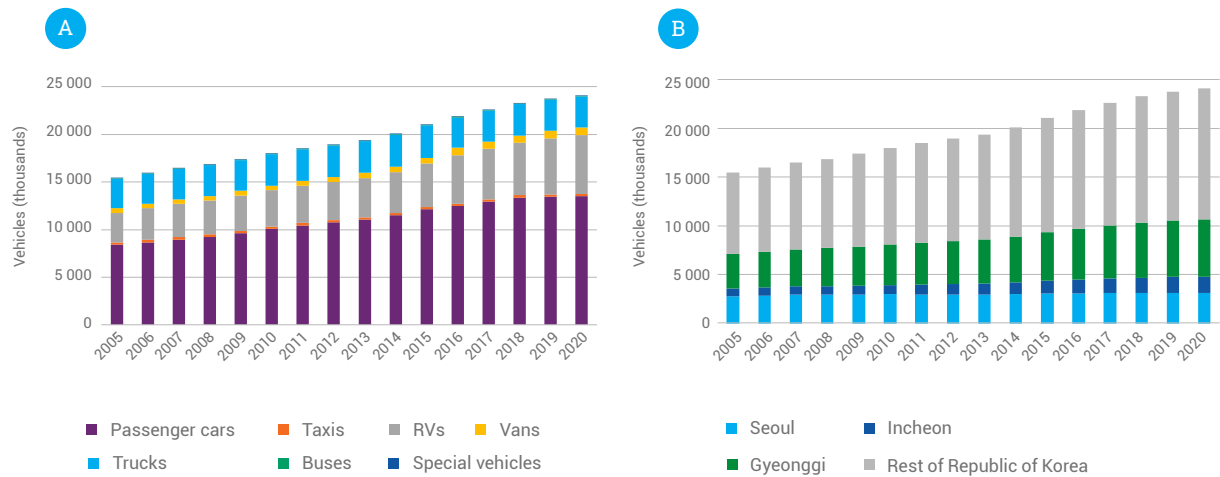


그림 3.3

2005-2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 인구 1,000명 당 전 차종(A) 및 승용차(B) 차량 대수

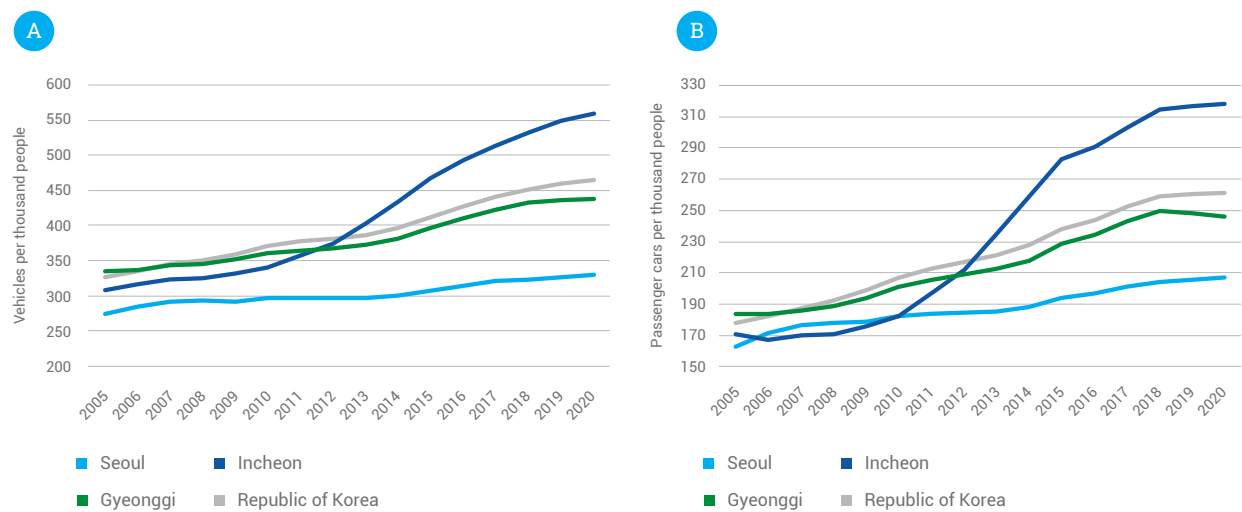
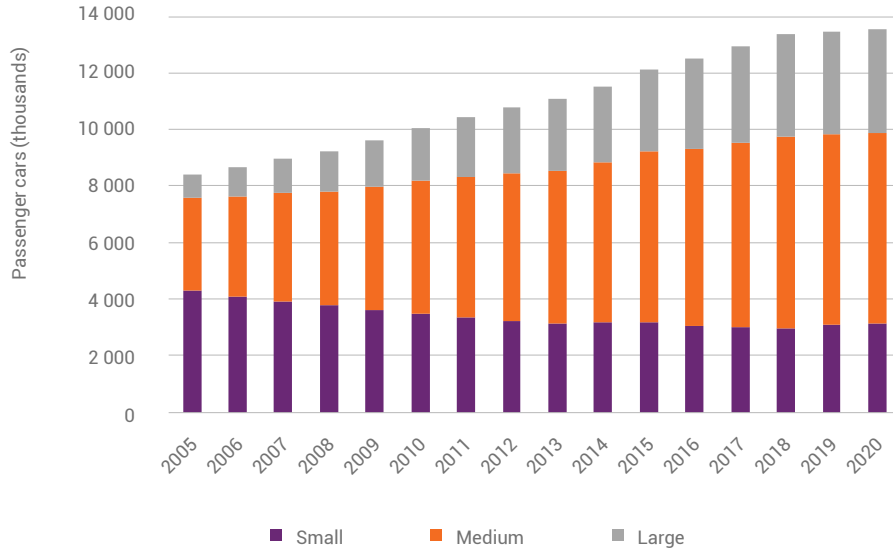


그림 3.4

2005-2020년 대한민국 크기별 승용차 대수(단위: 천 대) - 대한민국 자동차관리법에 따라 1000CC 이하는 경형, 1600CC 이하는 소형, 2000CC 이하는 중형, 2000CC 이상은 대형차로 분리



그러나 차량의 중대형화와 경향으로 세 지역에서 도로 수송 부문 대기오염물질 배출이 증가할 수도 있었지만, 같은 기간 훨씬 엄격해진 차량배출기준이 도입되면서 차량 당 대기오염물질 배출은 감소되었다. 과거 수십 년 동안 한국은 차량 대기오염물질 배출을 규제해왔다. 차량배출기준과 관련 자원 제공에 관한 자세한 사항은 3.2 절에서 살펴본다. 배출기준은 신차에 적용되며, 유럽과 북미 국가들의 차량 배출 규제와 유사한 수준이다. 과거

15년 동안 더 엄격해진 차량 배출 기준을 충족하는 차량 비중이 크게 증가했다(그림 3.4, 그림 3.5). 경차의 경우 가솔린 차량의 배출 기준은 캘리포니아 배출 기준⁶을 따르고 있으며, 경유차의 경우 유럽의 배출 기준(Euro standards)을 따르고 있다(Park *et al.* 2021).

6 캘리포니아 배출 기준: https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_vehicle_emission_standards

그림 3.5

2005-2020년 대한민국 중형 승용차 배출 가스 등급별 비중(단위: %)

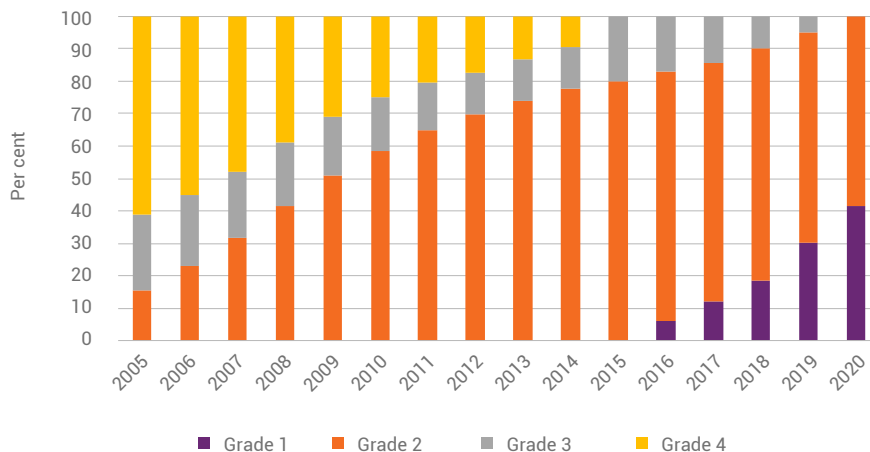
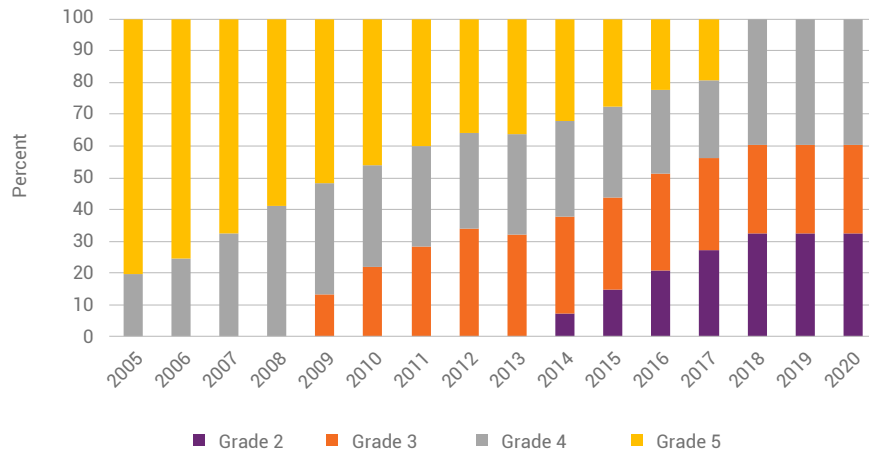


그림 3.6

2005-2020년 대한민국 대형 자동차 배출 가스 등급별 비중(단위: %)



도로 수송 부문이 통행수요에서 가장 큰 비중을 점하고 있지만, 비도로 수송 부문의 배출도 상당하며 잠재된 대규모 배출원이라고 할 수 있다. 철도 수송은 서울, 인천, 경기 및 전국 타 시도를 포함하여 전기 및 디젤 엔진,

지하철을 결합하여 사용하는 승객 수송을 포함한다(그림 3.7). 화물 수송에도 철도가 많이 사용된다. 해운 부문에서 인천항은 한국에서 두번째로 큰 항만이다. 한국에 입항하는 화물선의 약 20%는 인천항으로 들어온다(그림 3.8).

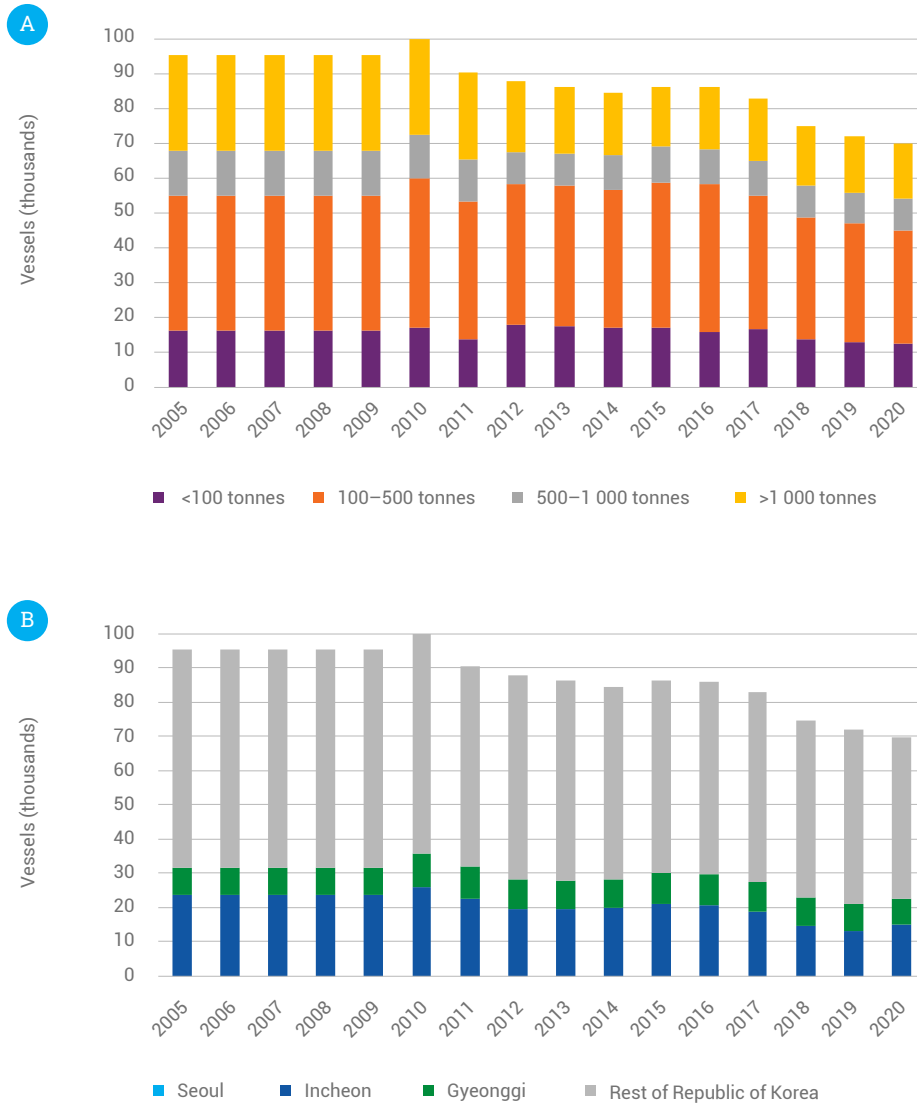
그림 3.7

2005-2020년 대한민국 철도 사용, 여객 운송(단위: 10억명-km, 10억톤-km)



그림 3.8

2005-2020년 대한민국 입항 선박 선박(A) 및 지역별(B) 현황(단위: 천 척)

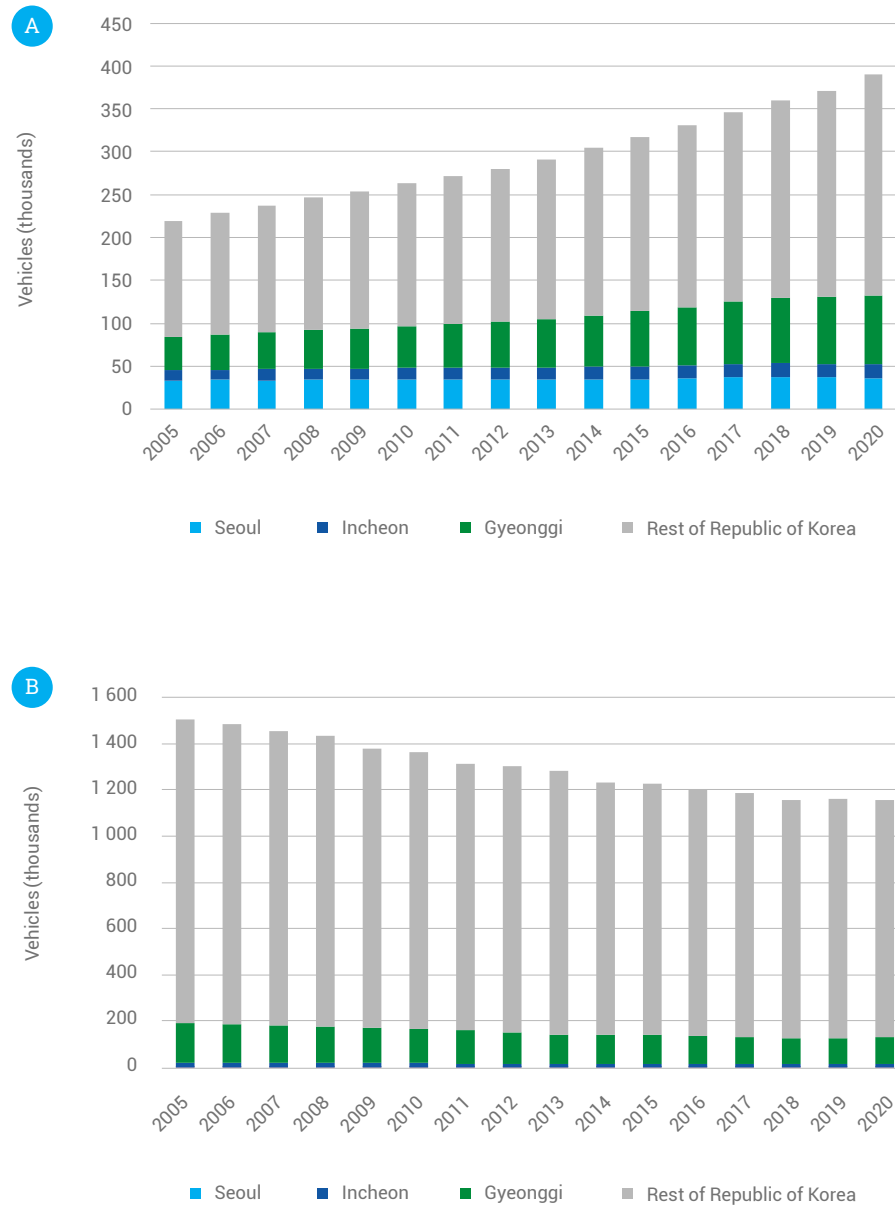


마지막으로 수송 부문 중 비도로 기계류는 보통 경유를 사용하며 대기오염물질 배출이 많은 편이다. 한국의 건설기계류는 2005년부터 2020년까지 거의 두배 가까이 증가했고, 증가량의 대부분은 서울, 인천 외 지역에서 발생했다. 경기도는 2005년 이후 건설기계류의 수가 두 배로 증가하였고, 이는 전국적인 추세와 일치한다. 포크리프트와 굴착기가 가장 흔히 쓰이는 건설장비이다.

그 외 농업 기계류는 2005년 이후 감소세를 보였다. 2005년부터 2020년까지 농업기계류 수는 총 23% 감소했다. 세 지역 중에서는 경기도에서만 농업용 기계가 많이 사용되는 데 전국 총량의 약 10%에 달한다(그림 3.9.B). 주로 사용되는 농업기계로는 트랙터와 자동 경작기가 파악되었다.

그림 3.9

2005-2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 건설기계(A) 및 농업기계(B) 현황(단위: 천 대)



대한민국 제조업의 에너지 소비 중에서는 유류 및 유류 제품이 가장 큰 비중을 차지하며 석탄과 전기가 그 뒤를 잇는다.

산업

산업 부문은 여러 유형의 연료를 사용하기 때문에 대규모 대기오염물질 배출원에 해당한다. 대한민국 산업 GDP에서 서울, 인천이 차지하는 비중은 그리 크지 않은 반면 1/3 정도는 경기도와 관련이 있다. '기타 제조업'을 제외하고 대한민국의 가장 큰 산업은 건설, 화학 제조, 철강 생산이다. 종합해보면 서울(주로 건설)과 인천(주로 기타 제조업)이 대한민국 산업 부가가치 GDP에서 차지하는 비중은 채 10%가 안된다. 경기의 경우 산업 부가가치 GDP의 절반 이상은 기타 제조업과 관련이 있으나 철강과 화학제조업의 비중도 상당하다(그림 3.10, 표 3.3).

대한민국 제조업의 에너지 소비 중에서는 유류 및 유류 제품이 가장 큰 비중을 차지하며 석탄과 전기가 그 뒤를 잇는다(그림 3.11). 이러한 연료 사용은 2005년 이후 증가하였는데, 전기와 석유 사용량은 50%, 석탄 사용량은 26% 증가했다. 정유, 철강생산, 화학제조 등 3 개 부문이 산업 부문 전체의 에너지 사용량 80%를 차지한다(그림 3.12). 정유 및 화학 제조업의 경우 유류 제품과 전기가 주요 에너지원이지만 철강 생산업의 경우 석탄이 주요 연료로 사용되는데 철강생산업의 에너지 사용량 75%를 차지한다(그림 3.13). 2020년 대한민국 산업 부문 석탄 사용량의 98%는 철강 생산에 사용된다. <그림 3.14>는 철강 생산의 여러 공정에서 석탄이 주된 연료로 사용되고 있음을 표기하고 있다. 위에서 언급했듯이 한국 철강 생산의 21%, 화학 생산의 25%는 경기도에서 이루어지고 있다. 경기도 내에서는 정유업이 존재하지 않으며 정유업 부가가치의 약 8%(부가가치 GDP 기준)는 인천에서 발생한다(표3.3).



그림 3.10

2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 제조업, 광업, 건설업의 주요 하위 부문별 부가가치 GDP 현황
(단위: 조 원)

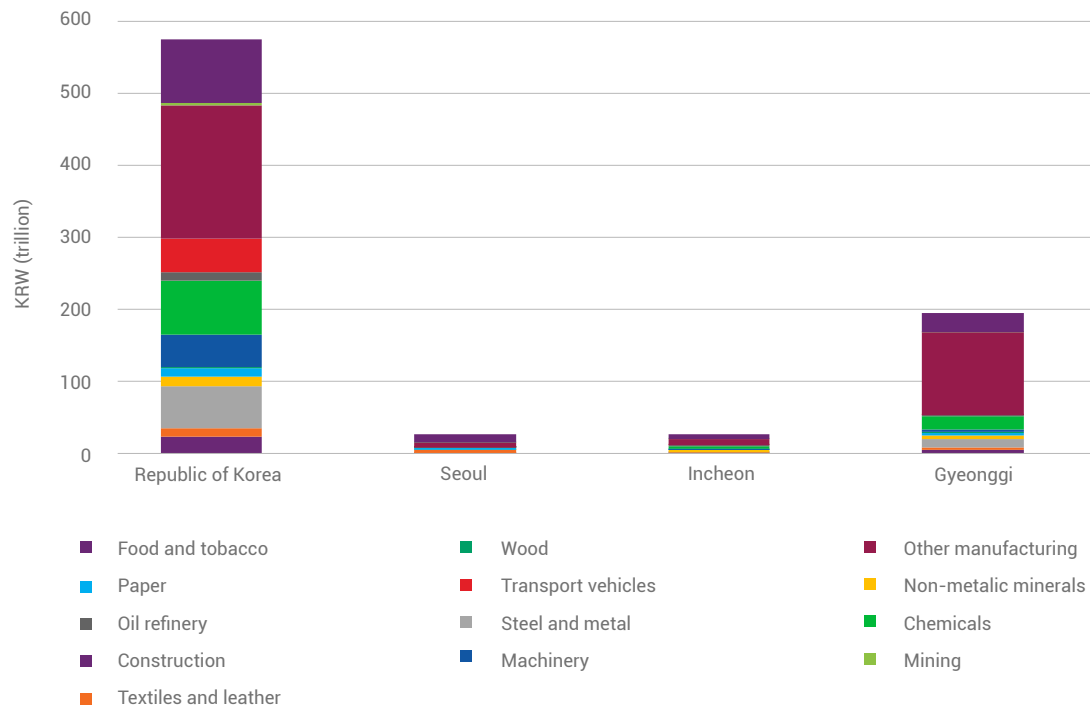


표3.3

2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 주요 산업 및 서비스 부문 부가가치 GDP 현황(단위: 조 원)

	대한민국	서울	인천	경기
식품과 담배	23	0	1	6
섬유와 가죽	13	5	0	3
철강금속	58	1	0	12
비철광물	13	0	3	4
제지	12	2	0	5
목재	2	0	1	1
기계류	44	0	1	3
화학제품	75	1	3	19
정유	12	-	1	0
수송차량	46	0	1	0
기타 제조	186	5	9	116
광업	2	0	0	0
건설	88	12	5	26
서비스	932	333	42	210
행정	113	15	5	20

그림 3.11

2020년 대한민국 제조업 연료 소비량(단위: MTOE)

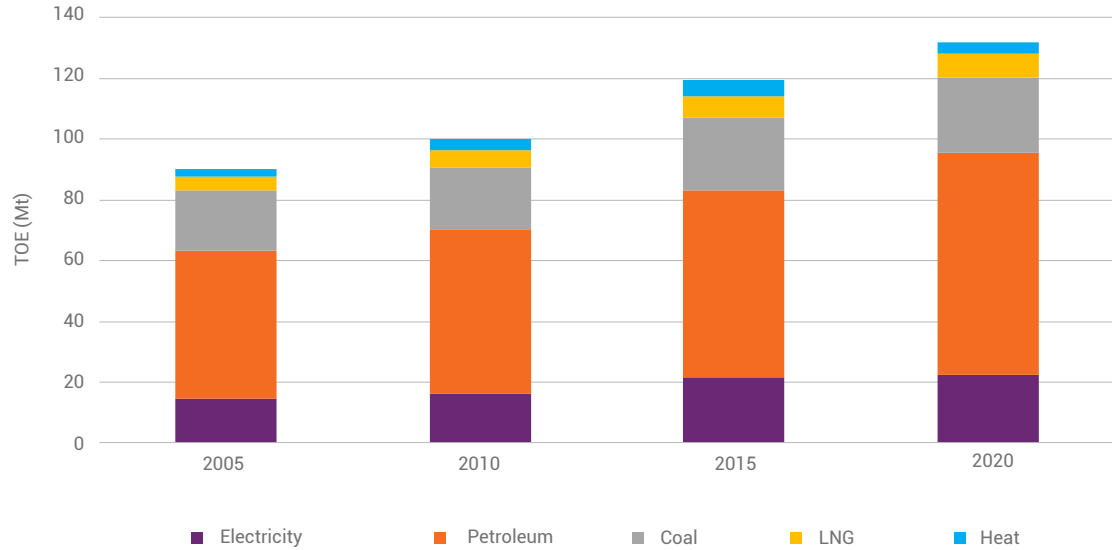


그림 3.12

2020년 대한민국 주요 제조업, 건설업, 광업의 연료 소비량(단위: MTOE)

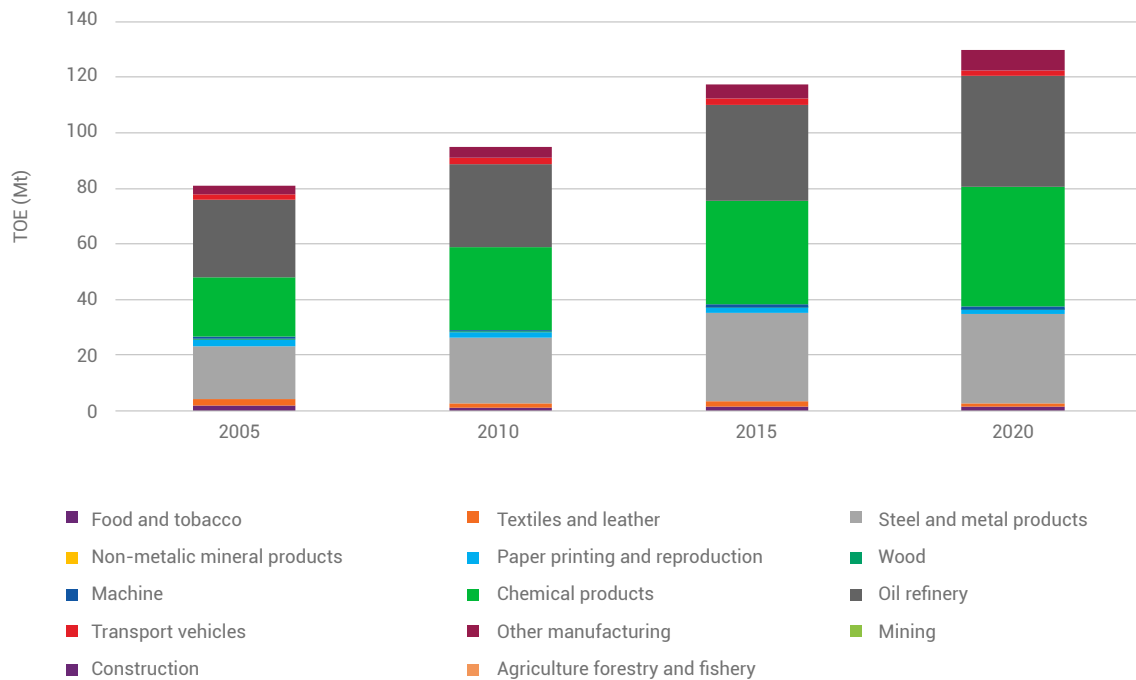


그림 3.13

2020년 대한민국 3대 연료 소비 산업의 총 연료 소비량 대비 연료별 비중(단위: %)

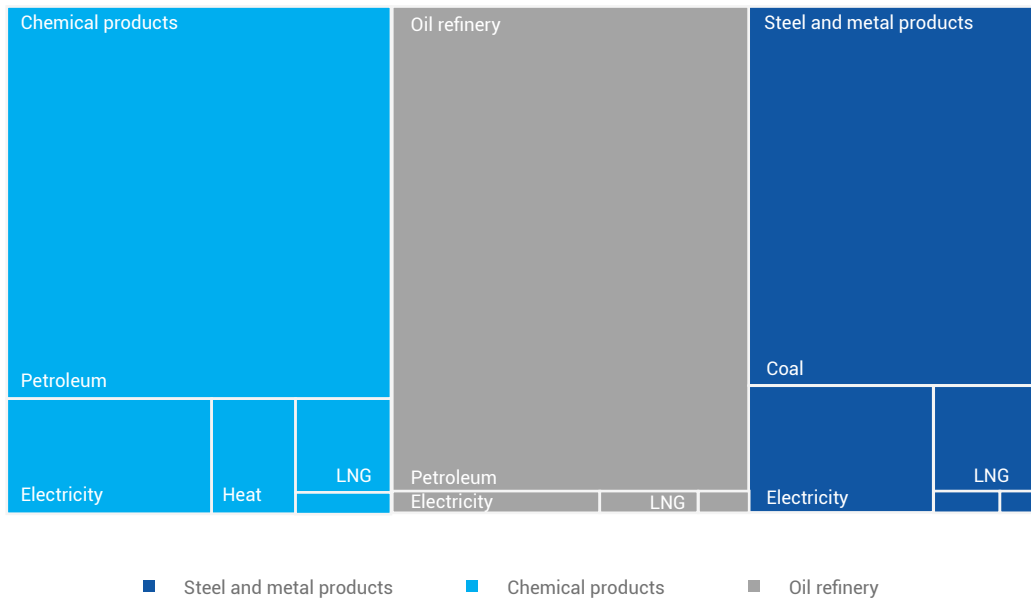
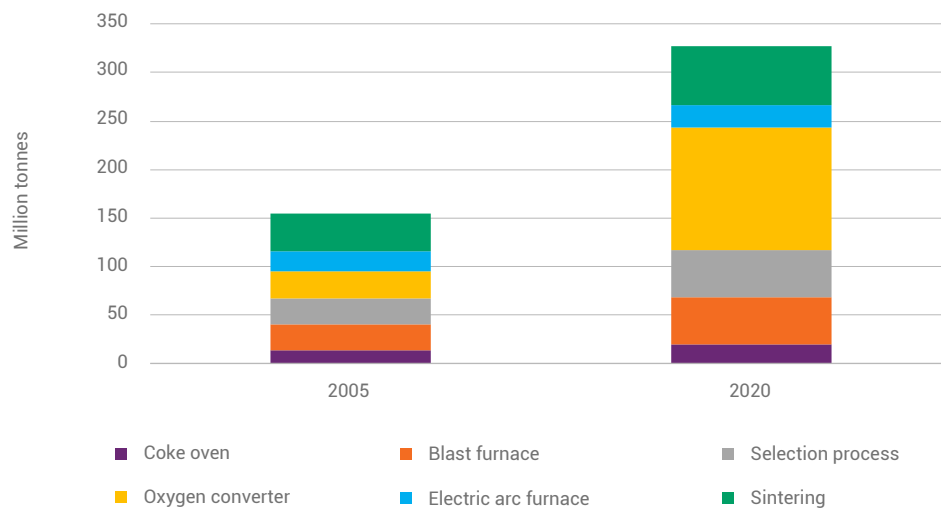


그림 3.14

2005년 및 2020년 대한민국의 공정별 철강 생산량(단위: 백만 톤)



현재 대한민국 총 전력 생산량의 약 16%가 서울(1%), 인천(11%), 경기(4%)에 위치한 발전소에서 생산된다.

전기

2020년 대한민국의 전력망 내 총 발전설비용량은 123 GW⁷였다. 이 중에서 서울에 위치한 발전소의 발전설비는 1GW 미만이며, 인천과 경기도에 위치한 발전소의 발전설비 규모는 14.8GW, 12.9GW 수준이었다. 2020년 대한민국 전력 시스템은 총 550TWh⁸ 규모의 전력을 생산했으며, 이는 2005년에 비해 151% 증가된 수준이다 (그림 3.15).

현재 대한민국 총 전력 생산량의 약 16%가 서울(1%), 인천(11%), 경기(4%)에 위치한 발전소에서 생산된다.

대한민국의 발전은 석탄 발전소, LNG 발전소, 원자력 발전소를 중심으로 이루어진다. 2005년에서 2020년까지 원자력 발전소의 발전량은 10% 증가에 불과했으나, 석탄 발전량은 40% 이상, LNG 발전량은 92% 증가했다. 2020년 재생에너지를 활용한 전력 생산량은 총 발전량의 16%를 차지했는데, 이는 재생에너지원이 총 발전량의 겨우 2%에 불과했던 2005년과 비교할 때 발전량이 20 배 이상 증가한 것이다. 2005-2020년까지 발전량이 증가했음에도 불구하고 2010년 이후 발전용 연료 사용은 감소하였으며, 2020년에는 2010년 대비 4% 낮은 수준이다. 이는 2010-2020년 동안 한국의 화력발전소 효율 증대에 따른 LNG 연료 사용량 20% 감소 및 석탄 사용량 9% 감소로 인한 것이다(그림 3.16).

7 GW: Gigawatt = 10^9 watts

8 TWh: Terawatt hours, Terawatt = 10^{12} watts



그림 3.15

2005-2020년 대한민국의 연료별 발전량(단위: TWh)

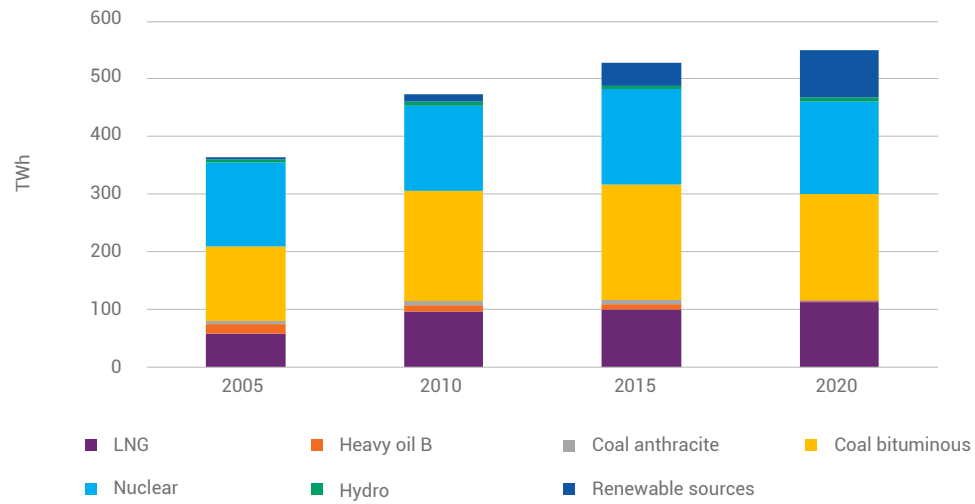
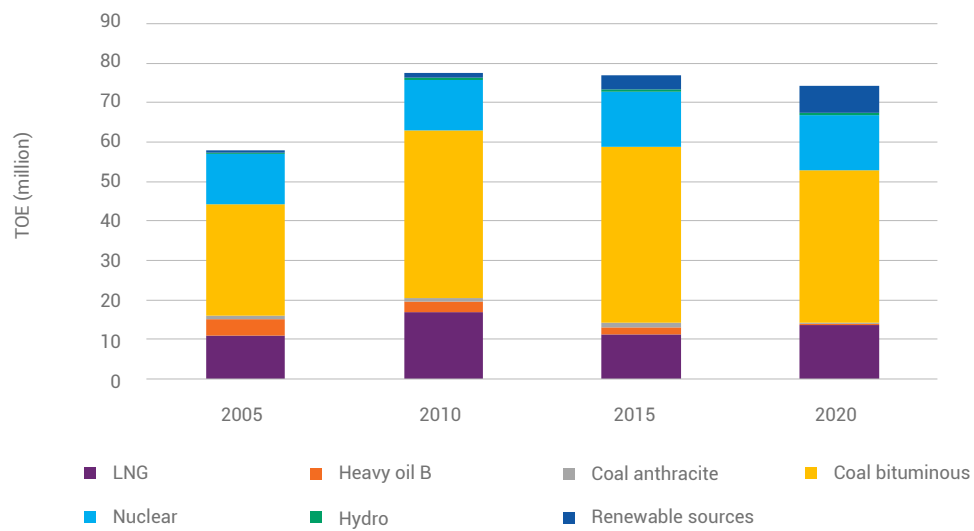


그림 3.16

2005-2020년 대한민국 발전용 연료 소비량(단위: MTOE)



2005-2020년까지 대한민국 가축 두수는 크게 증가했으나 거의 대부분은 서울, 인천 외 지역에서 증가했다.

농업

농업 분야에서 대기오염물질은 주로 가축과 작물생산에서 배출된다. 축산 부문 활동 중 분뇨관리, 보관 및 활용 과정 중 암모니아와 질소산화물이 배출되며, 소의 장 발효로 인해 메탄과 아산화질소 등 온실가스가 배출된다. 2005-2020년 사이 대한민국 가축 두수는 크게 증가했으나 거의 대부분은 서울, 인천 외 지역에서

증가했다. 가축은 주로 경기 지역에 분포하고 있으며, 서울과 인천 지역의 가축 수는 미미하다. 2020년 대한민국 소 9%, 돼지 15%, 가금류 19%, 젖소의 40%가 경기 지역에 산재한 것으로 파악되었다(표3.4). 2005-2020년 사이 경기와 전국을 기준으로 소, 가금류, 돼지 등 가축 수가 26%-85%까지 증가한 반면, 젖소 두수는 대략 15% 감소했다.



작물 생산과정에서도 대기오염물질이 배출되는데 농업 잔여물의 노천 소각, 비료 사용 과정(무기비료 및 분뇨 사용 시 암모니아와 질소산화물 배출) 등이 이에 해당한다. 서울에서는 작물 생산이 거의 전무한 상태로 2020년 기준 논 면적은 100 헥타르 정도에 불과하며, 기타 작물 생산도 거의 없다. 인천에서는 10,000 헥타르의 토지에서 쌀 65,000톤이 생산된다. 경기도는 전국 쌀 생산의 10% 이상을

차지하지만 다른 작물 생산 비중은 낮은 편이다(표3.5, 3.6, 3.7). 대한민국의 주요 생산 작물은 쌀이며 2005-2020년 동안 전국 쌀 생산량은 25% 감소했으며 경기 지역의 경우 28% 감소했다. 주로 요소, 혼합 비료, 황산암모늄 형태의 질소 비료 180-220톤이 매년 경작지에 사용된다. :

표3.4

2005년 및 2020년 대한민국과 경기 지역 가축 유형별 마릿수

지역	가축	2005	2020
전국	소	1.82	3.37
경기	소	0.17	0.31
전국	젖소	0.48	0.41
경기	젖소	0.19	0.16
전국	돼지	8.89	11.18
경기	돼지	1.81	1.69
전국	가금류	126.21	179.55
경기	가금류	27.18	34.09

참고: 서울과 인천 지역은 사실상 가축이 거의 없음
출처: 농림축산식품부

표 3.5

2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 쌀 및 기타 작물 생산량(단위: 천 톤)

지역	처리 방식	2005	2020
서울	매립	2.9	0.5
인천	매립	107.1	65.2
경기	매립	696.7	503.4
그 외 지역	매립	5 628.2	4 284.1
서울	소각	0.2	0.0
인천	소각	6.3	4.8
경기	소각	42.2	63.5
그 외 지역	소각	2 239.1	2 783.8

출처: 농림축산식품부

표 3.6
2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 경작지(단위: 천 헥타르)

지역	작물	2005	2020
서울	쌀	0.5	0.1
인천	쌀	16.2	10.0
경기	쌀	108.1	75.3
그 외 지역	쌀	855.0	622.8
서울	기타	0.1	0.0
인천	기타	2.4	1.4
경기	기타	30.7	21.5
그 외 지역	기타	362.3	274.0

출처: 농림축산식품부

표3.7
2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 비료 사용(단위: kg N/헥타르)

총 비료 사용량	2005	2020
서울	1 040.8	2 586.8
인천	178.2	165.4
경기	186.4	162.6
그 외 지역	230.0	217.2

참고: 서울은 재배 면적이 적어 비료 사용량이 불확실함
출처: 농림축산식품부

서울, 인천, 경기 지역에서 발생하는 폐기물 소각의 약 50%, 비료화/재활용의 40%가 주로 경기와 서울에서 발생한다.

폐기물

다른 지역과 마찬가지로 대한민국에서도 생활 및 산업 고형 폐기물은 매립, 소각, 또는 재활용, 비료화, 재사용을 통해 처리된다. 현재 이 모든 방식들이 활용되고 있지만 대부분의 고형 폐기물은 소각 처리된다. 전국 기준으로 매년 약 5백만톤의 생활 및 산업 폐기물이 매립, 소각되고, 비슷한 양의 폐기물이 비료화/재활용을 거친다. 폐기물 소각의 약 50%, 비료화 및 재활용의 약 40%가 수도권, 그 중에서도 경기와 인천에서 발생한다(표 3.8).

액체 폐기물인 경우 처리과정 중 발생하는 주요 오염물질은 메탄이다. 액체 폐기물이 생성되는 양은 연간 약 90억 m³ 이다. 전반적으로 서울, 인천, 경기 지역의 인구비를 반영하듯 전국에서 발생하는 폐수의 46%는 서울, 인천, 경기 지역에서 발생한다(표 3.9).

상기 자료는 인구를 기준으로 했을 때 서울, 인천, 경기 지역은 세계 최대 대도시 권역에 해당하며 그 결과 잠재적 대기오염 배출원이 다수 존재함을 보여준다. 또한 한국은 과거 수십년 동안 급속하게 발전해 온 터라, 서울, 인천, 경기 지역 외에도 상당한 대기오염원이 존재하며 수도권 지역의 대기질에 영향을 줄 수 있는 상황이다. 서울, 인천, 경기 안팎의 주요 대기오염물질 배출원으로 차량, 가정내 에너지 사용, 산업 에너지 사용과 공정 배출, 발전, 농업, 폐기물 발생을 꼽을 수 있다.

대기오염물질 저감 평가의 목적은 이러한 부문에 대한 정책이 향후 수십 년간 이행되었을 경우 과거 기간 동안 달성한 대기오염물질 배출 저감 경향을 이어가는 데 얼마나 기여할 수 있는지를 평가하는 것이다. 따라서 평가 대상 오염물질, 대상 배출원, 과거 배출량 추정에 사용된 방법, 베이스라인과 감축 시나리오 추정에 사용된 가정 등 평가 범위에 대한 내용을 이어서 다루고자 한다.



표 3.8
2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 매립, 소각, 비료화/재활용된 생활 및 산업 고형 폐기물 양(단위: 천 톤)

지역	처리 방식	2005	2020
서울	매립	-	-
인천	매립	1.68	3.65
경기	매립	0.20	0.11
그 외 지역	매립	6.78	3.71
서울	소각	398.64	861.62
인천	소각	135.11	277.64
경기	소각	934.02	1 461.99
그 외 지역	소각	1 365.94	2 659.67
서울	비료화/재활용	914.46	609.72
인천	비료화/재활용	149.81	200.85
경기	비료화/재활용	1 419.32	1 592.02
그 외 지역	비료화/재활용	4 740.59	2 990.42

표3.9
2005년 및 2020년 서울, 인천, 경기, 그 외 지역에서 발생한 생활 및 산업 폐수량 (단위: 백만m³)

지역	2005	2020
서울	1 888	1 822
인천	419	463
경기	1 769	1 988
그 외 지역	6 252	5 001



3.2 전체 평가 프레임워크

이 장에서는 대기오염과 온실가스 통합평가를 위해 서울, 인천, 경기, 전국의 오염물질 배출량을 먼저 추정했다. 3개 지역을 제외한 지역의 대기오염물질 배출량은 전국 수치에서 서울, 인천, 경기 지역의 배출량을 빼는 방식으로 추정했다. 대기오염물질의 경우 모든 부문에서 배출량은 각 지역의 지리적 경계선 내, 즉 서울, 인천, 경기 지역에서 배출한 양을 나타낸다. 온실가스 배출량 산정시 일부 부문의 경우 다른 지역의 사용과 연관된 간접 배출이 있다. 발전, 농업(식품 생산지 내 배출을 야기하는 식품 소비) 그리고 폐기물(한 지역에서 발생한 폐기물이 다른 지역에서 관리되는 경우) 등이 간접 배출에 해당한다. 이 보고서에서 전력 생산과 농업 부문의 경우 분석에 포함된 각 지역의 온실가스 직접 배출만 나타난다. 즉 지역 내 발전소에서 발행한 배출만 대상으로 한 것이다. 폐기물의 경우 각 지역의 온실가스 배출은 폐기물 처리장소와 상관없이 각 지역에서 발생한 폐기물에서 배출을 의미한다.

이 연구의 주요 목적은 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출 저감 효과를 평가하는 것이다. 초미세먼지($PM_{2.5}$)와 오존(O_3) 형성에 기여하는 모든 대기오염물질 배출을 주요 배출원으로부터 추산했다(3.1.2 절). 입자상 물질과 오존은 건강에 가장 해로운 두 가지 오염물질이기 때문에 이 평가에서 중점적으로 분석범위에 포함시켰다(Murray *et al.* 2020). 이 오염물질들은 1차 오염물질(초미세먼지만 해당) 및 기타 기체상 오염물질 배출로 인한 대기 중 초미세먼지와 오존의 2차 오염물질 형성으로 이어진다. 따라서 배출 분석을 통해 배출의 특징과 1차, 2차 오염물질의 배출 비중을 파악한다(Fuzzi *et al.* 2015).

또한 이 분석을 통해 온실가스(GHG) 배출량을 파악하여 서울, 인천, 경기 지역 기후변화에 기여하는 온실가스 저감 효과와 대기오염 개선의 동반상승 효과를 평가하고자 한다. 온실가스 배출 및 배출저감을 평가하는데 필요한

데이터와 대기오염물질 배출 계산에 필요한 데이터는 상당히 중복된다. 따라서 대기오염물질 및 기후변화 완화 통합 평가 개발은 대기질 개선과 기후변화 완화 효과를 동시에 볼 수 있는 정책을 평가할 수 있는 근거가 된다. 배출량 추정 범위에 포함된 오염물질은 다음과 같다.

온실가스(GHG)

- + **이산화탄소(CO_2)**: 대기 중 수백 년 동안 체류하는 온실가스로 기후변화에 가장 큰 영향을 미친다.
- + **메탄(CH_4)**: 대기 중 약 15년 동안 체류하는 온실가스이자 단기체류 기후변화 유발물질(SLCP)이다. 메탄은 이산화탄소 다음으로 지구 온도상승에 크게 기여하며 호흡기 건강에 위대한 대류권 오존 형성에 기여한다.
- + **아산화질소(N_2O)**: 대기 중 약 150년 동안 체류하는 온실가스로 단위 질량당 온실효과의 크기가 상당히 높다.

대기오염물질(AP)

- + **입자상 물질($PM_{2.5}$ 와 PM_{10})**: 공기역학 직경이 $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$) 미만, $10 \mu m$ (PM_{10}) 미만인 입자상 물질은 대기 중의 작은 고형 입자이다. 입자상 물질은 심혈관 및 호흡기 질환을 일으키는 건강에 가장 위대한 오염물질이다. 이 연구에서 사용된 미세먼지와 초미세먼지 배출량은 대기 중 입자상 물질의 직접 배출량을 의미한다. 하지만 질소산화물, 이산화황, 암모니아, 휘발성유기화합물과 같은 기체상 오염물질 역시 고체입자로 전환하는 대기화학반응을 통해 미세먼지와 초미세먼지 농도를 높이고 사람들에게 노출된다.

- + **질소산화물(NO_x):** 입자상 물질(PM)과 오존 형성의 전구물질이 되는 대기오염물질로, 질소산화물은 일산화질소와 이산화질소로 구성된다.
- + **이산화황(SO_2):** 입자상 물질(PM) 형성의 전구물질이 되는 대기오염물질이다.
- + **암모니아(NH_3):** 입자상 물질(PM) 형성의 전구물질이 되는 대기오염물질이다.
- + **비메탄계 휘발성 유기화합물(NMVOCs):** 다양한 배출원에서 배출되는 여러 유기분자 물질이다. NMVOCs는 대류권 오존과 입자상 물질(PM) 형성의 전구물질이다.

- + **일산화탄소(CO):** 기체상 대기오염물질로 대류권 오존 생성에 기여하는 물질이다.

서울, 인천, 경기 지역 및 그 외 지역의 관련 배출원 전체를 대상으로 상기 오염물질에 대한 배출량을 산정했다. 해당 배출원은 에너지, 산업공정, 농업과 폐기물 및 그 하위 부문으로 세부 내용은 아래 <표3.10>에 명시했다. 임업 부문의 일산화탄소 순배출은 함께 배출되는 대기오염물질이 없기 때문에 분석에 포함되지 않았다. 생물성연소/누출/비산먼지 배출 역시 배출량 자료에 상당한 불확실성이 존재하고 배출량 추정에 필요한 데이터의 문제로 이 분석에 포함되지 않았다.

표 3.10

배출 목록에 포함된 배출 부문과 명명코드(NFR)

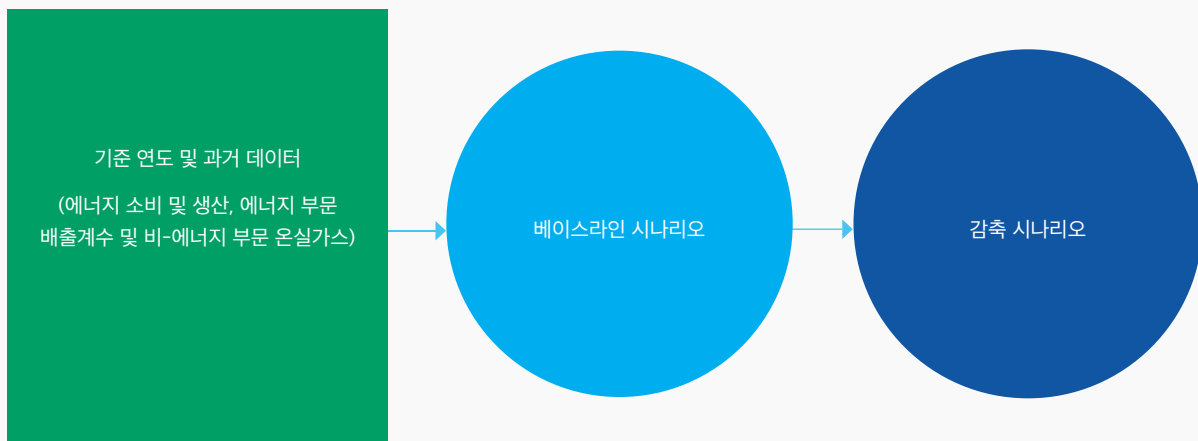
배출원	하위부문
1 - 에너지	1A1 에너지 산업
	1A2c 제조업과 건설 부문 고정연소: 화학물질
	1A3 수송
	1A4c 기타 부문(상업/기관, 가정, 농림수산업)
2- 산업 공정	2A 광물 생산
	2B 화학 생산
	2C 금속 생산
	2D 용제 사용
	2H 기타 산업
3 - 농업	3A 가축장내발효
	3B 분뇨관리
	3D 농업토양
4 - 폐기물	5A 폐기물 생물학적 처리 - 육상 생활 폐기물 폐기
	5B1 폐기물 생물학적 처리 - 비료화
	5C 폐기물 소각
	5D 폐수 처리

과거와 미래, 두 시기로 나누어 각 지역의 배출원 별 배출량을 추정했다. 하나는 2005-2020년 기간 동안 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 과거 배출 경향을 평가하는 것이고, 다른 하나는 2021-2050년 기간 동안 각기 다른 가정에 따른 미래 배출량을 추정하는 것이다. 미래 시나리오는 크게 두 가지로 분류된다. 첫째, 추가적인 저감 대책을 가정하지 않고 추정한 **베이스라인 시나리오**이다. 베이스라인 시나리오는 어떤 배출 저감 대책을 평가할 지에 대한 기준을 제공하는 것이 목적이다. 둘째, 배출 저감 대책 실행 결과를 예측하는 **감축 시나리오**이다. 평가 대상이 될 대책들은 각각 실행되었을 때 결과를 평가할 수 있도록 개별 시나리오로 작성되었다. 그리고 종합 감축 시나리오는 여러 대책을 조합하여 실행한 결과를 추정한다. 여러 종합 감축 시나리오는 해당 대책의 상호작용을 보여준다. 대책과 배출경감 상호작용의 효과는 이들 대책 효과의 단순합과는 달리 나타날 수 있다. 예를 들어 전기 수요 증가로 이어지는 전기자동차와 재생에너지 발전이 결합되면 대책을 각각 실행했을 때와 다른 결과가 나타날 것이다.

전체적으로 두 가지 종합 감축 시나리오를 마련했다. 첫째, **탄소중립 시나리오(Carbon Neutrality, CN)**는 서울, 인천, 경기 및 대한민국의 탄소중립 달성을 위해 설계된 기후변화 중심 대책 효과를 평가할 수 있도록 구성되었다. 두 번째, **대기오염 감축 시나리오(Air Pollution, AP)**는 기존 계획과 전략에서 제시된 대기오염물질 배출 저감을 위한 추가적인 대책을 포함한다. 시나리오에 대한 자세한 설명은 3.2.3절 <표 3.15>에 기술하였다. 또한, 탄소중립 및 추가적인 대기오염 대책 등을 모두 포함한 **총괄 감축 시나리오** 역시 모델링하여 배출 저감 대책 실행으로 가능한 대기오염물질 배출의 전반적인 저감효과를 볼 수 있도록 했다.

그림 3.17

대기오염 배출 저감 평가 실행 순서



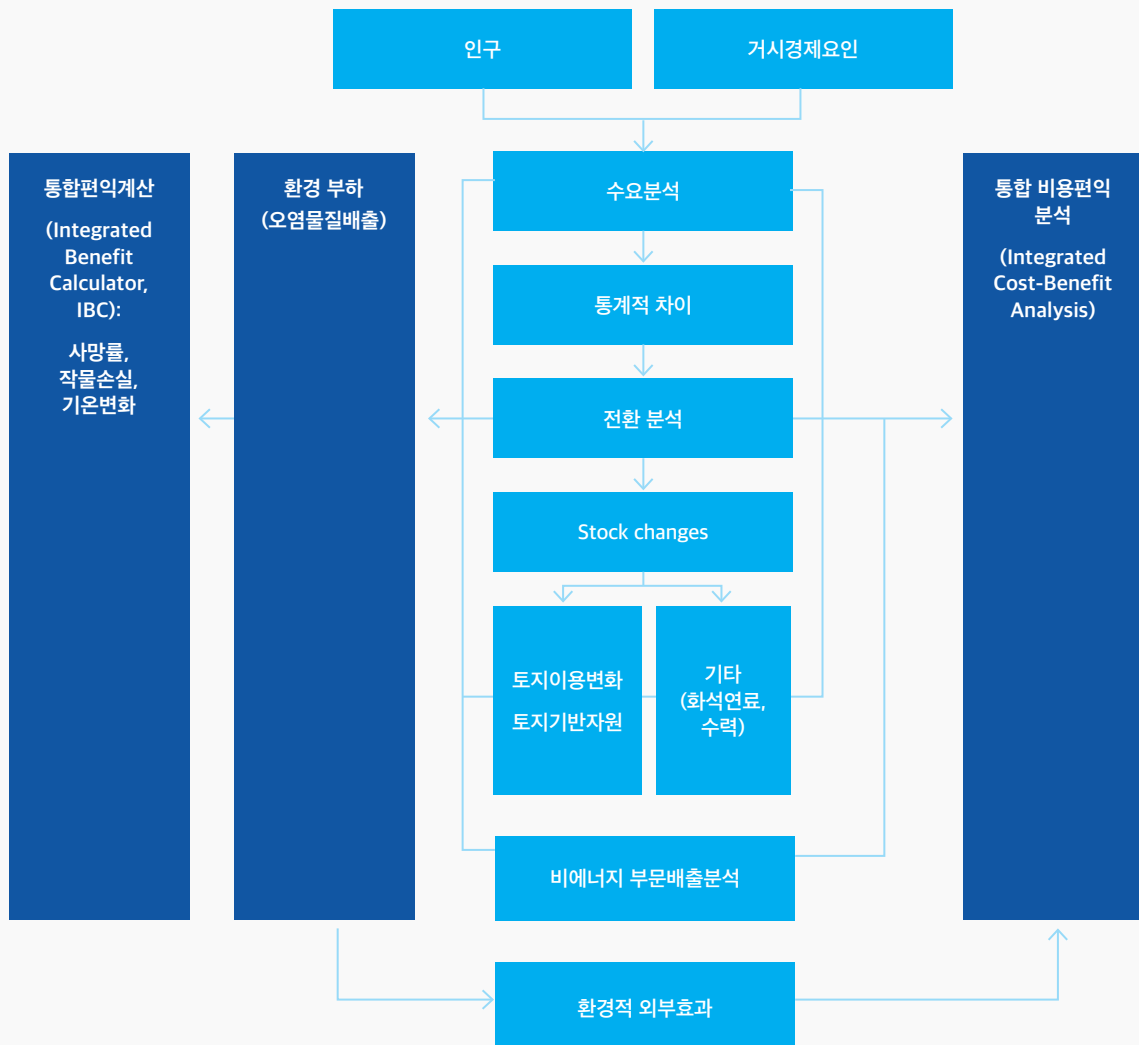
대기오염과 기후변화 통합 분석은 Low Emissions Analysis Platform (LEAP, leap.sei.org)⁹을 활용했다 (Heaps 2022). LEAP은 주요 배출원별 배출량을 추정하는 도구이다. LEAP은 에너지 수요와 공급 분석, 최종 연료 소비와 관련된 배출, 공급 부문의 전력생산과 전환을 통합한 에너지 시스템 모델을 구성하는데 사용된다. 비에너지 부문은 대기오염물질 배출목록 개발에 관한 국가 및 국제 지침에 부합하는 방식을 사용했다. LEAP 모델링

프레임워크는 <그림 3.18>에 표시되어 있다. LEAP은 시나리오 분석 도구로 특별히 설계되었다. 미래 추정치 평가용 LEAP 모델링 프레임워크는 미래 에너지 수요와 공급 부문에 가정한 변화가 가져올 효과(예. 미래 경제성장 또는 특정 경감대책 실행)를 모델링 할 수 있다는 장점이 있어, 미래 변화에서 예상되는 배출저감(증가) 효과를 전반적으로 알 수 있다.

9 스톡홀름 환경연구소에서 개발한 에너지 정책분석 및 기후변화 감축평가를 위한 다목적 소프트웨어 시스템(LEAP): <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/leap-long-range-energyalternatives-planning-system/>

그림 3.18

‘Low Emissions Analysis Platform (LEAP)’ 모델링 프레임워크



특정 활동도 데이터, 배출계수 및 각 배출원의 배출량 산정에 사용한 방법은 온실가스와 대기오염물질 배출에 관한 국제 가이드라인을 따랐다.

3.2.1 과거 배출량 계산 방식

저감 대책의 대기오염 개선 효과와 기후변화대응 효과를 이해하는 데 먼저 필요한 것은 대기오염물질 배출 정도와 주요 배출원이 오염물질을 배출하는 비중을 파악하는 것이다. 이를 바탕으로 어떤 배출원을 대상으로 설정하여 공략하면 가장 효과가 좋을 지 미리 파악할 수 있다.

과거 기간 동안 주요 배출원이 배출한 온실가스(GHG), 단기체류 기후변화 유발물질(SLCPs), 대기오염물질(AP)의 배출량을 추정하기 위해(표3.11) 주요 배출원의 오염물질 배출량 추정에 사용한 방식은 활동도 (또는 활동 데이터)와 배출계수를 곱하는 방식이다(산식1). 활동도 데이터는 어떤 부문과 공정이 어느 정도의 규모인지 보여주는 수치이다(예. 특정 부문에서 사용한 연료 테라줄스(Terajoules)¹⁰ 수치, 특정 광물, 화학물질 또는 제품생산 톤 수) 배출 계수는 활동도 단위당 오염물질의 배출량이다(사용한 연료 테라줄 당 블랙카본의 배출량).

산식 1

배출량=활동도 x 배출계수

특정 활동도 데이터, 배출계수 및 각 배출원의 배출량 산정에 사용한 방법은 온실가스와 대기오염물질 배출에 관한 국제 가이드라인을 따랐다. 특히 배출량 산정 방식은 ‘기후변화에 관한 정부간위원회(IPCC) 2006’과 ‘유럽 환경청/유럽 모니터링 및 평가 프로그램(EMEP/EEA)’ ‘2019 대기오염물질 배출목록 가이드라인(IPCC 2006; EMEP/EEA 2019)’을 따랐다. IPCC 2006 가이드라인은 온실가스 배출량 산정 방식을 제시한다. 또한 다른

오염물질의 경우 EMEP/EEA 대기오염물질 배출목록 가이드북을 사용했다. 각 오염물질의 배출계수 출처는 주로 IPCC 2006, EEA/EMEP 대기오염물질 배출목록 가이드북이다. 또한 일부 배출계수는 과학 관련 논문에서 가져왔다.

LEAP 모델 개발 과정에서 당시의 최신 활동변수와 배출계수들이 과거 배출량 추정치 특성화에 사용되었음을 밝혀 둔다. LEAP에 사용된 데이터를 업데이트 했다는 것은 3장에서 추정하여 제시한 배출 결과물이 2.5절에 수록한 CAPSS 데이터와 다르다는 것을 의미한다. 두 자료 간의 차이는 크지 않고 배출 규모에도 크게 영향을 주지 않으며, 서울, 인천, 경기 지역, 또는 그 외 지역 주요 배출원의 기여 비중도 크게 바뀌지 않는다.

또한 보고서에 사용된 모델링 방식은 대기오염물질과 온실가스 배출량 산정 지침에 부합하면서도 대기오염물질 배출 영향에 관한 정책이나 대책의 효과를 확인할 수 있는 방법이기도 하다. 이 방식은 각 부문의 배출 정도를 특정하여 정책 또는 대책이 필요한 부문을 파악할 수 있도록 충분히 세분화되어 있다(예. 차량은 유형별로 구분된다). 또한 부문을 통합시켜 대책 이행에 따른 부문의 교호작용도 반영할 수 있다(예. 가정부문에서의 에너지효율 개선 대책이 발전부문에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다). <표 3.11>은 각 부문별 배출을 모델에 반영하는데 사용한 주요 데이터를 요약한 표다(데이터는 3.1.1 절의 부문 개요에 수록되어 있다). <표 3.12>은 활동 데이터 분류와 데이터 출처를 나타낸다. 아래 절은 부문별 배출량 추정 방식을 설명한다.

10 에너지소비량 열량단위(TJ): Terajoule = 10¹² joules

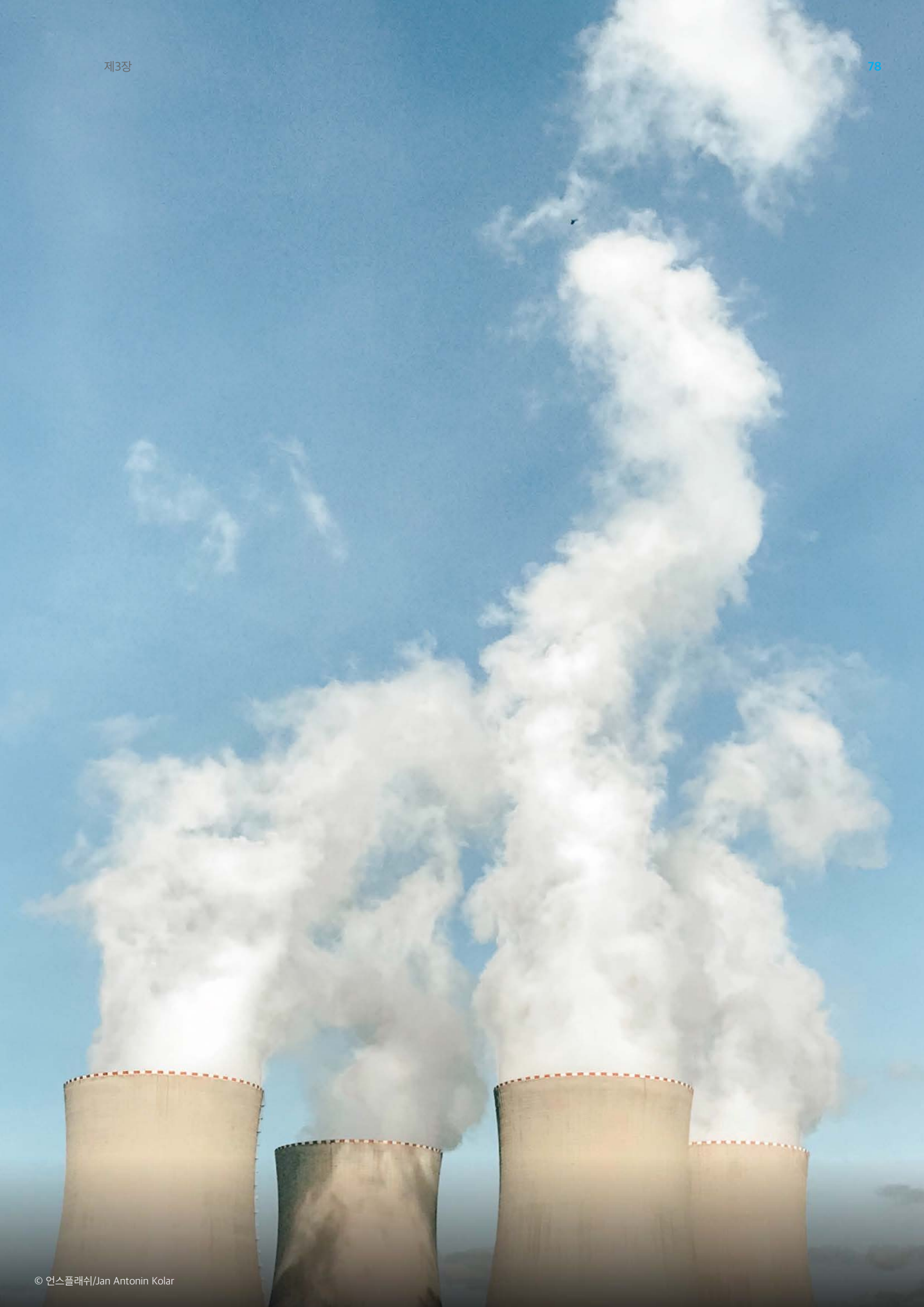
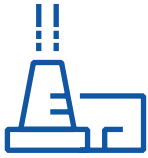


표 3.11

서울, 인천, 경기, 대한민국 배출 부문별 배출량 추정에 사용된 자료 출처

배출원	활동 데이터	데이터 출처
1A1 에너지 산업	- 과거 전력 생산 - 연료 사용 - 발전소 용량, 효율성과 가용성, 열생성과 연료 사용	한국전력(KEPCO) 한국 에너지공단(KEA)
1A2 제조업과 건설업	산업 부문 연료사용, 하위 부문별 분류(식음료, 섬유 및 가죽, 금속/철, 비철광물, 제지 및 인쇄, 목재, 기계류, 화학, 정유, 수송차량, 기타 제조, 광업, 건설)과 활동(보일러, 오븐, 동력, 난방 및 드라이어, 기타)	국가온실가스 배출량 종합정보 시스템(NETIS) 한국전력거래소(KPX)
1A3 수송	도로 - 차종(승용차, 밴, RV, 트럭, 택시, 버스, 특수차량) - 차량 크기 별 비중(대/중/소) - 연료 별 차량 비중(가솔린, 경유, LPG, 전기, 수소) - 배출기준별 총족 비율(1~4등급) - 차종 별 주행거리 - 차종, 연료, 등급별 연비 철도 - 기차 승객 이동거리 - 지하철 승객 이동거리 - 기차 화물 톤 이동거리 - 승객당 연료(경유와 전기) 사용량 km/톤 -기차와 지하철 이동거리 해운 - 입항 선박 선박 량 별 선박 대수(<100톤, 100-500 톤, 500-1000 톤, >1000 톤) - 선박 별 연료 사용량 항공 - 이착륙 - 연료 사용량	국가미세먼지정보센터(NAIR) 교통온실가스관리시스템(KOTEMS) 한국에너지공단(KEA): 차량연비 및 이산화탄소 배출 데이터 및 분석 한국석유공사(PEDSIS) 철도산업정보센터(철도통계연보) 한국에너지공단(KEA) 국가물류통합정보센터(NLIC) 한국석유공사(PEDSIS) 한국공항공단(KAC) 한국석유공사(PEDSIS)

배출원	활동 데이터	데이터 출처
1A4 기타	서비스 • GRDP 기여분 • 연료 사용량	국가통계포털(KOSIS) 한국석유공사(PETRONET) 에너지경제연구원(KEEI): 지역에너지통계연보
	행정 • GRDP 기여분 • 연료 사용량	국가통계포털(KOSIS) 한국석유공사(PETRONET) 에너지경제연구원(KEEI): 지역에너지통계연보
	가구 • 가구수 • 연료 사용량	국가통계포털(KOSIS) 한국석유공사(PETRONET) 에너지경제연구원(KEEI): 지역에너지통계연보
	농림수산업 • GRDP 기여분 • 연료 사용량	한국전력거래소(KPX) 에너지경제연구원(KEEI): 지역에너지통계연보
2A 광업	• 광물 생산	국가미세먼지정보센터(NAIR)
2B 화학	• 화학제품 생산	국가미세먼지정보센터(NAIR)
2C 금속	• 공정별 철강 생산(코크스 가마, 제철 용광로, 선정공정, 산소변환기, 전기 용광로, 소결)	국가미세먼지정보센터(NAIR)
2D 연료와 유기용제 원료 비에너지 제품	• 용제 사용량	국가미세먼지정보센터(NAIR)
2H 기타	• 목재/펄프 생산, • 식음료 생산	국가미세먼지정보센터(NAIR)
3A 가축 장내발효	• 가축 두수	국가통계포털(KOSIS)
3B 분뇨 관리	• 가축 두수 • 분뇨 관리 시스템 처리 비율	농림축산식품부(MAFRA): 농림축산식품통계연보
3D 농업토양	• 작물 생산 • 경작지 • 무기 비료사용율	농림축산식품부(MAFRA): 농림축산식품통계연보
5A 생물학적 쓰레기 처리-육상 고정폐기물 처리	• 매립량	자원순환정보시스템
5B1 생물학적 쓰레기 처리 -퇴비화	• 퇴비로 처리한 양	자원순환정보시스템
5C 폐기물 소각	• 소각량	자원순환정보시스템
5D 폐수 처리	• 폐수량	자원순환정보시스템



산업 부문은 제조업, 광업, 건설업으로 분류되고, 제조업은 세부 업종으로 분류된다.

산업

에너지 부문에서 산식 1의 활동 변수는 총에너지 사용량으로 연료별 활동별로 분류한 뒤 연료, 부문, 기술, 활동별 배출계수를 곱한다.

산업 부문의 경우, 연료 사용은 제조, 광업, 건설업으로 분류되고, 제조업은 하위 분류된다(그림 3.19). 각 하위 부문별 연료 사용은 활동 단위(예, 보일러, 오븐, 동력, 히터, 드라이어, 기타)별로 구분하며, 마지막으로 연료별로 구분된다. 이런 방식으로 각 산업의 배출량을 추정할 수 있고 총 배출량에 산업 내 활동의 배출비중을 파악할 수 있다.

그림 3.19

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 산업 부문 배출 모델 구축 구조





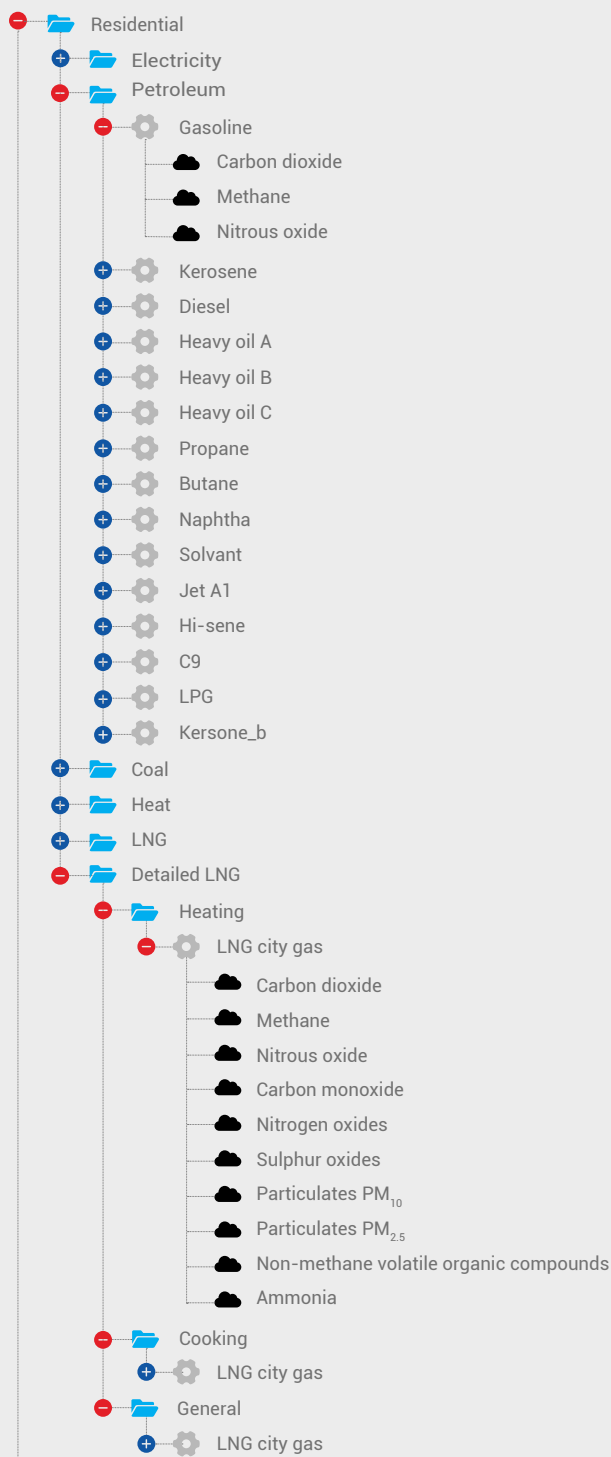
가구 부문에서 총 연료사용량은 지역별 총 가구수에 가구당 연료별 에너지 사용량을 곱하여 구한다.

가구

가구 부문에서 총 연료사용량은 전국, 서울, 인천, 경기의 총 가구수에 <그림 3.20>의 가구당 연료별 에너지 사용량을 곱하여 구한다. LNG는 (전기 외) 가장 보편적으로 사용하는 연료이며 활동 별로 분류한 연료이다(난방, 조명 및 기타). 가구의 총 연료사용량 추정은 각 지역에서 연료와 부문에 해당하는 배출 계수를 곱하여 추정했다.

그림 3.20

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 가구 부문 배출 모델 구축 구조





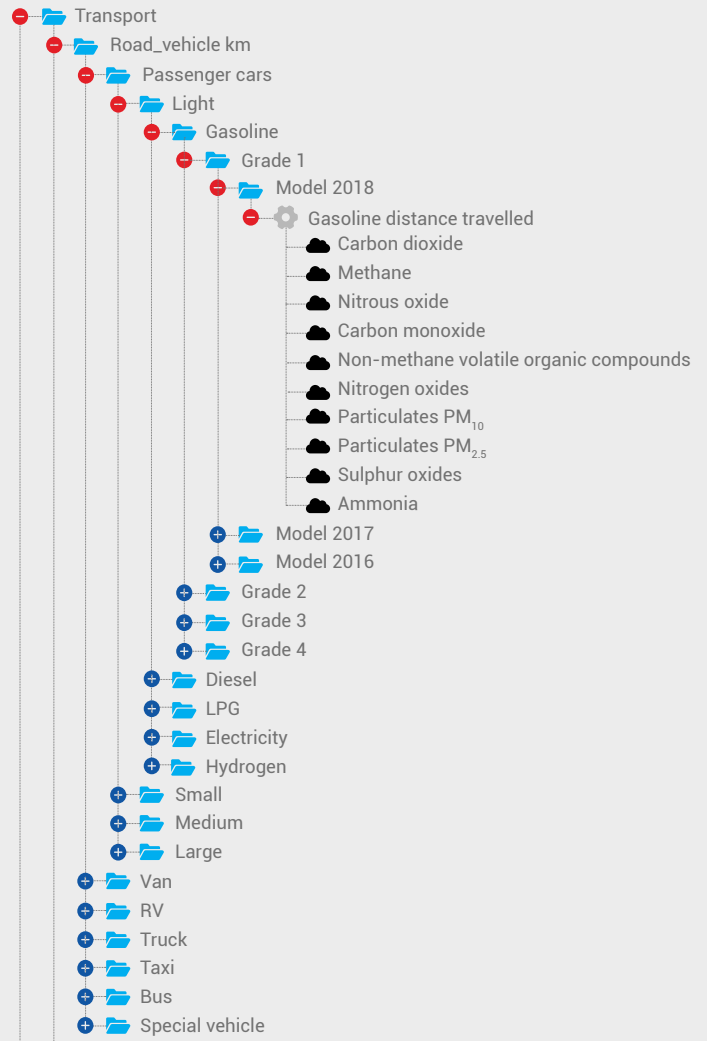
**도로 수송 부문의 총 연료
사용량은 차종, 크기, 연료 종류,
배출기준, 모델 출시 연도에
따라 개별적으로 추정했다.**

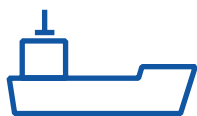
도로 수송

수송 부문에서 도로 수송은 다른 수송 방식보다 훨씬 자세하게 모델로 구축되었다. 도로 수송의 총 연료 사용은 차종, 크기(대중소), 연료 종류, 배출기준, 모델 출시 연도 별로 추정했다(그림 3.21). 각 카테고리별로 연료 소비량을 추정했는데, 해당 카테고리의 차량 대수와 연간평균운행거리(km/차/연)를 곱하고, 차량 대수와 연비(km당 소비하는 연료량)를 곱하는 방식이다. 그리고 나서 차량 배출 계수를 곱했다.

그림 3.21

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 도로 수송 배출 모델 구축 구조





기타 수송 부문에서의 에너지소비량은 수송 수단별 활동도와 단위 활동당 연료 소비 원단위를 곱하는 방식으로 계산했다.

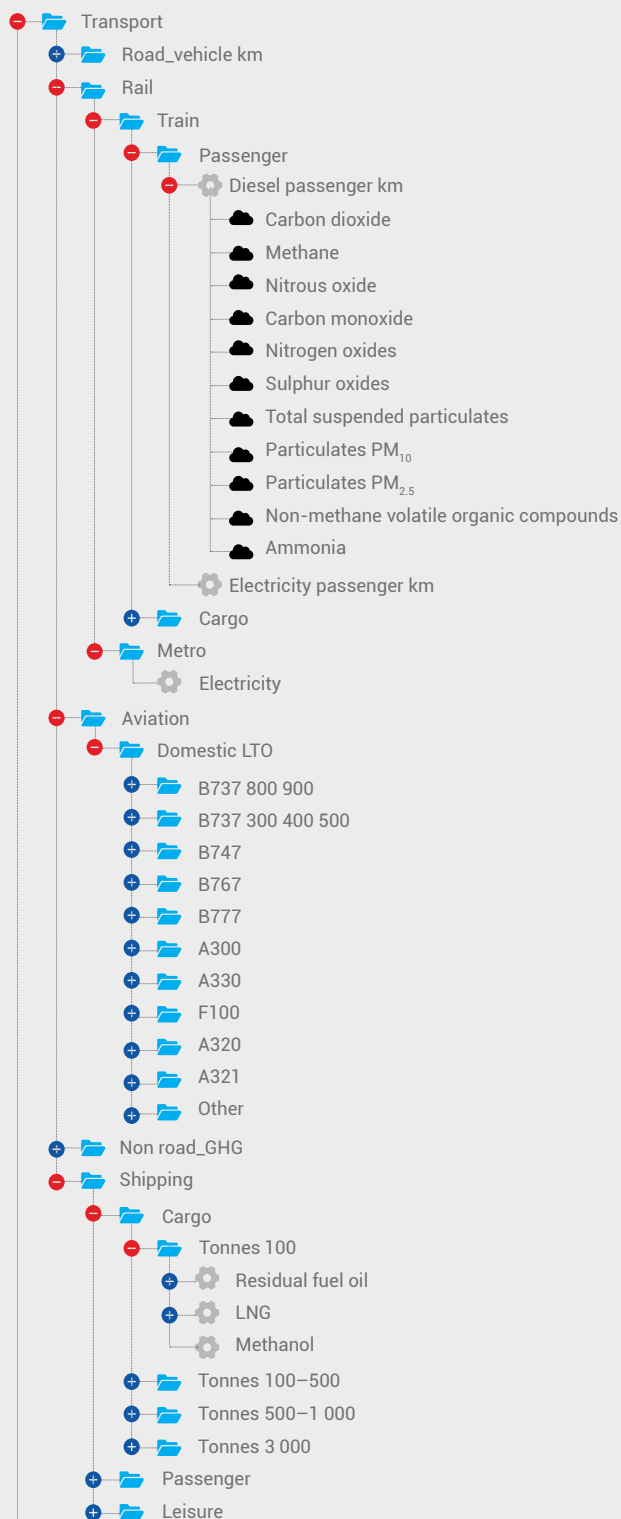
기타 수송

기타 수송(철도, 해운) 부문에서는 수송 활동과 활동단위당 연료 소비량을 곱하는 방식으로 계산했다. 철도의 경우, 여객 수송은 기차와 지하철로 구분하였으며, 승객-km 자료를 활용해 경유와 전력소비량을 산정했다. 화물 열차 수송에도 같은 방식이 사용되었으나 톤-km 단위가 사용되었다.

해운 부문의 경우 각 지역에 입항한 선박 대수와 선박 당 평균 연료 소비량을 곱했다.

그림 3.22

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 비도로 수송 배출 모델 구축 구조



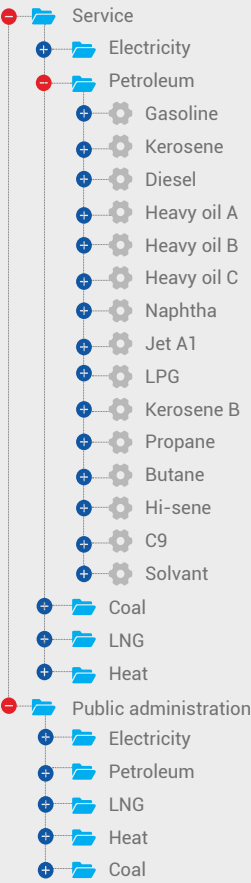


서비스 및 행정 부문은
연료사용량에 연료별
배출계수를 곱해 배출량을
산정하였다.

서비스

서비스 부문과 행정 부문의 연료사용량은
부가가치에 부가가치당 연료소비량을 곱하는
방식으로 산정하였다. 이후 연료별 배출계수를
곱해 오염물질 배출량을 산정하였다.

그림 3.2
대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 서비스 부문 배출 모델 구축
구조





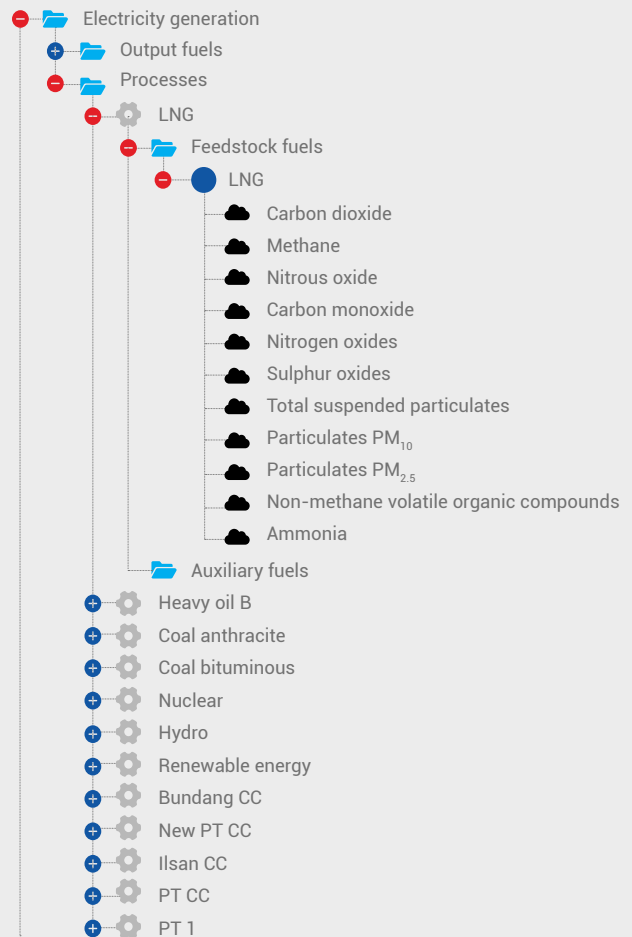
전국의 발전소는
연료유형에 따라
구분하였으며, 수도권
발전소는 개별 발전소별로
모형에 입력하였다.

발전

앞서 기술한 부문은 에너지 수요 부문의 배출량 추정(최종 에너지 사용 부문)에 관한 것이었다. 발전과 같이 에너지를 공급하는 부문 역시 전력생산에 사용된 총 연료량에 발전소 별 배출계수를 곱해주었다. 발전에 사용된 연료는 먼저 전력 수요(앞서 기술한 각 부문별 입력치)를 기준으로 추정하였다. 그 다음 전기 수요에 송전 손실분을 감안하여 조정하였다. 그리고 나서 각 지역 발전소를 주요 특성과 함께 포함시켰다. 대한민국의 발전소는 연료 유형별로 구분하고, 서울, 인천, 경기 지역의 개별 발전소를 모델링했다(그림 3.24). 각 발전소의 발전용량, 한 해 가용량, 사용자배분 급전 우선순위(merit-order dispatch)에 따라 발전량이 정해진다(단, 최적화 모델링은 실시하지 않았다). 발전소별로 생산된 전기에 각 발전소의 효율성 계수를 곱하여 발전에 필요한 연료 소비량을 추정하였다.

그림 3.24

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 발전 부문 배출 모델 구축 구조





농업과 같은 비에너지 부문의
배출량은 산식 1을 사용해
활동도와 배출계수를 곱하는
방식으로 산정했다.

농업

농업과 같은 비에너지 부문의 배출은 산식 1을 통해 추정한다. 즉, 활동 변수와 배출계수를 곱하는 방식이다. 축산 분야는 장내 발효와 분뇨 관리로 구분된다. 두 가지 경우 모두, 활동 변수는 가축 두수였다(그림 3.25). 각 배출 카테고리에서 가축별 배출계수를 가축 두수에 곱한다.

작물 생산에서 활동 변수는 경작지에 적용한 비료 톤수이다. 여기에 비료와 오염물질별 배출계수를 곱한다.

그림 3.25

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 축산 부문 배출 모델 구축 구조

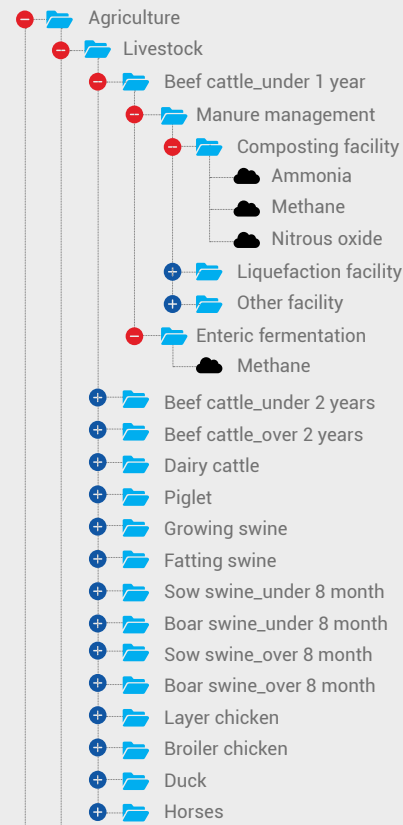
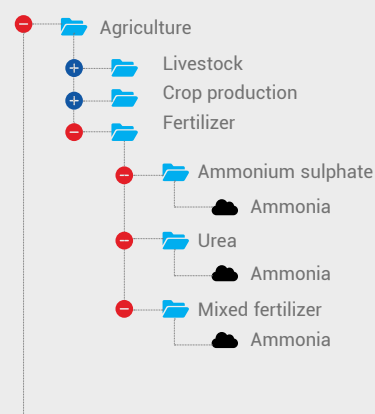


그림 3.26 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 작물 생산 배출 모델
구축 구조





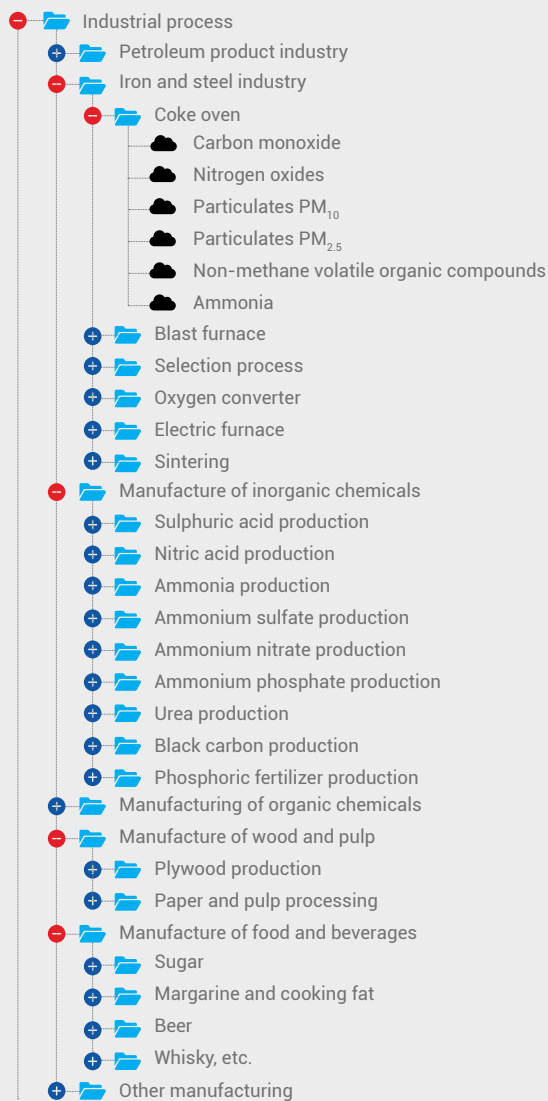
**산업공정 부문에서
활동도는 산업별 연간 제품
생산량이다.**

산업 공정

산업 공정 하위 부문에서 전 산업의 활동 변수는 여러 산업용 제품의 연간 생산량이다. 철강 분야의 경우 생산은 주요 공정별로 구분되고, 다른 산업의 경우 제품별 생산량에 배출계수를 곱해 배출량을 산정한다.

그림 3.27

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 산업 공정 배출 모델 구축 구조





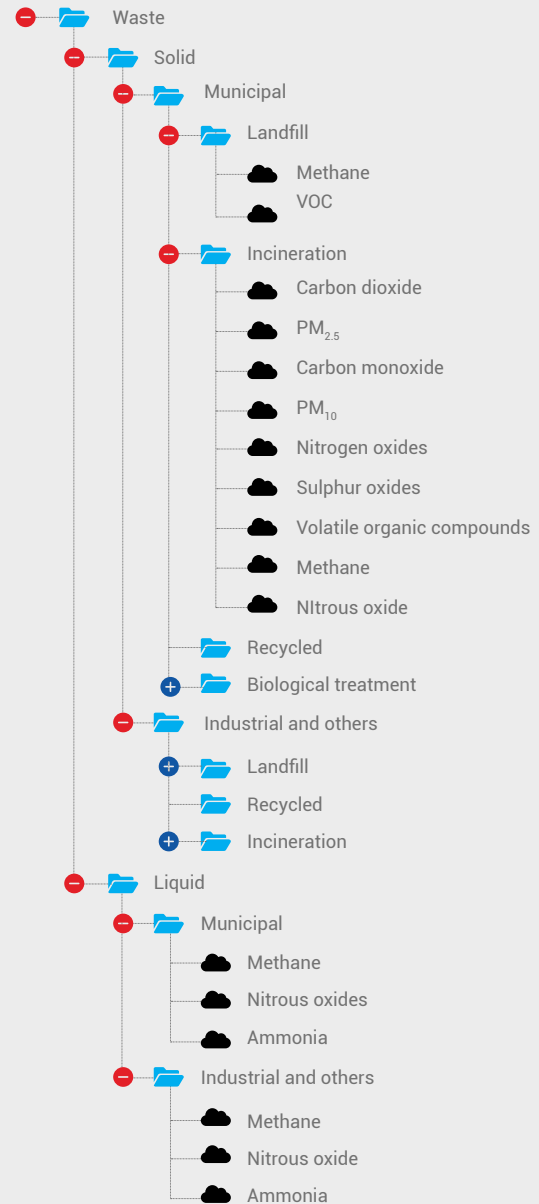
폐기물 부문의 주요 활동도는 처분 방식별 폐기물 발생과 처리량이다.

폐기물

폐기물 부문은 고형폐기물과 액상폐기물로 구분하고, 생활폐기물과 산업폐기물 배출과 처분과정에서의 오염물질 배출량을 산정하였다. 고형 폐기물과 액체형 폐기물이 생성되면 여러가지 방식으로 처리된다. 처리방식은 주요활동 변수이며, 오염물질과 공정별 배출계수를 곱하여 배출량을 추정한다.

그림 3.28

대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 폐기물 부문 배출 모델 구축 구조



3.2.2 베이스라인 시나리오 미래 배출량 추정

2장에서 언급한 바와 같이 지난 수십 년간 서울, 인천, 경기 지역과 대한민국은 사회경제적인 발전 및 배출저감 정책의 결과로 대기오염물질 배출량이 변화되어 왔다. 3.1절은 가가와 산업 부문의 에너지 사용, 차량 형태, 작물생산과 축산업, 폐기물 생성 등 여러 배출 요인들의 변화가 전반적인 대기오염물질 배출 양상을 어떻게 바꾸었는지, 시간에 따른 다양한 배출원 비중 변화에 어떻게 기여했는지를 보여주었다.

BAU 시나리오, 기준 시나리오로도 불리는 베이스라인 시나리오는 대기오염 또는 기후변화 관련 신규 대책을 추가하지 않았을 때 미래에 배출 상황이 어떻게 바뀌는 지 추정하도록 설계되었다. 베이스라인 시나리오는 새로운 정책을 시행할 때 예상되는 배출량 변화를 비교할 수 있는 기준점 역할을 한다. 베이스라인 시나리오는 새로운 대책이 실행되지 않은 경우의 배출 수준을 추정함으로써 여러 대책들의 효과성 평가가 가능하게끔 기초를 제공한다.

베이스라인 시나리오 작성을 위해 서울, 인천, 경기 지역과 전국의 과거 배출량 추정에 사용한 활동도 변수가 미래 추정에도 사용되었고, 미래 기간을 대상으로 예상되는

활동도 변수를 적용하고 배출량 계산을 반복했다. 이 작업에서 미래 시나리오의 대상 기간은 2021-2050 년이다. 각 배출원의 활동 변화 예측(3.2.1 절)은 활동 변수와 전국, 서울, 인천, 경기의 인구 구성 및 사회경제적 발전을 보여주면서 해당 부문 내에서 활동의 동인 역할을 하는 구체적인 대용 변수를 연결하는 방식으로 수행하였다.

베이스라인 시나리오의 전반적인 인구 및 거시경제 관련 가정은 <표 3.12>에 수록하였다. 국가통계포털에 따르면 전국에 걸쳐 인구는 2020-2030년, 그리고 2050년까지 감소할 것으로 예상된다. 2020년 수준 대비 2050년에는 9% 감소할 전망이다. 서울과 인천은 이와 같은 전국 동향에서 벗어나지 않을 것으로 예상되고 경기 인구는 증가할 것으로 보인다. 이와 반대로 향후 수십 년간 대한민국의 경제는 상당한 성장을 이룰 것으로 추정된다. 한국은행 GDP 예측 자료에 따르면 2020-2050년 기간 동안 51% 성장, 연 평균 1.7% 성장이 예상된다. 서울, 인천, 경기 지역 경제는 각각 72%, 63%, 66%로 전국 수준을 상회할 것이다(표3.12). 산업연구원에 의하면 2050년까지 한국 경제 구조 내 서비스업이 차지하는 비중이 더 늘어나, 서비스업의 부가가치는 2050년까지 2020년 대비 57% 증가할 것으로 전망된다. 한편 동일 기간 산업부문의 부가가치는 39% 증가하고, 농업부문의 부가가치는 큰 변화가 없을 것으로 전망된다(그림3.29).

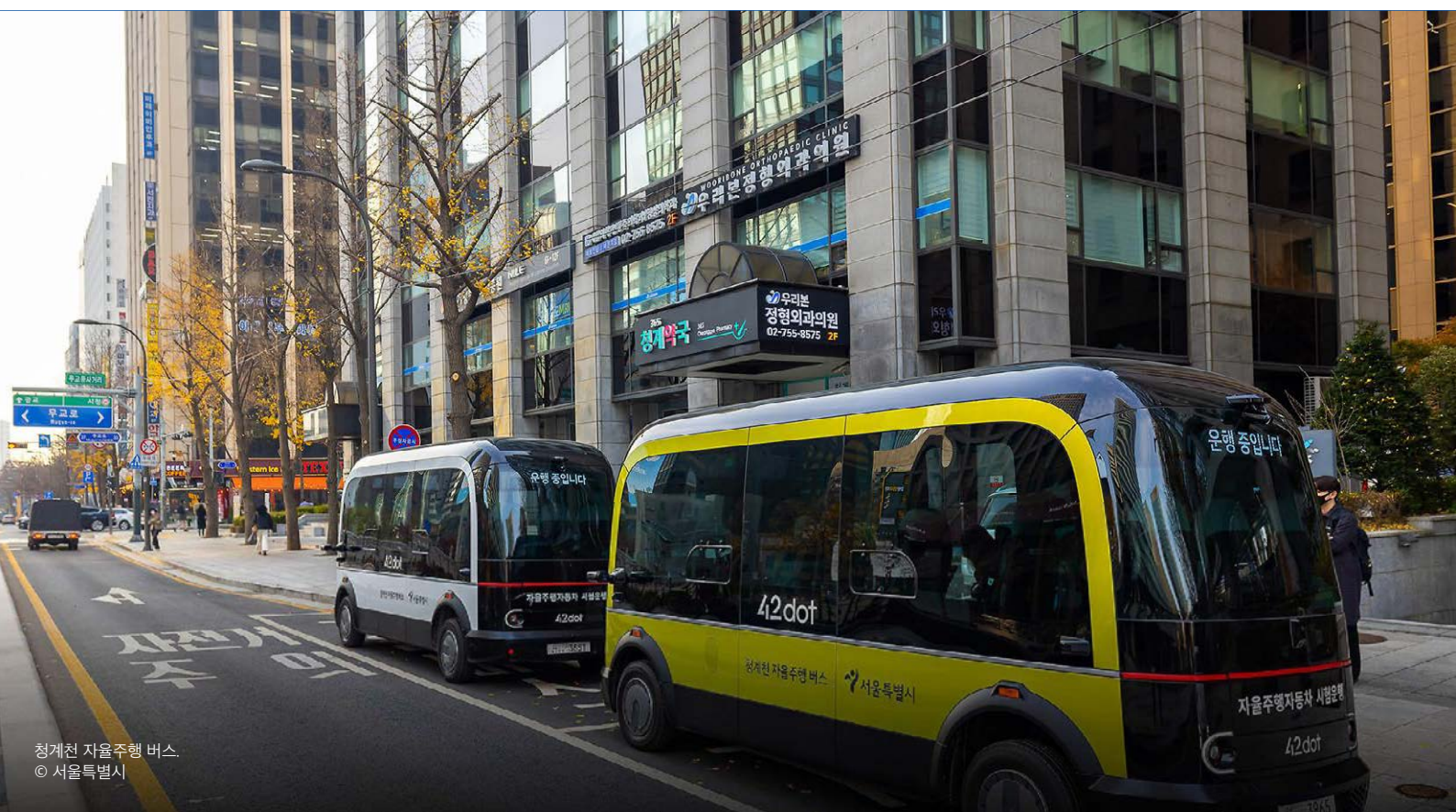


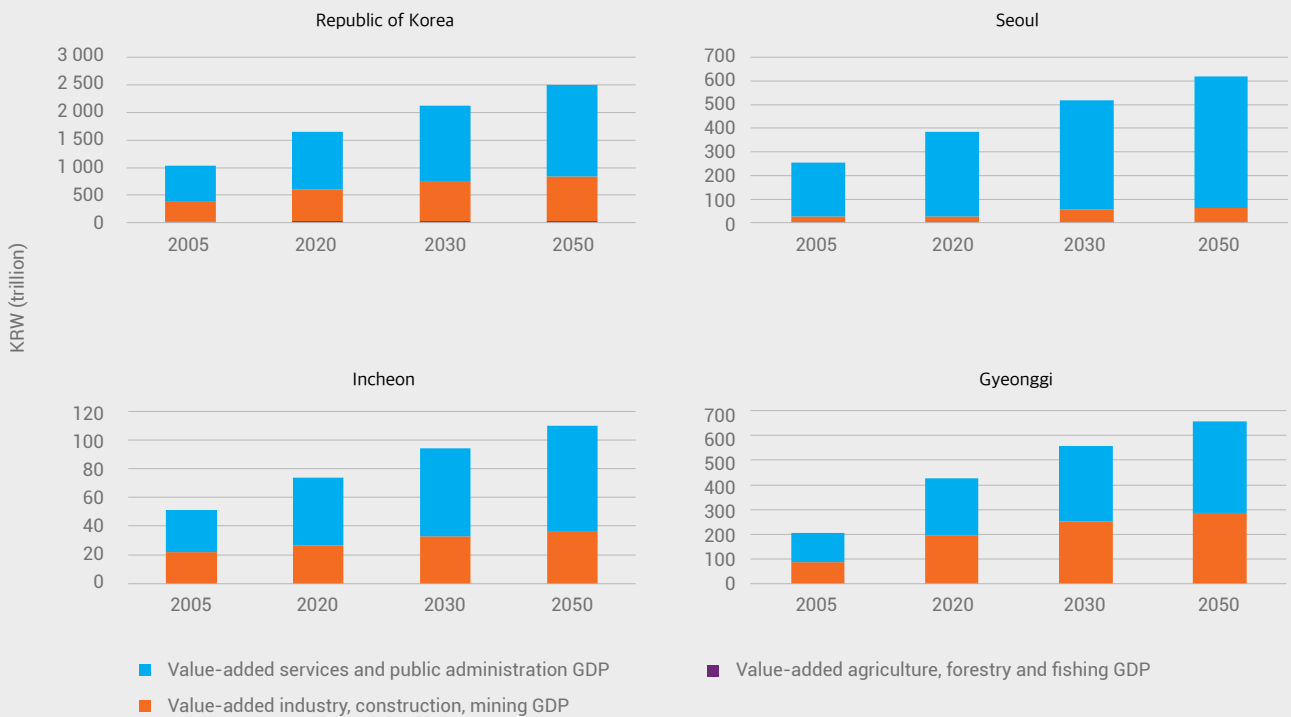
표 3.12

베이스라인 시나리오 개발에 사용된 인구 및 거시경제 변수 예측치

		2020	2030	2050
인구(백만 명)	전국	51.83	51.20	47.36
	서울	9.60	8.95	7.92
	인천	2.95	2.96	2.81
	경기	13.45	14.42	14.35
GDP(조 원)	전국	1 838.90	2 373.80	2 781.80
	서울	377.10	543.10	650.50
	인천	77.90	109.60	127.00
	경기	434.40	614.40	722.60

그림 3.29

2005-2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 거시경제 부문별 GDP 변화(단위: 조 원)



베이스라인 시나리오에 반영된 바와 같이 미래 경제 성장은 주요 대기오염원에 여러가지 변화를 초래할 것으로 예상된다. 전국 자동차 대수는 2020-2050년 기간 동안 증가할 것으로 예상되나 앞서 보여준 대로 각 지역의 인구 동향과 소득 변화에 따라 지역별로 다른 증가 양상이 발생할 것으로 보인다. 서울 지역의 차량증가율은 1% 가 예상되는 반면, 인천은 56%, 경기도는 19%로 훨씬 큰 폭으로 증가할 것이다(그림 3.30). 차량 보유량도 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 2020-2050년 기간 동안 전국 기준 1인당 승용차 보유량은 54% 증가가 예상된다. 2020년과 2050년의 1,000명당 승용차 보유대수는 각각 265대와 403대이다(그림 3.30).

또한 베이스라인 시나리오에 따르면 미래에는 저공해 차량 비중이 늘어날 것이며 배출등급이 낮은 구형 차량은 폐기되거나 등급이 높은 신차로 교체될 것이다. <그림 3.31>은 배출등급 기준으로 본 승용차 구성의 예를 보여준다. 2030년까지 서울, 인천, 경기도를 포함한 전국의 모든 중형 휘발유 승용차는 1등급 차량으로만 구성될 것이다.

그림 3.30

2005-2050년 대한민국의 지역별(A) 및 차량 유형별(B) 차량 대수 베이스라인 예측(단위: 천 대)

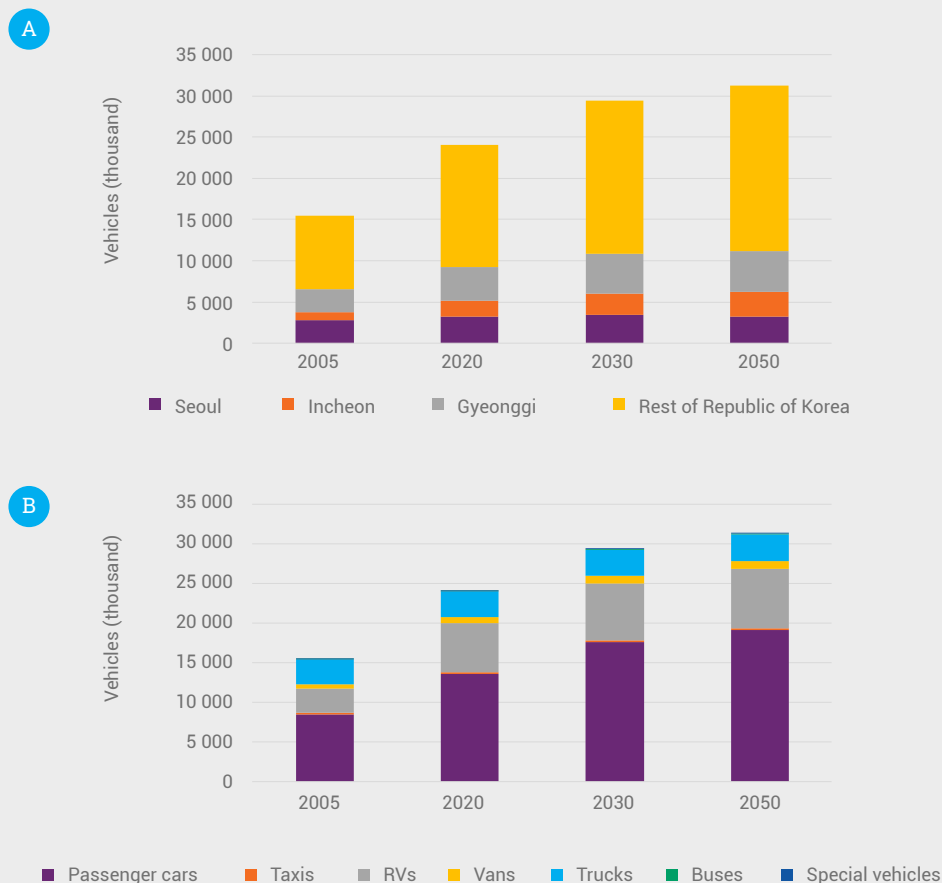
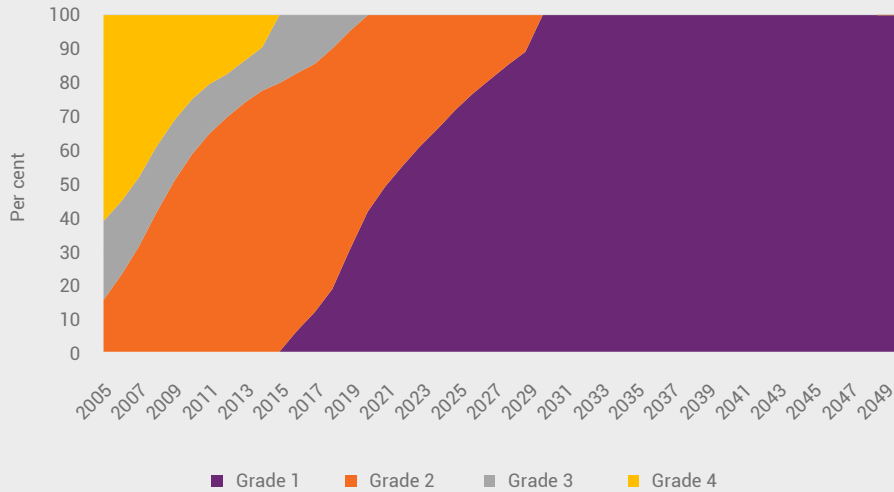


그림 3.31

2005-2050년 중형 휘발유 승용차 배출 가스 등급별 비중 베이스라인 예측(단위: %)



앞서 설명한대로 베이스라인 시나리오에 따르면 산업 GDP역시 서비스 부문에 비해서는 낮지만 지속적으로 성장할 것으로 보인다. 에너지를 사용하는 주요 3대 산업 부문(3.1절)에서 2020-2050년 기간 동안 성장이 지속될 것으로 예상된다. 같은 기간 철강 부문 부가가치는 19% 증가, 화학 생산은 39% 증가하나, 정유 부문은 2030년 이후 조금 하락할 것으로 예상된다. 그 결과 산업 부문의 연료 소비량은 앞으로도 계속 증가할 것이다. 베이스라인 시나리오에서 석탄, 석유 제품 등 전국 기준 산업 부문 연료 소비량은 크게 25% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 경기도의 경우 산업용 연료 사용 증가는 주로 천연가스 소비에 의한 것이다.

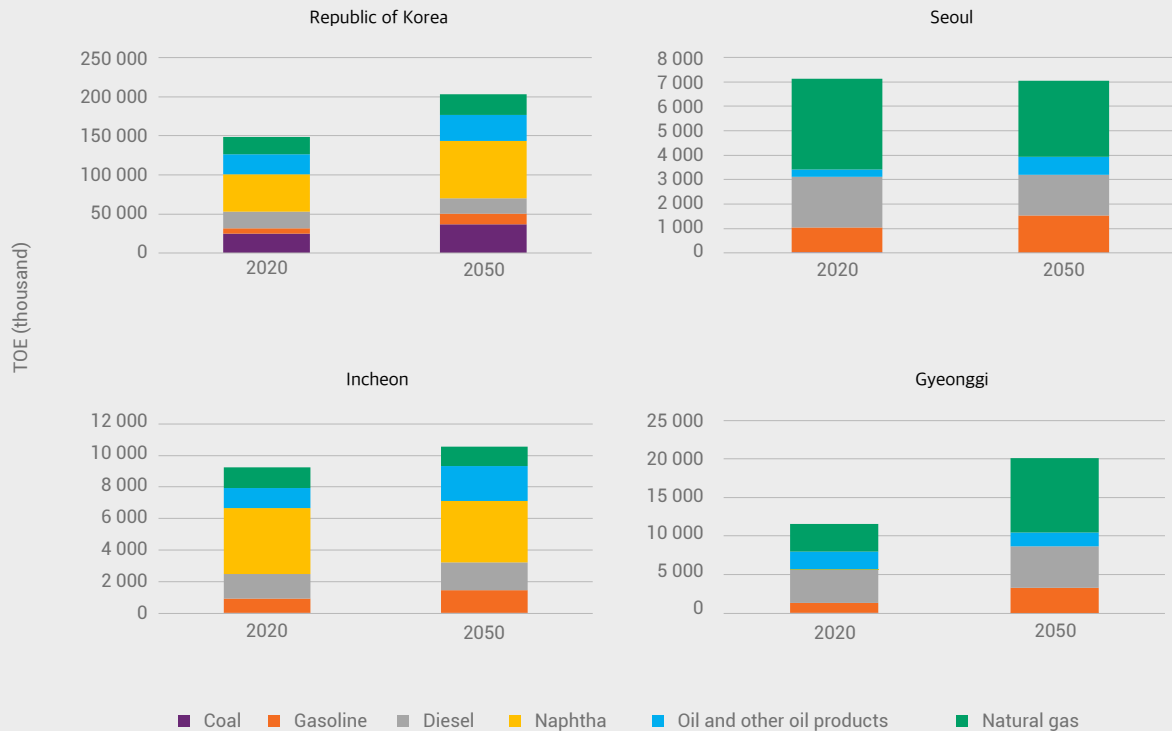
표 3.13

2005-2050년 대한민국 주요 산업별 산업 및 서비스 부가가치 GDP 베이스라인 추정치(단위: 조 원)

대한민국	2005	2020	2030	2050
식품과 담배	16.4	23.2	25.8	28.1
섬유와 가죽	14.3	12.7	15.3	17.7
금속철	54.4	58.3	64.6	69.1
비철광물	9.5	12.9	15.9	17.9
제지	8.8	11.5	11.4	9.9
목재	1.7	2.4	2.3	2.0
기계류	22.7	44.3	58.2	65.7
화학제품	52.3	75.2	92.5	104.7
정유	12.6	12.3	13.0	12.1
수송 차량	37.7	45.9	53.2	59.8
기타 제조	57.3	185.9	259.6	308.3
광업	3.0	2.1	2.1	2.2
건설	79.0	89.2	96.1	104.6
서비스	570.1	946.0	1 181.5	1 511.3
행정	71.1	108.2	133.2	144.2

그림 3.32

2020년과 2050년 대한민국 연료 유형별 최종 에너지 소비 베이스라인 예측(단위: 천 TOE)



베이스라인 시나리오에서 발전은 증가하는 전력수요에 대응하며, 발전소 건설 계획과 수명이 다한 노후 발전소의 폐쇄를 반영한다.

농업 및 폐기물 부문과 같은 비에너지 부문의 경우 베이스라인 시나리오는 예상 인구 동향을 바탕으로 가축 두수 및 폐기물 발생 부문의 활동을 예측한다.

베이스라인 시나리오는 새로운 정책을 감안하지 않은 상태에서 대기오염물질 배출의 진행을 반영한다. 그러나 기존 정책과 대책의 지속적인 효과는 시나리오에 반영된다. 따라서 기존의 차량 배출기준, 에너지 효율성 기준과 같은 대책의 지속적인 이행 효과는 미래의 대기오염물질 배출에 영향을 줄 것이고, 이 부분은 베이스라인 시나리오에 반영되어 있다. 이에 해당하는 정책은 <표 3.14>에 정리되어 있다.

표 3.14
베이스라인 시나리오에 포함된 정책

대책/정책명	부문	세부사항	정책	출처
산업 에너지 효율	산업	과거 동향	현행(현정책)	
건물 에너지 효율	가정/서비스/공공/행정	과거 동향	현행(현정책)	
차량 배출기준	도로 수송	유로6	현행(현정책)	
에너지 효율	철도	과거 동향	현행(현정책)	
배출기준 4개 등급	비도로 기계	기계류 4개 등급 배출기준제로 전환	2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015-2024)	환경부 (2021)
전기 모빌리티	도로 수송	과거 동향	현행(현정책)	
폐기물 감소	폐기물	과거 동향(재활용 등)	현행(현정책)	

3.2.3 배출저감 정책의 저감 효과 추정

위에서 설명한 ‘베이스라인 시나리오’ 외에 향후 기후변화와 대기오염 감축 대책을 반영한 두 가지 미래 시나리오를 작성하여 ‘탄소중립(CN) 시나리오’와 ‘대기오염 감축(AP) 시나리오’ 모델링을 실시하였다. 개별 감축 시나리오들은 두 가지 대책으로 분류하였다.

그래서 여러 저감 대책 이행 효과를 평가함으로써 여러 저감 조치 간의 상호작용을 볼 수 있도록 했다. 따라서 각 시나리오에는 현재의 계획, 전략, 정책 검토를 통해 파악한 대책이 포함되어 있어, 이를 이행했을 때 달성할 수 있는 대기오염물질, 단기체류 기후변화 오염물질 및 온실가스 저감효과를 파악할 수 있다. 각 시나리오에 포함된 정책들은 <표 3.15>에 수록되어 있다.

개별 감축 정책들은 두 가지 시나리오로 분류하여 다양한 감축 정책 이행 효과를 평가하였고 서로 다른 조치 간의 상호작용을 볼 수 있도록 했다.

표 3.15

탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오에 포함된 정책

시나리오	대책/정책명	부문	세부사항	정책	출처
탄소중립 시나리오	전환 부문 에너지 전환	전환 (전기, 열)	발전용 연료 대체(2050년까지 기존 화석연료에서 재생에너지로 약 72%까지 대체) 열생산을 위한 연료 대체 (2050년까지 화석연료에서 재생에너지원으로 대략 50%까지 대체)	2050 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	산업 부문 에너지 효율 개선	산업 (제조, 광업, 건설, 농업)	모든 제조 산업군 대상 에너지 효율성 개선 및 연료 대체 (화석연료에서 전기화 및 재생에너지로 전환)	2050 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	무공해차량 (ZEV) 보급	도로수송	2050년까지 도로주행용 차량 대상 무공해차량 보급(전기차 및 수소연료 전지차(FCEV) 포함)	2050 탄소중립계획, 도시접근규정 (서울시)	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	연비 향상	도로수송	주행 거리당 연료 소비량 감소, 소형차 비중 확대	2050 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	수송 수요 관리	도로수송	승용차에서 대중교통으로 전환(승용차 주행거리 감소)	2050 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	기타 수송 대책	수송(철도, 해운, 항공)	에너지 효율성 개선 및 연료 대체(화석연료에서 전기화 및 재생에너지로 전환)	2050 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	제로에너지건물 (ZEB)	주거, 서비스, 공공행정	에너지 효율성 개선	제로에너지 건물(ZEB) 제도, 건물 대상 온실가스 배출관리제도 (서울시)	국토교통부(2019), 황인창 외(2021)
탄소중립 시나리오	연료 대체	IPPU(철당)	연료 대체(화석연료에서 전기화, 재생에너지)	2050 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021)
탄소중립 시나리오	직매립 금지	폐기물(매립)	매립폐기물 감축	생활폐기물 매립 금지 제도	폐기물관리법 (2021)
탄소중립 시나리오	벼농사	농업-작물생산	홍수패턴 변화	농업 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021), (농림축산식품부, 2021)
탄소중립 시나리오	축산 관리	농업-가축	가축영양관리	농업 탄소중립계획	2050 탄소중립녹색성장위원회 (2021), (농림축산식품부, 2021)
대기오염 감축 시나리오	산업시설 대상 배출 상한제 & 거래 제도	에너지 공급, 산업, 소각	배출통제율 강화	2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015- 2024)	환경부(2021)
대기오염 감축 시나리오	교통수요 관리	수송-도로차량	수도권 대기관리권역 저배출 구역	2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015- 2024)	환경부(2021)
대기오염 감축 시나리오	비도로 4개 등급 배출기준	비도로-건설 & 농업기계류	기계류 4개 등급 배출기준제도로 전환	2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015- 2024)	환경부(2021)
대기오염 감축 시나리오	연료 개선	산업, 수송 및 기타	황함량 감소	2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015- 2024)	환경부(2021)

서울자전거
SEOUL BIKE 따릉이

서울자전거 따릉이의 역사 Seoul Bike Ttareungyi's History

연도	주요 사항
2015	따릉이 2,000대, 대여소 150개소 9월 : 5대 거점 간 운영
2016	따릉이 5,600대, 대여소 450개소 7월 : 11개구 8대 운영 9월 : 인천 공대 차이스 쿠퍼, 종합보통 강화
2017	따릉이 20,000대, 대여소 1,290개소 5월 : 정기권 2시간유급제 도입 7월 : 서울시 전 지역 운영 시작
2018	따릉이 25,000대, 대여소 1,540개소 6월 : 앱 디자인 전면 개편
2019	따릉이 29,500대, 대여소 2,140개소 3월 : 따릉이로 운영 시작
2020	따릉이 37,500대, 대여소 3,040개소 3월 : OR형 뉴리튬이온 배터리 운영 10월 : 따릉이 브랜드로 30만호로 내구성 강화 11월 : 배터리를 도킹, 이용연령 (만 15세 ~ 만 13세) 확대

서울자전거 따릉이에 대하여 About Seoul Bike Ttareungyi

서울시민의 친구 공공자전거 따릉이입니다. 서울시 내 대여소가 있는 곳이면 어디든지 대여와 반납이 가능한 따릉이는 친환경 생활권 교통수단으로서, 만 13세 이상 시민 여러분의 친근한 발이 되어드릴 것입니다.

- 건강한 자전거 도시
자전거 이용의 생활화를 통한 시민건강 증진 실현
- 녹색 성장 선도 도시
국가 비전인 "저탄소 녹색성장" 실현
- 깨끗한 자전거의 도시
자전거 교통수단 분담률을 향상시켜 CO2 발생 감소 실현

새벽따릉이는 어떻게 만들어졌나요?
새벽따릉이는 2019년 12월 '이동집에 정형로프와 함께한 고정확성이 재연한 아이디어를 수렴한 결과입니다. 기존 따릉이가 크고 무겁다는 의견들이 있어 좀 더 다양한 세대가 따릉이를 할 수 있도록 크기와 무게를 줄이고, 배터리를 연두색으로 변경하여 만들었습니다.

1599-0120 www.bikeseoul.com

서울자전거 따릉이.
© 서울특별시



양재 그린카 스테이션(태양열을 통한 수소-전기 융복합 충전소).
© 서울특별시

3.3 대기오염 저감평가 결과

3.1절에서 명시된 바와 같이 이 보고서는 서울, 인천, 경기 지역의 과거 대기오염물질 배출 경향을 평가하고, 향후 대기오염 정책들이 지속적으로 이행될 경우 어느 정도의 추가적인 감축이 이루어질지 평가하는 것이 목표이다. 3.2절에서는 베이스라인 시나리오 작성을 위해 2005년에서 2020년까지 모든 주요 배출부문에서 배출량을 어떻게 추정했는지, 그리고 2050년까지 어떻게 추정했는지 설명했다. 마지막으로 미래의 배출에 영향을 줄 수 있는 정책의 영향을 탄소중립 달성까지 포함하여 계량화했다. 이러한 평가분석을 통해 일차적으로 도출한 결과를 바탕으로 **다섯 가지의 주요 결과**를 제시하고자 한다. 한편 서울, 인천, 경기 지역 및 기타 국내지역의 대기오염물질 배출량을 조사하기 위해

많은 연구가 수행되었으며, 공식적으로 집계한 배출량 추정치는 대기정책지원 시스템인 CAPSS 인벤토리를 통해 주기적으로 업데이트되어 제공되고 있다. 이번 연구에서는 과거 배출량 특성 파악 및 미래 배출량 예측을 위해 업데이트된 데이터를 사용하였다. 참고로 이번 연구에서 조사한 배출량 추정치는 2019년 기준 CAPSS 대기오염물질 배출량 인벤토리를 소폭 하회하는 것으로 나타났다(표 3.16). 이러한 차이점에도 불구하고 두 개의 인벤토리 모두에서 공통된 주요 배출원이 관찰되었으며, 이 보고서에서 제시하고 있는 결론 및 주요 결과의 내용을 상당 수준으로 수정할 만큼의 큰 차이점은 아니라고 판단된다.



주요 결과 #1:

2005-2020년까지 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출량은 감소함

2장에서 설명한 바와 같이 과거 연구결과에 따르면 지난 수십 년간 서울, 인천, 경기 지역의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도, 질소산화물(NO_x) 농도 및 기타 오염물질 농도는 감소했다. 국외 지역의 배출 감소가 농도 감소에 기여하기도 했지만 과거 연구자료를 보면 서울, 인천, 경기 지역과 그 외 지역에 적용된 여러 정책들이 전국의 대기오염물질 배출량 감소에 기여했음을 알 수 있다. 이번 평가분석 결과 역시 서울, 인천, 경기 지역 및 전국의 대기오염 배출 저감에 상당한 진전이 있었음을 보여준다(표 3.16).

전국 기준으로 2005-2020년 기간 동안 1차 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출은 19% 감소했으며, 서울과 경기는 각각 75%, 53%로 더 큰 폭으로 감소하였다. 기타 오염물질들 역시 상당히 감소했다. 경기의 경우 2005년과 2020년 사이 가장 큰 배출량 감소폭을 보인 물질은 미세먼지(PM₁₀)와 이산화황(SO₂)으로 각각 -55%, -65%이다. 서울의 경우 질소산화물(NO_x) 배출량은 46%가 감소하였다. 이렇게 배출량이 줄어든 이유는 앞선 연구에서도 다루었지만 주요 배출부문에 시행된 대책 때문이다. 서울, 인천, 경기 지역에서 수송 부문의 배출량 감소가 전체 배출량 저감에 가장 크게 영향을 끼쳤다. 서울에서 배출량 감소 폭이 가장 큰 것으로 나타났는데 이는 서울의 초미세먼지 배출에 수송 부문이 가장 큰 비중을 차지했기 때문이다. 인천과 경기에서는 타 배출 부문이 상당한 비중을 차지했다.

표 3.16

2005년 및 2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 대기오염물질 및 온실가스 배출량(단위: 천 톤)

	대한민국			서울			인천			경기		
	2005	2020	변동 %	2005	2020	변동 %	2005	2020	변동 %	2005	2020	변동 %
CO ₂	579 413	725 999	25.3	26 383	22 603	-14.3	69 577	74 132	6.5	52 660	58 096	10.3
CO	674	499	-25.9	78	26	-66.2	38	32	-16.2	114	74	-35.0
CH ₄	1 110	1 004	-9.6	151	121	-19.9	29	28	-3.1	153	152	-0.9
NM VOC	893	979	9.6	82	66	-19.3	48	50	3.5	151	167	10.6
NO _x	977	876	-10.3	114	62	-45.7	74	63	-14.2	178	148	-16.9
PM ₁₀	144	131	-9.6	5	1	-76.4	3	2	-41.8	9	4	-54.5
SO ₂	402	284	-29.4	15	2	-88.9	38	32	-14.6	64	22	-65.1
NH ₃	252	275	9.2	2	0	-79.2	5	3	-45.8	39	38	-2.2
PM _{2.5}	81.1	65.5	-19.3	4	1	-75.0	4	3	-23.1	8	4	-52.7

이번 연구에서는 과거 배출량 특성 파악 및 미래 배출량 예측을 위해 업데이트된 데이터를 사용하였다. 참고로 이번 연구에서 조사한 배출량 추정치는 2019년 기준 CAPSS 대기오염물질 배출량 인벤토리를 소폭 하회하는것으로 나타났다.

대기오염물질 배출량 감소는 2절에서 설명한대로 대기정책지원시스템(CAPSS)에서 계산된 배출량 감소추세와도 일치한다. 하지만 서울, 인천, 경기의 LEAP 분석과 CAPSS 배출목록의 전체 배출량은 다르게 나타낸다. <표 3.17, 3.18>은 총 배출량과 부문별 배출량을 2019년 분석 추정치와 CAPSS 데이터로 추정한 내용을 나타낸다. 배출량 추정에 사용된 데이터가 다르기 때문에

정책 평가를 위해 LEAP 분석에 사용한 데이터 분류가 더 자세할수록 여러 대기오염물질의 총 배출량에는 차이가 생긴다. 이번 분석 평가의 배출량 추정치는 CAPSS 추정치보다 낮게 나타나는 경향을 가진다. 미세먼지와 초미세먼지를 살펴보면 LEAP 데이터가 비산먼지 배출을 포함하지 않는 데서 대부분의 차이가 오는 것을 알 수 있으나 다른 배출원의 배출량 추정치에도 차이가 난다.

표 3.17

LEAP 분석에 따른 2019년 대한민국 대기오염물질 배출량 추정치와 CAPSS 추정치 비교(단위: 천 톤)

오염물질	SIG LEAP	CAPSS	% 차이
CO	506	758	-33.3
NM VOC	982	1 020	-3.8
NO _x	919	1 087	-15.4
PM ₁₀	138	208	-33.8
SO ₂	299	273	9.6
NH ₃	274	316	-13.4
PM _{2.5}	69.1	87.6	-21.2

표 3.18

LEAP 분석에 따른 2019년 대한민국 주요 배출 부문별 대기오염물질 배출량 추정치와 CAPSS 추정치 비교(단위: 천 톤)

배출원 (CAPSS 분류)	CO		NO _x		SO _x		PM ₁₀		PM _{2.5}		VOCs		NH ₃	
	CAPSS	SIG LEAP	CAPSS	SIG LEAP	CAPSS	SIG LEAP	CAPSS	SIG LEAP	CAPSS	SIG LEAP	CAPSS	SIG LEAP	CAPSS	SIG LEAP
기타 표면 오염원	10 552		271		-		599		539		1 281		12 962	
농업	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	252 444	244 139
도로 수송	180 489	97 022	371 851	384 668	308	595	6 719	7 338	6 182	6 782	36 663	21 272	2 615	1 081
비도로 수송	187 565	142 945	311 748	196 238	37 555	32 846	17 265	9 030	15 989	8 350	63 951	56 398	122	119
비산먼지	-		-		-		105 037		17 272		-		-	
비산업	47 629	17 728	85 814	63 667	15 869	3 181	1 177	873	857	712	2 828	2 906	1 350	828
바이오매스 소각	218 642	146 828	8 407	5 358	75	-	13 806	8 640	11 482	7 194	83 521	60 292	15	5
산업공정	26 766	26 766	51 705	62 967	105 699	121 028	6 699	8 573	5 139	6 353	186 292	254 870	44 630	26 211
에너지 생산	64 327	46 575	75 513	138 685	45 297	86 810	3 365	5 422	2 813	5 078	8 434	6 219	1 422	1 021
송전 및 저장	-		-		-		-		-		29 062		-	
용제사용	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	545 244	545 057	-	-
제조업	19 737	24 429	169 221	47 460	65 730	52 191	52 932	97 293	27 118	34 301	3 404	1 938	717	360
폐기물 처리	2 140	3 227	12 332	19 925	2 326	2 460	267	344	228	309	59 537	32 749	22	0
총계	757 848	505 520	1 086 862	918 969	272 859	299 111	207 866	137 513	87 618	69 080	1 020 216	981 701	316 299	273 763

참고: 총계의 경우 반올림으로 인해 합산이 일치하지 않을 수 있음

대한민국 전역의 대기오염물질 배출 감소로 인해 서울, 인천, 경기 지역에서도 초미세먼지와 여러 대기오염물질 농도가 감소했다. 그럼에도 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도는 국가대기환경기준과 WHO 가이드라인을 초과한 상태였다. <그림 3.33>은 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도에 여러 배출원이 차지하는 비중을 보여준다. 산업 부문에서 2020년 국가 전체 초미세먼지 배출량의 절반에 가까운 양을 배출했고 이는 대부분 서울, 인천, 경기 이외 지역에서 발생했다. 수송 부문은 전국 초미세먼지 배출에서 두 번째로 많은 비중을 차지하고 있으며, 수송 부문은 서울에서는 초미세먼지 배출량의 40%, 경기에서는 30% 정도를 차지하는 등 서울과 경기의 단일 최대 배출원이다. 서울과 경기에서는 비도로 수송부문이 1차 초미세먼지 배출량의 나머지 대부분을 차지하며, 경기의 경우 농업부문 배출이

적지만 중요한 비중을 차지하고 있다. 인천은 전력생산이 1차 초미세먼지 총 배출량의 60% 이상으로 가장 큰 비중을 차지하여 수송부문의 경우 총 배출량의 20% 미만으로 두번째로 큰 비중을 차지하는 배출원이다.

질소산화물과 같이 위해한 대기오염물질의 경우 각 지역의 배출에 기여하는 배출원 비중을 보면 지역 간에 상당한 일관성이 발견된다(그림 3.34). 수송 부문이 전국 및 서울, 인천, 경기 지역의 가장 큰 배출원으로 지역별로 40-70% 이상을 차지하였다. 비도로 수송과 발전 부문이 남은 질소산화물 배출의 가장 큰 부분을 차지하였다. 그럼에도 이들 부문에서 지역별 요인으로 인해 발생하는 차이도 있다. 예를 들어 인천에서는 항만, 국제공항, 그리고 도시 내 위치한 발전소 때문에 비도로 수송과 발전 부문의 비중이 크게 나타난다.

그림 3.33
2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 주요 배출 부문별 1차 초미세먼지 총 배출량(A) 및 비중(B), (단위: 천 톤(A), %(B))



그림 3.34

2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 주요 배출 부문별 질소산화물 총 배출량(A) 및 비중(B), (단위: 천 톤(A), %(B))



주요 결과 #2:

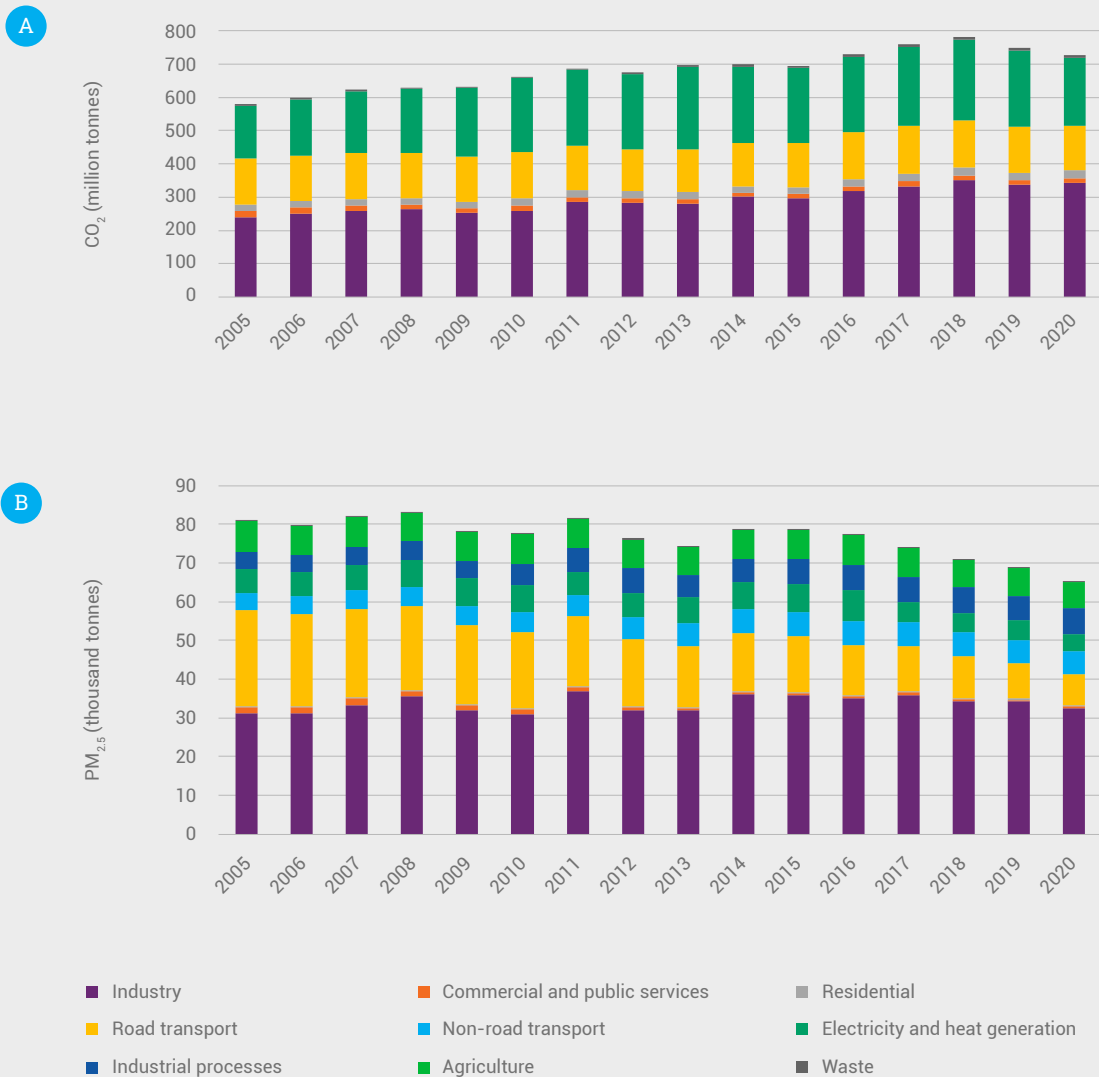
대기오염물질 감축과 온실가스 저감 경향의 상이성

2005년부터 2020년까지 서울, 인천, 경기 지역에서 건강에 위대한 대기오염물질은 상당 수준 감소했지만 온실가스, 특히 이산화탄소 배출은 큰 감소를 보이지 않았다. 전국을 기준으로 해당 기간 동안 1차 초미세먼지 배출은 19% 감소한 반면 이산화탄소 배출은 오히려 26%

증가했다(그림 3.35). 그러나 최근 몇 년 동안은 이산화탄소 배출량이 2018년 최고치를 기록한 이후 감소하고 있으며, 2020년 이산화탄소 배출량은 2018년 대비 7% 낮은 수준이다. 2005-2020년 기간 동안 대기오염물질 배출 추이와는 대조적으로 이산화탄소 배출량은 인천에서 7%, 경기에서 10% 가량 증가하였다. 서울의 경우 이산화탄소 배출은 14% 감소했으나 89%나 감소한 대기오염물질과 비교하면 매우 낮은 수치이다.

그림 3.35

2005-2020년 대한민국 주요 배출 부문별 이산화탄소 배출량(A) 및 1차 초미세먼지 배출량(B), (단위: 백만 톤(A), 천 톤(B))



이 현상은 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염관리 법제도가 성공적으로 작용하여 대기 오염물질 감축에 성공했으나 주요 배출원에서 발생하는 모든 배출이 감소한 것은 아니라는 것을 보여준다.

대기오염물질 배출과 온실가스 배출 패턴이 이렇게 다른 것은 서울, 인천, 경기 지역에서 공통적으로 관찰되는 특징이었다. 대기오염물질 감소를 위해 실행한 가장 공통된 대책들은 전통적인 대기오염 관리 수단들로 배출구에 방지기술을 적용하는 방식을 통해 연소 후 선택적으로 대기오염물질을 제거하는 방식이다. 예를 들면 입자상 물질(PM) 배출을 줄이는 분진필터를 차량이나 산업시설에 장착하는 조치들과, 차량 배출허용기준을 강화함으로써 서울, 인천, 경기 지역 내 수송 부문에서 발생하는 초미세먼지 배출을 크게 줄이는데 성공했다. 하지만 연소 후 제어방식은 이산화탄소 저감까지 이어지지 못했다. 이산화탄소 발생은 연소되는 연료의 양과 관련이 있기 때문이다. 따라서 서울, 인천, 경기 지역에서 대기오염물질 배출은 감소했지만, 이산화탄소 배출은 오히려 증가하거나 감소하더라도 그 폭이 매우 작았다.

서울, 인천, 경기 지역과 대한민국 전역의 대기오염물질 및 온실가스 배출 경향은 다르지만, 이산화탄소와 여러 대기오염물질의 주요 배출원의 경우 중복되는 부문이 많다(그림 3.36). 예를 들어 2020년 기준으로 수송부문은 전국의 이산화탄소 주요 배출원 중에 하나였고, 서울과 경기 지역에서는 수송 부문이 총 이산화탄소 배출량의 40%를 차지하는 최대 배출원으로 파악되었다. 인천에서는 발전 부문이 총 배출량이 거의 60%를 차지하여 최대 이산화탄소 배출원에 해당하였다. 전국적으로는 산업 부문이 전체 이산화탄소 배출량의 절반에 가까운 수준으로 가장 큰 배출원에 해당하며 이는 각 지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 주요 배출원과 동일하다.

따라서 대한민국이 추가적인 대기오염물질 배출을 감축하는 동시에 기후변화 완화 및 탄소중립 달성을 위한 전략을 설계, 평가, 이행할 수 있는 실질적인 기회가 있다고 볼 수 있다. 대기오염과 이산화탄소 배출을 동시에 줄일 수 있는 정책수단을 찾는다면 동시 저감효과가 발생할 수 있다는 것이다. 그렇게 되면 서울, 인천, 경기 지역과 전국에서 2005-2020년 사이에 나타난 대기오염물질과 이산화탄소 저감 간의 경향성 차이를 극복할 수 있을 것이다.



그림 3.36
2020년 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 주요 배출 부문별 총 이산화탄소 배출량(A) 및 비중(B), (단위: 백만 톤(A), %(B))



지난 수십 년간 대한민국 전역, 특히 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 감축성과는 구체적인 정책 수립과 대책 이행으로 이를 수 있었다.

주요 결과 #3:

2020-2050년까지 현 정책과 대책 이행으로 서울, 인천, 경기 지역이 달성한 대기오염물질 감소 추세는 유지할 수 있으나, 온실가스를 감소시킬 수는 없음

과거 수십 년에 걸친 정책 이행을 통해 서울, 인천, 경기 지역 및 전국에서 대기오염물질 저감을 달성할 수 있었다. 동시에 서울, 인천, 경기 지역의 경제 활동이 증가하면서 대기오염물질 배출 증가로 이어질 수 있는 자원 수요가 훨씬 증가한 측면도 있다. 예를 들어 가정과 산업 부문의 차량 대형화와 연료 소비 증가 등이 그렇다. 여러 부문의 대기오염물질 감축 베이스라인 시나리오는 일부 지역의 대기오염물질 배출 감축이 당연하게 여겨져서는 안 되며, 정책적 노력이 지속되지 않으면 언제든 역전될 수도 있음을 보여준다(표 3.19).

여러 지역의 미래 배출량 추정치는 주요 배출 부문의 비중에 따라 결정된다. 베이스라인 시나리오 상 2030년과 2050년 서울 지역의 초미세먼지 배출량은 2020년 대비 각각 36%와 54% 감소할 것으로 전망된다. 왜냐하면 상대적으로 고배출 차량들이 첨단 초미세먼지 제어기술이 적용된 신차로 교체될 것이기 때문이다. 베이스라인 시나리오에서는 비도로 수송 부문을 대상으로 Tier 4 배출허용기준과 같은 기타 대책의 이행을 가정하였으며, 이러한 대책은 해당 부문에서 초미세먼지($PM_{2.5}$) 및 기타 대기오염물질의 배출 저감에 기여도가 높다. 같은 이유로

경기와 인천 지역의 초미세먼지 배출량 역시 2020-2030년 기간 동안 감소할 것으로 보인다. 한편 대한민국의 초미세먼지 배출량은 2020년 대비 2030년까지 7%, 2050년까지 20% 증가할 것으로 전망된다. 서울, 인천, 경기 이외 지역에서 산업 부문이 초미세먼지 증가와 함께 기여를 하고 있고, 산업 생산량 증가, 연료 사용량 증가와 함께 화석연료를 사용하는 발전도 지속되면서 전국 배출량 증가를 주도할 것이다.

다른 오염물질들도 초미세먼지와 유사한 패턴을 보이지만 개별 오염물질 배출에 기여하는 배출원은 상이하다. 예를 들면 질소산화물의 경우 수송부문이 차지하는 비중이 전국적으로 고르게 높기 때문에, 베이스라인 시나리오 상에서도 질소산화물의 배출은 초미세먼지와 달리 향후에도 감소할 것으로 전망된다. 이는 발전과 산업부문 등이 질소산화물 배출에서 차지하는 비중은 적은 가운데, 차량교체는 대부분의 지역에서 유사하게 일어날 것이기 때문이다.

동시에 대한민국 대부분의 지역에서 이산화탄소 배출량이 증가할 것으로 예상된다. 베이스라인 시나리오를 기준으로 이산화탄소 배출량은 2020년과 비교하여 2030년까지 10%, 2050년까지 24% 증가가 예상된다. 서울과 경기는 이산화탄소 배출 증가가 예상되고 인천은 소폭 감소가 예상된다.

표 3.19

2010-2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 초미세먼지, 이산화탄소, 질소산화물 배출량 베이스라인 시나리오에 따른 추정(단위: 천 톤)

			2010	2020	2030	2040	2050	2020-2050 변동분 (%)
PM _{2.5}	전국		77.8	65.5	70.3	75.4	78.5	19.8
	서울		2.8	1.1	0.7	0.5	0.5	-54.3
	인천		4.5	3.2	2.6	2.2	2.2	-31.7
	경기		6.6	3.8	2.7	2.1	2.1	-45.2
CO ₂	전국		662 625	725 999	798 677	865 423	896 781	23.5
	서울		22 762	22 603	25 016	24 413	22 706	0.5
	인천		81 800	74 132	67 410	65 269	66 272	-10.6
	경기		50 677	58 096	78 391	80 721	79 359	36.6
NO _x	전국		1 050	876	689	628	616	-29.6
	서울		103	62	39	32	29	-52.6
	인천		85	63	44	41	41	-35.7
	경기		188	148	96	80	77	-48.0



주요 결과 #4:

2020-2050년까지 탄소중립 정책 이행 시 서울, 인천, 경기 지역 및 대한민국의 대기오염물질 및 온실가스 배출 저감이 동시에 이루어짐

탄소중립 시나리오(CN)는 온실가스와 대기오염물질을 동시에 감소할 수 있는 정책이다. 주요 결과 #2에서 보다시피 과거 대기오염물질 배출 감소는 선택적으로 특정 오염물질을 통제하는 방식의 대책으로 가능했으며, 그 결과 대기오염은 줄었지만 온실가스 배출은 오히려 증가했다. 탄소중립 시나리오는 이산화탄소 배출과 대기오염물질 배출을 동시에 공략할 수 있는 가능성을 제시한다. 온실가스와 대기오염물질을 대상으로 한 탄소중립 시나리오의 대책 유형은 화석연료를 재생에너지 발전으로 전환하거나, 내연기관차를 무배출차량(전기차)으로 전환하는 방식과 수송, 가정, 서비스 부문의 에너지 효율성 개선, 산업 부문, 가정, 서비스 부문의 연료 대체(전기에서 수소) 등 다양하다(표 3.15).

<표3.15>에 열거한 정책들을 이행하여 탄소중립 시나리오를 실현함으로써 서울, 인천, 경기 지역 및 대한민국 전역에서 대기오염이 감소할 뿐만 아니라 이산화탄소 배출 감축을 달성할 수 있을 것으로 예상된다(그림 3.37). 이번 분석에 포함된 탄소중립 시나리오의 저감 대책 이행으로 2050년까지 대한민국의 이산화탄소 총 배출량은 88% 감소하며 서울, 인천, 경기 지역 기준으로도 비슷한 수준의 감소가 예상된다. 또한 베이스라인 시나리오 대비 초미세먼지 배출량은 2050년 서울에서 대략 78%, 인천은 88%, 경기는 58% 정도의 감축이 예상된다. 이산화탄소 배출원과 중첩되는 다른 오염물질은 더 큰 폭의 감축이 예상된다. 질소산화물 배출량은 서울에서 대략 76%, 인천 81%, 경기 83% 정도의 감축이 예상된다(표3.20, 그림3.37).

이번 평가 결과는 대한민국과 서울, 인천, 경기 지역의 탄소중립 선언 및 이를 위한 정책을 단순히 기후변화 대응 계획으로만 볼 것이 아니라 서울, 인천, 경기 지역 및 전국에서 건강에 위대한 대기오염물질 배출을 상당 폭 감소시킬 수 있는 공공보건계획으로도 봐야 한다는 점을 시사한다. 또한 평가 결과에 따르면 대기오염물질 감축은 2020-2050년 기간 중 2030년 이후, 즉 후반부에 달성된다. 베이스라인 시나리오 기준 2030년 서울의 초미세먼지는 24% 감소로 2030년 전까지 탄소중립 시나리오 이행에 따른 대기오염물질 저감 효과는 상대적으로 작다. 기후변화 완화 계획에서 건강에 대한 편익을 강조하는 것은 기후변화 대응 목표를 강화하고 저감 대책을 우선적으로 이행하는데 도움이 될 수 있다. 탄소중립 달성을 목표로 한 정책은 대기오염 저감 및 건강편익 개선 목적을 동시에 만족시킬 수 있다. 탄소중립 정책을 신속하게 이행하면 건강상의 혜택을 지금보다 더 빠르게 누릴 수 있을 것이다.

이 보고서에서 다루고 있는 완화 대책을 이행하면 모든 주요 배출원을 대상으로 현저한 수준의 배출량 감소에 기여한다. <그림 3.38>은 지역별 그리고 배출원별 베이스라인 배출량 대비 2050년 배출 감소율을 표시하고 있으며, <표3.21>은 전국 기준 수치를 집계하여 정리한 것이다. 무공해차량(ZEV)의 보급 및 도로수송 부문을 대상으로 도입한 기타 대책을 통해 해당 부문에서의 대기오염물질 및 온실가스 모두 모든 지역에서 90%이상 감소하는 것으로 나타난다. 한편 재생에너지의 보급으로 발전 부문 역시 유사한 수준으로 배출량이 감소한다. 주거 부문의 경우 취사 및 난방용 연료 전환 및 에너지 효율성 확보를 통해 상당한 저감효과가 나타난다. 배출량 감소가 가장 작은 부문은 농업 및 폐기물 부문이다.

표 3.20
2020, 2030, 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 초미세먼지, 이산화탄소, 질소산화물의 베이스라인 및 모든 대책 이행을 가정한 저감 시나리오 상의 총 배출량(단위: 천 톤)

		2020		2030		2050	
오염물질	지역	베이스라인		모든 저감 대책		베이스라인	모든 저감 대책
PM _{2.5}	전국	65.5	70.34	34.1	78.45		12.2
	서울	1.1	0.66	0.5	0.49		0.1
	인천	3.2	2.58	2.2	2.21		0.3
	경기	3.8	2.71	2.3	2.09		0.9
CO ₂	전국	725 999	798 677	458 571	896 781		109 923
	서울	22 603	25 016	17 114	22 706		4 841
	인천	74 132	67 410	42 700	66 272		8 526
	경기	58 096	78 391	58 209	79 359		13 645
NO _x	전국	875.9	688.9	493.5	616.3		107.5
	서울	61.7	39.2	30.6	29.2		7.0
	인천	63.1	44.0	32.0	40.5		7.6
	경기	147.6	95.9	77.4	76.8		13.3

그림 3.37
2030년(A) 및 2050년(B) 대한민국, 서울, 인천, 경기, 그 외 지역 베이스라인 시나리오 대비 탄소중립 시나리오(CN)의 대기오염물질 및 온실가스 배출 감소율(단위: %)

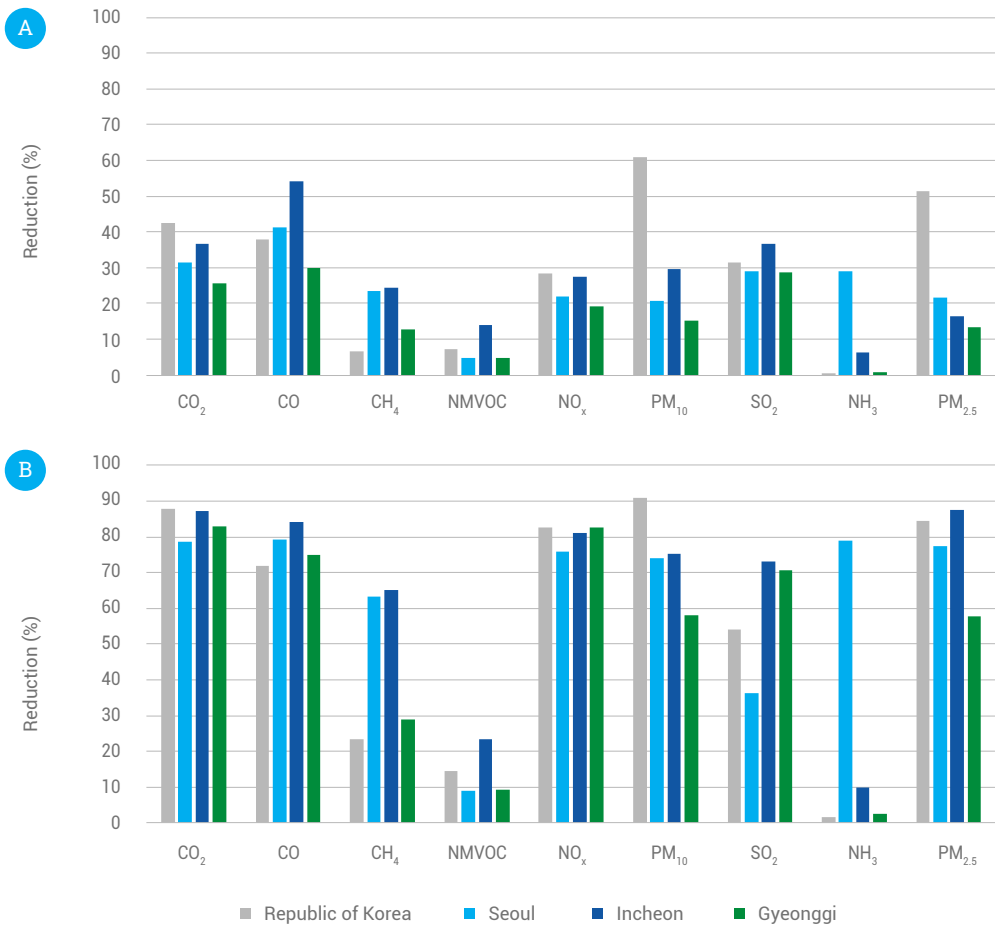


표 3.21

2050년 대한민국 주요 배출 부문별 초미세먼지, 질소산화물, 이산화탄소의 베이스라인 대비 배출 감소량(단위: 천 톤, %)

부문	PM _{2.5}		NO _x		CO ₂	
	순변화량(천 톤)	변화율(%)	순변화량(천 톤)	변화율(%)	순변화량(천 톤)	변화율(%)
산업	-49.9	-99	-62	-90	-408	-82
상업 및 공공서비스	-0.1	-40	-9	-41	-6	-50
주거	-0.3	-80	-33	-80	-20	-80
도로 수송	-6.8	-97	-226	-95	-135	-99
비도로수송	-0.4	-50	-8	-51		
전력 및 난방	-4.7	-99	-132	-99	-211	-99
산업 공정	-4	-54	-22	-31		
농업						
폐기물		-81	-17	-81	-7	-82

그림 3.38

2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 주요 배출 부문별 초미세먼지, 질소산화물, 이산화탄소의 베이스라인 시나리오 대비 탄소중립 시나리오(CN)의 배출 감소율(단위: %)

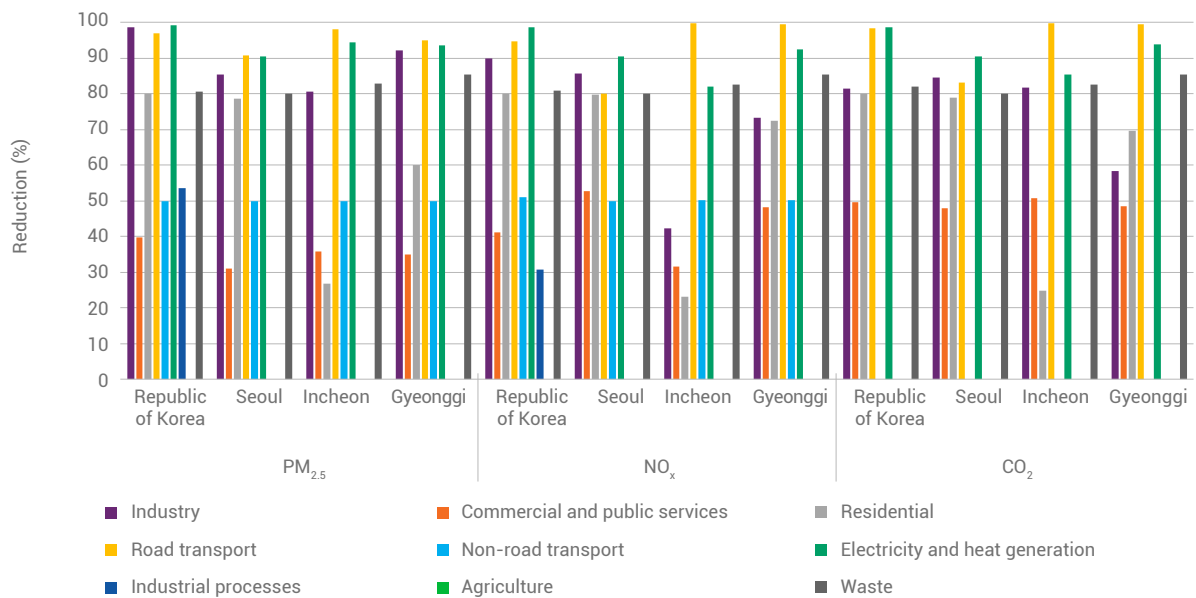


표 3.22

2050년 대한민국 개별 완화 조치 이행에 따른 베이스라인 시나리오 대비 배출 감소량(단위: 천 톤)

Mitigation Measure	PM _{2.5}	NH ₃	SO ₂	PM ₁₀	NO _x	NMVOC	CH ₄	CO	CO ₂
Baseline	81	382	303	179	616	1.151	863	847	893 059
Zero emission vehicles	3.8	0.4	0.0	1.8	35.7	2.4	2.3	33.0	10.1
Transport demand management	0.5	0.1	0.1	0.2	2.1	0.1	0.6	1.1	1.4
Fuel economy improvements	0.5	0.0	0.1	0.2	1.3	0.1	0.6	0.5	1.5
Non-road transport mitigation	0.5	0.0	0.0	0.2	1.3	0.1	-	0.5	-
Shipping mitigation	8.4	0.0	7.4	3.8	3.4	10.4	0.0	29.7	4.8
Zero energy buildings	1.1	0.2	0.1	0.5	8.3	0.2	0.3	1.4	3.2
Renewable electricity and heat generation	6.0	0.3	23.5	2.8	20.9	0.6	0.3	5.7	22.0
Industrial facility emissions programme	63.8	0.1	32.4	80.5	14.6	0.3	2.8	3.7	45.5
Direct landfill ban	0.5	0.0	0.0	0.2	1.3	0.1	-	0.5	-
Total mitigation	79.5	0.9	48.9	88.1	74.8	13.6	5.8	71.7	86.2

참고: 총계의 경우 반올림으로 인해 합산이 일치하지 않을 수 있음

그림 3.39

이번 평가에 포함된 모든 대책(탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오) 이행 후 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 베이스라인 시나리오 대비 초미세먼지 배출 감소량(단위: 천 톤)

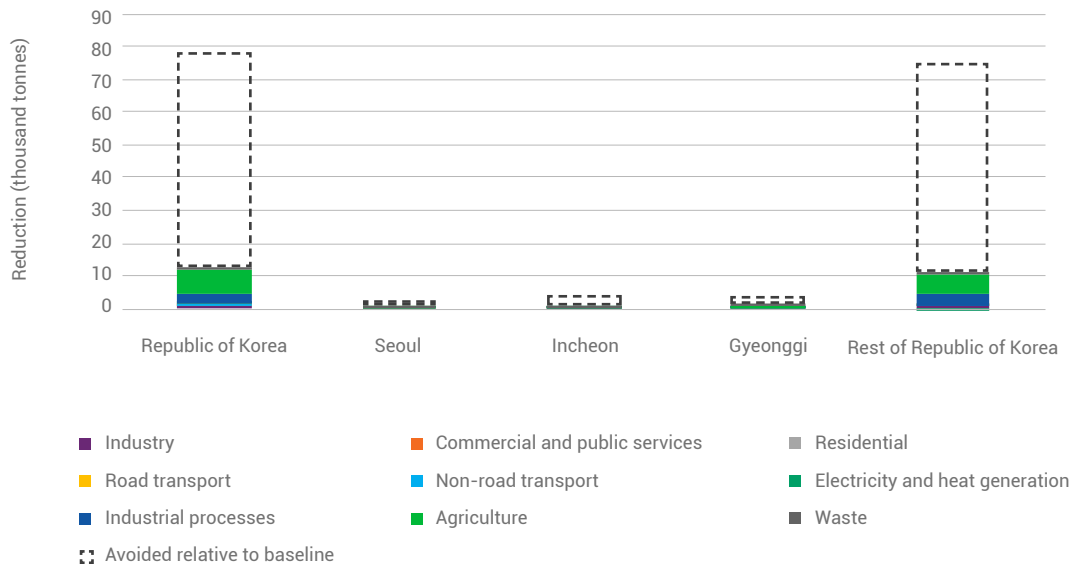


그림 3.40

이번 평가에 포함된 모든 대책(탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오) 이행 후 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 베이스라인 시나리오 대비 질소산화물 배출 감소량(단위: 천 톤)

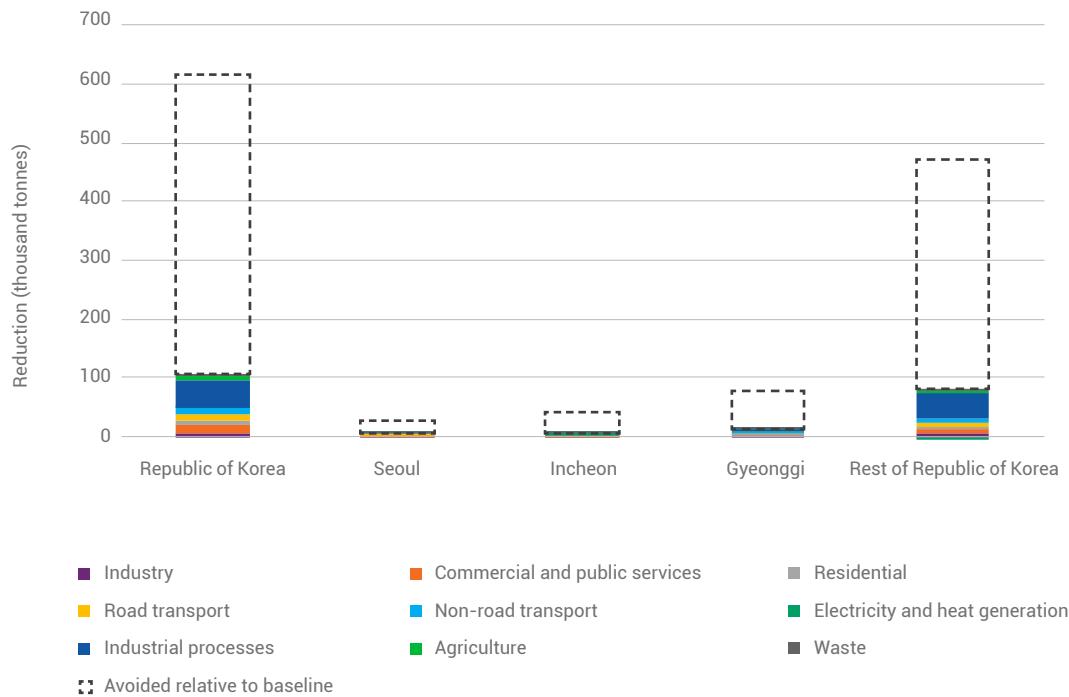
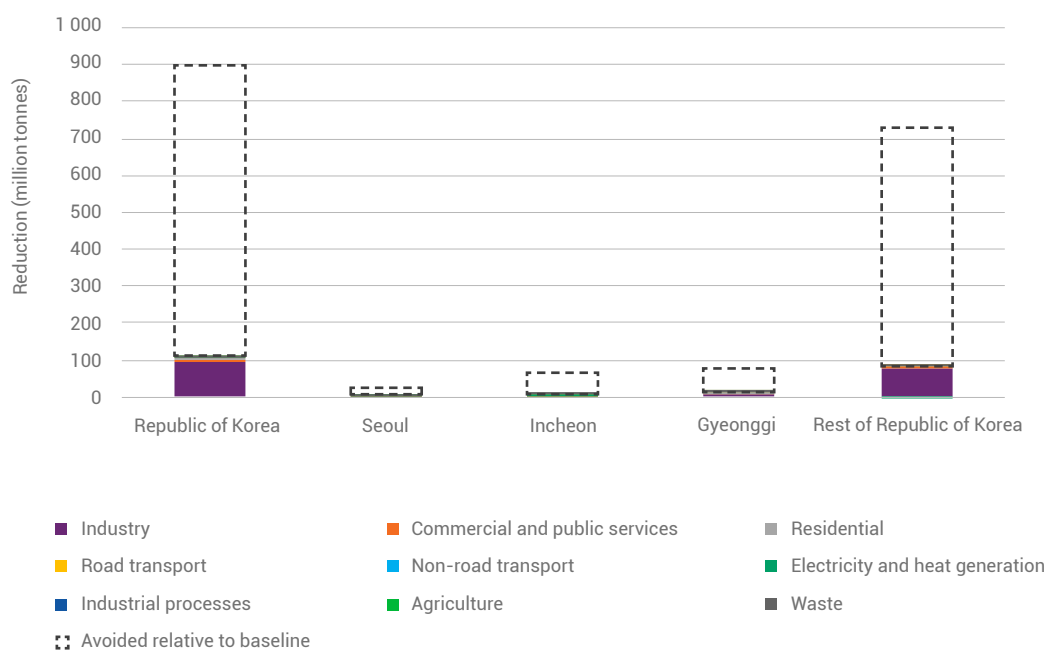


그림 3.41

이번 평가에 포함된 모든 대책(탄소중립 및 대기오염 감축 시나리오) 이행 후 2050년 대한민국, 서울, 인천, 경기 지역 베이스라인 시나리오 대비 이산화탄소 배출 감소량(단위: 천 톤)



주요 결과 #5:

모든 대책을 시행한 후에도 비도로 수송 및 농업 부문과 같은 여러가지 주요 대기오염 배출원들이 여전히 존재함

탄소중립 시나리오는 주로 이산화탄소 배출원에 집중하고 있다. 이번 평가에서 고려된 모든 대책을 실행한 이후에도 줄어들지 않는 주요 대기오염 배출원이 있다. 남아있는 배출원 중 일부에 대해서는 이산화탄소 제어 중심 탄소중립 정책이 영향을 발휘하기 어렵기 때문이다. <그림 3.41>는 탄소중립 정책 이행 이후에도 **산업** 부문에서 일부 이산화탄소가 계속해서 배출되고 있음을 보여준다(이번 평가분석은 잔여 이산화탄소 배출을 일부 상쇄할 수 있는 임업과 기타 토지사용을 포함하지 않는다). 산업 부문에서 완전한 탈탄소화가 이루어지지 않는 것은, 2020년 국내 산업 부문 초미세먼지($PM_{2.5}$) 발생량의 90%이상을 차지하는 철강 및 금속 생산에서 석탄 사용을 단계적으로 폐지하여 초미세먼지 발생량을 완전히 제거하는 것과는 대조적인 결과이다. 또한 서울, 인천, 경기 외 지역의 산업 부문이 여전히 질소산화물과 같은 기타 대기오염물질의 상당한 배출원으로 남아있을 수 있는데(그림 3.40), 이는 산업 부문 배출 감축을 위한 추가적인 대책이 마련되어야 함을 시사한다.

대기오염물질이 지속적으로 배출되고 있는 주요 배출원은 바로 수송 부문에서 발생하는 **비(非)배기 가스 배출**이다. 차량의 전동화만으로는 브레이크 및 타이어 마모 과정에서 발생하는 초미세먼지($PM_{2.5}$) 또는 도로 재비산먼지가 줄어들지 않는다. 이러한 배출원을 대상으로 교통 수요 줄이기와 같은 추가적인 조치를 마련하는 경우에만 이로 인해 발생하는 대기오염물질을 감축할 수 있다.

마지막으로 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도를 심화시키는 핵심 오염물질 중에서 과거 대기오염물질 저감 대책이나 탄소중립 정책 조치 대상으로 관리되지 않은 물질이 있다. 바로 농업 부문에서 주로 배출되는 **암모니아**로, 합성 및 유기 비료를 사용하는 과정에서 배출되며, 대기 중 초미세먼지 생성에 주요한 역할을 하고 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도에 상당한 영향을 끼친다. 이전 연구를 살펴보면 한국의 전반적인 대기질 개선을 위해 암모니아 배출 관리가 필요하다는 것이 강조되어 있다. 하지만 이번 평가 보고서에 제시된 대책만을 이행한다면 2050년 전국 암모니아 배출량은 베이스라인 대비 1.2% 감축에 불과할 것이다. 또한 세 지역 중 유일하게 농업 활동이 활발한 경기 지역의 2050 암모니아 배출량은 최대 3% 감소에 그칠 것으로 예상된다(그림 3.37). 따라서 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 관리 체계 내에서 고려되지 않은 오염물질에 대한 추가적인 배출 저감 대책이 필요하다.



농업 부문에서 주로 배출되는 암모니아는 합성 및 유기 비료를 사용하는 과정에서 배출되며, 대기 중 초미세먼지 생성에 주요 역할을 하고 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 농도에 상당한 영향을 끼친다.

분석의 한계

모든 미래 예측과 마찬가지로 이번 보고서에서 수행된 대기오염물질 배출 저감 평가는 미래 시나리오들이 펼쳐 수 있는 가능한 미래를 보여주지만 본질적으로는 불확실할 수밖에 없다. 베이스라인 시나리오 상의 배출은 외생요인인 인구와 거시경제 예측에 따라 결정된다. 배출을 일으키는 동인은 한국의 경제발전에 대한 낙관적 또는 비관적 시각에 따라 달라질 수 있다. 또한 <표 3.15>에 정리되어 있는 바와 같이 이번 평가에 반영된 정책들은 각각 구체적인 목표와 일정을 가지고 있는데, 정책 실행을 위한 여러가지 현실적인 장애요인을 고려하지 않았을 수 있다. 대규모 저감 정책을 시행하기 위해서는 정치, 경제, 사회, 문화와 연계된 여러가지 난관들이 있을 수 있다. 저감 정책을 파악하고 포함하는 과정에서 각 정책의 방해요인은 무엇이며 이러한 요인들이 정책 실행에 미칠 수 있는 영향에 대한 세부적인 분석이 충분하지 않을 수 있다.

또한 이번 분석에 포함되지 않은 또 다른 어떤 저감대책이 이행되어 향후 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출 감소에 상당히 기여할 수도 있다. 예를 들어 2장에서 다룬 서울, 인천, 경기 지역의 미세먼지 계절관리제는 12월에서

3월까지 고농도 미세먼지가 빈발하는 시기에 배출을 줄이기 위한 선제적 대응방식이다. 하지만 이러한 조치 이행 일 수는 제한되어 있기 때문에 LEAP의 결과물로 나오는 연 단위 배출에 미치는 영향은 판단하기 어려울 수 있다. 또한 유기용제 또는 바이오매스 소각으로 인한 배출 저감, 비산먼지 저감 역시 LEAP 분석에서 고려되지 않았다. 앞으로는 이번 연구에서 제대로 고려하지 못했던 이러한 대책들을 평가할 수 있도록 평가 분석 범위를 확장해야 한다.

탄소중립 시나리오 및 대책의 경우, 이번 연구 또한 서울, 인천, 경기 지역의 국가 탄소중립 계획 이행 영향에 초점을 맞추었다. 이에 따라 최상위 단계 탄소중립 계획을 기반으로 각 지역에 대한 예측을 종합하게 되었다. 예를 들어 서울과 같은 일부 지역이나 도시의 경우는 기후변화 완화를 위한 별도의 지역 차원 계획이 있고 구체적인 이행 목표와 일정을 가지고 있지만, 대한민국의 모든 지역이나 도시가 그럴 만한 여력이 있는 건 아니었다. 서울, 인천, 경기 지역 전체에서 분석의 일관성을 유지하기 위해 이번 분석에는 국가 차원의 계획 이행만 이행을 중심으로 다루었다.

04

서울, 인천, 경기 지역 대기오염문제 해소

4.1

서울, 인천, 경기
지역에서 지난 수십 년간
대기오염이 개선될 수
있었던 여러가지 이유

4.2

미래 서울, 인천, 경기
지역 대기오염의 지속적
개선을 위한 권고 사항



주요 결과

- 01 서울, 인천, 경기도는 대기오염문제로 고심하고 있는 많은 다른 도시들에게 모범사례를 제공한다. 과거 수십년 간 서울, 인천, 경기도는 여러 복합적인 활동을 통해 대기오염물질 배출을 감축할 수 있었고 이와 같은 감축 활동들은 다른 도시에도 적용 가능하다.
- 02 대기오염 개선 활동을 살펴보면 다음과 같다. i) 서울, 인천, 경기도의 대기질 관리를 위해 강력한 법적 제도를 개발하고 이에 따른 적절한 재원을 투입하였다. ii) 대기오염물질 배출목록과 조밀한 관측망 등 서울, 인천, 경기도는 대기오염에 관한 장기 데이터를 수집하고 재원을 투자하였다. iii) 서울, 인천, 경기도는 대기오염이 인체에 미치는 여러가지 부정적인 영향을 입증하였다. iv) 주요 배출원에 대한 대규모 저감 대책이 이행되었다. v) 대기오염 개선을 위해 중앙정부와 지방정부가 함께 협업하였다.
- 03 이와 동시에 서울, 인천, 경기도는 다른 대도시와 마찬가지로 향후 30년동안 기후변화 완화를 위한 탈탄소 도달이라는 과제에 직면해 있다. 탈탄소 달성을 위한 완화조치는 대기오염을 상당부분 감소시킬 수 있기 때문에 그 지역에 상당한 편익을 가져올 수 있다. 그러므로 대한민국과 서울, 인천, 경기도는 대기오염과 기후변화라는 두 의제를 통합하기 위해 노력해야 한다.



4.1 서울, 인천, 경기 지역에서 지난 수십 년간 대기오염이 개선될 수 있었던 여러가지 이유

이번 평가는 지난 15년간 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 개선 정도와 향후 이 지역의 대기오염 양상이 어떻게 변화할 수 있는지를 분석했다. 서울, 인천, 경기 지역은 지난 20년간 초미세먼지 농도가 낮아져 서울, 인천 경기 지역 및 그 외 지역의 배출량이 감소하여 대기질이 크게 개선되었다. 뿐만 아니라 국외의 배출도 감소하여 대기오염물질이 국경을

넘어 서울, 인천, 경기 지역으로 이동하는 양도 줄었다. 이번 평가는 과거 15년 동안 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 개선이 가능했던 여러가지 이유를 아래와 같이 정리하였다. 자국의 대기질 관리를 위해 노력하는 다른 나라들도 서울, 인천, 경기지역에서 시행되었던 대기오염 정책에서 많은 것을 배울 수 있을 것이다.



법제도는 국가 및 지역 수준에서 해야 하는 역할과 책임이 구체적으로 법에 명시되어 있어 여러 대기오염 관리 이행 시 누구에게 책임이 있는지 명확하게 확인할 수 있어 효과적이다.

이유 #1:

대기질 관리를 위한 견고한 법적 체계 구축 및 제도 이행을 위한 적절한 재정 지원

2장에서 설명한 바와 같이 대한민국과 서울, 인천, 경기의 대기오염 관리에 적용되는 법은 세가지다. 법제도가 중요하고 효과적인 이유는 국가 및 지역 수준에서 해야 하는 역할과 책임이 구체적으로 법에 명시되어 있기 때문이다. 대기오염 관리의 여러 구성요소를 이행할 때 어떤 부서가 무엇을 담당할지 명시되어 있다. 예를 들면 대기오염측정망 설치의 지방정부 소관이며 대기오염물질 배출목록 작성은 환경부 소관이다. 따라서 법제도는 **i) 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 농도와 배출을 추적하는데 필요한 도구들을 마련해주고, ii) 이 도구들을 각기 어떤 조직에서 담당할 지도 명확히 제시한다.**

또한 법제도는 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 개선을 위한 기획 과정을 명확하게 정하고 있다. 국가 차원의 대기오염 개선 계획을 짜고, 다음으로 적용되는 시·도의 지역단위 계획을 수립할 수 있는 시스템이 구축되어 있다. 따라서 국가 차원에서 대기오염 관리 목표의 방향성이 명확하게 제공되는 동시에 이러한 목표 달성에 필요한 활동에 지역의 구체적인 상황을 반영할 수 있다. 3장에서 설명된 것처럼 서울, 인천, 경기의 주요 대기오염 배출원은

각각 상이하며, 이는 지역별로 각각의 정책효과가 서로 상이할 수 있음을 의미한다. 한국의 이러한 시스템 덕분에 서울, 인천, 경기 지역은 광범위한 국가 차원의 계획 안에서 각 지역의 상황을 반영한 계획을 수립할 수 있었다.

마지막으로 법제도는 주요 대기오염물질 배출 부문과 관련된 구체적인 법령을 제공함으로써 해당 부문을 규제하고 배출을 감소시킬 수 있도록 하며, 수송과 산업 부문의 배출 저감을 위한 주요 수단까지 포함한다.

뿐만 아니라 법제도의 이행을 뒷받침하기 위해 지난 수십 년 동안 상당한 투자를 추진하여 충분한 재원을 마련하였다. 2007년부터 2020년까지 89억 달러를 투자하여 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염에 대처할 수 있는 강력한 과학적 기반을 구축하는 한편, 차량 대상 배출허용기준의 수립 및 시행과 같은 완화조치를 우선적으로 이행하였다.

대기오염 관리를 위한 법제도가 충분히 갖춰진 나라는 많지 않다. 다른 나라와 도시의 경우 기존 법제도가 국가 및 지역 차원의 대기오염 관리를 어떻게 통합하고 조율하는지 명확히 규정해두지 못한 경우가 많다. 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 관리를 위한 법제도는 이러한 국가들에 대기오염 관련 법이 여러 이해관계자에게 명확한 역할과 업무를 제시하는 방식에 대한 모범사례가 될 수 있다.

많은 개발도상국과 도시들은 대기오염 수준과 영향 및 오염을 일으키는 배출원을 파악할 수 있는 기본적인 연구조사가 부족한 상황이다.

이유 #2:

장기적으로 방대하게 수집한 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 데이터 활용

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 관리 법제도 덕분에 지난 수십 년 동안 상당한 양의 대기오염 관련 데이터가 수집되었고, 이로 인해 대기오염물질 농도를 낮추는데 필요한 정보를 직접 찾을 수 있는 여건이 마련되었다.

법제도 하에 의무적으로 데이터들이 수집된다. 서울, 인천, 경기 지역 대기오염 측정망은 시간 단위로 여러 대기 구성물질을 측정하며 수백 개의 관측지점으로 구성되어 있다. 이렇게 수집된 방대한 양의 데이터는 웹사이트를 통해 일반에 공개되며¹¹ 대기오염 수준을 국민에 알리는 데 사용될 뿐만 아니라 경향 분석, 배출원별 배출 비중, 건강영향평가 등 다양한 연구조사에도 활용되고 있다. 대기오염 배출목록은 수십 년간 축적된 대기오염물질별 연간 배출량과 주요 배출원의 비중을 국가, 시·도, 시·군·구 단위로 제공한다. 이를 통해 이행 정책이 해당 지역 내 배출에 끼치는 영향을 평가하고 계량화 할 수 있다.

서울, 인천, 경기의 대기오염 관리 법체계에서 파생된 구체적인 데이터 외에도, 과거 수십년 동안 많은 학문적 연구를 통해 서울, 인천, 경기의 대기오염의 특성이 밝혀

지기도 했다. 2장에서 설명한 이 연구는 지역별 배출량, 배출부문 및 지리적 여건뿐 아니라 대기질 농도, 노출, 건강 영향에 대한 연관 관계를 이해할 수 있게 해 준다. 그리고 서울, 인천, 경기에서 대기오염 개선 정책 개발과 지역별 대기오염 영향 평가를 위한 추가 정보를 제공한다. 또한 성별로 구분된 환경데이터(예: 개인별 환경 위험 노출 데이터)는 환경 정책의 목표 설정과 이행 성과에 기여할 수 있다.

한편 방대한 양의 연구조사는 국가 및 지방정부, 기관, 학계, 그리고 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염에 전문성을 가진 연구기관들의 상당한 역량을 보여준다. 서울, 인천, 경기 지역의 전문가를 통해 정책 이행 전, 이행 과정 및 이행 후를 제대로 평가할 수 있다.

많은 개발도상국과 도시들은 대기오염 수준과 영향 및 오염을 일으키는 배출원을 파악할 수 있는 기본적인 연구조사가 부족한 상황이다. 법제도 외에도 한 국가 또는 도시의 대기오염 특성을 파악하기 위한 연구조사 프로그램이 반드시 마련되어야 한다. 배출, 농도, 건강위해성에 대한 이해는 서울, 인천, 경기 지역 방식과 같이 대기오염을 효과적으로 줄이기 위한 필수 과정인 것이다.

이유 #3:

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염으로 인한 건강위해성 입증

대기오염이 건강에 미치는 부정적인 영향은 여러 연구들을 통해 입증되었다. 최근까지 건강위해성에 대한 연구는 주로 북미와 유럽에서 실시되어왔지만 근래 들어 북미 이외의 지역에서도 연구가 이루어지고 있다. 세계적으로 건강영향평가 연구는 역학적 연구 결과를 적용함으로써 대기오염의 건강 부담을 추정하는 방식이었다. 이러한 건강영향평가 연구는 여러 지역에서 대기오염이 인구에 미치는 위해한 영향을 보여주는 했지만, 지역마다 대기오염 구성 물질도 다르고 해당 인구의 건강상태도 다르기 때문에 지역 단위 연구의 응용연구에 해당한다.

서울, 인천, 경기 지역에서 다수의 역학연구가 실시되었고 이를 통해 수집한 데이터를 직접 근거로 활용함으로써 대기오염의 건강위해성을 살펴볼 수 있었다. 즉 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염이 성인 및 아동에 미치는 영향은 물론 사망률, 유병률 같은 평가변수에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 수 있는 직접적인 근거가 마련된 것이다. 서울, 인천, 경기에서 이러한 연구가 가능했던 이유는 세부적인 데이터가 축적되어 있어 대기오염물질 농도와 여러 건강상 인과관계를 분석할 수 있었기 때문이다. 서울, 인천, 경기 지역에는 조밀한 대기오염측정망이 갖추어져 있기 때문에 여러 위치에서 대기오염물질 농도에 관한 세부적인 정보를 확보할 수 있고 대기오염물질 농도와 비교할 수 있는 건강통계자료도 가지고 있다. 이에 따라 대기오염 노출로 인한 영향도 파악할 수 있었다. 하지만 개발도상국과 도시들 중에서는 이 정도 수준의 자료를 보유한 경우가 드물기 때문에 해당 지역사회 내에서 대기오염이 건강에 미치는 영향을 평가할 수 있는 직접적인 근거가 없다.



서울 도로 위 “미세먼지 신호등”.
© 유엔환경계획(UNEP)/ 서은영

2016년부터 대기질에 대한 시민의 우려가 높아져 ‘미세먼지 대책위원회’를 포함해 공공-민간-산업계 간의 다양한 형태의 협력이 시도되었다.

이유 #4:

주요 배출원을 대상으로 주요 감축 대책 이행

법제도나 세부적인 자료 및 연구가 대기오염 개선 계획을 위한 업무 분담 및 대기오염 감축에 가장 효과적이고 세부적인 대책을 마련하는 근거는 맞지만, 실제로 지난 수십 년간 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염을 개선한 것은 대기오염물질 배출을 직접적으로 감소시키는 주요 감축 대책의 시행이다.

이 보고서 제3장에 제시된 법제도, 과거 연구조사, 배출 평가 내용을 보면 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염을 감소시킨 구체적인 대책이 있었음을 알 수 있다. 가장 큰 효과를 나타낸 대책은 서울, 인천, 경기 지역의 수송 부문 대책으로, 차량 배출허용기준을 지속적으로 강화하여 지난 15년간 수송부문 배출량이 크게 감소했다. 또한 가장 집중적인 투자가 이루어진 부분도 수송 부문으로, 2007년부터 2020년까지 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 관리를 위해 집행한 총 투자금액의 56%에 달하는 예산이 수송 부문에 집중되었다. 이는 서울, 인천, 경기 지역의 차량이 신차로 교체되면서 오염물질 고배출 차량이 저배출 차량으로 교체되었음을 의미한다. 이 연구의 과거 서울, 인천, 경기의 대기오염물질 배출목록에서 수송 부문 배출 감축을 확인할 수 있고 해당 정책 이행효과를 분석하고 문서화할 수 있었다.

또한 서울, 인천, 경기 지역의 대기질 개선을 위한 기본계획에는 다른 부문을 포괄하는 정책이 포함되어 있다. 구체적으로 대형 점오염원 대상 총량관리제 및 배출권거래제와 오염자 부담원칙의 이행 등이 이에 해당된다. 소규모 사업장의 경우에는 배출량 저감을 위해 직접적인 재정 지원을 제공하였다. 한편 2장에서

정리한대로 가정, 농업, 비도로 이동오염원, 폐기물 부문에서 발생하는 배출을 관리하기 위한 추가적인 대책도 마련되었다.

2016년부터 대기질에 대한 시민의 우려가 높아져 ‘미세먼지 대책위원회’를 포함해 공공-민간-산업계 간의 다양한 형태의 협력이 시도되었다. 국민의 인식이 시민사회와 시민사회단체 전반으로 확대되면서 언론 역시 이 문제를 심각하게 다루기 시작했다. 이러한 분위기가 형성되면서 정부 정책과 예산 결정 과정에 영향을 주었고 대기질 개선에도 효과가 있었던 것으로 보인다. 국민적 공감대와 협력을 얻는 것이 크게 어렵지 않았던 이유는 미세먼지와 황사가 국민건강에 직접 영향을 주는 것으로 인식되었기 때문이다.

대통령령 29713호에 따라 2019년에 대통령 직속 자문위원회 형태로 ‘국가 기후환경 회의’가 설립되었다. 자문위원회 위원은 중앙정부, 지자체, 학계, 산업 및 민간 부문에서 위촉되었다. 그리고 2020년 11월 국가기후환경회의 중장기 국민정책제안을 발표하면서 2030년까지 초미세먼지 농도 목표를 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하고, 기후와 대기를 망라한 수송, 발전 등 부문별 과제를 정했다. 2021년 4월 30일, 국가기후환경회의 활동이 종료되면서 이 조직은 대통령직속 ‘2050탄소중립위원회’(‘탄소중립녹색성장위원회’는 2022년 발족)로 통합되었다. 2019년 국무총리실 소속 ‘미세먼지특별대책위원회’가 설치되었고 ‘미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법’에 따라 정책, 계획, 이행관련 문제를 검토하는 임무를 맡았다.

다른 지역 배출원의 배출 개선으로 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 수준이 개선된 것은 다른 국가와 도시들이 주목할 만한 현상이다.

이유 #5:

대기오염 개선을 위한 중앙정부와 지방정부의 협력

2장에서는 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 농도 중 상당 부분이 서울, 인천, 경기 외부에서 발생한 대기오염물질에 의해 결정된다는 것을 보여준다. 여기에는 대한민국에서 서울, 인천, 경기를 제외한 나머지 지역에서 배출되는 오염물질도 포함된다. 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지 상당부분도 국내 다른 지역에서 유입된 것이다. 2장에서 제시한 평가분석을 보면 차량 교체 등 서울, 인천, 경기 지역에서 실행되었던 여러 대책으로 인해 2005년에서 2020년 사이 서울, 인천, 경기 외 지역의 배출도 감소했다. 대한민국의 대기질 관리를 위한 법제도는 배출이 직접 발생하는 장소, 도시, 지역에만 국한하지 않고, 배출이 이동하는 구역까지 포함하여 대기오염을 개선할 수 있도록 전국 단위의 정책과 조치를 이행하고 조율할 수 있는 기반을 제공한다.

연구에 따르면 서울, 인천, 경기를 제외한 한국 내 다른 지역의 배출 감소 외에도 동북아시아 지역의 배출량 또한 감소하였으며, 그 결과 특히 최근 동북아 지역에서 서울, 인천, 경기 지역으로 유입되는 오염물질의 양도 감소하였다. 동북아시아 지역의 배출 감소 및 이로 인한 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도 개선 사례를 통해 대기오염 문제를 해결하기 위한 국제협력의 중요성이 강조된다.

다른 지역 배출원의 배출 개선으로 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 수준이 개선된 것은 다른 국가와 도시들이 주목할 만한 현상이다. 한국의 대기오염관리 관련 법제도는 단지 오염이 발생한 지역만 대상으로 하지 않고 전국 단위로 대기오염 문제를 다룰 수 있도록 하는 메커니즘을 두어 대기오염물질 농도 개선 효과를 높일 수 있었다. 다른 국가들도 한국과 같은 메커니즘을 마련할 수 있다면 국제적으로도 대기오염물질 배출 저감을 위한 협력 조치를 통해 대기오염물질 농도 감소 효과를 극대화 할 수 있을 것이다.

대기오염물질 배출 저감을 위한 국가간 협약을 통해 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 저감이 이루어진 것은 아니다. 하지만 특히 유럽에서는 국경을 넘는 장거리 대기오염물질에 관한 협약을 맺고 지역차원의 협력을 통해 유럽 지역의 대기오염물질 개선 성과를 달성했다. 동북아시아에서도 이와 같은 지역적 협력을 통해 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염개선을 가속화하고 더 나아가 지역 전체의 개선도 바라볼 수 있을 것이다(4.2절 권고안 4).



서울, 인천, 경기 지역에서 운행 중인 저배출 차량은 오염물질을 배출하지 않고 깨끗한 연료로 운행되어 대기질 개선에 기여하고 있다.

이유 #6:

대기질 개선을 위한 지역맞춤 선도정책 마련

서울, 인천, 경기 지역은 기본계획 외에도 대기환경 목표 달성을 위해 다양한 정책을 공통으로 수립 하였으며, 이와 더불어 각 지역적 특성에 맞는 맞춤 선도 정책들을 발굴하고 시행 해왔다. 먼저 세 지역이 공통으로 시행한 대기질 개선 정책은 다음과 같다.

- + **(공통) 미세먼지 예·경보제 및 비상저감조치:** 자동차 보급 확대로 인해 대기오염이 증가하고 미세먼지에 대한 시민의 관심이 급증함에 따라, 대기오염 감소 및 국민 건강도모를 위해 서울, 인천, 경기 지역 모두 미세먼지 예·경보제를 도입하고(서울: 2005년, 인천: 2008년, 경기: 2007년), 초미세먼지 경보 시스템 운영을 시작했다(서울: 2013년, 인천: 2014년, 경기: 2015년). 또한 고농도 초미세먼지 발생 시 신속한 미세먼지 농도 저감을 위해 '비상저감조치'를 시행하였다(서울: 2017년 7월, 인천: 2017년 2월, 경기: 2018년 8월). 2018년 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법'이 제정되고 2019년 시행됨에 따라 지자체는 비상저감조치에 대한 법적 근거를 마련하였고, 해당 법안에 따른 미세먼지관리 종합대책을 시행하여 자동차 운행 제한과 대기오염물질 가동시간 조정, 학교 휴업 권고 등의 조치 및 미세먼지 저감사업을 시작할 수 있었다. 이와 더불어 2019년 '재난 및 안전관리 기본법' 에서 미세먼지를 사회재난으로 규정하면서 초미세먼지 재난위기경보(관심, 주의, 경계, 심각) 발령 시 비상저감조치를 단계적으로 강화하여 시행하게 되었으며, 실시 범위 또한 전국으로 확대되었다.
- + **(공통) 미세먼지 계절관리제:** 계절관리제는 고농도 미세먼지가 발생하는 겨울부터 초봄까지(12월부터 이듬해 3월까지) 평상시보다 강화된 미세먼지 배출저감 및 관리 조치를 시행하는 사전 예방적 특별대책으로, 서울, 인천, 경기 지역 모두 2019년 12월 ~2020년 3월 간 처음으로 도입되었다. 계절관리제는

미세먼지 농도가 이미 높아진 후 사후적으로 취해지는 '비상저감조치'의 한계점을 보완하였다. 5등급 차량 상시 운행제한, 공공기관 차량 2부제, 대기오염물질 배출사업장 점검, 미세먼지 집중관리구역 지정 관리, 취약계층 보호를 위한 시설점검 강화 등 추가적인 배출 감축 조치를 시행하며 지역별 특화 대책을 함께 추진한다.

- + **(공통) 가정용 친환경 보일러 설치의무화:** 서울, 인천, 경기도는 미세먼지 관리계획의 일환으로 대기오염을 저감하고 난방비를 낮출 수 있는 친환경 보일러 보급을 시작했다(서울: 2015년, 인천: 2017년, 경기: 2017년). 친환경 보일러에는 미세먼지를 유발하는 질소산화물(NOx) 배출 저감장치가 장착되어 대기오염물질 배출이 적으며, 에너지 효율 또한 높은 것이 특징이다. 2020년부터 시행된 '대기관리권역법'에 따라 서울, 인천, 경기지역 공통으로 친환경 보일러 설치가 의무화되었다. 서울시의 경우 2018년부터 환경영향평가 기준을 개정하면서 대형건물(100,000m³ 이상) 신축에 친환경 보일러 설치를 의무화했으며, 서울특별시 녹색건축물 조성지원 조례에서 500~10만 m³ 중 30세대 이상 건축물에 대해 환경마크 인증 친환경 보일러 설치를 의무화하였다. 인천시는 2017년부터 보급 및 지원 사업을 시작하여 2022년까지 약 5만 8천여대의 가정용 친환경 보일러를 보급하였다. 경기도는 2017년부터 보급 및 지원 사업을 시작하여 2022년까지 약 29만 1천여대의 친환경 보일러를 보급하였다.
- + **(공통)친환경 버스도입:** 친환경 버스는 대기오염물질을 배출하지 않고 청정 연료를 사용하여 대기환경 개선에 도움을 주는 수단으로 서울, 인천, 경기 지역에 모두 도입되어 왔다. 서울시는 2002년 한국 월드컵 개최 준비를 계기로 저공해 차량을 도입하여 탈디젤화를 추진한 결과 2014년 시내 버스의 100%가 CNG 버스로 교체되었다. 또한 서울시는 기업들과의 협약을 통해 전기버스 기술개발을 추진하여 2010년 세계 최초로 전기버스를 상용화하는데 성공했다. 2022년 서울시 시내버스 7,393대 중 수소버스는 9대, 전기버스는 733

대를 운영하고 있다. 인천시는 2019년 친환경 전기버스 15대 도입을 시작으로 2022년까지 150대로 확대하고, 2030년까지 수소버스 선도도시 조성을 목표로 인천시 시내버스 약2천대를 모두 친환경 수소버스로 전환할 예정이다. 경기도는 2016년 친환경 버스를 도입하기 시작하여 2022년까지 전기버스 910대, 수소버스 11대를 운영하고 있다.

- + **(공통) 공해차량 운행제한:** 공해차량 운행제한 제도는 자동차로 인한 지역 내 대기 오염을 개선하기 위한 제도로 대기오염 물질을 많이 배출하는 차량의 경우 통행을 제한하도록 지역을 설정하고 이를 지키지 않을 경우 과태료가 부과된다. 우리나라는 2016년 환경부 및 서울, 인천, 경기 간 협약을 통해 공해차량 제한지역(대기관리권역내)운행제한제도시행계획을 수립하였고, 카메라 설치 등 단속을 위한 시스템을 구축하였다. 2017년 미세먼지 비상저감 조치 시 차량운행을 제한하고, 2018년 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법' 제정에 따라 노후자동차 상시 운행제한 및 단속을 시행하였다. 또한, 2019년 미세먼지 계절관리제 도입 이후로 계절관리제 운행제한 단속을 시행하고 있다.

다음은 앞서 언급한 공통적인 정책 이외에 서울, 인천, 경기 지역이 수립하여 실시해 온 지역별 맞춤 대기질 개선 정책들이다.

- + **(서울) 『맑은 서울 2010』 및 『더 맑은 서울 2030』:** 서울시는 2007년 '맑은 서울 2010'이라는 특별 조치를 발표하여 대기질 개선 관련 정책들을 대규모로 실시하였다. 그 결과 2011년 서울의 미세먼지(PM_{10}) 농도는 2006년 대비 22% 감소했으며 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 2020-2021년 연속으로 최저치를 기록했다. 그러나 2021년 서울의 초미세먼지 연평균 농도는 $20 \mu g/m^3$ 으로 국가대기환경기준($15 \mu g/m^3$) 및 파리, 런던, 로스앤젤레스 같은 세계 주요 대도시에 비해 여전히 높은 편이었다. 이에 따라 서울시는 2022년 9월 기존 대책 대비 더 강력한 조치들로 구성된 대기질 개선 종합대책인 '더 맑은 서울 2030'을 발표하였다.
- + **(서울) 녹색교통지역지정 운행제한:** 서울시는 2017년 5월 옛 서울인 한양도성 내부 ($16.7km^2$)를 전국 최초로 '녹색교통진흥 특별대책지역(녹색교통지역)'으로 지정하여 종합 교통 수요관리와 녹색교통 활성화를 통해 도심 교통 상황을 집중적으로 관리하고 있다. 제도 도입을 위하여 2017년 7월 차량운행제한 시범운행을 실시하였고, 2017년 12월부터 운영하고 있다.



서울시 노후 경유차량 운행제한제도 관리 화면.
© 서울특별시

- + (인천) 수소대중교통체계 추진:** 인천광역시는 수소 대중교통체계 진입 가속화를 통한 온실가스 감축 및 미세먼지 저감을 목표로, 2019년 수소 승용차 214대 보급을 시작으로 2022년 말까지 수소트럭 등 총 1,615대를 보급하였다. 2023년 1월에는 국내 최초로 민간 수소 고상버스 4대를 보급하였고, 2024년까지 총 700대의 수소버스를 도입할 예정이다. 또한 2019년 인천시 1호 수소충전소를 시작으로 2023년말까지 총 14곳의 수소충전소를 조성할 계획이며, 2030년까지 인천지역 곳곳에 52개소의 수소 충전인프라를 구성을 추진 중이다.
- + (인천) 민·관 협력을 통한 자발적 대기오염 저감 추진:** 인천시는 항만, 공항, 발전소 (전국 발전설비의 9%, 수도권 발전설비의 약 40%) 등 관내 대규모 배출원에 대한 자발적 오염물질 감축을 유도하기 위해 민·관협력을 추진하고 있다. 2010년 대형 발전소 및 정유사와 「Blue Sky 협의회」, 2016년 공항, 항만, 매립지, 가스공사와 「클린공사 협의회」를 구성하여 2조 5,489억원에 달하는 자발적 환경개선 사업을 진행하고, 이를 통해 오염물질 배출량을 2011년(20,748톤) 대비 67% 감축(6,912톤, 2022년 기준)하였다. 특히, 석탄화력발전에서 발생하는 대기오염물질 피해분석 및 저감사업을 추진하기 위해 실시되었던 「영흥화력발전소 민·관 공동조사단(1996)」은 대표적인 민·관협력의 사례이다.
- + (경기) 『알프스 프로젝트』 및 『대기환경관리 시행계획』:** 경기도는 2016년 고농도 미세먼지 줄이기를 통한 도민 건강보호 대책인 ‘알프스 프로젝트’를 수립하여 2020년까지 미세먼지 배출량을 1/3수준으로 감축한다는 목표를 설정하고 발생원별 미세먼지 기여도 분석, 정보제공, 저감사업 등 다양한 미세먼지 관리정책을 추진하였다. 또한, 2020년 4월, 서울, 인천과 달리 인구가 밀집한 도시지역과 도·농복합 지역이 혼재되어 있는 독특한 지역 실정에 맞춘 ‘경기도 대기환경관리 시행계획 (2020~2024)’을 수립하였다. 특히, 전국에서 가장 높은 인구, 제조업 수, 차량 대수를 보유한 지역의 특성을 반영하여 교통, 사업장, 생활오염원 등 부문별 특화된 대책을 추진중이다.
- + (경기) 집중관리도로(구역) 지정 운영 및 도로 재비산먼지 저감사업:** 경기도는 미세 먼지 또는 초미세먼지의 연간 평균농도가 환경기준을 초과하고 취약계층 이용시설이 집중된 지역을 대상으로 미세먼지 회피, 정보제공, 저감시설을 지원하는 사업을 시행 중이다. 2020년 3월 이래 총 8개소 8.5km²를 집중관리구역으로 지정하였다. 또한 계절관리기간 동안 도로 재비산먼지 저감을 위해 집중관리도로를 선정하고 31개 시군 총 86개 구간(487.6km)에 대하여 일 2~4회 이상 도로청소실시, 도로 재비산먼지 제거 차량 구매 지원, 살수차 확대 보급 등을 추진중이다.

4.2 미래 서울, 인천, 경기 지역 대기오염의 지속적 개선을 위한 권고 사항

과거 수십 년 동안 서울, 인천, 경기 지역에서 이루어진 상당한 개선에도 불구하고 이 지역의 대기오염은 여전히 국내 및 국제 건강보호 기준과 지침을 초과하는 수준이다. 수십 년 동안의 노력을 통해 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 농도를 개선했음에도 불구하고 지속적인 정책을 이행하지 않으면 농도 감소 경향은 보장되지 않는다. 2장에서 설명된 바와 같이 베이스라인 시나리오 상의 대기오염물질 배출 예측을 보면 추가 조치 이행이 없으면 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출은 현 수준으로 유지되거나 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

하지만 2장에서 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염물질 배출을 추가로 감소시킬 수 있는 기회로 기존의 정책을 이행하는 방법 또는 우선순위가 아니었던 주요 배출원을 대상으로 새로운 정책을 마련하는 방법에 대해서도 설명하였다.

대기오염물질 배출을 추가로 저감하기 위해서는 지난 15년 동안 서울, 인천, 경기 지역이 이미 경험했던 정책 이외 다른 수단들이 이행되어야 한다. 북미, 유럽, 아시아 국가 등 많은 도시들은 대부분 연소 후 대기오염물질 배출을 제어하는 기술기반 조치를 이행하면서 대기오염을 개선해왔다. 유엔환경계획(UNEP)의 2019년 보고서 '아시아 태평양 지역의 대기오염: 과학기반 솔루션'에 따르면 이와 같은 조치는 전통적인 대기오염 관리수단(표3.15)에 해당한다(UNEP 2019b). 그러나 아태지역 25개 우수 청정대기

대책을 제시한 동 보고서는 과거에는 대기오염관리 계획에 포함되지 않았으나 대기오염물질 배출 저감에 효과를 보일 수 있는 조치수단들을 광범위하게 다루고 있다. 그 내용은 <표 4.1>에 수록되었다. '차세대 조치'로 분류된 대책 중 일부는 한국에 실시되었고, 이미 진전과 성과를 이루어 냈다. 예를 들면 농업 부문의 농작물 잔류물을 처리할 때 남아시아나 동남아시아에서 흔히 보는 노천소각을 하지 않는 것이다.

아태지역의 마지막 대책은 대기오염물질 배출 저감을 위한 신규 대책 수단의 개발이었다. 많은 경우 이러한 대책들은 온실가스 배출 저감과 대기오염 및 기후변화 완화 효과를 동시에 공략하고, 재생 에너지 발전, 에너지 효율성 개선, 전기차 보급 등이 이에 해당된다. 이러한 경우 연소 후 대기오염을 관리하는 방식에서 벗어나 대기오염물질을 배출하지 않는 기술과 연료로 전환된다. 이와 같은 조치들은 기존의 대기오염 관리 수단과 비교할 때 더 광범위하고 다양한 장점을 지닌다. 가장 대표적으로 특정 공정 또는 부문에서 대기로 배출되는 모든 오염물질의 배출이 동시에 줄어든다. 다시 말해 대기오염물질 중 일부 물질의 배출저감에 효과를 내는 기존의 관리 방식(예. 디젤분진필터를 장착하면 입자상 물질(PM) 배출 저감에만 효과 있음)과 달리, 이 방식은 모든 대기오염물질을 배출 단계에서부터 감축할 수 있다.

표 4.1

‘2019 아시아 태평양 지역 대기오염: 과학기반해법’ 보고서의 청정대기 우수 대책(전통적인 관리대책, 차세대 관리대책, 대기오염 편익 동반 개발대책으로 분류)

모든 아시아 국가에 적용되는 전통적인 대기오염 관리대책	
연소 후 관리	발전소와 대규모 산업에 최첨단 사후 대책을 도입하여 이산화황, 질소산화물, 입자상 물질(PM) 배출 저감.
산업 공정 배출 기준	철강 플랜트, 시멘트 공장, 유리생산, 화학산업 등 산업에 강화된 배출허용기준 도입
도로 차량 배출 기준	전체 배출 기준 강화; 경량 자동차와 대형 디젤 차량 규제에 집중
차량 검사 및 유지보수	차량 의무 점검제도
먼지관리	건설 및 도로 분진 억제; 그린 구역 확장
차세대 대기오염 관리대책 (다양한 배출원 대상)	
농작물 잔여물	노천 소각 엄격 금지 등 농작물 잔여물 관리
생활 쓰레기 소각	생활 쓰레기 노천 소각 엄격 금지
가축 분뇨관리	덮개형 보관소 및 분뇨의 효율적 활용법 도입; 혐기성 소화 활성화
질소비료 사용	효율적인 활용법 확립; 요소에는 요소분해억제제 사용 또는 질산암모늄으로 대체
국제 해운	저항 연료 사용과 입자상 물질(PM) 배출 통제 의무화
유기용제 사용과 정유	산업용 및 DIY 용 저-솔벤트 페인트 도입; 누출 탐지: 소각과 회수
대기오염 개선(메탄 관련 대책)에 도움이 되는 개발(에너지, 농업, 도시계획)을 위한 우선순위 목표에 기여하는 관리대책 + HFC 대책	
재생에너지 발전	풍력, 태양, 수력 발전을 확장할 수 있는 인센티브 제도를 활용하고 효율이 낮은 플랜트는 단계적 폐지 수준
가구 에너지 효율성	가전, 건물, 조명, 냉난방의 에너지 효율성 개선을 독려할 수 있는 인센티브 마련; 지붕 태양광 설치 독려
산업 에너지 효율성 기준	산업 부문 적극적 에너지 효율성 기준 도입
전기차	전기 차량 사용 활성화
대중교통 개선	개인 차량 사용에서 대중교통 활용 전환
생활 폐기물 관리	가스 사용 등 배출원별 분리 처리가 가능한 중앙집중식 폐기물 수집 활성화
논	담수답의 간헐적 급기 활성화
폐수 처리	바이오가스 회수 등 2단계 처리 도입
(HFC) 냉매 교체	키갈리 개정의정서 준수 보장 ¹²

12 키갈리 개정의정서: 2016년 10월 ‘오존층 파괴 물질에 관한 몬트리올 의정서’ 개정 https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=_en

대기오염물질 배출을 줄이는 효과 외에도 차세대 조치를 이행하고, <표4.1>에 열거된 대책을 통해 이산화탄소 같은 온실가스 배출을 저감할 수 있다. 즉 이와 같은 대책들은 기후변화를 악화시키는 한 국가, 도시의 배출을 감축하는 동시에 해당 지역, 이웃 지역의 대기오염을 개선할 수 있다. 이러한 동시 효과는 2019년 UNEP 및 CCAC 보고서에 담겼으며, 보고서는 아시아 전역에서 25대 청정대기 대책을 모두 이행하는 것으로 인구 10억명이 사는 공간의 대기오염농도를 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮출 수 있으며 동시에 지구 온도 상승을 0.3°C 로 제어할 수 있다는 결론을 제시했다(UNEP 2019b).

이번 보고서의 분석 결과에 따르면 “2019 아태지역 대기오염: 과학 기반 솔루션 보고서”에서 **다음 단계를 위해 제시한 발전 대책을 이행할 경우 서울, 인천, 경기지역의 대기오염 배출을 더욱 감축할 수 있는 기회가 될 수 있다.**

첫째, 한국은 2050년까지 탄소중립을 선언했으며, 탄소중립 달성을 위한 서울, 인천, 경기 지역의 온실가스 저감대책(차량의 전면적인 전기화, 재생 에너지 발전, 에너지 효율성 강화 등)을 마련했다. 이번 평가 분석은 서울, 인천, 경기 지역을 포함하여 전국적으로 **탄소중립 시나리오 실현으로 온실가스 배출을 저감할 수 있을 뿐만 아니라 초미세먼지와 질소산화물 배출을 저감할 수 있음을 보여준다.** 이는 한국에서 탄소중립 시나리오 실현에 따른 과거 대기오염물질 개선에 대한 평가결과들과 일치한다. 예를 들어, 과거 한 연구에 따르면, 탄소중립에 도달하는 경우 전국적으로 초미세먼지 5만톤 이상, 질소산화물 100만톤 이상 배출 저감을 할 수 있다(Phillips 2022).

둘째로, 이번 연구에서는 탄소중립을 목적으로 한 저감대책을 이행하거나 현재의 계획과 전략상 추가대책을 실행한 이후에도 대기오염물질을 계속 배출하는 주요 배출원을 파악했다. 예를 들면 탄소중립 시나리오 이행 이후에도 산업부문 초미세먼지는 계속 배출되고 있으며 특히 비도로 부문은 상당량의 초미세먼지와 질소산화물을 계속 배출하고 있다. 농업부문에서 비료 사용에 따른 암모니아 배출은 탄소중립 이후에도 계속될 것으로 예상된다. **“2019 아태지역 대기오염: 과학 기반 솔루션 보고서”에 명시된 25 개의 청정 대기 대책들을 서울, 인천, 경기 지역에 적용하고 시행하면 계속되는 대기오염물질 배출을 줄일 수 있을 것이다(CCAC SNAP 2019).** 암모니아 배출을 줄일 수 있는 합성비료를 더욱 효율적으로 사용하거나 질산암모늄 등 다른 비료로 대체하는 대책들이 명시된 예에 해당한다. 산업부문과 비도로 수송 부문에서 청정연료로 전환하게 되면 이들 부문에서 해소되지 못한 대기오염물질 배출을 줄일 수 있는 다른 경로가 마련된 것이다(표4.1 및 권고안 2).

따라서 이번 분석을 통해 대기오염을 해소하는 정책을 지속적으로 이행하여 실제로 배출이 줄고 그 과정에서 기후변화 완화 노력이 통합될 경우 서울, 인천, 경기 지역에 어떤 이익이 있을지 전반적으로 파악하였다. 하지만 구체적인 조치에 대한 실천이 전제되지 않으면 분석을 통해 파악한 배출 저감 효과는 이론에 그치고 말 것이다. 지금까지의 진전을 바탕으로 대기오염 개선을 위해 무엇이 더 필요한지 파악함으로써 배출저감 목표를 달성하는 데 효과적인 권고안을 제시할 수 있게 되었다. 권고안은 해당 지역의 대기오염 현황에 대한 평가를 바탕으로 마련된 서울, 인천, 경기 지역을 위한 것이다. 그러나 이 권고안은 세 지역의 기후변화를 완화시키는 것과 동시에 자국의 대기질 개선을 위해 고심하고 있는 다른 도시와 지역에도 동일하게 적용될 수 있다. 권고안은 다음과 같다.

대기오염물질 배출목록 작성과 정기적인 업데이트는 배출 관련 대책의 실질적 이행 진전을 추적할 수 있는 핵심 활동이다.

권고안 1:

서울, 인천, 경기 지역의 기후변화 및 대기오염 개선 대책수립과 이행 과정의 통합

앞서 언급했다시피 서울, 인천, 경기 지역에서 대기오염 개선은 주로 대기오염물질 배출 감소를 위한 연소 후 처리기술 적용이라는 전통적인 방법을 통해 이루어졌다. 이 방법을 통해 많은 국가와 도시들 역시 과거 대기오염 개선 효과를 보았다. 하지만 온난화 제한 국제협약을 준수하고, 온실가스를 저감하기 위해서는 추가 조치가 필요한 것이 사실이다. 한국, 서울, 인천, 경기 지역에서 탄소중립을 위한 저감 대책들이 마련되었고, 이들 지역의 대기오염물질 배출 가능성을 수치로 계산했을 때, 저감 대책을 이행하지 않았을 때를 가정한 베이스라인 예측과 대비해 대기오염물질을 더 감축할 수 있다는 결과가 도출되었다.

온실가스, 단기체류 기후변화유발물질 및 기타 대기오염물질 등 모든 유형의 배출을 억제하기 위해서는 궁극적으로 대기오염 배출의 원인이 되는 제품, 에너지원 및 서비스에 대한 수요를 감소시키는 한편 기술적 조치를 이행하여 배출원에서부터 배출량을 줄여 나가야 한다. 이처럼 배출량 감축 전략을 통합하여 추진하는 방식은 이미 서울, 인천, 경기 지역의 배출량 관리를 위해 마련한 대책과 제3장에서 소개한 LEAP 모델링에도 반영되어 있다. 전기차로 적극 전환하고, 재생 에너지 확대 정책을 통해 한국이 기후중립 약속을 이행하면 추가적인 대기오염물질 배출 감축을 이루어 낼 수 있다. 그러나 국가 및 지방정부 차원의 여러가지 활동을 통해 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염과 기후변화 계획을 긴밀하게 통합할 수 있다.

2장에서 보듯이 대기오염물질 배출목록 작성과 정기적인 업데이트는 배출 관련 대책의 실질적 이행 진전을 추적할 수 있는 핵심 활동이다. 하지만 현재 온실가스와 대기오염물질 배출목록은 분리되어 있다. 이로 인해 온실가스와 대기오염물질 배출량 산정에 사용되는 데이터 간의 일관성이 부족할 수 있으며, 비효율적이기도 하다. 온실가스와 대기오염물질 배출량 산정에 필요한 데이터가 크게 겹치기 때문이다. **따라서 대기오염물질과 온실가스 배출량 자료수집을 통합하여 일관되게 관리할 수 있도록 권고한다. 대기오염물질 배출목록이 업데이트됨에 따라 배출 감축조치 이행결과로 나타나는 배출량 변화를 일관되게 평가할 수 있다.**

2장에서 설명한 법제도로 대기오염 개선을 위한 구체적 계획 마련을 위해 국가와 지방정부의 역할을 정할 수 있다. 법제도는 이러한 계획의 내용이나 실행 과정을 평가하여 제출해야 하는 연례 보고서 내용 등을 세부적으로 정하고 있다. 기후변화 대응조치가 대기오염관리 계획에 포함되도록 하기 위해 **서울, 인천, 경기 지역의 대기오염 관리를 위한 법령에 온실가스 배출 감축 관련사항이 반영되고, 탄소중립 달성 대책을 통한 대기오염물질 감소 효과가 대기질 관리 정책 및 보고서에 반영될 것을 권고한다.** 법제도의 개정이 불가능한 경우, 기후변화 및 대기오염 대응을 통합하여 연례 보고서에 포함시켜야 한다.

권고안 2:

기후변화 대응 대책에 의해 저감되지 않는 대기배출원 도출 및 완화대책 마련

탄소중립정책과 대기오염 관리 대책을 이행한 이후에도 여전히 서울, 인천, 경기 지역에서 주요 배출원으로 남아있는 부문들이 있다. 이러한 배출원들은 대기오염 관리 계획으로 통합 이행하여 세 지역에서 개선 효과를 극대화할 수 있도록 한다.

추가 대책이 필요한 주요 배출원에는 **농업 부문이 포함된다. 특히 합성/유기비료를 사용하면 현재 감축계획에서 고려되지 않은 암모니아 배출이 발생한다.** 암모니아는 대기오염물질로 질산암모늄 또는 황산암모늄 형성 반응을 한다. 암모니아 배출은 서울에서도 2차 무기에어로졸 생성량을 결정하는 인자인 것으로 보인다(Kim *et al.* 2021; Singh *et al.* 2021). 예를 들면 최근 한 연구에 따르면 대한민국 암모니아 배출 50% 감축은 한국 전역의 초미세먼지 농도 9% 저감 효과로 나타났다. 이와 유사하게 동북아시아의 암모니아 배출 50% 감축은 한국의 연간 초미세먼지 농도 9% 저감효과를 가져올 수 있다(Kim *et al.* 2021). 또한 성인지적 관점에서 볼 때 대기오염의 영향은 노동시장에서 농업생산에 종사하는 여성들에게 높게 나타나고 생산성, 경제 및 사회에 미치는 건강 영향과 관련이 있다.

다시 말해 농업 부문에서 암모니아 배출 감축이 서울, 인천, 경기 지역 및 그 외 지역의 초미세먼지 농도 저감에 중요하다는 의미이다. 그러나 이번 평가 범위에는 암모니아 배출 저감 대책이 포함되지 않았다. 여러 국제 연구에서 농업 부문의 암모니아 저감 대책을 탐색해왔다. 예를 들면 밭에 비료를 사용하는 시점 또는 비료를 토양에 주입하는 방식 등 합성 비료의 사용방식에 관한 연구들이 이에 해당한다. 축산 부문의 경우 질소 손실을 줄이는 분뇨관리방식 개선으로 암모니아 배출을 감축할 수 있으며 아산화질소와 메탄 같은 온실가스 배출을 감축할 가능성이 있다. 그렇게 된다면 대기오염 개선과 기후변화 대응 효과를 동시에 기대할 수 있다. 영농활동이 활발한 지역인 경기 및 대한민국 전역에서 가장 효과적으로 이행할 수 있는 대책이 파악되어야 암모니아 배출 저감을 대기오염 관리에 포함시킬 수 있다.

탄소중립 이후에도 여전히 배출수준이 높을 것으로 예상되는 부문은 **비도로 수송부문**이다. 화석연료를 대체하는 다양한 수송 수단이 필요하며, 이는 실질적인 배출을 감소하기 위해 필요하다. 비도로 부문에는 건설, 농업, 기타 산업에 사용되는 대형 기계류가 포함된다. 전기 또는 수소를 동력으로 쓰는 차량으로 전환하는 방식이 가장 현실적인 해결책이다. 이러한 선택의 타당성 여부는 향후 서울, 인천, 경기 지역의 수요 측면에서 평가해볼 필요가 있다. 해운 및 항공기의 배출도 포함되는데 항만 시설과 국제 공항이 위치한 인천지역의 배출에서 가장 큰 비중을 차지한다.

비도로 부문 배출의 대응책은 기술 변화이다. 오염물질 배출이 심한 연료를 저배출 연료로 교체하고, 대체 수송수단/차량을 승객과 화물 수송에 사용할 수도 있고, 운행의 필요성을 줄이는 수요관리방식 변화 등이 가능한 해법일 것이다. 대기오염관리 계획 과정에서 서울, 인천, 경기 지역의 가장 효과적이고 적합한 수단을 파악한 다음 그 효과를 분석하여 시행계획을 수립하고 집행할 필요가 있다.

또한, 비도로 수송 부문 배출과 더불어 비(非)배기 가스 배출 역시 추가적인 완화 대책이 마련되지 않는다면 상당한 수준의 대기오염물질을 배출하는 배출원이 될 가능성이 있다. 서울, 인천, 경기지역에서 차량의 전동화를 통해 배기가스와 온실가스는 제거할 수 있으나 브레이크 및 타이어 마모와 도로 재비산먼지는 줄일 수 없다. 개인 승용차 수를 줄이고, 대중교통으로의 전환 등을 통해 이러한 배출을 줄임으로써 배기가스 배출 외 여러 배출물질 저감에 도움을 줄 수 있을 것이다.

마지막으로 농업, 비도로 수송 부문 및 이외 다양한 부문에서도 성인지적 관점을 반영할 수 있도록 하고 대기오염 관련 행사에서 성비를 고려하여 여성 및 여성 주도 단체가 참여할 수 있도록 독려해야 한다. 또한 성별간 지식격차 및 감축 경로를 파악하기 위해 정부 부처, 이해관계자 및 시민사회 단체 간의 참여, 협업 및 대화가 필요하다. 그리고 업무상 대기질에 관한 인식제고 및 성인지적 관점에서의 대기질 개선 정책 마련을 위한 정책입안자들의 역량을 구축하고 강화할 필요가 있다.

대기오염 저감을 위한 국제적 해결 사례는 전세계에서 찾아볼 수 있고, 그 중에는 지역 협력을 통해 진전을 이룬 사례도 많다.

권고안 3:

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염문제 해소를 위한 국제 협업의 필요성

서울, 인천, 경기 지역의 대기오염은 서울, 인천, 경기 지역 내 배출만으로 발생한 것이 아니다. 한국과 동아시아 국가들이 서울, 인천, 경기 지역의 초미세먼지를 비롯한 여러 대기오염 물질의 연평균 최고 농도에 큰 비중을 차지한다. 따라서 서울, 인천, 경기 지역의 대기오염을 효과적으로 개선하기 위해서는 세 지역으로 유입되는 외부 지역의 배출이 감소되어야 한다.

국제적 해결 사례는 전세계에서 찾을 수 있고, 그 중에는 지역 협력을 통해 상당한 진전을 이룬 사례도 많다. 유럽과 북미에서 대기오염 해결을 위한 협력 의지가 특히 강했다. 문제가 완전히 해소된 것은 아니지만 국가 및 지역 차원의 협력으로 오염물질 배출과 농도 저감에 상당한 효과를 달성한 경우들이 있었다.

현재 동북아시아 지역의 사정은 유럽이나 북미와는 현격한 차이를 보인다. 최근의 대기오염 수준은 동북아시아 지역이 훨씬 높으며, 이는 20세기 중반 유럽과 북미가 경험했던 최고 수준의 오염에 해당한다. 동북아 국가들이 국가 차원에서 강력한 조치를 취하고 있으나 지역 협력의 추가적 확대를 위한 여지가 있다. 여러 지역이 얽힌 오염 문제를 해소하기 위해, 특히 건강위해성이 염려되고 있는 만큼 기술, 재정, 행정력을 결합한 총체적인 접근이 반드시 요구된다. 그렇게 하기 위해서는 국가적 활동을 확대하고 진전에 가속도를 붙일 수 있도록 지역 협력이 활성화되어야 한다.

2021년 최근 한 보고서에서 한중일 동북아 세 나라 간의 협력을 살펴보고 유럽과 북미의 지역 협력 사례 중 동북아에 적용할 수 있는 부분에 대한 분석을 실시했다. 보고서에 따르면 유럽과 북미의 대응과 지역 협력은 장거리 월경성 대기오염협약(CLRTAP)과 같은 정부간 협약 마련, EU 입법, 미국-캐나다 협약 등을 중심으로 실시되었다. 국제협력과 데이터 공유에 대한 상당한 정치적 의지와 유럽의 투명성 노력도 영향을 발휘하면서, 지난 40년간 배출저감 협상이 실시되어, EU는 유럽 전역의 입법을 일관되게 추진할 수 있었다.

대기오염과 관련된 동북아 지역에서의 활동을 살펴보면 동아시아 산성 강하물 측정망(EANET), 동북아 환경협력계획(NEASPEC), 동북아 청정대기파트너십(APCAP), 기후 및 청정대기 연합(CCAC) 등이 있다. 이러한 협력 프로그램들은 국가간 세분화된 자료 공유에 방점을 둔다. 지속적으로 노력을 해왔음에도 배출 감축에서 눈에 띄는 결과를 내지는 못했다. 따라서 보고서는 배출감축 활동을 강화하고 촉진하기 위해 동북아의 지역 협력을 강화했을 때 잠재적으로 어느 정도의 효과가 있을지 예측하기는 어렵다는 결론을 내리고 있다. 대기오염에 관해 동북아에서 가장 협력이 잘된 점으로 관련 정부와 조직이 서로 소통하려는 의지가 있었음을 입증하지만 여전히 시민 참여가 부족하다고 평가하고 있다.

이 보고서는 한중일의 환경 협력을 비교하는데 각국 상황과 장애요소들이 전부 다르다는 점에서 의미 있는 비교일 것이다. 일단 3개국은 국가 차원의 활동에 집중해왔으며 국가간 협력은 미미한 수준이었다. 하지만 동북아는 역동성이 넘치는 지역이고 항상 기회가 생기는 곳이다. 최근 중국이 2060년까지 탈탄소를 달성하겠다는 의지를 천명한 사례에서 보듯이 앞으로 협력과 확대 가능성은 충분히 있다.

또 이 보고서는 세 국가 간 지역 협력의 핵심 전략을 담고 있다. 한가지 중요한 요소는 대기오염 문제와 그 해결 가능성에 관해 과학자들과 국민들의 강력한 합의를 마련하는 것이다. 한국, 중국, 일본의 정책을 공동으로 평가 검토하여 우수사례를 파악하는 것으로 중요한 진전을 이룰 수 있다. 각국이 최고의 기술을 활용한 경험을 공유하면 세 국가 간의 기술 협력을 통해 좋은 전략을 찾을 수 있다. 그렇게 되면 민간부문 협력을 강화할 수 있고, 사업 기회와 산업 생산도 확대될 수 있을 것이다.

동북아의 월경성 대기오염 문제를 해결하기 위한 총체적인 접근법이 중요하기 때문에 기술 전문성, 경제적 자원, 행정적 지원을 모두 동원하여 문제를 해결해야 한다. 자료 및 정보 공유는 좋은 시발점이지만 결코 충분하지 않다. 배출을 감축하고자 한다면 적절한 전략, 정책, 대책을 마련해야 한다. 보고서는 민간부문의 적극적 참여와 학계와의 협력을 독려하면서 관측용 핵심 기술, 인식 제고, 대기오염 해결방안 지원 등 다양한 협력을 거론하고 있다. 대기오염 저감이라는 공동의 목표를 지향하는 정부 계획을 지원할 수 있도록 양성 친화적인 과학기술자 네트워크를 구성하여 협력을 강화할 수 있다. 이러한 네트워크 형성으로 민간 부문의 참여를 높일 수 있다. 이는 결국 정책입안자의 이익에도 부합한다. 국민의 대기오염 이슈에 대한 인식이 높아진다면 정책입안자의 참여 역시 활성화될 수 있다. 유럽과 북미의 대기오염을 감축할 수 있었던 활동에는 이 모든 과정이 포함되어 있었다. 보고서는 유럽과 북미에서 실행했던 활동들이 동북아에도 유효한 과정이 될 수 있다고 강조한다.



**미세먼지 발생을 줄이기 위해서는 국제적인 협력이 중요하다.
이러한 기술 협력과 분석은 다른 국가나 지역이 해결책을 찾는 데
도움이 될 수 있다.**

권고안 4:

대기질 개선을 위한 서울, 인천, 경기 지역 지방정부와 중앙정부 간의 협력 강화

대기질은 해당 지역뿐만 아니라 더 넓은 지역까지 영향을 미친다. 그렇게 때문에 해결안 모색에 국제 협력 또는 도시간 협력이 중요하다. 환경부 산하 ‘수도권대기환경청’과 서울, 인천, 경기 지방정부는 ‘수도권 대기환경관리위원회’를 설치하여 통합 환경관리 시스템을 통해 대기질 관련 데이터를 공유하고 관리 성과를 평가하면서 협업하고 있다. 수도권과 가까운 충북과 충남 지역 역시 다양한 배출원이 있는 지역이다 보니 데이터 공유 및 기술과 인적 지원을 위한 협력이 필요하다. 이는 지방정부의 노력뿐만 아니라 중앙정부의 노력도 요구되는 사항이다.

환경부는 한-미 대기질 공동연구(KORUS-AQ)¹⁶를 미항공우주국(NASA)과 함께 2016년과 2021년 두 차례 실시했다. 2022년 발표된 최종 보고서에서 초미세먼지는 2차 생성비율이 매우 높고 기상조건에 영향을 받고 있으며 전구물질들은 상당부분 해외에서 유입된다는 결론을 내렸다. 또한 동아시아의 문제로 여겨지는 오존 농도 상승이 관측되었기 때문에 역내 관련국들의 종합적인 협력이 필요하다고 제안했다. 그래서 몽골 지역에 조성하는 ‘인천

희망의 숲’, 한중 국제포럼 등과 같은 국제협력이 미세먼지 발생을 줄이는데 중요한 것이다. 이러한 기술협력과 분석을 통해 타 지역도 해결책을 찾고 확장하는 데 도움을 줄 수 있다.

‘이유 #4’에서 언급했듯이 시민, 산업, 공공 부문, 중앙 및 지방정부 같은 다양한 주체들이 장기적인 협력에 참여해야 한다. 예를 들면, 인천시는 대기관리 전문가, 시민단체, 환경질병 전문가 등으로 구성된 ‘인천광역시 미세먼지 민관 대책위원회’를 구성하여 시행계획을 검토하고 대기오염저감 효과를 높이기 위한 방안을 논의한다. 인천 리빙랩은 시민 참여형 실험으로 주민, 지역 활동가, 공공부문 등 지역 사정을 잘 아는 당사자들이 모여 해결책을 논의한다. 리빙랩은 이러한 주체들이 시민참여 프로그램을 통해 궁극적인 해결책에 더 다가갈 수 있게 해준다.

그 외에도 기업의 자발적인 참여도 필요하다. 대기업의 자발적인 협약과 ESG 경영이 대표적인 사례이다. 중앙정부와 지방정부의 역할은 이러한 활동에 인센티브를 제공하고 필요한 정보와 실무지원을 제공하는 것이다.

16 KORUS-AQ: An International Cooperative Air Quality Field Study in Korea (2016). <https://espo.nasa.gov/korus-aq/content/KORUS-AQ>

2022년 시행된 ‘기후위기대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법’의 목적은 환경, 에너지, 토지, 해양 정책을 묶어 탄소중립 사회를 구축하고 공정한 전환을 이루며, 녹색 기술과 산업을 육성하는 데 있다.

권고안 5:

완화조치 이행에 대한 투자효과 평가

2022년 시행된 ‘기후위기대응을 위한 탄소중립, 녹색성장기본법’의 목적은 환경, 에너지, 토지, 해양 정책을 묶어 탄소중립 사회를 구축하고 공정한 전환을 이루며, 녹색 기술과 산업을 육성하는 데 있다. 성인지적 관점을 포함한 대기오염저감 정책은 에너지 소비 조정 및 에너지 전환과 같은 공동 이익을 만들어 내는데 그 취지가 있다. 따라서 비용편익을 극대화할 수 있는 정책 이야말로 성공의 열쇠가 될 수 있다. 공공보건과 재난대응은 이른바 ‘미세먼지 8법’으로 강화되어 왔다. 대국민 소통 강화와 협력 확대를 본격화하면서 한국은 기획, 이행, 평가, 환류 및 개선을 모두 관리할 수 있는 통합(end-to-end) 모니터링 시스템을 구축해야 한다.

이번 연구에서는 여러 부문을 대상으로 적용하고 있는 완화조치에 대한 투자효과가 포함되어 있다(예를 들어 수송, 산업, 가정, 농업 및 폐기물) 이러한 완화조치를 이행하려면 이행 과정에 직접 투입할 수 있는 가용 자원이 필요하다. 세계적으로 여러 연구조사에서 많은 완화

조치가 비용 효과적인 것으로 나타났으며, 실현 기간은 상이할 수 있으나 일정 기간 이후에는 자체적으로 비용 충당 역시 가능한 것으로 파악되었다(에너지 효율성 조치 및 대중 교통으로의 전환 조치 등이 이에 해당됨). 참고로 대기오염에 노출되어 발생하는 건강 피해는 상당한 경제적 피해를 유발하며, 피해 규모는 2015년 대한민국 GDP의 3.7%에 상응하는 것으로 추정되었다(Roy and Braathen 2017).

서울, 인천, 경기 지역의 기후변화대응 계획의 일환으로 완화 조치의 이행을 뒷받침하는 공공 및 민간 부문에 대한 투자가 필요한 이 시점에서, 투자의 정당함을 설득력 있게 입증할 수 있는 근거는 바로 대기오염으로 인한 상당한 경제적 피해와 완화조치의 이행으로 달성 가능한 비용 절감 기회라 할 수 있다. 더불어 성인지적 관점을 반영한 청정대기 이니셔티브에 대한 재정지원이 필요하다. 환경분야에서 성별에 대한 고려를 촉진하고 동등한 재정지원을 보장하기 위한 성별 예산이 필요하다. 따라서 마지막으로 제안하고자 하는 권고안은 이러한 투자의 정당성을 입증하고 정책 이행을 뒷받침할 수 있는 재원을 확보해야 한다는 것이다.

참고문헌

- 2050 Carbon Neutrality Committee (2021). 2050 Carbon Neutrality Scenarios, 2050 Carbon Neutrality Committee (in Korean)
- Ahmed, E., Kim, K.H., Shon, Z.H. and Song, S.K. (2015). Long-term trend of airborne particulate matter in Seoul, Korea from 2004 to 2013. *Atmos. Environ.* 101, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.024>
- Anenberg, S.C., Achakulwisut, P., Brauer, M., Moran, D., Apte, J.S. and Henze, D.K. (2019). Particulate matter-attributable mortality and relationships with carbon dioxide in 250 urban areas worldwide. *Sci. Rep.* 9, 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48057-9>
- Anenberg, S.C., Henze, D.K., Tinney, V., Kinney, P.L., Raich, W., Fann, N., Malley, C.S., Roman, H., Lamsal, L., Duncan, B., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Brauer, M., Doherty, R., Jonson, J.E., Davila, Y., Sudo, K. and Kuynlenstierna, J.C.I. (2018). Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. *Environ. Health Perspect.* <https://doi.org/10.1289/EHP3766>
- Bae, M., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, J. and Kim, S. (2021). Role of emissions and meteorology in the recent PM_{2.5} changes in China and South Korea from 2015 to 2018. *Environ. Pollut.* 270, 116233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116233>
- Bae, S., Lim, Y.H. and Hong, Y.C. (2020). Causal association between ambient ozone concentration and mortality in Seoul, Korea. *Environ. Res.* 182, 109098. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109098>
- Climate and Clean Air Coalition Supporting SLCP National Action Planning 2019. *Opportunities for Increasing Ambition of Nationally Determined Contributions through Integrated Air Pollution and Climate Change Planning: A Practical Guidance document*. Paris: Climate and Clean Air Coalition; Stockholm: Stockholm Environmental Institute.
- Choi, S.W., Bae, C.H., Kim, H.C., Kim, T., Lee, H.K., Song, S.J., Jang, J.P., Lee, K., Bin, Choi, S.A., Lee, H.J., Park, Y., Park, S.Y., Kim, Y.M. and Yoo, C. (2021). Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea. *Asian J. Atmos. Environ.* 15, 1-28. <https://doi.org/10.5572/AJAE.2021.064>
- Choi, W. and Kim, K.Y. (2021). Association between exposure level of air pollutants and incidence rate of circulatory disease in residential and industrial areas of South Korea. *Int. J. Environ. Health Res.* 00, 1-10. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1969647>
- Choi, Y.J., Kim, S.H., Kang, S.H., Kim, S.Y., Kim, O.J., Yoon, C.H., Lee, H.Y., Youn, T.J., Chae, I.H. and Kim, C.H. (2019). Short-term effects of air pollution on blood pressure. *Sci. Rep.* 9, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56413-y>
- Dimitroulopoulou, C., Ashmore, M.R., Hill, M.T.R., Byrne, M.A. and Kinnersley, R. (2006). INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes. *Atmos. Environ.* 40, 6362-6379. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.047>
- European Monitoring and Evaluation Programme/ European Environment Agency (2019). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*. Copenhagen: European Monitoring and Evaluation Programme/European Environment Agency
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M.C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J.G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M. and Gilardoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs. *Atmos. Chem. Phys.* <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>
- Guak, S., Lee, S.G., An, J., Lee, H. and Lee, K. (2021). A model for population exposure to PM_{2.5}: Identification of determinants for high population exposure in Seoul. *Environ. Pollut.* 285, 117406. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117406>
- Haines, A., Amann, M., Borgford-Parnell, N., Leonard, S., Kuynlenstierna, J. C.I. and Shindell, D. (2017). Short-lived climate pollutant mitigation and the Sustainable Development Goals. *Nat. Clim. Chang.* 7, 863-869. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0012-x>
- Han, B.S., Park, K., Kwak, K.H., Park, S.B., Jin, H.G., Moon, S., Kim, J.W. and Baik, J.J. (2020). Air quality change in Seoul, South Korea under covid-19 social distancing: Focusing on pm_{2.5}. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 1-12. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176208>
- Han, C. and Hong, Y.C. (2020). Decrease in ambient fine particulate matter during covid-19 crisis and corresponding health benefits in Seoul, Korea. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 17, 1-12. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155279>
- Han, C., Kim, S., Lim, Y.H., Bae, H.J. and Hong, Y.C. (2018). Spatial and temporal trends of number of deaths attributable to ambient PM_{2.5} in the Korea. *J. Korean Med. Sci.* 33, 1-14. <https://doi.org/10.3346/jkms.2018.33.e193>
- Heal, M.R., Kumar, P. and Harrison, R.M. (2012). Particles, air quality, policy and health. *Chem. Soc. Rev.* 41, 6606-6630. <https://doi.org/doi:10.1039/C2CS35076A>

- Health Effect Institute (2022). *Air quality and health in cities - State of global air report*. Boston, MA: Health Effects Institute
- Health Effects Institute (2020). *State of Global Air 2020. Data source: Global Burden of Disease Study 2019*. Boston, MA: Health Effects Institute
- Heaps, C.G. (2022). *LEAP: The Low Emissions Analysis Platform*. [Software version: 2020.1.56]. Somerville, MA: Stockholm Environment Institute US. <https://leap.sei.org>
- Heo, J., Schauer, J.J., Yi, O., Paek, D., Kim, H. and Yi, S.M. (2014). Fine particle air pollution and mortality: Importance of specific sources and chemical species. *Epidemiology* 25, 379-388. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000044>
- Hong, Y.C., Lee, J.T., Kim, H., Ha, E.H., Schwartz, J. and Christiani, D.C. (2002). Effects of air pollutants on acute stroke mortality. *Environ. Health Perspect.* 110, 187-191. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110187>
- International Energy Agency (2016). *World Energy Outlook - Special Report Energy and Air Pollution*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-and-air-pollution>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Geneva: International Panel on Climate Change. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Kang, S.H., Heo, J., Oh, I.Y., Kim, J., Lim, W.H., Cho, Y., Choi, E.K., Yi, S.M., Do Shin, S., Kim, H. and Oh, S. (2016). Ambient air pollution and out-of-hospital cardiac arrest. *Int. J. Cardiol.* 203, 1086-1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2015.11.100>
- Kim, D.Y. (2021). *Evaluation and Improvement of Subsidy program for air pollutant emission facility in Gyeonggi-do*. Suwon, Gyeonggi-do: Gyeonggi Research Institute. <https://www.gri.re.kr/eng/contents/publications.do?schM=view&page=1&viewCount=10&schProjectNo=20210179&schBookResultNo=14777>
- Kim, E., Kim, B.U., Kim, H.C. and Kim, S. (2021). Sensitivity of fine particulate matter concentrations in South Korea to regional ammonia emissions in Northeast Asia. *Environ. Pollut.* 273, 116428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116428>
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.U., Jin, C.S., Hong, S., Park, R., Son, S.W., Bae, C., Bae, M.A., Song, C.K. and Stein, A. (2017). Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. *Sci. Rep.* 7, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, K.H., Ho, D.X., Jeon, J.S. and Kim, J.C. (2012). A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station. *Atmos. Environ.* 49, 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.058>
- Kim, S., Lee, J., Park, S., Rudasingwa, G., Lee, S., Yu, S. and Lim, D.H. (2020). Association between peak expiratory flow rate and exposure level to indoor PM_{2.5} in asthmatic children, using data from the escort intervention study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 1-11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207667>
- Kim, Y., Yi, S.M. and Heo, J. (2020). Fifteen-year trends in carbon species and PM_{2.5} in Seoul, South Korea (2003-2017). *Chemosphere* 261, 127750. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127750>
- Kim, Y.P. and Lee, G. (2018). Trend of air quality in Seoul: Policy and science. *Aerosol Air Qual. Res.* 18, 2141-2156. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0081>
- Kumar, N., Park, R.J., Jeong, J.I., Woo, J.H., Kim, Y., Johnson, J., Yarwood, G., Kang, S., Chun, S. and Knipping, E. (2021). Contributions of international sources to PM_{2.5} in South Korea. *Atmos. Environ.* 261, 118542. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118542>
- Kuylenstierna, J.C.I., Heaps, C.G., Ahmed, T., Vallack, H.W., Hicks, W.K., Ashmore, M.R., Malley, C.S., Wang, G., Lefèvre, E.N., Anenberg, S. C., Lacey, F., Shindell, D.T., Bhattacharjee, U. and Henze, D.K. (2020). Development of the Low Emissions Analysis Platform - Integrated Benefits Calculator (LEAP-IBC) tool to assess air quality and climate co-benefits: Application for Bangladesh. *Environ. Int.* 145, 106155
- Lee, H.M., Park, R.J., Henze, D.K., Lee, S., Shim, C., Shin, H.J., Moon, K.J. and Woo, J.H. (2017). PM_{2.5} source attribution for Seoul in May from 2009 to 2013 using GEOS-Chem and its adjoint model. *Environ. Pollut.* 221, 377-384. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.088>
- Lee, J.J., Hwang, H., Hong, S.C. and Lee, J.Y. (2022). Effect of Air Purification Systems on Particulate Matter and Airborne Bacteria in Public Buses. *Atmosphere* 13 (1) 55. <https://doi.org/10.3390/atmos13010055>
- Lee, S., Kim, M., Kim, S.Y., Lee, D.W., Lee, H., Kim, J., Le, S. and Liu, Y. (2021). Assessment of long-range transboundary aerosols in Seoul, South Korea from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and ground-based observations. *Environ. Pollut.* 269, 115924. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115924>
- Lim, S., Kim, J., Kim, T., Lee, K., Yang, W., Jun, S. and Yu, S. (2012). Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmos. Environ.* 47, 407-412. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.043>

- Malley, C.S., Ashmore, M.R., Kuylensstierna, J.C.I., McGrath, J.A., Byrne, M.A., Dimitroulopoulou, C. and Benefoh, D. (2020). Microenvironmental modelling of personal fine particulate matter exposure in Accra, Ghana. *Atmos. Environ.* 225, 117376. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117376>
- Malley, C.S., Kuylensstierna, J.C.I., Vallack, H.W., Henze, D.K., Blencowe, H. and Ashmore, M.R. (2017). Preterm birth associated with maternal fine particulate matter exposure: A global, regional and national assessment. *Environ. Int.* 101. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.01.023>
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O. and Williams, M.L. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 8889–8973
- Murray, C.J.L., Aravkin, A.Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K.M., Abbasi-Kangevari, M., et al. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- Nakarmi, A.M., Sharma, B., Rajbhandari, U.S., Prajapati, A., Malley, C.S., Kuylensstierna, J.C.I., Vallack, H.W., Henze, D.K. and Panday, A. (2020). Mitigating the impacts of air pollutants in Nepal and climate co-benefits: a scenario-based approach. *Air Qual. Atmos. Heal.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11869-020-00799-6>
- Oh, H.R., Ho, C.H., Kim, J., Chen, D., Lee, S., Choi, Y.S., Chang, L.S. and Song, C.K. (2015). Long-range transport of air pollutants originating in China: A possible major cause of multi-day high-PM₁₀ episodes during cold season in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.* 109, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.005>
- Oh, M.S. and Park, C.K. (2022). Regional source apportionment of PM_{2.5} in Seoul using Bayesian multivariate receptor model. *J. Appl. Stat.* 49, 738–751. <https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1822305>
- Park, D.H., Kim, S.W., Kim, M.H., Yeo, H., Park, S.S., Nishizawa, T., Shimizu, A. and Kim, C.H. (2021). Impacts of local versus long-range transported aerosols on PM₁₀ concentrations in Seoul, Korea: An estimate based on 11-year PM₁₀ and lidar observations. *Sci. Total Environ.* 750, 141739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141739>
- Park, E.H., Heo, J., Kim, H. and Yi, S.M. (2020). Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM_{2.5} in Seoul. *Chemosphere* 251, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>
- Park, J., Kim, H., Kim, Y., Heo, J., Kim, S.W., Jeon, K., Yi, S.M. and Hopke, P.K. (2022). Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF. *Sci. Total Environ.* 833, 155056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155056>
- Park, J., Shin, M., Lee, J. and Lee, J. (2021). Estimating the effectiveness of vehicle emission regulations for reducing NO_x from light-duty vehicles in Korea using on-road measurements. *Sci. Total Environ.* 767, 144250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144250>
- Park, R.J. (2004). Natural and transboundary pollution influences on sulfate-nitrate-ammonium aerosols in the United States: Implications for policy. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/2003jd004473>
- Park, S.K. (2019). Assessing the impact of ozone and particulate matter on mortality rate from respiratory disease in Seoul, Korea. *Atmosphere* 10. <https://doi.org/10.3390/atmos10110685>
- Phillips, D. (2022). Ambient air quality synergies with a 2050 carbon neutrality pathway in South Korea. *Climate* 10. <https://doi.org/10.3390/cli10010001>
- Roy, R. and Braathen, N.A. (2017). *The Rising Cost of Ambient Air Pollution thus far in the 21st Century: Results from the BRIICS and the OECD Countries*, OECD Environment Working Papers, No. 124, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development Publishing. <https://doi.org/10.1787/d1b2b844-en>
- Royal Society (2008). *Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications*. Royal Society Science Policy Report 15/08. London: Royal Society. https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2008/7925.pdf
- Seo, J.H., Jeon, H.W., Sung, U.J. and Sohn, J.R. (2020). Impact of the Covid-19 outbreak on air quality in Korea. *Atmosphere* 11, 1–15. <https://doi.org/10.3390/atmos11101137>
- Seo, J.H., Leem, J.H., Ha, E.H., Kim, O.J., Kim, B.M., Lee, J.Y., Park, H.S., Kim, H.C., Hong, Y.C. and Kim, Y.J. (2010). Population-attributable risk of low birthweight related to PM₁₀ pollution in seven Korean cities. *Paediatr. Perinat. Epidemiol.* 24, 140–148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3016.2009.01085.x>

- Shindell, D., Kuylensstierna, J.C.I., Vignati, E., van Dingenen, R., Amann, M., Klimont, Z., Anenberg, S.C., Muller, N., Janssens-Maenhout, G., Raes, F., Schwartz, J., Faluvegi, G., Pozzoli, L., Kupiainen, K., Hoglund-Isaksson, L., Emberson, L., Streets, D., Ramanathan, V., Hicks, K., Oanh, N.T.K., Milly, G., Williams, M., Demkine, V. and Fowler, D. (2012). Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security. *Science* 335 (6065), 183-189. <https://doi.org/10.1126/science.1210026>
- Singh, R., Kim, K., Park, G., Kang, S., Park, T., Ban, J., Choi, S., Song, J., Yu, D.G., Woo, J.H., Choi, Y. and Lee, T. (2021). Seasonal and spatial variations of atmospheric ammonia in the urban and suburban environments of Seoul, Korea. *Atmosphere* 12. <https://doi.org/10.3390/atmos12121607>
- Son, J.Y., Bell, M.L. and Lee, J.T. (2011). Survival analysis of long-term exposure to different sizes of airborne particulate matter and risk of infant mortality using a birth cohort in Seoul, Korea. *Environ. Health Perspect.* 119, 725-730. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002364>
- Song, S.K., Shon, Z.H. and Kang, Y.H. (2015). Comparison of impacts of aircraft emissions within the boundary layer on the regional ozone in South Korea. *Atmos. Environ.* 117, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.010>
- Uhm, J.H., Kwon, E.H., Kim, Y.J., Seong, J.H., Ju, H., Ahn, J.H., Bae, I.S., Choi, Y.S., Cho, S.J. and Shin, Y.S. (2021). Status of Ambient PM_{2.5} Pollution in the Seoul Megacity. *Asian J. Atmos. Environ.* 15, 1-12. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.022>
- United Nations Environment Programme (2018). *Integrated Assessment of Short-lived Climate Pollutants in Latin America and the Caribbean*. Nairobi: United Nations Environment Programme, Paris: Climate and Clean Air Coalition. <http://ccacoalition.org/en/resources/integrated-assessment-short-lived-c>
- United Nations Environment Programme (2019a). *Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.13140/2.1.4203.8569>
- United Nations Environment Programme (2019b). *Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions*. Paris: Climate and Clean Air Coalition, Nairobi: United Nations Environment Programme. <http://www.ccacoalition.org/en/resources/air-pollution-asia-and-pacific-science-based-solutions>.
- United Nations Environment Programme/World Meteorological Organization (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone*. Nairobi: United Nations Environment Programme, Geneva: World Meteorological Organization. <https://wedocs.unep.org/rest/bitstreams/12809/retrieve>
- Vellingiri, K., Kim, K.H., Jeon, J.Y., Brown, R.J.C. and Jung, M.C. (2015). Changes in NO_x and O₃ concentrations over a decade at a central urban area of Seoul, Korea. *Atmos. Environ.* 112, 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.032>
- World Health Organization (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulphur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Yang, S., Kim, O.J., Shin, M., Kim, W.J. and Kim, S.Y. (2021). Association between long-term exposure to high levels of ambient air pollution and incidence of lung cancer in a population-based cohort. *Environ. Res.* 198, 111214. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111214>
- Yeo, M.J. and Kim, Y.P. (2022). Long-term trends and affecting factors in the concentrations of criteria air pollutants in South Korea. *J. Environ. Manage.* 317, 115458. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115458>
- Yoo, J.M., Jeong, M.J., Kim, D., Stockwell, W.R., Yang, J.H., Shin, H.W., Lee, M.I., Song, C.K. and Lee, S.D. (2015). Spatiotemporal variations of air pollutants (O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀, and VOCs) with land-use types. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 10857-10885. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10857-2015>



Produced by
United Nations Environment Programme
Regional Office for the Asia Pacific
2nd floor, Block A, UN Building
Rajdamnern Avenue, Bangkok 10200
Phone: +662 288 2314, +662 2803829
uneproap@un.org