

범부처 미세먼지 저감 로드맵 수립 기획보고서
- 범부처 미세먼지 저감을 위한 공백기술 확보 R&D 전략
기획

한국외국어대학교

한국연구재단

제 출 문

한국연구재단 이사장 귀하

본 보고서를 “범부처 미세먼지 저감 로드맵 수립 기획보고서 - 범부처 미세먼지 저감을 위한 공백기술 확보 R&D 전략 기획에 관한 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 9. 17.

연구기관명 : 한국외국어대학교

연구책임자 : 이 강 응

연 구 원 : 여 민 주

기획위원 : 권성안(한국환경산업기술원)

권호장(단국대학교)

김득수(군산대학교)

김순태(아주대학교)

김영민(삼성병원)

김용표(이화여자대학교)

박덕신(철도기술연구원)

송상석(녹색교통)

송지현(세종대학교)

이경용(극동대학교)

장영기(수원대학교)

정병걸(동양대학교)

정용일(자동차환경네트웍)

채여라(한국환경정책평가연구원)

한영지(강원대학교)

요 약 문

I. 연구제목

범부처 미세먼지 저감 로드맵 수립 기획보고서
- 범부처 미세먼지 저감을 위한 공백기술 확보 R&D 전략 기획

II. 연구의 목적 및 필요성

□ 연구 목적

- 연구 목적은 신속한 국민건강보호와 문제 해결을 위한 통합적 미세먼지 공백기술 확보 R&D 전략 도출에 있음
- 본 연구의 구체적 목표는 변화하는 여건에 따른 미세먼지 관련 과학적, 사회적, 정책적 대응에 필수적인 **공백기술과 역량**을 분석하여 **통합적인 범부처 미세먼지 저감 공백기술 확보 전략**을 제안하는데 있음. 이를 위해 각 부처의 미세먼지 R&D 현황, 성과 중간점검, 전문가들의 수요조사 및 기술조사 분석을 통해 **부처간 R&D 계획 연계와 협업 기반의 중단기 전략**을 수립하고자 함. 세부 목표는 다음과 같음.
 - 중앙정부주도에서 도심 지역 및 지자체 현안 문제 해결 지원
 - 근원적 문제해결을 위한 기초, 원천기술개발 확대와 지원
 - 연평균 농도 저감 위주 기술에서 고농도 현상 대응 중심
 - 미세먼지관리종합대책(2017)의 기술적, 정책적 지원 방안 마련
 - 지속적 지원이 필요한 R&D와 공백기술의 우선 발굴

□ 연구 필요성

- 미세먼지는 국가·사회적 최우선 현안
- 다양한 노력에도 저조한 PM₁₀ 개선효과
- 급변하는 관련 환경변화
 - 서울시 미세먼지 (PM₁₀) 평균 농도는 감소하나 환경기준 초과일수 : '12년 5일 → '15년 10일 → '17년 20일로 오히려 증가
- 사회적, 과학적 수요의 변화
 - 새정부 미세먼지 해결공약 이행을 위한 관리종합대책의 지원필요 (2017,9)
 - 민감계층(어린이)에 대한 건강 우려가 높아 장기적인 건강영향 파악과 대응에 대한 수요 증가

- 그간 정책 추진과정에서 소통 부족
- 미세먼지 문제해결에 있어 종합적, 통합적 접근 필요
- 오염원 관리에 있어 다양한 한계점 노출
- 미세먼지 국외영향에 대한 대책 미흡
- 위해성을 고려한 민감계층 보호대책 부족
- 과학적 대응 역량 부족
 - 2차 생성 미세먼지 배출량
 - 국외, 국내 오염원별 기여도
 - 체계적인 조사·연구 확대로 과학적 기반의 대응역량 강화

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

□ 미세먼지 R&D 현황 조사

- 미세먼지 R&D 분류에 따른 현황 조사
 - 현상규명 및 예측 분야, 배출저감 분야, 국민생활보호분야별 3개 대분류를 기본으로 원인규명연구 등 10개 중분류에 따른 상세 현황 분석
- 정부 R&D 현황 자료 분석
 - 2017년 이후 5년간 부처별 R&D 예산, 기간, 목표 조사

□ 미세먼지 R&D 성과 중간점검

- 정부부처 R&D 주요 성과 중산 점검
 - 부처별 R&D 연구 목표 및 주요 결과물 분석

□ 미세먼지 R&D 공백기술 발굴

- 전문가 R&D 수요조사
 - 각 분야별 전문가들의 수요조사 자료 검토
- 전문가 기술수준 조사
 - 각 분야별 전문가들의 기술수준조사 분석
 - 선진국 기술격차 및 기술개발 역량 분석
- 전문가 R&D 공백기술 발굴
 - R&D 현황, 수요조사, 기술수준 조사를 통한 전문가 공백기술 발굴
 - 중복성, 시급성, 중요성, 파급효과를 고려한 우선순위 선정

- 역량분석을 통한 R&D 성공 가능성 고려

□ 미세먼지 R&D 공백기술 보완에 필요한 로드맵 마련

- 기존 미세먼지 R&D 로드맵과의 연계확보
- 효율적인 부처간 R&D 관리 및 지원 방안 마련
- 성과확산 및 정책 활용 목표 설정

IV. 연구결과

□ 미세먼지 R&D 현황 조사

- 미세먼지 관련 국가 R&D 지원은 미세먼지 대응 기술의 개념 및 기술 분류 체계를 적용할 경우 '16년 315억원에서 '18년 597억원*으로 약 2배 확대
 - * 연구과제 단위로 합산한 금액으로, 사전 기획 및 지정이 불가능한 Bottom-Up 과제 제외
- 2018년 기준 미세먼지 R&D 예산은 과기정통부 101.2억, 환경부 287.4억, 산자부 132.6억 수준
- '18년 기준, 총 8개 정부부처에서 미세먼지대응 R&D를 수행 중이며, 환경부·산업부·과기정통부 등 3개 부처가 87.3% 차지
- 2016년 비교해서 2018년 과기정통부의 예산이 크게 증가
- 2018년 기준 전체 연구비 중 현상규명 및 예측 분야 38%, 배출저감 분야 44%, 국민생활보호분야 19%

○ 주요 R&D 과제 현황

- 현 R&D 과제의 주요 내용과 성과는 원인규명 및 현상진단 및 미세먼지배출저감 분야에 집중
- 대부분의 분야에서 투자 규모가 상승하였으며, 특히 고정오염원 배출저감 분야가 '16, '17년 대비 2배 이상 상승하여 '18년 전체 투자액의 26%로 가장 큰 비중 차지

○ 전부처 미세먼지 R&D 추진 계획 현황

- 2017-2021 년 총 5년간 미세먼지 관련 국가 R&D 지원계획 중 총 과제수는 174 건, 총 2968억원
- 2021년까지 새로운 R&D과제의 계획은 제한적이고 현재 진행 중인 과제의 연장이 주 내용
- 2017-2021 5년간 미세먼지 R&D 예산은 과기정통부 344억, 환경부 1008억, 산자부 916억, 국토부 238억, 기상청 119억 수준

- 전체 연구비 중 배출저감 분야가 더 확대되어 54% 로 증가하고 현상규명 및 예측 분야 29%, 국민생활보호분야 17% 전망

□ 미세먼지 R&D 성과 중간점검 및 추진 전략

○ R&D 성과 중간점검 및 추진 전략 도출 방법

- 기술수준조사 : 산·학·연 전문가(총 48명)를 대상으로 3개 대분류, 10개의 중분류별로 기술역량, 시장 활성화도, 시급성, 중요도 등을 조사(`18.6)
- 산업 동향: 국내 전문기관(한국환경산업기술원, 중소기업기술정보진흥원, 한국기상산업진흥원 등)과 국제기구(OECD, IEA, WHO 등)의 발표자료 분석
- 전문가 분석: 전문기관 및 전문가가 참여하여 각 부처의 세부 기술별 연구 성과, 기술수준 등을 공유·분석하여 미세먼지 기술 10대 부문별 투자전략 마련

1) 원인규명

- 미세먼지 문제해결에 가장 기본적인 연구 분야이나 선진국 대비 기술수준 및 R&D 투자 규모가 저조
- 미국과 중국이 전체 논문 수의 70%를 차지하는 등 국제 연구사회를 리드, `18년 정부 투자 R&D는 전체 3.5%에 불과(8위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 71%, 기술 격차는 5.7년 내외
- 빠른 시간에 산업적 성과를 보이기 어려운 기초과학 분야로서, 민간보다는 정부 중심의 R&D 투자가 필요
- 특히 국내 다양한 지역별 미세먼지 발생원을 우선 규명하고 2차 미세먼지의 생성 메커니즘을 밝히기 위한 지속적 연구 수행 중요
- 중국 등 주변국의 환경오염정보 등이 중요하므로 국가 및 연구기관의 국제협력 및 공동연구 지원 강화

2) 진단·측정조사

- 불특정 배출원 조사를 보완하여 신뢰성 있는 결과 제시, 실시간 관측 인프라 구축, 관련 원천 기술을 개발로 선제적 시장 대응 필요
- 대기오염 측정 장치 세계 시장은 연평균 8.1% 비율로 '21년에는 65억불 규모로 성장할 것으로 전망되며 전체 정부 투자 R&D 중 20.6% 점유(2위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 75%, 기술 격차는 7.6년 내외
- 상세 관측이 대부분 수도권에 집중되어 있으며 지역·국가별 특성을 상세히 규명 할 수 있는

지역적·산업적 근원 측정 연구 필요

※ 배출원 조사 결과의 신뢰성을 확보하고 불특정 배출원 조사 보완을 위해 전문 운용 인력에 대한 인력 투자 병행

- 장기적으로 미세먼지 측정 및 모니터링 시장에 대응하기 위한 기술 선점형 원천기술 확보에 투자를 강화

3) 대기질모델링

- 장기적으로 국내 지자체별 특성을 고려한 미세먼지 농도 예측 및 효과 분석 및 기상·배출량 등 기초 자료 개선 필요
- '16년 KORUS-AQ 관측, 한국형 예보모델 개발 연구 등을 수행하고 '18년 전체 R&D의 12%를 점유(4위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 79%, 기술 격차는 4.8년 내외
- 고농도 현상은 국지적 배출 및 타 지역의 배출 영향, 국외 유입 등에 대한 정량적 분석이 필요하며 시공간적으로 다중 규모의 접근 중요
- 장기적으로 지자체별 미세먼지 농도를 예측하고, 고농도 원인 분석 및 맞춤형 개선정책 도출이 가능한 대기질 모델링 플랫폼 마련 검토
- 기상과 배출량 자료에 대한 개선과 예보 정확도 향상을 위한 자료 동화 연구 및 독자적인 예보모델 개발에 대한 장기적 투자 병행

4) 고정오염원

- 환경기준 강화에 대비한 혁신적 신소재 개발 등 공통 원천기술 및 대·중소 사업장 적용한 가능 저비용·고효율 기술 확보
- 국내외 시장 및 기술이 상대적으로 성숙기에 도달한 분야로 우리나라 국가별 논문 순위 3위, '18년 R&D 투자 비중 25.3% 차지(1위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 82%, 기술 격차는 4.1년 내외
- 민간 R&D 투자가 상대적으로 활발한 분야로 민간 확보가 어려운 원천기술 및 중소기업 적용 기술개발 등으로 정부 R&D 투자 재편 필요
- 관련 촉매 등 신소재 개발 및 효율 향상을 위한 공통 핵심 원천기술, 신공정 기술 등 신기술 개발이 중요
- 현장 적용 가능한 질소산화물 제어 촉매기술을 국산화하고, 자동 측정 장치와 연계된 제어기술을 접목하여 측정 사각지대 보완

5) 도로 이동오염원

- 완성차 제조업체 등 민간 중심의 R&D가 필요한 분야로, 정부는 정책 지원(노후 경유차 대체 등) 및 도심지역 실태 분석·관리 필요
- 국내외 기술이 상대적으로 성숙기에 도달하여 관련 특허가 최근 3년간 감소하는 추세이며, '18년 전체 R&D의 14% 점유(3위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 84%, 기술 격차는 3.5년 내외
- 경유차 배출가스 저감 후처리장치 부착을 의무화 하고 있으나 정상 작동 여부를 확인 할 수 있는 실시간 배출가스 배출량 모니터링 시스템 부재
- 특히, 도로변, 승차장 등 미세먼지 도심지역의 피해 저감을 위한 현황 파악 및 배출저감 기술의 확보 등 대응 시급
- 현재 환경부(친환경자동차기술개발사업단)에서 주도적으로 R&D를 수행 중이며 분야가 광범위하여 각 부처 역할분담, 체계적 기술협력 필요

6) 비도로 이동오염원

- 배출규모에 비해 투자가 저조한 '선박 배출 미세먼지 저감'에 대한 투자 확대 검토 및 건설기계는 정책 중심으로 관리
- 논문·특허 등 연구가 저조한 분야로 최근 미세먼지 관리의 사각지대로 부각 중이며 '18년 전체 R&D의 6.9% 차지(6위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 61%, 기술 격차는 5.5년 내외
- 대형선박, 건설기계 등은 시장이 형성되어 있고 민간(제작회사)의 투자 여력이 있는 만큼 민간 중심의 R&D 필요
- 소형선박(연안해운 등), 농기계, 규제대응 기술 등 민간 투자 취약 분야는 정부 차원의 투자 검토
- 건설기계는 노후 건설기계 저공해화 등 정책·제도 중심으로 관리하되, 장기사용 특성 고려한 저감 시스템(SCR,DPF) 실증 지원 검토

7) 비산먼지

- 일반적으로 기술기반의 문제해결 영역이 아닌 것으로 평가 되고 있으나, 비산먼지 배출원별 보급형 저감 기술 등 개별적 검토 필요
- 도로 비산먼지는 청소차, 살수차 운행, 건설현장은 세정식 집진, 전기 및 여과집진 등 적용 중. '18년 전체 R&D 중 투자비율 최소(0.3%,10위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 79%, 기술 격차는 4.4년 내외
- 비산먼지 저감 분야는 개별 요소기술의 개발보다는 기존에 존재하는 요소기술을 통합하는

시스템 엔지니어링 기술이 중요

- 대형건설사가 수행하는 건설공사장 등 일부 사례를 제외하고는 도로, 지하철 등 공공장소가 많아 정부 차원의 대책 마련 필요

8) 건강영향평가

- 국민건강 보호를 위해 정부 주도 R&D 수행이 필요하며 고농도 시 민감군/취약군에 대한 인체 노출 평가 및 건강 영향 분석 시급
- 전세계 특허출원 건수 중 중국이 91% 차지하고 있으며 '18년 전체 R&D 중 9% 투자(5위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 72%, 기술 격차는 5.6년 내외
- 미세먼지 건강영향평가는 국민 건강보호라는 공공적 성격이 클 뿐만 아니라 국민적 관심도도 높은 분야로, 정부 중심의 R&D 추진
- 특히, 어린이·노인 등 미세먼지 민감군과 야외 근로자 등 미세먼지 노출 취약계층에 대한 건강영향 우선 파악 필요
- 중·장기적으로 미세먼지에 대한 국민 건강영향 최소화를 위해 물질 특성별, 인구 특성별, 질환별 노출-반응 연구 등 종합적 접근 중요

9) 노출저감

- 강화되는 실내 공기질 기준을 달성하기 위한 핵심 원천기술을 개발하고, 실증 연구를 수행하여 실효성 검증 등 필요
- 국내 대기환경산업 시장 규모는 '16년부터 '21년까지 5.1%씩 증가하여 7조 9천억원 규모로 성장할 것으로 예측'18년 전체 R&D 중 6.8%(7위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 69%, 기술 격차는 4.5년 내외
- 정부는 민간의 기술경쟁이 심화된 영역 이외에 장기간 R&D가 소요되는 고감도 센서, 핵심 부품소재 개발 등 원천기술 개발 수행
- 현재, 검증된 적용 사례가 부재하여 다중이용시설 등에 대한 정부 차원의 실증 사업을 추진하여 실효성 검증 필요

10) 정책 및 정보서비스

- 과학기술에 근거한 미세먼지 정책 수립, 사회적 소통 위해 기술·사회경제적 측면을 함께 고려한 융·복합 기술 개발 필요
- 정보관리 및 서비스 분야에 투자 증으로 '18년 전체 R&D 중 1.6%(9위/10위)
- 최고 기술보유국 대비 기술력은 66%, 기술 격차는 4.3년 내외

- 과학적 연구결과 및 사회경제적 여건 등을 반영할 수 있는 통합적 영향 관리 의사결정 지원 및 평가 방법론 연구 중요
- ※ 에너지 소비 구조, 사회경제 여건, 배출량, 배출저감 정책 및 기술의 비용-효과 등의 다각적인 정보를 함께 고려하여 정책 결정을 지원

□ 미세먼지 R&D 공백기술 발굴

- 국민들의 눈높이와 불안감의 조속한 해소를 위한 공백 요소 발굴
- 분야별 연구 및 특허기술 동향, 범부처 미세먼지 R&D 과제 현황(176개) 및 성과 분석 등을 통해 핵심 연계 과제 발굴
- 미세먼지 건강 위해성 평가 -> 미세먼지 원인의 과학적 이해 -> 효과적 정책과 저감 방안 -> R&D 및 정책의 효용성 평가와 개선 방향을 포함하는 전과정 **총 10개 기술 도출**

1) 지역 환경 특성에 따른 미세먼지 오염원 규명

- 전국 규모에서의 미세먼지 측정 결과, 고농도 상황은 서울·수도권, 경기, 충남과 함께 전북 지역 등에서도 심각한 수준
 - 지역기반 주요 생산시설, 농축산업 등 지역별 미세먼지 원인물질 배출환경 특성에 따른 맞춤형 미세먼지 오염원 규명 연구 필요
- 연구목표
 - 지역별 미세먼지 현안 규명
 - 미분류, 미산정 배출원 규명
 - 배출원 정확도 개선
- 주요연구내용
 - 축산 농업 지역 환경 특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
 - 산림 환경 특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
 - 자동차에서 배출되는 암모니아 현황 및 대기환경에 미치는 영향 분석

2) 화학적·생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지 정밀 추적 및 노출 평가

- 기존의 대기확산모델, 수용모델 분석을 통한 기여도 산정 방법은 특정 배출 지역에 대한 상세하고 정확한 기여도 산정에 한계
- 장거리 이동 중에도 배출지역의 특성이 변하지 않고, 극미량으로도 추적 가능한 화학적·생물학적 지표 발굴 필요

○ 연구목표

- 미세먼지 중 화학적·생물학적 정보의 실시간 측정 시스템 개발
- 화학적·생물학적 지표를 활용한 동북아 미세먼지 정밀 추적 및 노출 평가

○ 주요 연구 내용

- 배출 시설 및 지역에서의 화학 물질 특성 정보 구축
- 바이오 미세먼지 실시간 모니터링 및 생물정보 분석 기술 개발
- 화학적 지표 발굴 및 실시간 모니터링을 통한 미세먼지 기여도 산정

3) 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성 평가

- 현재는 소형 스모그챔버를 이용한 이차미세먼지 생성 기작 규명에 그쳐 실제 대기 및 다양한 미세먼지 생성 시나리오 구현이 어려움

- 이차생성 미세먼지에 유해성 대한 노출 평가를 함께 고려한 종합적 연구 부재

○ 연구목표

- 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 이차입자 생성특성 연구
- 저감 대책 수립을 위한 주요 배출원 이차입자 생성특성 규명 및 유해성 평가

○ 주요 연구 내용

- 구축 예정인 중형 스모그챔버를 활용하여 한반도 고농도 발생원인인 장거리 유입+ 국내정체 영향에 대한 미세먼지 생성 핵심인자 규명
- 이차생성 미세먼지에 의한 유해성 평가를 위해 동물 노출챔버로 구성된 미세먼지 흡입노출 평가 시스템 구축
- 이동형 스모그챔버 시스템을 활용하여 배출원 현장에서의 미세먼지 입자의 생성을 모사할 수 있는 시스템 구축

- 주요 배출원별 저감 대책 수립을 위한 핵심인자 및 유해성 규명

4) 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발

- 대기질 모사 시스템 개선을 위해 대기질 모델 외에 주요 입력 자료인 기상과 배출량 자료에 대한 종합적인 불확도 평가와 개선 필요

○ 연구목표

- 정부 및 지자체에서의 국가간, 지역간 미세먼지 등 대기오염물질 농도 및 기여도 분석
- 지역 배출 특성을 고려한 대기질 모사 플랫폼 마련

○ 주요 연구 내용

- 고농도 발생 시 기상요인, 이동 경로에 따른 농도와 구성성분 변화, 풍향 및 기온 등 영향 분석
- 다양한 예측결과를 이용한 대기질 모델 및 입력자료에 대한 불확도 평가
- 고해상도 시공간 배출량 자료 확보
- 지역별 고농도 발생원인 분석 시스템 구축

5) 사업장 맞춤형 저비용 고효율 원천기술 및 스마트 제어기술 개발

- 현재 질소산화물 배출저감을 위한 선택적 촉매환원법(SCR) 촉매는 높은 가격에도 불구하고, 국내 원천기술 부재로 전량 수입에 의존
- 전국적으로 산재되어 있는 고정오염원에 대한 현장 기술실증 강화 및 관리 사각지대에 있는 중소규모 고정오염원의 적정 제어기술 부재
 - 현장 적용 가능한 질소산화물 제어 촉매기술을 국산화하고, 측정과 관리를 위한 자동 측정 장치와 연계한 제어기술 접목 필요
- 연구목표
 - 저온에서도 높은 질소산화물 제거 성능을 갖고, 고온에서의 내구성이 우수한 질소산화물 저감 촉매 제조
 - 중소규모 고정오염원에 적용 가능한 촉매 설계
 - 자동 배가스 측정장치와 연계한 스마트 제어기술 현장 적용
- 주요 연구 내용
 - 새로운 구조의 고효율/고내열성 SCR 촉매 소재 원천기술 개발
 - ※ SCR 촉매의 핵심 소재인 제올라이트를 혁신적으로 개발
 - 저온의 높은 NO_x제거 성능과 고온 내구성이 우수한 촉매 제조
 - 중소규모 배출원에 폭넓게 적용 가능한 SCR 시스템 현장적용 및 능동 제어
 - ※ 오염원 종류, 배출가스 특성 등 각 용도에 맞는 최적화된 SCR 시스템 설계 및 현장 적용
 - ※ IOT에 기반한 능동제어 기술을 현장용 SCR 시스템과 결합

6) 도로변, 항구 등 우심지역 내 민감·취약계층 미세먼지 노출저감 방안 연구

- 자동차 배출가스를 통합적으로 실시간 측정하고 후처리장치 정상작동 여부를 관리하는 기술개발
- 도로변의 나노미세먼지를 측정하여 실태를 분석하고, 위해도 지도를 작성하여 나노 미세먼지 관리 가능
- 경유 선박 후처리 기술 적용 및 천연가스 엔진 등을 개발하여 미세먼지 영향 큰 어선에 대한 저감 기술 마련

○ 연구목표

- 운행차 배출가스 관리기술 개발 및 시스템 운영
- 자동차 나노미세먼지(50nm) 현황과 인체유해성 분석 기술 개발
- 연근해 선박의 배기가스 오염물질 저감 대책 수립

○ 주요 연구 내용

- 경유차 후처리 장치 정상 작동 관리 장치 및 실시간 측정용 통합 센서 개발
- 도로변 자동차 배출 나노미세먼지 측정 및 인체 유해성 분석기술 개발
- 선박용 경유 엔진 미세먼지 현황 조사 및 선박용 엔진 요소기술 개발

7) 고농도 미세먼지 발생 시 건강영향 평가 및 피해저감 방안 연구

- 미세먼지가 고농도로 발생 했을 때 건강에 미치는 영향에 대한 국민적 관심이 매우 높음에도 불구하고 고농도 시 연구 결과 부재

- 일부 성분 및 질환 등 파편화된 연구로 종합적 평가가 어려움

※ 단기 피해 저감을 위한 고농도 시 건강영향 최소화를 위한 지역·인구 특성별 구체적인 피해 저감 방안 마련 시급

○ 연구목표

- 고농도 미세먼지 발생 사례의 유해성 평가, 인체노출평가, 역학 연구에 기반 한 통합적 건강영향평가 수행
- 고농도 미세먼지 발생에 의한 국민 건강영향 최소화 방안 마련

○ 주요 연구 내용

- 고농도 미세먼지 성분 특성 조사 및 유해성 평가

※ 시기별, 지역별 고농도 미세먼지 성분 및 독성 평가

- 고농도 미세먼지 발생 시 인체 노출 평가

※ 지역별, 인구 그룹(민감군/취약군)별 인체 노출 평가

- 고농도 미세먼지-질환 역학연구 및 위험인구 파악

※ 질환과의 연관성 분석 및 건강영향 위험인구 도출

8) 다중이용시설에서 인공지능을 이용한 미세먼지 농도 예측 및 최적제어 실증

- 국민 체감도가 높은 미세먼지 대응 연구개발을 위해 거주 밀도가 높고 유동 인구가 많은 다중이용시설에 대한 미세먼지 저감 기술 적용 필요

- 특히 지하역사, 노인 및 환자가 주로 이용하는 요양시설 등 다중이용시설 내 미세먼지 저감·관리 시급

○ 연구목표

- 다중이용시설 이용자의 미세먼지 노출저감
- 인공지능을 이용한 미세먼지 농도 예측 신뢰도 제고 및 공기질 최적화
- 주요 연구 내용
 - 인공지능 기반 다중이용시설 미세먼지 농도 예측 기술 개발
 - 빅데이터 플랫폼 개발 및 측정 센서 보정 기술 개발
 - 인공지능 기반 최적 공기질 제어기술 개발
 - AI 예측 알고리즘 - 공조 설비 연계 기술 개발 및 테스트 베드 구축

9) 동북아 기후 및 대기오염 연구 협력 강화

- 정부 주도 국제 공동연구 협의체와 병행하여 민간 전문가들이 주축이 되는 대기환경 연구 플랫폼 마련
- 미세먼지와 기후, 에너지 등을 포함한 종합적 연구를 수행하고 국제적 인증을 추진하여 공신력 있는 대기 환경 외부 영향 분석에 기여
- 연구목표
 - 국제적으로 공신력 있는 대기환경 외부 기여도 및 영향 분석
 - 동아시아 환경 협력 (한, 북한, 중, 일, 몽골)의 주도적 역할 수행
- 주요 연구 내용
 - 한중일, 북한, 몽골을 포함한 동아시아 국가 대기환경 공동연구 플랫폼 구축
 - 대기환경, 에너지, 기후 등을 포함한 포괄적이고 체계적인 연구 우선 지원
 - 기존 국제공동연구 분석 및 미세먼지 생성 주요 경로, 영향도 정량화
 - 국제협력 프로그램에서 인증 추진하여 공신력 제고

10) 미세먼지 문제해결을 위한 정책 결정 및 소통 지원 시스템 개발

- 미세먼지는 에너지 생산과 소비활동 등 사회 구조와 밀접하게 연관되어 있어 사회경제적 측면을 고려한 융·복합적 접근 중요
 - 특히 국민 불안이 매우 높은 상황으로 국민 수요 및 사회적 평가를 고려한 소통 방안 마련이 필요
- 연구목표
 - 사회경제 여건, 배출량, 배출저감 정책·기술의 효과 및 비용 등의 다각적 정보를 통합적으로 고려한 정책결정 지원 시스템 개발
 - 미세먼지 정책 전 과정에 걸친 국민 수용성 제고를 위한 소통 체계 개발

○ 주요 연구 내용

- 미세먼지 정책 목표 달성을 위한 최적 정책조합 발굴 시스템 구축

※ 배출량, 건강영향, 사회 경제적 영향 분석, 정책/기술별 비용편익 분석 기술 개발

- 미세먼지 정책·기술의 모니터링 및 평가 방법론 개발

※ 정책 기술별 성과평가 지표개발 및 모니터링 시스템 마련

- 미세먼지 위험관리 단계별 쌍방향 의사소통 시스템 개발

※ 유해위험 요인 및 노출 정보, 위험 대응 방법별 장단점, 미세먼지 관련 사업 평가 결과 및 사후 개선방안에 대한 정보 등 단계별 정보 공유 및 소통

□ 미세먼지 R&D 공백기술 보완에 필요한 로드맵 마련

○ 핵심목표 및 공백기술 목표설정

- 핵심목표인 14년 대비 '22년 30% 배출저감, '22년 $18\mu\text{g}/\text{m}^3$ 달성은 2017년 정부종합대책 설정치

○ 25년 40% 감축, $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 달성은 2018년 강화된 새로운 초미세먼지환경기준 목표

○ 본 연구에서 제안된 공백기술 R&D 전략의 세부고유목표와 로드맵은 아래와 같음

① 기초 원천기술개발 및 활용

- 미세먼지 전구물질 배출인벤토리와 기여율산정 불확도를 2017년 대비 2025년 50% 축소

② 고농도 미세먼지 발생으로부터의 국민 건강권 보호

- 고농도 예측 시 선제적 저감 정책 시행으로 나쁨(전국평균,신기준)일수 '17년 57일
→'22년 40일 →'25년 35일 달성

③ 지역 미세먼지 현안 지원

- 대기오염총량규제, 지역 배출인벤토리 고도화, 예방적 노출저감 방안 등 지역 맞춤형 미세먼지관리 지원

V. 연구결과의 활용계획

- 미세먼지 대응 기술 R&D 관련 모든 주체(부처·재정당국, 연구관리기관, 연구기관 등)가 R&D 기획·관리·수행, 성과 연계, 홍보 등에 적극 활용
- 충실한 R&D 지원: 전 부처 미세먼지 관련 연구개발 진행상황 모니터링, 공백기술 발굴, 중복 투자 방지, 지연과제 보완 조치 등
- 전략적 홍보·안내: R&D 성과의 주기적(예 : 분기), 묶음 홍보 등 종합적 정보제공으로 민간의 대응 투자 촉진
- 통합적 대응: '범부처 미세먼지 R&D 협의체'를 통한 부처별 R&D 성과 공유, 제도개선 피드백, 신규 R&D 투자 공동 검토 및 기획 등

V. 연구결과의 활용계획(필요에 따라 제목을 달리할 수 있음)

SUMMARY

The PM_{2.5} and PM₁₀ among air pollutants are known as the most imminent and common threats to public health in Korea. Despite of many reduction activities for PM and its precursors, the air quality in Korea has not been reached the planned goals, especially for PM_{2.5}. In recognition of degrading air quality, and its significant threat to the public health, comprehensive PM mitigation policy and control plan should be implemented imminently. The attainable air quality policy and practical emission reduction plan should be based on scientific evidences and assessment of current and future status of PM_{2.5} and its effects on public health, especially with contributions and causes from major sources, such as mobiles, industries, and long-range transport.

In this study, we propose a multi-ministry R&D strategy which is a top priority for reducing PM by analyzing the essential technologies and capabilities necessary for the scientific, social and policy responses toward rapidly raised PM issue. To accomplish this, we tried to establish the inter-ministerial R&D planning and the collaboration based multi-dimensional analysis of current R&D strategies in each ministry, their performance evaluation, expert's survey and technical demands. The main direction of this R&D investment strategy is 1) to strengthen the solution specifically for unattained regions and local governments contrast to earlier central government-led R&D investments 2) to continuously expand and support basic technologies and sciences for solving fundamental aspects of PM pollutions, and 3) respond to reduce the health effects from episodic occurrences of high PM events, which is more dangerous and public concerns than the yearly average concentration.

For the purpose of strengthen the solution specifically for unattained regions and local governments, three specific strategic R&D are proposed for 1) emission studies of local and regional fugitive sources for PM precursors, 2) development of a multi-temporal and spatial air quality diagnosis and forecasting model platform, 3) developing reduction measures and techniques small and medium-sized industries and non-mobile emission. For promoting basic science and technology for PM, we focus three field of studies, 1) secondary aerosol formation mechanism and their health effects to establish reduction measures, 2) accurate source apportionment and exposure evaluation of PM in East Asia using chemical and biological fingerprints, and 3) founding international collaborative research project among civilian experts in East Asia (including North Korea). In order to reduce the health effects from episodic occurrences of high PM events, we are

recommending R&D in 1) reduction plan of PM exposure for vulnerable individuals in highly exposed areas such as roadside, 2) developing technology to reduce public exposure in case of high PM episode, 3) developing effective implementation and communication plan with general public for PM policy.

CONTENTS

I. Research Outline	1
1. Research Background and Need	1
2. Research Goals and Main Contents	13
2.1. Research Goals	13
2.2. Research Strategy	13
2.3. Research Methods	13
II. Research trends and Issues	15
1. PM definition	15
1.1. PM definition	15
1.2. PM category	17
2. Research trends and technology roadmap	22
2.1. Research trends	22
2.2. National technology roadmap	36
3. Major problems and issues related to PM	46
3.1. Change in status	46
3.2. SWOT analysis	67
3.3. Major research strategy	68
III. Current status of PM in major research category	70
1. Assessment and forecasting	70
1.1. Overall	70
1.2. Formation mechanism	75
1.3. Assessment and monitoring	81
1.4. Forecasting models	92
2. Emission control	98
2.1. Overall	98
2.2. Stationary sources	103

2.3. Mobile sources	110
2.4. non-road mobile sources	115
2.5. Fugitive sources	120
3. Health effects	127
3.1. Overall	127
3.2. Health effects	134
3.3. Exposure reduction	138
3.4. Policy and communication Investment Strategic Expansion Program	143
IV. Strategic Investment Expansion Plan	151
1 Early performance (ex, Technology progress)	151
2 Performance linkage(avoid duplication, promote performance)	158
3 Vacant technology	173
3.1. Formation mechanism	174
3.2. Assessment and monitoring	179
3.3. Forecasting model	183
3.4. Stationary sources	187
3.5. mobile sources	191
3.6. Exposure reduction	196
3.7. Health effects	199
3.8. Policy and communication	202
V. Vacant technology (VT) for R&D Performance	207
1 Prioritization by urgency, importance and ripple effect	207
2. VT 1. Identification of localized non-classified sources	208
3. VT 2. Source identification with chemical and biological fingerprints	210
4. VT 3. Secondary aerosol formation and its health effects	212
5. VT 4. multi-spatial and temporal forecasting models	214
6. VT 5. Reduction measures and techniques for small and medium-sized industries and non-mobile emission	215
7. VT 6. Reduction plan of PM exposure for vulnerable individuals in highly exposed areas such as roadside	217
8. VT 7. Technology to reduce public exposure in case of high PM episode	219

9. VT 8. Reduction technology for PM exposure in multi-use facility	221
10. VT 9. International collaborative research project	222
11. VT 10. Effective implementation and communication plan with general public for PM policy	225
12. Budget plan for vacant technologies	227

VI. Roadmap for vacant technology228

1 Identification of localized non-classified sources	230
2 Source identification with chemical and biological fingerprints	231
3 Secondary aerosol formation and its health effects	232
4 multi-spatial and temporal forecasting models	233
5 Reduction measures and techniques for small and medium-sized industries and non-mobile emission	234
6 Reduction plan of PM exposure for vulnerable individuals in highly exposed areas such as roadside	235
7 Technology to reduce public exposure in case of high PM episode	236
8 Reduction technology for PM exposure in multi-use facility	237
9 International collaborative research project	238
10 Effective implementation and communication plan with general public for PM policy	239

Appendix244

Appendix 1. Current PM PTR roadmap	244
Appendix 2. Identification of localized non-classified sources	269
Appendix 3. Source identification with chemical and biological fingerprints	275
Appendix 4. Secondary aerosol formation and its health effects	284
Appendix 5. multi-spatial and temporal forecasting models	292
Appendix 6. Reduction measures and techniques for small and medium-sized industries and non-mobile emission	295
Appendix 7. Reduction plan of PM exposure for vulnerable individuals in highly exposed areas such as roadside	303
Appendix 8. Technology to reduce public exposure in case of high PM episode	311
Appendix 9. Reduction technology for PM exposure in multi-use facility	317
Appendix 10. International collaborative research project	325
Appendix 11. Effective implementation and communication plan with general public for PM policy	334

목 차

I. 연구개요	1
1. 연구배경 및 필요성	1
2. 연구 목표 및 주요 내용	13
2.1. 연구 목표	13
2.2. 연구 추진 방향	13
2.3. 연구 방법	13
II. 연구 동향 및 주요 이슈	15
1. 미세먼지 정의	15
1.1. 미세먼지 정의	15
1.2. 미세먼지 분류	17
2. 연구 동향 및 기술로드맵 사례	22
2.1. 국내외 연구동향	22
2.2. 국내 미세먼지 저감 기술로드맵 사례	36
3. 미세먼지 관련 미래 주요 문제 및 이슈	46
3.1. 여건 변화	46
3.2. SWOT 분석	67
3.3. 주요 연구 방향	68
III. 주요 분야별 미세먼지 관련 현황 분석	70
1. 현상규명 및 예측 분야	70
1.1. 총괄	70
1.2. 원인 규명 연구	75
1.3. 현상진단 및 측정 조사	81
1.4. 대기질 모델링	92

2. 미세먼지 배출저감 분야	98
2.1. 총괄	98
2.2. 고정오염원배출저감	103
2.3. 도로이동오염원 배출저감	110
2.4. 비도로 이동오염원 배출저감	115
2.5. 비산먼지 저감 분야	120
3. 국민생활 보호 분야	127
3.1. 총괄	127
3.2. 건강영향평가	134
3.3. 미세먼지 노출저감 기술	138
3.4. 정책 및 정보서비스	143
IV. 미세먼지 관련 투자 방향	151
1. 조기성과 창출(기술개발 경과 등)	151
2. 성과연계(과제 간 유사중복, 성과연계 필요 분야 도출)	158
3. 공백기술 발굴	173
3.1. 원인규명기술 중분야	174
3.2. 현상진단 및 측정기술 중분야	179
3.3. 대기질 모델링 중분야	183
3.4. 고정오염원 배출저감 기술 중분야	187
3.5. 도로이동오염원 저감 기술 및 비도로이동오염원 배출저감 기술 중분야	191
3.6. 미세먼지 노출저감 기술 중분야	195
3.7. 건강영향평가기술 중분야	199
3.8. 정책 및 정보서비스 중분야	202
V. 추진 방향 달성을 위한 공백기술 또는 필요기술	207
1. 시급성, 중요성, 파급효과 별 우선순위 도출	207
2. 공백기술 1. 지역맞춤 미분류 배출원 규명	208
3. 공백기술 2. 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지 정밀 추적 및 노출평가	210
4. 공백기술 3. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성평가	212
5. 공백기술 4. 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발	214
6. 공백기술 5. 중소형 사업장 및 비도로 이동오염원 미세먼지 배출저감 방안	215
7. 공백기술 6. 도로변, 항구 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출저감 방안 연구	217
8. 공백기술 7. 고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구	219

9. 공백기술 8. 고농도 미세먼지 사전대응 능동관리형 노출저감 방안	221
10. 공백기술 9. 동북아 기후 및 대기오염 민간전문가 연구 협력체	222
11. 공백기술 10. 미세먼지 정책의 효과적인 집행 방안 및 소통방안	225
12. 과제별 예산규모	227

VI. 공백 기술 확보를 위한 연차별 계획 228

1. 지역맞춤 미분류 배출원 규명 로드맵	230
2. 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지 정밀 추적 및 노출평가	231
3. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성평가	232
4. 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발	233
5. 중소형 사업장 및 비도로 이동오염원 미세먼지 배출저감 방안	234
6. 도로변 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출저감 방안 연구	235
7. 고농도 미세먼지 사례 시 건강영향평가 및 피해 저감을 위한 방안 연구	236
8. 미세먼지 노출저감 기술 방안	237
9. 동북아 기후 및 대기오염 민간전문가 연구협력체	238
10. 미세먼지 정책의 효과적인 집행 방안 및 소통방안	239

별첨 244

별첨 1. 미세먼지 기술분야별 R&D PTR 현황	244
별첨 2. 지역환경특성에 따른 미세먼지 오염원 규명	269
별첨 3. 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지의 정밀 추적 및 노출 평가	275
별첨 4. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성 평가	284
별첨 5. 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발	292
별첨 6. 중소규모 대기배출원에 적용 가능한 저온촉매와 SCR 원천기술 개발 및 스마트 제어기 술 현장적용	295
별첨 7. 도로변 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출저감 방안 연구	303
별첨 8. 고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구	311
별첨 9. 다중이용시설에서 인공지능을 이용한 미세먼지 농도 예측 및 최적제어 실증화 연구	317
별첨 10. 동북아 기후 및 대기오염 민간전문 연구협력체	325
별첨 11. 미세먼지 문제 해결을 위한 정책 결정 및 소통 지원 시스템 개발	334

표 목 차

표 1. 2018년 연구분야별 주요 부처 R&D 연구비 현황 (단위 :억원)	7
표 2. 분야별 주요 R&D 과제 현황 2018년 기준	9
표 3. 5년간(2017-2021) 연구분야별 주요 부처 R&D 연구비 현황(단위: 건, 백만원)	10
표 4. 대기중 입자 관련 용어 정의(Seinfeld & Pandis, 2016)	16
표 5. 미세먼지 대분류, 중분류 분야별 논문 발표수	23
표 6. 미국의 대기 모니터링, 측정, 배출 분야 연구 관련 기술 사례(EPA, 2018)	25
표 7. 미국의 대기 모델, 툴, 데이터베이스(EPA, 2018)	26
표 8. 일본의 PM2.5 농도에 대한 발생지별 기여도(일본환경성, 2015)	29
표 9. 중국의 PM2.5 연구 동향(김유미 등, 2015)	35
표 10. 미세먼지 국가전략프로젝트 기술개발 추진일정(안)(관계부처합동, 2016b)	38
표 11. 기초·원천 R&D 연구 추진(안)(한국과학기술연구원, 2018)	44
표 12. 인터넷에서 자주 언급되는 키워드 순위 (송길영, 2018)	48
표 13. 미세먼지 관리 패러다임 전환 (관계부처 합동, 2017).	56
표 14. 기상항공기 관측장비 목록 (기상청 보도자료, 2017)	60
표 15. 한서대/국립환경과학원 항공기 관측장비 목록 (김종호, 2017).	62
표 16. 환경부 대기오염집중측정소의 현황 및 설치 목적.	63
표 17. 대기오염 측정장치에 대한 지역별 시장전망	86
표 18. 대기오염 측정장치 제품별 시장전망	86
표 19. 선진국과의 상대적 기술격차	89
표 20. 비산먼지 관련 특허 동향	124
표 21. 국민생활보호 R&D 기술수준	133
표 22. 분야별 R&D 우수성과	153
표 23. 패키지 과제(녹색기술센터, 2018)에서 제안한 R&D 확대 또는 신규 추진 사업	163
표 24. 패키지 과제(녹색기술센터, 2018)에서 제안한 현상 규명 및 예측 분야 사업	164
표 25. 패키지 과제(녹색기술센터, 2018)에서 제안한 미세먼지 배출저감 분야 사업	165
표 26. 패키지 과제(녹색기술센터, 2018)에서 제안한 노출 및 건강영향 최소화 분야 사업	166
표 27. 패키지 과제(녹색기술센터, 2018)에서 제안한 제도 및 소통체계 개선 분야 사업	167
표 28. 미세먼지기초원천보고서 최종 선정과제(한국과학기술연구원, 2018)	168
표 29. 전문가 제안과제	169
표 30. 연계 및 기술 검토 사항	171
표 31. 원인규명분야 공백기술 투자 방향	177
표 32. 현상진단 및 측정분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	181
표 33. 대기질모델링분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	185
표 34. 고정오염원 배출저감 분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	189

표 35. 도로아동오염원 및 비도로 이동오염원 배출저감 분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	193
표 36. 미세먼지노출저감 분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	197
표 37. 건강영향평가분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	200
표 38. 정책 및 정보서비스 분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과	204
표 39. 공백기술 우선순위 도출 근거	207
표 40. 과제별 및 전체 예산 규모 (억)	227

그림 목 차

그림 1. 최근 5년간 미세먼지 주간 뉴스미디어 키워드검색 결과(최고값을 100으로 한 상대적 비교) by Google Trends	2
그림 2. 최근 5년간 미세먼지 주간 뉴스미디어 지역별 키워드검색 결과(최고값을 100으로 한 상대적 비교) by Google Trends	3
그림 3. 중국의 미세먼지와 전구물질 배출량 변화(Zheng, 2018)	4
그림 4. 2017년도 상반기 ‘미세먼지’ 이슈의 주요 내용(한국정보화진흥원, 2017)	5
그림 5. 2018년 주요 부처 R&D 연구비 현황과 예산 비율	7
그림 6. 분야별/연도별 R&D 투자 규모(단위:억원)	8
그림 7. 5년간(2017-2021) 주요 부처 R&D 연구비 현황과 예산 비율	11
그림 8. 대기 중 에어로졸 크기 분포(Seinfeld & Pandis, 2016)	18
그림 9. 응집, 응축 및 휘발과정 모식도(김용표, 2016)	19
그림 10. 탄소성분 입자의 분류(Andreae and Gelencser, 2006)	20
그림 11. 입자의 화학적 조성 사례(Rogge et al., 1993)	21
그림 12. 국가별 미세먼지 논문 발표수	23
그림 13. 동경 대기오염물질농도 추이(1975~2011) (일본환경성, 2013)	29
그림 14. 일본 미세먼지 종합대책(정책패키지) 개요(일본 환경성, 2015; 이수철, 2017)	31
그림 15. 일본 미세먼지 대책의 장단기 과제 추진 일정(일본 환경성, 2015; 이수철, 2017)	32
그림 16. 중국의 31개 지방 수도(베이징 포함)의 PM10과 NO2의 연평균 농도 추이(2003~2012) (Li et al., 2018)	33
그림 17. 과학기술기반 미세먼지 대응 전략 국가전략 프로젝트 추진 체계(한국과학기술연구원, 2018, 재인용)	37
그림 18. R&D 사업에 대한 기존 방식(개별적)과 패키지 방식(통합적) 비교(녹색기술센터, 2018)	40
그림 19. 미세먼지 R&D 패키지의 구성(녹색기술센터, 2018)	41
그림 20. 정부 R&D 패키지형 연구개발 투자플랫폼 미세먼지 분야 1단계 투자모형 개념도 ①(전분야 키워드 구분) (녹색기술센터, 2018)	42
그림 21. 정부 R&D 패키지형 연구개발 투자플랫폼 미세먼지 분야 1단계 투자모형 개념도 ②(미세먼지 문제 해결 전 분야 주요 내용(소분류) 구분 및 주요 분야 핵심 키워드) (녹색기술센터, 2018)	42
그림 22. 미세먼지 문제로 인한 국민 불안 해소를 위한 연구 개발 방향 모식도(한국과학기술연구원, 2018)	43
그림 23. 인구구조에 따른 미세먼지와 사망률 관련성. 우리나라도 고령화가 급속히 진행됨에 따라 같은 미세먼지 농도라도 2060년에는 현재보다 사망률이 높아지고, 미세먼지 농도가 현재보다 절반으로 저감되더라도 사망률은 비슷하거나 높아질 것으로 예상됨(한림원, 2017). ..	46

그림 24. 2017년 국민들이 불안을 느끼는 위험요소 순위(연합뉴스, 2018)	47
그림 25. 일반인의 미세먼지에 대한 인식 연관도(김영욱 등, 2016)	49
그림 26. 전문가의 미세먼지에 대한 인식 연관도(김영욱 등, 2016)	49
그림 27 그림 27. 기상조건이 일정하다고 가정하고, 대기오염물질 배출량의 변화만을 고려하였을 경우의 미세먼지 농도 예측치 추이. 서울시(검은 점선), 수도권(회색 실선), 전국(회색 점선)의 2014년부터 2016년 사이의 연평균 미세먼지 농도 변화는 기상조건이 일정하다면 배출량 감소로 인해 농도가 떨어졌어야 함을 보여주고 있음(Kim et al., 2017)	51
그림 28. 기후변화로 인해 중국 베이징에서 겨울에 미세먼지 고농도 발생 기상조건 (haze weather index(HWI) 빈도 변화 예측 결과. 파란색 막대는 1950-1999년 결과, 빨간색 막대는 기후변화 RCP8.5 예측 시나리오에 따른 15개 기후모델 결과로부터 산출한 2050-2099년 예측 결과 (Cai et al., 2017).	51
그림 29. 북한 석탄화력발전소에서 단위전력 생산당 배출되는 이산화탄소 배출량. PDD 결과는 북한이 제출한 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM) 사업을 위해 제출한 Project Design Documents(PDDs) 자료에서 산출한 것이며, 다른 결과들은 국제에너지기구(IEA) 자료임 (Yeo and Kim, 2017).	53
그림 30. 남한, 북한, 기타 지역의 수도권 PM _{2.5} 에의 각 오염물질별 2016년 월별 영향도 모델링 결과 (a) PM _{2.5} , (b) 질산염, (c) 황산염, (d) 암모늄, (e) 유기탄소(OC), (f) 원소상 탄소(EC) (배민아 등, 2018).	55
그림 31 그림 31. 대기 초미세먼지 농도 변화에 따른 사망률 추이. 초미세먼지가 낮은 농도에서의 변화율이 높은 농도에서보다 큰 것을 알 수 있음. 또한 사망률이 무시할만한 정도는 이 연구에서는 6 μ g/m ³ 정도인 것으로 나타났으나(Apte et al., 2015), 우리나라에서는 이루기 힘든 농도로 보임.	57
그림 32. 수도권 일최고 8시간 평균 오존 농도 추이(김정환 등, 2018). 미세먼지 농도 추이와는 달리 계속 증가하고 있음.	58
그림 33. 서울의 남동쪽에 위치한 태화 연구 숲 인근에서 KORUS-AQ 연구기간에 DC-8 항공기가 52건의 고도별 관측을 진행하는 동안 관찰한 오존의 수직적 분포. 박스는 1km 구간에 따라 개별 측정값의 중간값과 사분위 값을 나타냄(국립환경과학원, 2017). 관측한 오존의 최솟값이 대체로 60ppb(우리나라 8시간 평균 오존 대기환경기준)을 초과하는 것을 알 수 있음. 또한 대부분의 경우 오전에 비해 오후에 오존 농도가 높은 것은 국지적인 광화학반응에 의한 오존 생성이 발생함을 의미함	58
그림 34. 국내에서 개발 중인 환경위성 탑재체(2017년 환경부 보도자료).	59
그림 35. 한서대/국립환경과학원 항공기 및 제원(김종호, 2017).	61
그림 36. 기상청의 기상1호(좌)와 해양과학원의 온누리호(우).	62
그림 37. 환경부 대기오염집중측정소의 전경(왼쪽 상단부터 시계방향으로 백령도, 서울, 대전, 울산, 제주, 광주).	64
그림 38. 우리나라 미세먼지 정책 수립 과정에서 필요한 분야의 선진국 대비 기술수준(김용표, 2017).	65
그림 39. 수도권의 대기오염물질 배출을 각각 50% 저감하였을 때 미세먼지 저감 효과 예측	

결과. 수도권은 질소산화물 배출만 저감할 경우 미세먼지 증가가 예상되며, 암모니아 배출저감이 미세먼지 저감에 가장 효과적인 것으로 제시됨(김순태 등, 2017).66

그림 40. 미세먼지 관련 주요 문제 및 이슈의 SWOT 분석표67

그림 41. 현상규명 및 예측 연도별 논문발표 현황70

그림 42. 현상규명 및 예측분야 국가별 논문발표 현황71

그림 43. 현상규명 및 예측 연도별 특허출원 현황71

그림 44. 현상규명 및 예측 국가별 특허출원 현황72

그림 45. 현상규명 및 예측 R&D 현황73

그림 46. 미세먼지 원인규명 연도별 논문발표 현황76

그림 47. 미세먼지 원인규명 국가별 논문발표 현황76

그림 48. 미세먼지 원인규명 연도별 특허출원 현황77

그림 49. 미세먼지 원인규명 국가별 특허출원 현황78

그림 50. 수도권의 대기오염물질 배출허용 총량의 추이(환경부, 2017)79

그림 51. 원인규명기술관련 부처별 R&D 투자 현황과 총 연구비 추이79

그림 52. 원인규명기술관련 전문가 조사 결과80

그림 53. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 연도별 논문발표 현황82

그림 54. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 국가별 논문발표 현황82

그림 55. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 연도별 특허출원 현황83

그림 56. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 국가별 특허출원 현황84

그림 57. 현상진단 측정·조사기술관련 부처별 R&D 투자 현황과 총 연구비 추이88

그림 58. 현상진단 측정·조사기술관련 전문가 설문조사 결과90

그림 59. 미세먼지 대기질 모델링 연도별 논문발표 현황92

그림 60. 미세먼지 대기질 모델링 관련 연도별 국내외 논문발표 현황(Keyword : 국가별, Secondary PM, CMAQ, CAMx, WRF-Chem, GRIMS-Chem)92

그림 61. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 국가별 논문발표 현황93

그림 62. MICS-Asia Phase III 에서의 모델 상호 비교 연구 예시(Gao et al., 2018)94

그림 63. 미세먼지 대기질 모델링 연도별 특허출원 현황95

그림 64. 미세먼지 대기질 모델링 국가별 특허출원 현황95

그림 65. 미세먼지 대기질 모델링 R&D 현황96

그림 66. 미세먼지 대기질 모델링 전문가 설문조사 결과97

그림 67. 미세먼지 배출저감 연도별 논문발표 현황98

그림 68. 미세먼지 배출저감 국가별 논문발표 현황99

그림 69. 미세먼지 배출저감 연도별 특허출원 현황100

그림 70. 미세먼지 배출저감 국가별 특허출원 현황100

그림 71. 미세먼지 배출저감 R&D 현황102

그림 72. 미세먼지 고정오염원배출저감 연도별 논문발표 현황104

그림 73. 미세먼지 고정오염원배출저감 국가별 논문발표 현황104

그림 74. 미세먼지 고정오염원배출저감 연도별 특허출원 현황105

그림 75. 미세먼지 고정오염원배출저감 국가별 특허출원 현황	106
그림 76. 중국의 대기오염 투자 전망	107
그림 77. 미세먼지 고정오염원배출저감 R&D 현황	108
그림 78. 미세먼지 고정오염원배출저감 전문가 설문조사	109
그림 79. 미세먼지 도로이동오염원 연도별 논문발표 현황	110
그림 80. 미세먼지 도로이동오염원 국가별 논문발표 현황	111
그림 81. 미세먼지 도로이동오염원 연도별 특허출원 현황	111
그림 82. 미세먼지 도로이동오염원 국가별 특허출원 현황	112
그림 83. 미세먼지 도로이동오염원 R&D 현황	113
그림 84. 미세먼지 도로이동오염원 분야 전문가 설문조사결과	114
그림 85. 미세먼지 비도로이동오염원 연도별 논문발표 현황	115
그림 86. 미세먼지 비도로이동오염원 국가별 논문발표 현황	116
그림 87. 미세먼지 비도로이동오염원 연도별 특허출원 현황	116
그림 88. 미세먼지 비도로이동오염원 국가별 특허출원 현황	117
그림 89. 미세먼지 비도로이동오염원 R&D 현황	118
그림 90. 미세먼지 비도로이동오염원 전문가 설문조사 결과	119
그림 91. 미세먼지 비산먼지 저감 연도별 논문발표 현황	120
그림 92. 미세먼지 비산먼지 저감 국가별 논문발표 현황	121
그림 93. 미세먼지 비산먼지 저감 연도별 특허출원 현황	121
그림 94. 미세먼지 비산먼지 저감 국가별 특허출원 현황	122
그림 95. 비산먼지 R&D 현황	125
그림 96. 비산먼지 전문가 설문조사결과	126
그림 97. 미세먼지와 국민건강과의 관계성	128
그림 98. 국민생활보호 연도별 논문발표 현황	129
그림 99. 국민생활보호 국가별 논문발표 현황	129
그림 100. 국민생활보호 연도별 특허출원 현황	130
그림 101. 국민생활보호 국가별 특허출원 현황	131
그림 102. 국민생활보호 R&D 현황	132
그림 103. 미세먼지 건강영향평가 연도별 논문발표 현황	134
그림 104. 미세먼지 건강영향평가 국가별 논문발표 현황	135
그림 105. 미세먼지 건강영향평가 연도별 특허출원 현황	135
그림 106. 미세먼지 건강영향평가 국가별 특허출원 현황	136
그림 107. 미세먼지 건강영향평가 R&D 현황	137
그림 108. 미세먼지 건강영향평가 전문가 설문조사결과	138
그림 109. 미세먼지 노출저감 기술 연도별 논문발표 현황	138
그림 110. 미세먼지 노출저감 기술 국가별 논문발표 현황	139
그림 111. 미세먼지 노출저감 기술 연도별 특허출원 현황	139
그림 112. 미세먼지 노출저감 기술 국가별 특허출원 현황	140

그림 113. 미세먼지노출저감 기술 부처별 R&D 투자 현황과 총 연구비 추이	141
그림 114. 미세먼지노출저감 기술 전문가 설문조사 결과 분석	142
그림 115. 미세먼지 정책 및 정보서비스 연도별 논문발표 현황	144
그림 116. 미세먼지 정책 및 정보서비스 국가별 논문발표 현황	144
그림 117. 미세먼지 정책 및 정보서비스 연도별 특허출원 현황	145
그림 118. 미세먼지 정책 및 정보서비스 국가별 특허출원 현황	146
그림 119. 미세먼지 정책 및 정보서비스 R&D 현황	148
그림 120. 미세먼지 정책 및 정보서비스 전문가 설문조사 결과	149
그림 121. 미세먼지 투자 방향 및 전략적 목표	155
그림 122. 투자방향의 정책 및 위험관리모델 연계도	157
그림 123. 미세먼지 투자 방향 및 공백기술 도출방법	158
그림 124. 미세먼지 공백기술의 구분류 및 연계성	173
그림 125. 원인규명 분야 공백기술들의 투자 방향 개념도	178
그림 126. 현상진단 및 측정기술 분야 공백기술의 투자방향	182
그림 127. 다중 규모 대기질 모사 및 진단 시스템 마련 연구안	186
그림 128. 고정오염배출원 저감 기술 분야 공백기술의 개념도	190
그림 129. 도로이동오염원 및 비도로오염이동오염원 저감 기술 분야 공백기술 투자방향 개념	194
그림 130. 미세먼지노출저감 분야 공백기술 투자방향 개념	198
그림 131. 정책 및 정보서비스 분야 공백기술 투자방향 개념	206

I. 연구개요

1. 연구배경 및 필요성

□ 연구 비전

신속한 국민건강보호와 문제 해결을 위한
통합적 미세먼지 공백기술 확보 R&D 전략 도출

□ 추진 방향

- 1) 중앙정부주도에서 도심 지역 및 지자체 현안 문제 해결 지원
- 2) 근원적 문제해결을 위한 기초, 원천기술개발 확대와 지원
- 3) 연평균 농도 저감 위주 기술에서 고농도 현상 대응 중심
- 4) 미세먼지관리종합대책(2017)의 기술적, 정책적 지원 방안 마련
- 5) 지속적 지원이 필요한 R&D와 공백기술의 우선 발굴

□ 연구배경

- 미세먼지는 국가·사회적 최우선 현안
 - 미세먼지의 1군 발암물질(IARC, 2013) 지정 후 국민적 경각심 증가
 - 국내 도시의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 선진국 주요도시의 2배 이상 수준 (2017년 서울 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 뉴욕 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 동경 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 - 2015년 기준 OECD 국가 중 대한민국이 미세먼지 최고수준(OECD, 2017)
 - 최근 미세먼지에 대한 국민적 관심 증가(그림 1)
 - 국민 생명의 직접적 요소로 인식 변화와 불안감 증가

- 다양한 노력에도 저조한 PM₁₀ 개선효과
 - 2014년 이후 전국 미세먼지(PM₁₀) 농도는 거의 정체 경향
 - 관리와 정책적 효과보다는 기상효과에 대한 변동이 더 큼(김순태, 2018)
 - 충청, 강원, 전북이 산업도시인 울산과 유사한 수준의 관심 수준(그림 2)
- PPM₁₀ 대비 PM_{2.5} 악화
 - 감소 추세인 PM₁₀과 달리 전반적으로 PM_{2.5}의 경우 오히려 악화 경향
 - 전국 봄철 PM_{2.5}는 오히려 2015년 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2016년 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2017년 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가(Kim et al., 2018)
 - 전국 1~5월 PM_{2.5} 주의보·경보 발령 횟수 '15년 72 → '16년 66 → '17년 92회로 증가(관계부처 합동, 2017)
 - 배출과 생성과정이 복잡한 2차 생성 오염 기여율 증가

○ 급변하는 관련 환경변화

- 서울시 미세먼지(PM₁₀) 평균 농도는 감소하나 환경기준 초과일수 : '12년 5일 → '15년 10일
→ '17년 20일로 오히려 증가
- 2018년 미세먼지의 환경기준 강화(PM₁₀ 일평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ → 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 연평균 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ → 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 로 '미세먼지 주의보' 급증
- 원전 축소로 인한 화력발전 수요의 증가
- 노후 석탄 화력발전소 폐쇄 등 다양한 배출저감에 따른 효과
- 중국 대도시의 급격한 미세먼지 및 전구물질의 저감 효과(그림 3)

○ 사회적, 과학적 수요의 변화

- 2018년 4월 정부는 미세먼지를 사회적 재난으로 인정하고 국회는 사회재난관련법 발의
- 사회재난 시 산업계에 미세먼지 발생 책임을 물어 재해복구비용 청구가능
- 행정적, 법적 구속력을 위한 과학적 분석 및 근거가 필수로 요구
- 새정부 미세먼지 해결공약 이행을 위한 관리종합대책의 지원필요(2017,9)
- 최근 미세먼지 연관어는 중국 관련이 가장 높음(그림 4)
- 민감계층(어린이)에 대한 건강 우려가 높아 장기적인 건강영향 파악과 대응에 대한 수요 증가
- 미세먼지가 정상급 외교 차원에서 해결할 이슈로 변화
- 외교적 노력을 지원하기 위한 고도의 과학적 분석 필요성 증가

□ 미세먼지관리의 반성과 평가(관계부처합동 미세먼지관리종합대책, 2017)

- 그간 정책 추진과정에서 소통 부족
 - 저탄소차 협력금제 유예('14.9월), 영흥화력 7·8호기 신설논란 등
 - 미세먼지 정책 전 과정에서 국민 참여 확대
- 미세먼지 문제해결에 있어 개별적 접근 실시
 - 기후 에너지 정책 간 연계성 부족
 - 2차 생성 미세먼지 저감 대책 부족
 - 통합적인 관점에서 미세먼지 관리 대책 수립 필요
- 오염원 관리에 있어 다양한 한계점 노출
 - 대 중, 소규모 사업장 감시 부족
 - 대규모 배출원 감시 강화 등을 통한 오염원 집중 관리 실시
- 미세먼지 국외영향에 대한 대책 미흡
 - 한중협력의 미흡
 - 미세먼지 문제에 있어 인접국가에 대한 보다 적극적인 대응 필요
- 위해성을 고려한 민감계층 보호대책 부족
 - 환경기준강화

- 보호서비스 강화 등을 통한 민감계층 중점 보호 실시
- 과학적 대응 역량 부족
 - 2차 생성 미세먼지 배출량
 - 국외, 국내 오염원별 기여도
 - 체계적인 조사·연구 확대로 과학적 기반의 대응역량 강화

□ 미세먼지 R&D 현황

- 미세먼지 R&D의 추진 현황
 - 미세먼지 관련 국가 R&D 지원은 미세먼지 대응 기술의 개념 및 기술분류 체계를 적용할 경우 `16년 315억원에서 `18년 622억원*으로 약 2배 확대
 - * 연구과제 단위로 합산한 금액으로, 사전 기획 및 지정이 불가능한 Bottom-Up 과제 제외
 - 2018년 기준 미세먼지 R&D 예산은 과기정통부 98억, 환경부 287.4억, 산자부 134.8억 수준
 - `18년 기준, 총 8개 정부부처에서 미세먼지대응 R&D를 수행 중이며, **환경부·산업부·과기부 등 3개 부처가 83.7%** 차지
 - 2016년 비교해서 2018년 과기정통부의 예산이 크게 증가
 - 2018년 기준 전체 연구비 중 현상규명 및 예측 분야 36%, 배출저감 분야 46%, 국민생활보호분야 18%

그림 1. 2018년 주요 부처 R&D 연구비 현황과 예산 비율

--	--

○ 주요 R&D 과제 현황

- 현 R&D 과제의 주요 내용과 성과는 원인규명 및 현상진단 및 미세먼지배출저감 분야에 집중
- 대부분의 분야에서 투자 규모가 상승하였으며, 특히 **고정오염원 배출저감 분야**가 `16, `17년

대비 2배 이상 상승하여 `18년 전체 투자액의 26%로 가장 큰 비중 차지

□ 전부처 미세먼지 R&D 추진 계획 현황

○ 전부처 미세먼지 R&D의 추진 계획(2017-2021)

- 2017-2021 년 총 5년간 미세먼지 관련 국가 R&D 지원계획중 총과제수는 174 건, 총 2968억원
- 2021년까지 새로운 R&D과제의 계획은 제한적이고 현재 진행 중인 과제의 연장이 주 내용
- 2017-2021 5년간 미세먼지 R&D 예산은 과기정통부 344억, 환경부 1008억, 산자부 916억, 국토부 238억, 기상청 119억 수준
- 전체 연구비 중 배출저감 분야가 더 확대되어 54% 로 증가하고 현상규명 및 예측 분야 29%, 국민생활보호분야 17% 전망

□ 미세먼지 국가전략프로젝트 연구개발사업의 후속 대응

- 범 부처 기반의 문제해결형 사업으로 2017년부터 2019년까지 3년간 총 496억원의 정부지원금으로 진행됨(부처합동 보도자료, 2016)
- 부처별 협업과 노력을 통한 집중화된 기획과 예산 지원이 이루어진 최초의 연구개발사업으로 평가됨
- 도출된 성과와 추가적인 환경변화를 기반으로 새로운 연구 목표와 전략 수립 필요

그림 2. 5년간(2017-2021) 주요 부처 R&D 연구비 현황과 예산 비율

--	--

- 전부처 미세먼지 R&D 현황과 계획 분석의 시사점
 - 각 부처별 정책에 맞춘 R&D 우선순위에 따라 진행
 - 각 부처별 시급성, 중요도, 파급효과를 우선한 R&D
 - 범부처 차원의 R&D가 국가전략연구사업의 일환으로 2017년 시작했으나 아직은 제한적
 - 추가적인 범부처 차원의 과제 발굴 여지 검토 필요
 - 향후 2021년까지 현재 진행 중인 R&D의 틀이 거의 그대로 진행될 계획
 - 2017-2021 5년간 총 174 건의 연구과제 중 139 건의 연구 과제가 이미 2017년 시작하거나 종료되었고, 35 건만 신규 계획
 - 현재 계획대로라면 추가적인 연구개발의 여지가 매우 제한
 - 미세먼지 국가전략프로젝트 연구개발사업의 후속 전략 수립 필요
 - 국민들의 눈높이와 불안감의 조속한 해소를 위한 공백 요소 점검 필요
 - 미세먼지 건강 위해성 평가 -> 미세먼지 원인의 과학적 이해 -> 효과적 정책과 저감 방안 -> R&D 및 정책의 효용성 평가와 개선 방향을 포함하는 전과정 분석 필요
 - 사회적, 과학적 새로운 요구와 전과정 분석을 반영한 유연한 R&D 로드맵 보완 필요
 - 예상되는 새로운 R&D 로드맵 수립의 당면과제

- 미세먼지문제의 국가적 의제 격상에 따른 R&D 연구 결과의 과학적, 사회적 요구 수준의 증대
- 사회적 수요가 높은 국외 원인파악, 취약층 건강영향평가 등 분야의 단기적인 결과 도출이 어려움
- 미세먼지 위해성, 과학적 이해, 대응방안의 정량적인 불확실성 해소 방안 마련

□ 각 부처의 미세먼지 R&D 로드맵의 유연한 조정 필요성

- 국민 인식 변화와 불안감 증가
- 다양한 저감 노력에도 PM2.5 농도 증가현상
- 급변하는 미세먼지 관련 환경변화
- 사회적, 과학적, 정책적 수요의 변화

2. 연구 목표 및 주요 내용

2.1. 연구 목표

본 연구의 목표는 변화하는 여건에 따른 미세먼지 관련 과학적, 사회적, 정책적 대응에 필수적인 공백기술과 역량을 분석하여 통합적인 범부처 미세먼지 저감 공백기술 확보 전략을 제안하는데 있다. 이를 위해 각 부처의 미세먼지 R&D 현황, 성과 중간점검, 전문가들의 수요조사 및 기술조사 분석을 통해 부처간 R&D 계획 연계와 협업 기반의 중단기 전략을 수립하고자 한다.

2.2. 연구 추진 방향

- 1) 지속적인 미세먼지 저감을 위한 연구
- 2) 기후변화 대응을 같이 고려한 미세먼지 저감 연구
- 3) 지속적인 미세먼지 저감을 위한 적극적인 국제협력(북한포함)
- 4) 중앙정부주도에서 도심 지역 및 지자체 현안 문제 해결 지원
- 5) 근원적 문제해결을 위한 기초, 원천기술개발 확대와 지원
 - 미세먼지의 2차 대기오염물질 생성원인 규명
- 6) 연평균 농도 저감 위주 기술에서 고농도 현상 대응 중심
- 7) 효과적인 정책 수립, 시행, 평가와 소통 체계 구축
- 8) 지속적 지원이 필요한 R&D와 공백기술의 우선 발굴

2.3. 연구 방법

□ 미세먼지 R&D 현황 조사

○ 미세먼지 R&D 분류에 따른 현황 조사

- 현상규명 및 예측 분야, 배출저감 분야, 국민생활보호분야별 3개 대분류를 기본으로 원인규명연구 등 10개 중분류에 따른 상세 현황 분석

○ 정부 R&D 현황 자료 분석

- 2017년 이후 5년간 부처별 R&D 예산, 기간, 목표 조사

□ 미세먼지 R&D 성과 중간점검

○ 정부부처 R&D 주요 성과 중산 점검

- 부처별 R&D 연구 목표 및 주요 결과물 분석

□ 미세먼지 R&D 공백기술 발굴

- 전문가 R&D 수요조사
 - 각 분야별 전문가들의 수요조사 자료 검토
- 전문가 기술수준 조사
 - 각 분야별 전문가들의 기술수준조사 분석
 - 선진국 기술격차 및 기술개발 역량 분석
- 전문가 R&D 공백기술 발굴
 - R&D 현황, 수요조사, 기술수준 조사를 통한 전문가 공백기술 발굴
 - 중복성, 시급성, 중요성, 파급효과를 고려한 우선순위 선정
 - 역량분석을 통한 R&D 성공 가능성 고려

□ 미세먼지 R&D 공백기술 보완에 필요한 로드맵 마련

- 기존 미세먼지 R&D 로드맵과의 연계확보
- 효율적인 부처간 R&D 관리 및 지원 방안 마련
- 성과확산 및 정책활용 목표 설정

II. 연구 동향 및 주요 이슈

1. 미세먼지 정의

1.1. 미세먼지 정의

□ 먼지 및 미세먼지 정의

○ 대기환경보전법의 정의(대기환경보전법 제2조)

- 먼지: 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질*

* 입자상물질: 물질이 파쇄·선별·퇴적·이적될 때, 그밖에 기계적으로 처리되거나 연소·합성·분해될 때에 발생하는 고체상 또는 액체상의 미세한 물질

※ 대기환경보전법에는 미세먼지에 대한 별도의 정의가 제시되지 않음

○ 지방자치단체(예: 세종특별자치시조례 제1119호)의 미세먼지 관련 조례 내 정의(제2조)

- 미세먼지는 직경에 따라 PM₁₀과 PM_{2.5}등으로 구분함. PM₁₀은 1000분의 1000분의 10mm보다 작은 먼지: 미세먼지(PM₁₀)은 입자의 크기가 10 μ m 이하인 먼지, 미세먼지(PM_{2.5})은 입자의 크기가 2.5 μ m 이하인 먼지

○ 환경부(에어코리아, 2018) 정의

- 미세먼지는 직경에 따라 PM₁₀과 PM_{2.5}등으로 구분함. PM₁₀은 1000분의 10mm보다 작은 먼지이며, PM_{2.5}는 1000분의 2.5mm보다 작은 먼지로, 머리카락 직경(약 60 μ m)의 1/20~1/30 크기보다 작은 입자로 공기 중 고체 상태와 액체 상태의 입자의 혼합물로 배출되며 화학반응 또는 자연적으로 생성됨

□ 입자 관련 용어(Seinfeld & Pandis, 2016)

- 입자(에어로졸)는 크기, 특성 등에 따라 안개, 미스트, 스모그 등 다양하게 분류됨(표 4)

1.2. 미세먼지 분류

□ 입자의 특성에 따른 먼지 분류(김용표, 2016)

○ 입자의 특성: 주로 입자의 크기, 화학적 조성, 형태에 따라 결정됨

※ 입자상 오염물질(Particulate Matter, PM)은 가스상 오염물질처럼 단일 성분 물질이 아니고 다양한 배출, 생성, 변환, 이동, 소멸 과정을 거쳐 대기 중에 존재하며 수많은 화학적 성분 즉, 위해성이 다른 물질로 구성되어 있음. 입자 크기도 나노미터(nm)에서부터 수십 마이크로미터(μm)까지 광범위하며, 모양도 구형에서 사슬 형태까지 다양해서 공기역학적으로 다르게 거동함(한국과학기술한림원, 2016)

○ 입자의 크기(그림 8)

- 입자의 크기 영역(size mode): 입자들이 가장 몰려 있는 특정한 영역

- 핵영역과 집적영역의 입자: 미세입자(fine particle)

· 핵영역(nucleation mode): 아이트켄 영역(Aitken mode)이라고도 함. 입자의 크기가 가장 작은 영역. 주로 평균입자의 지름이 $0.1\mu\text{m}$ 미만인 입자 영역에 해당하며, 이 영역의 입자는 주로 연소 등의 화학반응에 의하여 핵으로 생성됨

· 집적영역(accumulation mode): 핵영역의 입자가 응집(coagulation), 응축(condensation) 및 휘발(eavporation) 과정을 통해 빠르게 집적영역의 입자로 커짐. 집적영역은 핵영역보다 크고, 입자의 지름이 $2\sim 2.5\mu\text{m}$ 까지인 입자를 포함함

* 응집: 입자들의 충돌에 의하여 새로운 입자가 형성되는 과정. 입자의 질량농도는 변하지 않지만 개수농도와 입자 크기가 변함(그림 9)

응축과 휘발: 응축은 기체상에 있는 기체 분자가 입자, 휘발은 입자상의 분자가 기체상으로 이동하는 과정. 이 두 과정에서 입자의 개수농도는 변하지 않지만 질량농도(따라서 입자 크기)가 변함(그림 9)

- 조대영역의 입자: 조대입자(coarse particle)

· 조대영역(coarse mode): 입자의 지름이 $2\sim 2.5\mu\text{m}$ 보다 큰 입자 영역

→ 입자의 크기로 구분할 때는 핵영역과 집적영역의 입자, $\text{PM}_{2.5}$ 에 해당하는 영역의 입자가 미세입자에 해당함. 하지만 일반적으로 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대해 모두 미세먼지라는 용어를 사용하고 있으며, 이들을 구분하기 위하여 미세먼지(PM_{10}), 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 같이 () 안의 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 표기를 병행하여 사용함

그림 9. 응집, 응축 및 휘발과정 모식도(김용표, 2016)

○ 입자의 화학적 조성

- 입자의 화학적 조성은 주로 입자의 기원에 따라 결정됨. 화학반응에 의하여 배출되는 입자는 주로 미세입자임. 이에는 유기성분 입자, 연소과정이나 화학공정에서 생성된 금속입자, 무기이온성분 입자들이 있음
- 유기성분 입자: 수소와 탄소의 비가 상대적으로 큰 유기탄소(organic carbon, OC)와 비가 작은 원소상 탄소(elemental carbon, EC)가 있음
 - 통상적으로 원소상 탄소를 블랙카본(black carbon, BC)과 구분하지 않고 유사한 용어로 혼용하여 사용하였으나, 최근 광학특성과 열화학적 특성 등에 따라 블랙카본(black carbon, BC)과 브라운카본(brown carbon)을 분리하여 지칭함. 분자구조적으로는 graphite와 유사하고, 광학적으로는 외형적인 색깔이 검정색에 가까울수록, 그리고 열화학적으로는 열에 의해 휘발 또는 증발하지 않을수록 블랙카본에 속함(그림 10)
 - 분자량이 작고 색깔이 없으며 열적으로 불안정하여 낮은 온도에서도 휘발성이 강한 물질들은 유기탄소성분으로 분류될 수 있음. 이 두 가지 분류의 중간에 위치한 물질들은 분자량이 크고, 보통 갈색 계통을 띠고 있으면서 열적으로도 저온에서는 안정적이고 고온에서 휘발되는 물질들이 브라운 카본으로 분류됨(그림 10) (Andreae and Gelencser, 2006; 한국환경산업기술원, 2012)

- 금속성분 입자: 연소과정이나 화학공정에서 생성되는 금속성분의 대표적인 것으로는 납(Pb)과 카드뮴(Cd) 등이 있음
- 무기이온성분 입자: 아황산가스(SO₂)가 광화학반응을 통해 변환되는 황산염 입자(SO₄²⁻, sulfate)가 대표적인 예이며, 질산염 입자(NO₃⁻, nitrate), 암모늄(NH₄⁺, ammonium)등이 포함됨
- ※ 1차입자인 토양이나 해염입자에서 유래한 염소이온(Cl⁻, chloride)과 대부분의 금속 양이온은 조대영역에 더 많이 있음
- 도시 대기 중 미세입자의 화학적 조성 사례는 그림 11과 같음

○ 입자의 형태

- 입자의 형태는 액체상인 경우는 일반적으로 구형이나, 고체상인 경우에는 구형이 아닌 경우가 많음. 구형이 아닌 입자의 크기는 일반적으로 공기역학적 등가직경(aerodynamic equivalent diameter)으로 나타냄. 이는 실제 입자와 같은 침강속도를 갖는 밀도 1g cm^{-3} 인 구형입자의 지름을 의미함. 실제 입자와 같은 침강속도와 밀도를 갖는 구형 입자 지름을 가정하여 스토크스 직경(stokes diameter), 현미경적 방법에 의하여 광학적 직경(optical diameter)으로 입자의 크기를 나타내기도 함

2. 연구 동향 및 기술로드맵 사례

2.1. 국내외 연구동향

□ 미세먼지 연구동향(논문 현황)

○ 최근 5년간(`13년~`18년 4월까지) 주요 국가별 미세먼지 분야 논문 현황

- 미국과 중국이 각각 1849편(1위)과 1771편(2위)으로 전체 논문 수 6488편의 56% 가량을 차지함. 영국, 독일, 프랑스가 약 400여 편의 논문을 발표하여 그 뒤를 이었고, 우리나라가 288편으로 6위를 차지함(그림 12)

- 표 5에서 현상규명 및 예측 분야 논문은 모두 3525편으로 전체 6488편의 약 54%, 미세먼지 배출저감 분야는 1758편으로 약 27%, 국민생활보호 분야는 1205편으로 약 19%를 차지함. 중분류 기준으로 가장 논문편수가 많은 분야는 현상규명 및 예측의 현상진단 측정조사로 2206편의 논문이 발표되었고, 미세먼지 배출저감의 비도로 이동오염원 분야의 논문이 7편으로 가장 적게 발표됨

- 해당 기간 내 200개 이상의 논문을 발표한 국가는 그림과 같이 모두 11개국이며, 일본이 212편으로 11위에 해당함. 이들 11개국에서 발표한 논문은 6278편임

- 그림 11을 살펴보면, 주로 현상규명 및 예측 분야의 비율이 가장 높음. 그 중에서도 독일, 캐나다, 영국의 상대적인 비율이 가장 높음. 중국, 한국, 일본의 동아시아 3개국은 현상규명 및 예측 분야 비율이 상대적으로 가장 낮고, 미세먼지 배출저감 분야 비율은 상대적으로 가장 높음. 국민생활보호 분야 비율은 이탈리아, 영국, 독일이 상대적으로 가장 높음

→ **시사점:** 최근 미세먼지 문제가 크게 부각되고 있는 동아시아 국가들인 한국, 중국, 일본의 연구는 북미와 유럽 국가들에 비해 미세먼지 배출저감 분야에 집중되어 있고, 현상규명 및 예측 분야의 연구가 상대적으로 이들 국가에 비해 비중이 낮다는 것을 알 수 있음. 동아시아의 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 동아시아 특성에 맞게 현상을 규명하고 원인을 파악하는 등 현상규명 및 예측 분야 연구가 필요함. 우리나라에서도 현상규명 및 예측을 위한 기초연구에 보다 적극적인 지원이 필요할 것임. 최근 미세먼지의 건강영향에 대한 우려가 높고, 미세먼지 노출을 줄이고 회피할 수 있는 방안에 대한 요구가 높은 만큼 국민생활보호 분야에 대한 지원도 늘려나가야 할 것임. 또한, 동아시아 미세먼지 문제를 해결하기 위해서 우리나라 뿐 만 아니라 한중일 3개국을 포함한 동아시아 국가들이 함께 협의체를 구성하여 동아시아 미세먼지 문제 현상 규명 및 예측을 위해 긴밀히 협조하며 보다 적극적으로 공동 연구를 진행해야 할 것임

그림 12. 국가별 미세먼지 논문 발표 수



(1) 미국

□ 대기 연구 분야(표 6) (EPA, 2018)

○ EPA(United States Environmental Protection Agency) 대기 연구 분야

- 크게 5가지로 제시됨. 1) 대기 모니터링, 측정, 배출, 2) 대기질에 의한 건강과 환경 영향, 3) 대기 모델링, 4) 대기질과 기후변화, 5) 대기과 에너지의 5개 분야임.
- 1) 대기 모니터링, 측정, 배출, 3) 대기 모델링, 4) 대기질과 기후변화, 5) 대기과 에너지 분야는 미세먼지 기술로드맵 대분류상 주로 '현상규명 및 예측', 2) 대기질에 의한 건강과 환경 영향은 '국민생활보호'에 해당함.

○ 1) 대기 모니터링, 측정, 배출 분야

- 연구 내용

- 대기 질 규제 기관 및 관리자가 대기 오염 문제를 효과적으로 해결할 수 있도록 새롭고 개선된 대기 측정 기술 및 역량을 개발하고 평가함
- 대기질 보호를 위한 의사결정 시 고려하기 위해 대기 화학의 이해를 높이고, 배출 인벤토리를 확장하기 위해 미국 내 지정된 배출원에서의 대기오염물질 배출량 자료 수집
- 혁신적인 대기 센서 기술과 지역 사회 및 시민 과학자를 위한 대기질 측정 기술의 유효성(availability)과 접근성을 개선하는 분석 툴 개발

- 관련 기술 프로젝트

- EPA는 국가대기질기준(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)을 준수하기 위한 모니터링 기능 향상을 위해 저비용의 휴대용 측정 기술을 발전시키고 있음. 대기 감지 장비(Air sensor equipment)는 개별적으로도 설치 가능함. 표 5는 EPA에서 진행 중인 차세대 대기 측정 기술, 대기질 측정 방법, 배출 인벤토리 연구프로젝트 사례임

○ 2) 대기질에 의한 건강과 환경 영향

- 연구 목표

- 개별 및 다중 오염물질에 대한 노출과 건강영향 사이의 관련성 이해
- 다중 오염물질 노출을 특성화하기 위한 모델과 방법론 개발
- 고속도로, 산업시설, 항구 등과 같은 근거리 배출원에서의 대기오염물질 혼합물(air pollutant mixtures)의 배출, 노출, 건강영향을 이해하고 지역 대기질에서 다중 오염물질의 영향을 저감하는 해결책 제시
- 대기 오염에 불균형적으로 영향 받는 위험인구(population-at-risk) 규명
- 대기오염물질에 노출될 때 건강영향을 미치게 되는 독성 경로와 생물학적 과정을 규명하고 대기오염물질 혼합물에 대한 민감성과 노출의 잠재적인 생물지표를 평가함

- 관련 연구: 천식 연구, 노출과 대기오염물질 혼합물의 건강영향, 건강과 환경에 대한 데이터베이스(Health and Environmental Research Online, HERO) 구축, 대기오염으로 인한 심장 문제와 관련된 정보 제공 웹사이트 구축, 인간 대상 연구(Human Subjects Research), 통합과학 평가(Integrated Science Assessments), 근거리 배출 대기오염 연구(Near-Source Air Pollution Research)

○ 3) 대기 모델링

- 연구 목표

- 대기질을 특성화하고 지역단위에서 도시 규모, 지역단위에서 대륙 규모, 그리고 글로벌 단위에서 반구 규모에서의 노출을 예측하는 모델링 툴 개발
- 다른 매체(예를 들어, 물)의 모델링 툴과 대기 모델링 툴을 연계하고

- 미국의 대기모델, 툴, 데이터베이스는 다양하고 광범위함(표 7)
 - 다양한 규모와 방식의 모델이 개발되어 있음
 - 노출, 위해도, 건강영향 등을 평가할 수 있는 툴이 많이 개발되어 있으며 시민과학자(Citizen Scientists)를 위한 툴도 따로 개발되어 있음
 - 대기질에 대한 데이터베이스뿐만 아니라 에너지, 건강영향 등에 대한 데이터베이스에 대해서도 구축되어 있음

○ 4) 대기질과 기후변화

- 연구 내용

- 기후변화가 미세먼지와 다른 대기오염물질에 미치는 영향 이해
- 대기 중 자연적으로 배출된 화합물과 인위적 배출 오염물질 간의 상호 작용 이해
- 대기오염물질 저감과 기후변화 영향 저감 간의 부수 편익(co-benefits) 규명
- 이산화탄소, 온실가스 저감을 위한 적응 및 완화 옵션 개발

- 관련 연구: CMAQ 모델, GLIMPSE 모델 연구와 블랙카본, 청정 스토브(Clean Cookstove) 연구

○ 5) 대기과 에너지

- 연구 목표

- 에너지 시스템의 변화가 기후와 대기질에 미치는 영향 평가
- 에너지 자원으로써의 바이오매스가 대기질에 미치는 영향 평가

- 신규 에너지 기술과 자원의 영향을 이해하는데 도움이 되는 모델과 접근 방법 분석과 규명
- 관련 연구: 물과 에너지 연구, EPAUS9R (An Energy Systems Database for use with the Market Allocation (MARKAL) Mode), GLIMPSE 모델 연구
- 시사점
 - 미국의 대기 연구에서 현상규명 및 예측 분야는 매우 광범위하게 연구되고 있음. 예를 들어, 대기질과 기후변화를 통합하여 상호 영향을 살펴보는 연구, 에너지 시스템이 기후와 대기질에 미치는 영향을 파악하는 연구도 다각도로 진행되고 있음. 우리나라의 경우, 그간 미세먼지 문제 해결에 있어 개별적 접근을 실시한 것에 대한 반성과 평가(관계부처 합동, 2017)가 있었던 상황으로, 기후 에너지 정책간 연계성이 부족한 것이 주요 원인의 하나로 고려됨. 향후 기후변화가 미세먼지 농도에 영향을 줄 가능성이 크다고 예상되는 상황이므로(한국과학기술연구원, 2018) 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 기후변화 및 에너지와 연계한 연구까지 범위를 확대하여 현상을 규명하고 예측할 필요가 있음.

(2) 일본

□ 일본의 미세먼지 현황

○ 일본의 PM_{2.5} 농도 추이

- 일본에서 PM_{2.5} 대기환경기준은 2009년 제정되었지만, 2001년부터 측정을 하였고, 2002년 동경도내 연소로 규제를, 2003년 디젤차 배출관리를 시작하고, 2009년부터는 VOC 저감 대책이 도입되어 PM_{2.5} 농도가 지속적으로 감소되어 2011년까지 55% 감소됨(한국과학기술한림원, 2016) (그림 13). 이후에도 일본의 PM_{2.5}농도는 전반적으로 감소하는 추세임.

○ 일본 PM_{2.5} 농도에 대한 발생지별 기여도

- 일본의 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 한반도, 중국, 일본의 상대적 기여도는 표 8과 같음. 일본 내 지역에 따라 기여도는 달라지는데, 한반도의 기여도가 0-10%로 가장 낮고, 그 다음 일본국내 기여도가 21-51%로 낮으며, 중국의 영향이 39-61%로 가장 높음.

○ 일본의 미세먼지 문제

- 일본에서도 미세먼지로 인한 건강피해가 중요한 사회적 문제로 대두됨 . 2013년 1월 중국 베이징의 미세먼지 일일 평균농도가 993 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 올라가면서 일본에도 큰 영향(일본 후쿠오카시에서 국가 대기환경기준치, 일평균 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 농도 관측)을 미치게 되자 미세먼지에 대한 일본 사회 내 관심이 고조되고 문제가 제기됨(일본환경성, 2015).

□ 일본의 대기질 관리

○ 일본의 대기질 관리 근거

- 일본은 ‘대기오염방지법’과 ‘자동차대기오염규제법(1992년 자동차 NO_x법 제정, 2001년 자동차 NO_x-PM 법으로 개정)’을 근거로 대기질 관리를 해옴(한국과학기술한림원, 2016).

○ 일본 청정대기 프로그램(Japan Clean Air Program, JCAP)

- 재단법인 석유에너지기술센터(Japan Petroleum Energy Center, JPEC)가 실시하고 있는 대기 환경 개선을 위한 프로그램으로 경제산업성의 지원을 받아 연료를 사용하는 자동차 산업과 연료를 만드는 석유 산업 분야의 공동 연구 추진.
- 대기 환경 개선을 목표로 한 자동차 배출 가스 저감을 목적으로 1997년부터 2001년까지 JCAP I, 2002년부터 2006년까지 JCAP II가 추진됨.

○ 일본 오토오일 프로그램(Japan Auto-Oil Program, JTOP)

- JCAP I, II에 이어, 대기 환경 보전 및 개선을 전제로 하면서, 지구 온난화, 에너지 안전 분야를 포함하여, ‘이산화탄소 배출저감, 연료 다양화, 배출가스 저감’의 3 가지를 동시에 해결하는 최적의 자동차 연료 이용 기술 개발을 목표로 2007년부터 5년간 JATOP, 2012년부터 3년간 JATOP II, 2015년부터 3년간에 대한 JTOP III 사업을 진행함.

□ 일본의 미세먼지 대책과 연구

○ 일본 미세먼지 종합대책(정책패키지)

- 그림 14는 일본 환경성에서 2013년 발표한 미세먼지 종합대책(정책패키지) 개요로, 이 대책에서는 3가지 목표를 제시함. 목표 1은 ‘국민의 안심과 안전의 확보’로, PM_{2.5}가 고농도일 때의 대응을 개선 및 강화하려는 것임. 목표 2는 ‘환경기준 달성’으로 (국내에서 발생하는) 미세먼지의 현상규명과 감축대책을 통해 달성하고자 함. 목표 3은 ‘아시아 지역의 청정 대기 공유’로 주로 한중일 정책협력 및 대화를 통한 장거리이동 오염에 대한 대응에 해당함(일본환경성, 2015).

- 국내 미세먼지 대응 및 저감은 목표 1과 2와 관련되며 각각의 목표에 대한 대책은 다음과 같음. 목표 1, 고농도 대응에 대한 대책으로는 ‘미세먼지(PM_{2.5})에 대한 전문가 회의’를 2013년에 설치하고 미세먼지 고농도시(일평균 PM_{2.5} 농도가 70 μ g/m³ 를 초과할 것으로 예상되는 경우) 국민 행동 지침(잠정 지침)을 제시함. 목표 2, 환경기준 달성을 위해 국내 발생을 줄이기 위한 대책으로 PM 외, NO_x, VOC 등의 화학 반응에 의해 PM_{2.5}를 생성하는 원인 물질도 포함하여 저감하기 위한 장단기 과제를 실시함(일본환경성, 2015) (그림 15).
- 단기 과제: 미세먼지의 1차생성 미세먼지(매연, 디젤 미립자 등)와 2차 생성 미세먼지의 원인이 되는 전구물질(NO_x, VOC 등)의 배출규제 상황 점검, 배출실태 파악과 배출억제 기술현황을 조사 하여 대책의 조기실시 가능성을 모색함. 또한, 대기오염방지법 규제대상 제외 물질인 암모니아(NH₃)와 산불 및 들불 등 각종

연소가스의 배출 상황에 대한 대책도 검토하고 있음(이수철, 2017)

- 장기 과제: 고정발생원으로부터의 1차 생성 미세먼지에 대한 적절한 측정방법을 개발하고, 발생원 정보 및 데이터의 분석방법을 정교화하여 보다 효과적인 대책 마련을 위한 기반을 정비함. 특히 2차 생성 미세먼지에 대한 과학적 메카니즘을 규명하고 미세먼지의 전구물질인 휘발성유기화합물질(VOC) 등의 배출저감 가능성에 대한 연구가 많이 진행되고 있음(이수철, 2017)
- 일본에서의 미세먼지대책은 기존의 대기오염방지법과 자동차배기가스 규제관련법의 실시 상황을 점검하고 미세먼지의 발생원 및 발생경로 관련 정보와 자료정비에 힘을 쏟고 있음. 아울러 미세먼지에 대한 보다 정확한 발생원 및 발생량에 대한 정보를 신속히 국민에게 전달하기 위하여 중앙정부 및 지방자치단체와 연계 강화, 정보공유를 도모하면서 모니터링 체제를 정비하도록 함. 현재 미세먼지를 비롯한 대기오염물질의 상시감시는 대기오염방지법에 근거하여 지방자치단체가 실시하고 있음(이수철, 2017)

○ 시사점

- 일본은 자국의 주요 배출원인 이동오염원에 대한 투자와 관리를 집중하여 NO_x와 미세먼지 농도를 성공적으로 저감시킨 사례로 평가받고 있음(한림원, 2017). 하지만 최근 일본도 우리나라와 마찬가지로 중국의 고농도 미세먼지 영향으로 미세먼지로 인한 건강피해가 중요한 사회적 문제로 대두됨. 이에 그림 15를 보면, 최근 일본 정부는 국민들의 미세먼지 문제 대응력을 높이는데 주력하고 있음을 알 수 있음. 외부 영향은 자국의 노력만으로 해결할 수 없기 때문에 국민들의 대응력을 제고할 수 있는 노력을 최대화하는 것으로 판단됨. 우리나라는 국내 요인에 의한 미세먼지 농도도 일본에 비해 높은 상황이므로 국내 미세먼지 배출을 최대한 줄이면서 미세먼지 노출을 최소화할 수 있는 방안을 동시에 찾아야 함.

(3) 중국

□ 중국의 미세먼지 현황

○ 중국의 미세먼지 농도

- 중국 지상 측정소에서의 PM_{2.5} 측정은 최근에야 시작됨. 따라서 그 이전의 PM 오염 정도는 간접적 방법을 통해 알 수가 있는데, 장기간에 걸친 미국 NASA와 유럽연합 ESA의 공개된 지구 관측 위성자료가 있음(한국과학기술한림원, 2016).
- 일본의 사례에서 제시하였듯이 2013년 1월 중국 베이징의 미세먼지(PM_{2.5}) 일일 평균농도가 993 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 올라가면서 역대 최대치를 기록함. 중국 PM_{2.5} 오염의 원인을 분류하면, 석탄 사용에 의한 것이 45%를 차지하여 중국 전체에서 최대 오염원으로 나타났으며, 그 다음으로 자동차 배출가스와 산업배출이 각각 20%를 차지함(한국과학기술한림원, 2016).
- PM₁₀의 연평균 농도를 보면, 2012년에도 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 가까운 높은 농도를 나타내고 있지만, 2003년 이후 전반적인 농도는 감소하는 추이를 보임(그림 16).

- 최근 2년간 베이징의 PM_{2.5} 일평균 농도 현황을 보면, 농도를 보면, 2015년은 2014년에 비해 연평균 농도(97.7 → 82.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 최댓값(406.4 → 391.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 중국 환경 기준초과일(181 → 145일) 모두 개선되었음. 특히 모든 배출원들에 대해 특단의 강력한 배출억제 정책을 시행한 2015년 9월 3일 전승절 기념 퍼레이드 기간에는 PM_{2.5} 농도가 11.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 역대 최저치를 기록함(한국과학기술한림원, 2016).

□ 중국 정부의 대책

○ 제12차 환경보호 5개년 계획(2011-2015)

- 2020년까지 전체 에너지 15%를 비화석연료로 대체하고 2020년까지 에너지 강도(intensity)를 40-45% 감소시키는 것을 목표로 하고, PM_{2.5} 오염을 중요한 환경 문제로 처음으로 인정하고 새로운 연료 기준, 강화된 PM_{2.5} 환경기준을 포함하여 저감 및 제어 대책 수립을 가속화함. 2012년 2월 처음으로 PM_{2.5} 환경기준을 공표하고 2016년부터 전국적으로 실행하기로 함(한국과학기술한림원, 2016).

○ 대기질 개선 5개년 계획(2013-2017)

- 2017년까지 전국 지급 이상 도시(성과 현 사이의 행정구역)는 PM₁₀ 농도를 2012년 대비 10% 이상 감축하여 대기질이 양호한 일수를 점진적으로 제고하는 것을 목표로 삼음. 이 중 징진지(베이징-톈진-허베이, BTH), 장강삼각주(상하이 일대) 및 주강삼각주(광둥 일대) 등 3대 대기오염 심각지역은 PM_{2.5} 농도를 2012년 대비 각각 25%, 20%, 15%를 감축하는 것을 목표로 함(전소현과 김용표, 2015).
- 총 1조 7000억 위안(약 289조 원)을 투자하여 전국의 대기오염을 개선하는 것을 목표로 함. 2018년 목표 달성을 위한 10가지 방안이 제시됨(한국과학기술한림원, 2016).

- 1. 산업체에서 석탄 세척율을 100%까지 올리고, 고유황함유 석탄(>0.6%) 사용 금지
- 2. In-use heavy duty 차량에 DPF(Diesel Particulate Filter) 장착 의무화
- 3. 허베이지역은 석탄 사용을 줄이기 위해 철강 생산을 원래 계획인 4,000만톤 줄이는 계획에서 6,000만 톤 감산으로 강화
- 4. 허베이와 텐진 지역의 제철소들은 현대화 된 PM 제어기술 적용(ESP and FAB)
- 5. 허베이와 텐진 지역의 시멘트 공장에 FAB 설치. 허베이 지역 시멘트 공장에는 SNCR도 설치
- 6. 허베이 코크 공장에 집진시설 설치
- 7. 허베이 지역의 석탄 난방 플랜트에 DeNOx 시설 설치. 텐진 지역의 석탄 난방플랜트 50%에 DeNOx 시설 설치
- 8. 허베이와 텐진 지역에 Euro3 디젤 차량을 금지하고 디젤 사용 비율을 20% 아래로 줄임
- 9. 허베이와 텐진 지역의 주요 산업체에서 VOC 배출을 30-40% 감축
- 10. 대형 가축사육장 비율을 30%까지 높임. 허베이와 텐진 지역에 저속방출 비료사용 권장

□ 중국의 PM_{2.5} 관련 연구

○ 중국의 PM_{2.5} 연구 동향(김유미 등, 2015)

- 중국 내 PM_{2.5}에 대한 연구는 증가하는 추세임. PM_{2.5}의 특성을 파악하기 위한 관측과 모델링 연구, PM_{2.5}의 배출원 기여도 산정 연구, 연무(haze) 사례 연구 등이 활발하게 진행중임. 표 9에서 중국의 PM_{2.5} 연구를 1) 장기 추이 분석, 2) 관측, 3) 모델링, 4) 배출원 기여, 5) 연무 사례 연구, 6) 건강영향에 대해 정리함. 1)-5) 연구는 미세먼지 기술로드맵 대분류상 주로 ‘현상규명 및 예측’, 6) 연구는 ‘국민생활보호’에 해당함.

○ 시사점

- 최근 중국 정부는 미세먼지 문제를 해결하기 위해 전폭적인 지원을 하고 있음. 대기오염방지 행동계획과 같은 대책을 마련하고 규제를 강화하고 연구에 아낌없이 투자를 하고 있음. 결과 미세먼지 분야 연구에 필요한 신뢰도 높은 자료들이 단기간에 생성되고 있으며, 미세먼지 분야 연구가 양적, 질적으로 모두 향상됨. 이전에는 동아시아 대기오염 문제를 해결하기 위해 중국의 대기오염물질 배출시설에 방지시설을 지원하는 방안을 마련하는 것 등을 고민하였지만, 앞으로는 동아시아 미세먼지 문제를 해결하기 위해 원인을 파악하고 현상을 규명하기 위한 공동연구를 효율적으로 진행할 수 있는 방법과 공동 연구 체제를 공고히 하는 방안 등이 중요해질 것임.

2.2. 국내 미세먼지 저감 기술로드맵 사례

가. 미세먼지 국가전략프로젝트

○ 미세먼지 국가전략프로젝트 개요(그림 17)

- 미세먼지 문제해결을 위해 과학기술기반 미세먼지 대응 전략 프로젝트가 2017년부터 2019년까지 3년간 총 496억원의 정부지원금으로 진행됨(관계부처 합동, 2017).
- 미세먼지 저감에 있어 패러다임의 전환으로 새로운 연구 목표와 전략을 수립하고, 대기환경 분야에 있어 국가적으로 종합적이고 집중적인 기획과 예산 지원이 이루어진 최초의 연구개발사업으로 평가됨(한국과학기술연구원, 2018).
- 하지만, 1단계 3년 동안에 현안 대응을 위한 연구 수행으로 기초·원천 기술 개발 연구가 상대적으로 미흡하고, 국민 불안 해소를 위한 위기관리/소통 등의 연성 기술(soft technology)에 대한 연구가 미흡하다고 평가됨(한국과학기술연구원, 2018).

- 미세먼지 국가전략프로젝트 기술개발 추진일정(안)(관계부처합동, 2016b)

나. 미세먼지 R&D 패키지형 투자플랫폼

○ 미세먼지 R&D 패키지형 투자플랫폼 개요(녹색기술센터, 2018)

- 4차 산업혁명에 선도적으로 대응하기 위해 각각의 R&D 사업별 지원 방식에서 탈피하여 '기술+ 산업+ 제도'를 패키지 사업군으로 구성하여 종합적 지원하고, 혁신적인 R&D 지원체계를 구축함.
- R&D 패키지는 '특정 목적을 지향하는 상호 관련된 R&D들의 묶음'으로 동일 분야에 대해 개별적으로 추진 중인 R&D를 하나의 단위로 묶어줌으로써(그림 18) R&D간 상호보완성과 통합성을 강화하여 R&D 효율성과 효과성을 제고하는 목적을 지님.

- R&D 패키지는 기술(공급)이 아닌 '문제'(수요)로부터 도출됨. 미세먼지 해결을 위한 과학기술 R&D 외에 이를 뒷받침하는 지원 R&D도 필요함. (1) 자연과학, 기술뿐만 아니라 국민의 인지 및 개발된 기술의 실제 사업화 및 사회적 수용성 향상을 위해 사회과학분야 연구 개발 지원이 필요하고, (2) 미세먼지 R&D 패키지에 포함되는 R&D는 과학기술지식 R&D와 정책 지원 제도 및 소통 R&D로 구분이 가능함(그림 19). 또한, (3) 핵심·기반지식, 기술·정보 융합, 공공 서비스로도 구분이 가능함(한국과학기술연구원, 2018) .

- 미세먼지 저감 분야는 시범적용사업에 포함되며, 2019년 정부 연구개발 예산 심의부터 적용됨.
 - 하지만, 정부 R&D 패키지형 연구개발 투자플랫폼의 개념은 하향식 연구개발 수요 분야 파악이나, 현재 정부 연구개발 투자 모형은 상향식 연구개발이어서, 필요한 연구개발 분야 키워드가 제시되었어도 관련부처에서 연구개발 의향이 없는 경우에는 연구개발이 불가능하다는 제한점이 제시됨(한국과학기술연구원, 2018).
 - 미세먼지 R&D 패키지형 투자플랫폼은 미세먼지 저감을 위한 새로운 통합형 R&D 추진 방식을 의미하는 것이지만, 기존 과학기술 R&D에서 분류되지 않았던 제도 및 소통체계 개선과 같은 정책 R&D도 분류하여 투자모형 개념도를 제시함.
- 정부 R&D 패키지형 연구개발 투자플랫폼 투자모형 개념도(그림 20, 21).

다. 기초·원천 R&D 연구 추진(안)

○ 기초·원천 R&D 연구개요

- 국민이 불안해하는 분야에 대해, 불안 저감을 위한 적극적인 연구 수요 발굴 및 연구 수행이 필요하다는 취지하에 정책 수립, 시행 과정의 신뢰성과 정당성 확보와, 국민과의 효과적인 소통을 위한 미세먼지 분야의 기초·원천 연구가 기획됨(그림 22).

- 기초·원천 사업 범위를 현상규명 및 예측, 미세먼지 배출저감, 노출 및 건강영향 최소화, 제도 및 소통체계 개선의 4개 분야로 설정하고, 미세먼지로 인한 영향을 저감하고 국민 불안을 해소하기 위한 연구 분야를 기획함.

○ 기초·원천 R&D 연구 추진(안)

3. 미세먼지 관련 미래 주요 문제 및 이슈

3.1. 여건 변화

가 내부 여건

○ 고령화 사회

- 고령화는 미세먼지에 의한 조기사망자 증가에 큰 영향을 미칠 것임. 우리나라의 미세먼지에 의한 조기사망자는 2060년에는 2010년 대비 3배 이상 증가할 것으로 예상됨. 이는 대기오염의 악화와 함께, 급속한 인구구조 변화에 의한 것임(OECD, 2016). 그림 23에서 보듯이 고령화 국가(2015년 기준 65세 이상 인구의 비율이 14%를 넘는 나라)에서는 미세먼지 농도가 같더라도 사망률이 증가하는 것을 알 수 있음. 따라서 미세먼지 농도가 현재 수준의 절반으로 감소하더라도 미세먼지에 의한 조기사망자는 현재와 비슷한 수준이거나 증가할 가능성이 큼.

○ 높은 사회적 관심과 정부 대책에 대한 불신

- 국민의 미세먼지 문제에 대한 관심은 매우 높음(그림 24, 표 12). 한국보건사회연구원의 ‘사회통합 실태 진단 및 대응 방안 연구(IV)’ 보고서에 따르면, 2017년 성인 3천839명을 대상으로 각종 위협에 대한 불안 수준을 측정한 결과, 가장 높은 항목은 ‘미세먼지 등과 같은 대기오염’으로, 경기침체 및 저성장, 고령화로 인한 사회문제, 수질오염, 성인병·실업 및 빈곤, 북한의 위협 및 북핵 문제, 노후보다 불안 수준이 높았음(연합뉴스, 2018). 또한 인터넷에서 자주 언급되는 키워드 순위에서도 미세먼지가 2013년 19위에서 2017년 6위로 상승하여, 육아나 출산보다 자주 언급됨(송길영, 2018).
- 국민들의 정부의 미세먼지 대책에 대한 신뢰도는 높지 않음 2016년 6월 시행된 여론조사에서 국민의 75%가 정부의 미세먼지 대책에 만족하지 않았고, 15%만이 만족함(국회뉴스, 2016). 정부의 미세먼지 예보를 신뢰하지 못하는 국민들이 자체적으로 미세먼지 대책 모임을 만들어 정보를 교환하고 미세먼지 예보를 하고 있음(JTBC, 2018).

- 일반인과 전문가의 미세먼지에 대한 인식이 큰 차이를 보이고 있음. 그림 25와 26에서 보듯이 미세먼지의 원인에 대해 일반인은 언론의 영향으로 ‘중국발 스모그’라는 관념이 매우 크게 자리 잡고 있음. 반면에 전문가는 미세먼지는 여러 오염원에서 배출된 대기오염물질에 의해 배출, 생성되는 것으로 인식하고 있음 (김영욱 등, 2016). 이는 전문가의 의견을 반영하여 미세먼지 저감을 위한 정책을 수립하고 시행하는 과정에서 국민들의 신뢰와 지지를 받기 힘들 가능성을 보여주는 것임.

○ 정부의 적극적인 노력

- 정부는 2013년 환경부에서 미세먼지 관리 종합대책을 발표하였고 (환경부, 2013), 이후에도 국민의 관심이 높아지자 관계부처 합동으로 2016년 미세먼지 특별대책 (관계부처 합동, 2016a), 2017년 미세먼지 종합대책을 발표하여 (관계부처 합동, 2017) 미세먼지 문제 해결을 위한 대책을 수립하여 시행하고 있음. 이와 함께 2018년 국무총리실 산하에 미세먼지 위원회를 구성하기로 함. 또한 국회에서도 미세먼지 문제 해결을 위한 법안이 여럿 발의되어 심의중임.
- 정부에서는 국민이 불안하게 느끼는 사회 문제를 해결하기 위해 국민 문제 해결형 연구개발사업을 추진하고 있음. 2013년 사회문제 해결형 연구개발사업을 기획하여(과학기술정책연구원, 2013) 2014년부터 3년간 ‘초미세먼지 통합형 인체 유해성 실시간 진단, 예보 모델 개선 및 저감 기술개발’ 과제를 수행함. 또한 국가전략프로젝트 연구개발사업을 2016년에 기획하여(관계부처 합동, 2016b) 2017년부터 3년간 연구를 수행하고 있음. 또한 패키지형 연구개발 투자플랫폼(PIE)을 개발하여(녹색기술센터, 2018) 범부처 사업 간 연계 및 투자효율성 제고를 통한 미세먼지 관련 정부 연구개발 자원의 효율적인 활용을 위해 활용하고 있음. 또한 국민생활연구 연구개발사업을 새로 추진하여 국민이 연구 과제를 제안하고 기획, 평가하는 새로운 노력을 하고 있음(과학기술정보통신부, 2018). 그러나 현안해결이 연구의 주목적이어, 문제의 근본적인 해결을 위한 연구 분야는 상대적으로 소홀 해진다는 단점이 있음(한국과학기술연구원, 2018).

나. 외부 여건

○ 기후변화

- 2013년부터의 동아시아 농도 미세먼지 발생현상 증가원인을 분석한 연구들에 따르면 동아시아 기상현상 변화에 따른 대기 중의 확산현상의 감소가 주된 원인으로 밝히고 있음. 최근 서울을 비롯한 한반도 미세먼지 농도 증가 또한 국내 및 중국 대기오염물질 배출량 증가라기보다는 전지구적 지구온난화에 따른 한반도 기상현상의 변화에 기인하는 것으로 주장하는 연구결과가 계속되어 보고되고 있음(그림 27). 중국의 2013년 1월 고농도 미세먼지 사례도 기후변화가 한 원인일 가능성이 높은 것으로 보고되었으며(Li et al., 2018), 기후변화로 인해 베이징에서 겨울에 미세먼지 고농도 사례가 발생할 가능성도 증가할 것으로 예상된다는 연구결과가 발표됨(그림 28) (Cai et al., 2017). 따라서 기후변화가 계속되면서 같은 대기오염물질 배출 조건에서 미세먼지 농도가 증가할 가능성이 높음.

○ 중국의 적극적인 미세먼지 저감 노력

- 중국도 우리나라처럼 미세먼지가 국가 현안임. 대기오염 특히 미세먼지 관련 강력한 저감 정책과 정책 결정을 뒷받침하는 대규모 현상 이해 연구는 2008년 베이징 올림픽을 준비하는 과정에서 시작되어, 현재까지 계속되고 있음.
- 2013년에 발표된 대기오염방지 행동계획에서는 10대 대기오염 저감 방안을 제시함. 특히 중국 전역에서도 오염이 심각한 베이징 수도권 지역(징진지), 상하이 일대(장강 삼각주),

광저우 일대(주강 삼각주)에 대해서는 더 엄격한 관리 방안을 제시하여 실시하고 있음(전소현과 김용표, 2015). 2017년 3월 제 12기 전인대 5차회의에서 람천보위전(파란하늘 지키기) 5개 중요과제를 발표함(국립환경과학원, 2018). 2015년 1월부터 발효된 친환경보호법 개정안의 주된 내용은 크게 3가지로 나눌 수 있는데 1) 환경당국에 법 집행 권한 부여, 2) 벌칙의 강화, 3) 공익소송제도 도입임(전소현과 김용표, 2015). 2016년 1월부터 시행된 개정 대기오염방지법에서는 1) 총량억제 책임 강화, 2) 자동차 관리 및 석탄연료 감축을 통한 대기오염 개선 강화, 3) 엄격한 처벌 강화, 4) 정보 공개와 신고 장려 등의 내용을 담고 있으며, 지방정부와 기업에 대기환경 개선에 대해 무거운 책임을 지게 함(국립환경과학원, 2018).

- 특히 중국 수도권의 미세먼지 문제로 인한 국민의 불안을 해소하기 위해 2017년 9월부터 총리 기금을 사용하여 수행하는 연구로 국가대기오염방치공관연합중심 (National Joint Research Center for Tackling Key Problems in Air Pollution)을 설치하여 3년간 연구를 수행중임. 여기에서는 1) 생성원인과 영향도 규명, 2) 배출저감, 3) 정책 지원, 4) 건강영향의 4개 분야에 대한 연구를 수행중임. 대상 지역은 베이징 대기환경에 영향을 주는 2+26 도시임. 1,500여명의 연구 인력이 참여하고 있고, 28개의 연구팀을 별도로 구성하여 2+26 도시에서 연구 및 자문을 하는 대규모 조직 연구임 (국립환경과학원, 2018).
- 이에 따라 중국의 대기오염도, 특히 미세먼지 농도는 빠르게 저감되고 있음. 2016년 중국 74개 도시의 연평균 PM2.5 농도는 2015년에 비해 9.1% 저감됨(MEP, 2017). 베이징은 2013년 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2016년 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 18% 감소하였고, 수도권 지역은 2013년 106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2016년 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 33% 감소함(국립환경과학원, 2018). 황산화물의 배출은 중국 공식자료에서 2006년 최대치를 보이고 감소하였고, 제주도 고산 배경측정소에서 관측한 비해염 황산염 농도도 2006년 최고 농도를 보였음(Kim et al., 2014). 또한 인공위성 자료와 역모델링 연구를 통해 이산화질소의 배출도 2011-2012년부터 줄고 있는 것으로 나타남(Souri et al., 2017).
- 그러나 우리나라나 선진국의 사례를 검토해보면 중국이 현재 시행하고 있는 연료 전환과 사업장 관리 강화 정책으로 달성할 수 있는 미세먼지 농도저감에는 한계가 있을 것으로 보임. 워낙 방대한 면적에 많은 인구가 생활하고 있으며, 지속적인 경제발전을 추구하고 있고, 지역별로 대기오염 형태가 다르기 때문에, 중앙정부의 규제만으로는 미세먼지 문제를 국민들이 안심할 수 있는 정도로 해결하기 위해서는 오랜 시간이 걸린 것으로 보임.

○ 북한의 영향 증가와 협력 가능성

- 북한은 열악한 경제 사정으로 에너지 사용량이 작아 대기오염물질 배출량은 작음. 그러나 시설의 노후화와 운영의 비효율 문제로 단위에너지 사용량 당 대기오염물질 배출량은 많음(김인선 등, 2011). 북한의 전력 생산은 수력과 석탄 화력에 주로 의존하고 있으나, 석탄화력 발전은 발전효율이 23% 정도로 낮으며, 그 결과 단위 전력생산 당 이산화탄소

배출량은 그림 29에서 보듯이 전세계적으로 매우 높음(Yeo and Kim, 2017).

- 그러나 북한은 환경자원 소비가 충분하지 못함에도 불구하고 생태발자국이 생태수용력보다 큰 생태적자 상태임. 북한의 생태적자는 생태수용력보다 생태발자국을 구성하는 요인에 의한 기여가 높았음. 생태적자는 1966년에 시작되었는데, 이 시점부터 1990년대 중반까지는 일인당 생태발자국 값이 오버슈트 비율에 기여하는 비율이 60% 전후로 가장 높았고, 1990년대 중반 이후에는 인구에 의한 기여도가 40~60%로 가장 높았음. 생태수용력과 생태발자국 모두에서 높은 비중을 차지한 경작지 부분의 경우, 면적이 증가했음에도 불구하고 생산성이 줄어들어 생태수용력이 감소함. 북한의 생태적자를 줄이기 위해서는 1990년 이후 눈에 띄게 줄어들고 있는 산림면적을 이전 수준으로 복구하고, 경작지의 생산성을 높이기 위한 방안을 마련해야 할 것임. 또한 근본적으로 북한 주민의 빈곤을 해결할 수 있는 식량 지원 방안, 자연재해에 대한 취약성을 극복할 수 있는 방안도 함께 마련되어야 할 것임(여민주와 김용표, 2017).
- Kim et al. (2013)에 의하면 2005-2006년 서울에서 관측한 생체소각에 의해 배출된 것으로 추정되는 미세먼지의 다환방향족탄화수소(PAHs)의 20% 이상이 북한에서 이동한 것을 평가됨. 또 배민아 등 (2018)에 의하면 수도권 미세먼지 농도는 전반적으로 북한의 영향을 받으며, 수도권 북쪽으로 갈수록 북한의 영향을 크게 받았다. 수도권으로 넘어오는 북한 미세먼지는 2016년 연평균 $3.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 수도권 전체 미세먼지 중 14.7%를 차지함. 북풍이 많이 부는 1월에는 북한의 영향력이 더 올라가 수도권의 북한발 미세먼지는 약 20%로 추정됨. 특히 미세먼지를 만드는 물질 가운데 나무 등 생물체를 소각하면서 발생한 유기탄소(OC,

organic carbon)의 경우 북한의 영향력이 월등히 높았음. 1월 수도권대기 OC의 42%가 북한발로 모사됨(그림 30).

- 북한은 생태 환경 보호와 경제 발전을 강력하게 추진할 것으로 예상되며, 이에 따라 여러 영향이 있을 것으로 예상됨. 북한의 경제 개발 과정에서 에너지 사용량이 증가할 것으로 예상되어, 북한의 대기환경에 영향을 미칠 뿐만 아니라 우리나라, 특히 수도권 북부와 서울의 미세먼지 농도에 끼치는 영향도가 증가할 가능성이 큼. 이러한 영향을 줄이기 위해서는 북한의 미세먼지 현황 파악과 함께 북한의 경제 발전 과정에서 효율적인 에너지 사용과 적극적인 환경관리 정책을 시행할 수 있는 협력을 제안하는 것이 필요함. 다행히 최근 국제정세로 인해 에너지를 포함한 환경협력 활성화 가능성이 높음. 특히 최근의 북한과 미국의 대화와 함께 남북한의 대화와 협력이 구체적으로 진행되고 있어 미세먼지 문제와 직접적으로 연결되는 대기환경과 기후변화 관련 협력을 적극적으로 추진할 수 있을 것으로 보임. 북한은 이미 국제적인 기후변화 관련 체제에 적극적으로 참여하고 있고(Yeo and Kim, 2017), UN에도 이와 관련된 지원 요청을 하였음(UNEP 2012).

○ 미국의 강력한 미세먼지 연구 협력 의지

- 2016년 미국 NASA가 우리나라와 공동으로 KORUS-AQ 연구를 수행한 것을 포함하여 미국은 우리나라와의 환경 분야, 특히 대기환경 분야의 공동연구에 적극적임. 물론 이러한 공동연구는 미국의 국익에 도움이 되는 한도 내이겠으나, 우리나라로서는 아직 우리보다 분석 장비나 항공기 등의 플랫폼, 그리고 연구 관리와 결과 해석 등의 전반적인 연구 개발, 수행, 결과 해석에서 우위에 있는 미국과의 공동연구가 미세먼지 문제 해결에 큰 도움이 될 것임.

다. 대기환경

○ 패러다임 변화

- 정부에서 2017년 관계부처 합동으로 발표한 미세먼지 관리 종합대책은 여러 면에서 대기관리의 패러다임 변화를 보여주고 있음. 예를 들어 수도권 위주의 관리에서 지역 특성을 고려한 관리로, 농도 관리에서 위해성을 고려한 관리로, 관리 정책도 과학기술에 기반 한 통합적인 관리 정책으로 변경하는 내용을 담고 있음(표 13). 이와 함께 지금까지의 미세먼지 관리 대책보다 광범위하게 발전, 산업, 수송, 생활 부문 등 거의 모든 분야에서의 미세먼지와 전구물질 배출저감에 대한 대책을 담고 있음. 또한 중국을 포함한 동아시아와 여러 국가와의 협력, 위해성 저감 관점에서의 미감계층 보호 대책, 과학에 기반 한 관리 등 지금까지 전문가들이 주장하였던 내용들이 대부분 담겨 있음. 특히 지금까지는 관리가 잘 되지 않았던 이륜차와 선박과 건설기계 등의 비도로 이동오염원, 그리고 고형연료(SRF), 노후석탄발전소에 대한 관리를 강화될 것으로 제시되어 있음(관계부처 합동, 2017). 단, 패러다임 변화와 함께 구체적인 정책 제시가 미흡하고, 패러다임 변화의 근거 자료가 미흡한 것이 단점으로 지적되고 있음 (한국과학기술연구원, 2018).

○ 영향 역치가 없음

- 미세먼지에 의한 인체 영향은 역치가 없으며, 그림 31에서 보듯이 낮은 농도 영역에서 그 저감 효과가 더 큰 것으로 알려져 있음. 이는 미세먼지 저감 효과가 농도가 낮은 영역에서도 큰 것을 의미하며, 미세먼지 농도가 서울의 1/2 수준인 유럽 많은 도시들에서 지속적으로 노후 자동차 통행제한 등의 미세먼지 저감 정책을 지속적으로 추진하는 근거의 하나임.

○ 오존 농도 증가

- 대부분이 이차 생성에 의해 발생하는 미세먼지와 함께 대기에서의 반응을 통해 생성되는 오존(O₃)은 1990년대부터 증가하는 추세임(그림 32). 이는 전반적으로 줄어드는 추세를 보이는 미세먼지와는 다른 경향임. 이런 경향은 그림 33에서 보듯이 외부에서의 이동 효과와 국내에서의 화학반응이 결합된 결과로 보임. 중국도 미세먼지 농도는 저감되고 있으나, 인구 밀집지역에서의 오존 농도는 증가하고 있음(Wang et al., 2017).
- 미세먼지가 인체에 대한 위해성이 큰 것과 비교하여, 오존은 인체에 대한 위해성이 클 뿐만 아니라 농작물 등의 생태계에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 이에 대한 저감 연구와 대책이 필요함.
- 오존은 미세먼지의 대부분 성분과 마찬가지로 대기에서 생성되는 2차 오염물질이어서, 오존을 저감하기 위해서는 그 지역 주요 전구물질인 질소산화물과 휘발성유기화합물의 농도 비율과 반응 정도에 대한 과학적인 이해가 필요함.

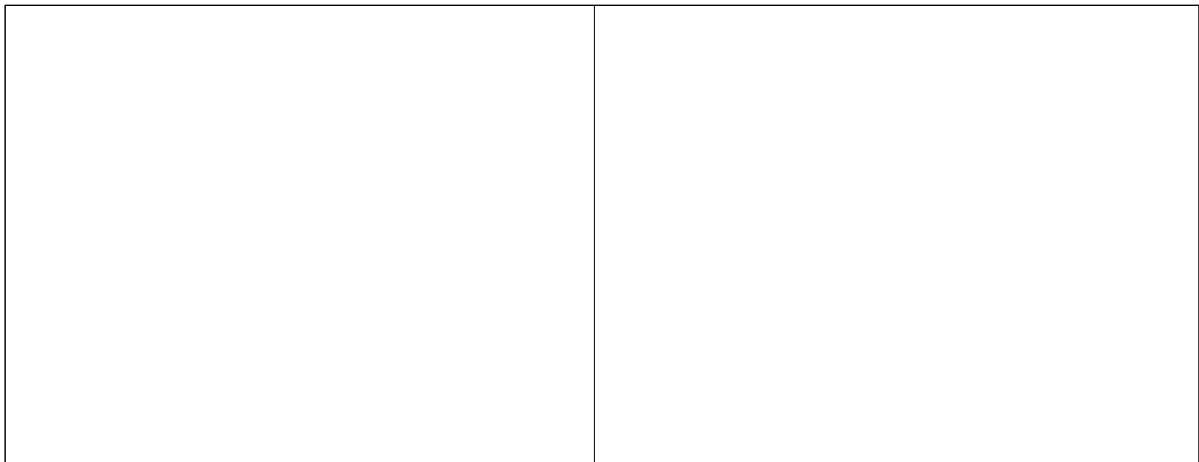
그림 32. 수도권 일최고 8시간 평균 오존 농도 추이(김정환 등, 2018). 미세먼지 농도 추이와는 달리 계속 증가하고 있음.

그림 33. 서울의 남동쪽에 위치한 태화 연구 숲 인근에서 KORUS-AQ 연구기간에 DC-8 항공기가 52건의 고도별 관측을 진행하는 동안 관측한 오존의 수직적 분포. 박스는 1 km 구간에 따라 개별 측정 값의 중간값과 사분위 값을 나타냄(국립환경과학원, 2017). 관측한 오존의 최소값이 대체로 60ppb(우리나라 8시간 평균 오존 대기환경기준)을 초과하는 것을 알 수 있음. 또한 대부분의 경우 오전에 비해 오후에 오존 농도가 높은 것은 국지적인 광화학반응에 의한 오존 생성이 발생함을 의미함.

○ 연구 기반 확충

- 최근 5년간 국내의 미세먼지 연구 기반은 비약적인 발전을 함. 아시아에서 유일하게 대기오염현황(미세먼지, NO₂, SO₂, O₃, HCHO)을 실시간 관측할 수 있는 정지궤도 환경위성 탑재체사업(GEMS)을 2012년 시작하여 총 1,500억의 예산을 투입하여 2019년말 발사예정에 있음. 현재 개발 중인 정지궤도 환경위성 탑재체는 3만 6,000 km 상공에서 지구 대기환경을 관측할 수 있는 성능을 지닌 초고해상도 분광센서로 세계 최초로 개발이 진행되고 있으며 위성자료의 활용과 연구 지원을 위해 올해 ‘국가환경위성센터’가 이미 설립됨. 2019년 환경위성이 발사에 성공할 경우 인도에서부터 일본 열도까지 광범위한 지역(5,000×5,000 km)을 매 시간 관측할 수 있기 때문에 미세먼지 예보 정확도 향상과 주변국으로부터 이동되는 대기오염물질의 실시간 감시 및 배출량 정보의 정확도 향상 등을 기대할 수 있음(2017년 환경부 보도자료).

그림 34. 국내에서 개발 중인 환경위성 탑재체 (2017년 환경부 보도자료).



- 2017년 기상청은 총 126억원이 투입된 기상 및 대기오염 관측용 항공기를 도입하여 운영 중에 있음(표 14). 기상항공기에는 총 14종 25개 항목의 관측 장비가 구비되어 종합적이고 입체적인 기상 대기오염 관측이 가능하게 됨. 최대 6시간 고도 10 km 까지 연속 관측이 가능한 이 항공기는 미국 비치크라프트 (Beechcraft)사의 King Air 350HW 기종임. 이 항공기는 태풍, 집중호우, 대설 등 계절별 위험기상과 해상 기상현상 뿐 만 아니라 미세먼지를 비롯한 대기오염물질 측정에 활용될 계획임.

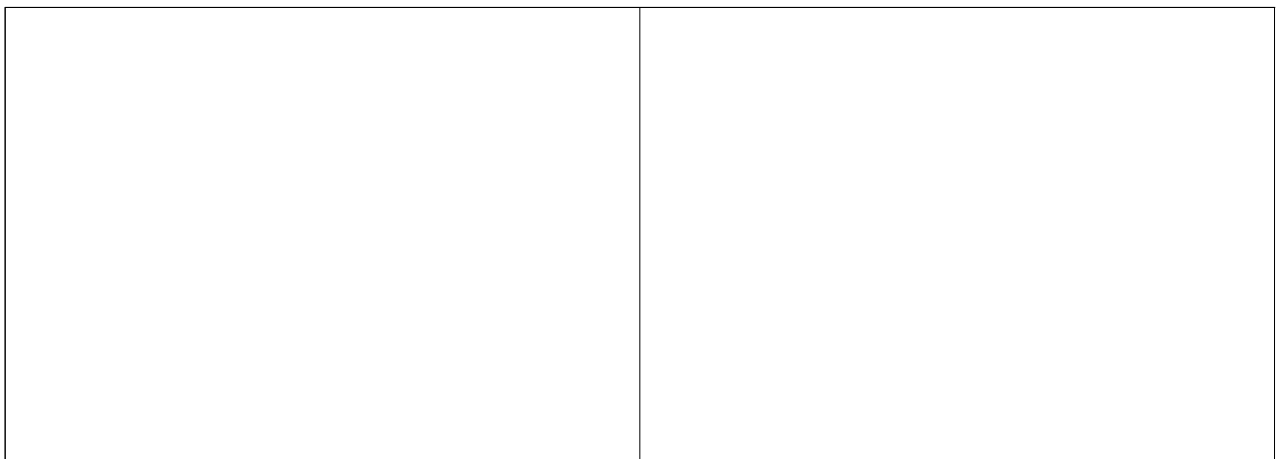
- 국립환경과학원은 한서대학교와 공동으로 한서대 항공기중 중형 여객용 항공기(Beechcraft 1900D, 19인용)를 개조하여 항공측정시스템으로 구축 중에 있음. 기상청 항공기보다 큰 기체로 6시간까지 운영가능하며 미세먼지의 성분을 포함한 다양한 대기오염물질의 실시간 관측이 가능하도록 추진되어 2018년 말에 구축을 완료할 예정임(그림 35). 기상청항공기가 기상요소 및 에어로졸의 물리적 특성에 특화된 반면에 한서대 연구용 항공기는 화학적 특성분석에 최적화된 관측 장비 구성을 하고 있음(표 15).

그림 35. 한서대/국립환경과학원 항공기 및 제원(김종호, 2017).



- 기상청과 해양과학원은 각각 기상 및 대기오염관측이 가능한 해양관측선박인 기상 1호와 온누리호를 운영 중에 있음. 498톤급(길이 64m)인 기상1호는 최대 탑승인원은 47명으로 대기 환경을 관측할 수 있는 고층기상관측장비(ASAP)와 미세먼지 등 추가적인 연구자들의 대기오염요소 관측을 지원할 수 있는 플랫폼임. 1442톤의 온누리호는 25명의 연구원이 탑승하여 해양 및 대기환경의 전문적인 연구를 집중적으로 장기간 관측할 수 있는 여건을 제공하고 있음. 실제로 2016년 KORUS-AQ 기간동안 기상 1호와 온누리호는 국내 연안의 대기환경 현황을 종합적이고 입체적으로 관측하는데 크게 기여한 바 있음.
- 미세먼지 현상의 정확한 규명을 위해서는 첨단 관측 기술과 장비의 기반이 매우 중요함. 이들 장비의 대부분은 매우 고가여서 일반연구자들이 구축하기 매우 어려운 상황임. 환경부는 2008년부터 미세먼지 분석 등 첨단 대기오염관측 장비가 구비된 백령도 대기오염집중측정소의 설치를 시작으로 현재까지 총 6소의 대기오염측정소를 설치 운영하고 있음(표 16). 각 집중측정소의 목적에 따라 거점 지역(그림 37)에 위치하여 미세먼지 등 대기오염 전반의 종합적이고 집중적인 관측 활동이 수행되고 있다. 현재는 일반 연구자들이 활용이 어려운 첨단장비를 보유하고 정기적인 관측 활동을 통해 미세먼지의 원인 규명 및 현황과악에 지대한 역할을 하고 있음. 집중측정소는 추후에도 미세먼지 공적 R&D의 핵심적인 기반이자 민간 연구자들의 R&D 확대에도 기여할 것으로 보임.

그림 36. 기상청의 기상1호(좌)와 해양과학원의 온누리호(우).



- 또한 미세먼지 국가전략프로젝트의 일환으로 한국형 미세먼지 예보 모델링 개발 연구가 2017년부터 진행되어 2019년 개발완료 예정임. 한반도 미세먼지 고농도 사례에 대한 예보 모델의 예측 정확도는 전국 47%로 매우 낮은 실정인데 이 연구를 통해 획기적인 정확도 개선을 도모할 예정임. 예보모델은 배출량·기상장 입력 처리 IO 모듈, 한반도에 특화된 대기화학 모델링 모듈, 분석 후처리 모듈 의 3대 핵심모듈을 독자적으로 개발하고 이를 궁극적으로 통합하여 단일 운영시스템 개발을 목적으로 함. 개발시스템은 예보 현업기관인 국립환경과학원에서 시범운영 후 검증 및 개선·보완*을 거쳐 본격 서비스할 예정으로 2020년까지 미세먼지 고농도시 단기 예보의 정확도 75% 구현할 것으로 기대되며 이를 통해 미세먼지 현황 분석 기술과 정책 효과 검증 등 다양한 분야에서 활용이 가능할 것임.

○ 불균형적인 분야별 기술 수준

- 정책의 신뢰성 확보를 위해서는 정책에 활용된 자료의 과학적 근거가 필수적임. 또한 다양한 대책의 우선순위를 결정하기 위해서도 대책별 효과분석이 필요하며, 이에 는 과학적인 근거가 필요함. 그러나 우리나라의 미세먼지 정책 수립 과정에서 미세먼지 생성 기작의 이해와 같은 과학기반 지식과 정책 순위 결정 및 시행 분야가 선진국에 비해 가장 뒤떨어진 것으로 평가됨 (그림 38). 예를 들어 미세먼지 저감을 위해서는 기존의 직접 배출이나 질소산화물 배출저감보다는 암모니아 배출저감이 더 효율적일 수 있다는 연구 결과가 제시됨(그림 38). 그러나 정책 수립에 반영하기 위해서는 보다 확실한 과학적 근거가 필요하나, 현재 우리의 미세먼지 생성기작 규명 연구 수준으로는 이에 대한 명확한 근거를 제시하지 못하고 있음. 따라서 생성기작 규명과 정책 순위 결정 및 시행 분야에 집중적인 연구개발이 필요함.

○ 복합적인 문제

- 미세먼지 배출저감은 에너지, 사회구조와 밀접하게 연관되어 있는 복합적인 문제임. 미세먼지와 미세먼지를 생성하는 전구물질은 다양한 인간의 활동에 의해 발생하고, 자연적으로도 발생하기도 함. 따라서 미세먼지 농도 저감이라는 정책목표를 달성하기 위해 미세먼지와 그 전구물질 배출을 저감하기 위해서는 에너지 사용, 농업, 축산업 등의 여러 산업 활동과, 교통 및 도시계획 등 여러 분야의 정책이 동일한 목표를 달성하기 위해 연계되어야 함. 또한, 미세먼지 고농도 현상이 오염물질의 배출 유무 혹은 과다와의 일대일의 단순한 상관관계를 벗어나 대기 중의 여러 기상현상과 연관된 복잡한 문제임을 명확히 인식하고, 이를 종합적으로 판단하고, 국민과 협의하는 과정을 가져야 함.

- 국민 개개인도 본인이 사용한 에너지가(전기나 자동차 연료 등)가 본인은 인식하지 못하였지만 미세먼지 농도 증가에 영향을 미치고 있음. 또한 미세먼지는 대상을 가리지 않고 주로 호흡을 통해 인체에 위해를 끼치고 있음. 따라서 미세먼지에 관해서는 우리는 가해자이자 피해자임. 따라서 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 우리의 생활, 사회 시스템에 대한 과학적인 검토와 이해가 필요하며, 이에 따른 협의와 소통 등 전반적인 사회 체계 변화가 필요함.

3.2. SWOT 분석

- 앞 절에서 분석한 미세먼지 관련 미래 주요 문제 및 이슈를 SWOT(Strength, Weakness, Opportunity, Threat)의 4 형태로 구분하여 정리함(그림 40)

3.3. 주요 연구 방향

가. 미세먼지 저감을 위한 기초원천기술개발 지속 지원

- 미세먼지와 오존 등의 2차 대기오염물질 생성원인 규명
- 배출저감 기술 고도화
- 영향 저감을 목표로 한 연구 방향 전환
- 효과적인 정책 수립, 시행, 평가와 소통 체계 구축

나. 수도권 및 중앙정부중심에서 지역 및 지자체 현안 중심으로 전환

- 수도권 풍하 지역에서의 미세먼지 고농도 발생
- 지방 산단 및 대규모 점오염원 지역에서의 사회 문제화
- 산림, 농업 등에서 배출되는 미세먼지의 중요성 증가
- 지역별 배출원 관리, 노출저감, 예보 모델 필요성

다. 미세먼지 고농도 현상 집중 대응

- 미세먼지 노출 피해가 고농도 발생 시기에 집중
- 정확한 예보를 통한 사전 예방적 미세먼지 배출관리 필요
- 고농도 미세먼지 발생 시 건강영향평가 부재
- 고농도 미세먼지 발생 시 피해저감 방안 마련 필요

라. 기후변화 대응을 같이 고려한 미세먼지 저감 연구

- 동아시아 에너지 사용량과 대기오염물질 배출량 변화에 따른 지구/대기환경 변화 예측
- 온실가스와 대기오염물질 동시 저감 효과 분석

마. 적극적인 국제협력

○ 동아시아 대기과학센터 수립 및 공동 연구

○ 동아시아 대기 화학 특성 규명

바. 환경, 에너지 분야 남북한 공동 연구

○ 독립형 에너지, 환경 자립 패키지 공동 개발

○ 대기환경 관리 기술 공동 개발

○ 에너지 효율 향상 기반기술

○ 신재생 에너지 활용 기술

Ⅲ. 주요 분야별 미세먼지 관련 현황 분석

1. 현상규명 및 예측 분야

1.1. 총괄

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 예측분야 관련 논문은 년 5-10% 정도로 꾸준히 증가하고 있으나 최근 증가폭이 약간씩 줄어들고 있음.

○ 주요 연구 국가별 논문 현황

- 최근 5년간 주요 국가별 논문발표수준의 경우는 미국과 중국이 각각 1130편(1위)과 731편(2위)으로 전체 논문수의 70%이상을 차지하고 있으며, 독일, 영국 순으로 200여 편의 논문을 발표하나 우리나라는 그 절반인 121편.

- 우리나라 논문발표는 일본보다 앞서 있어 이 분야 연구력 우위를 간접적으로 보임.

- 그러나 중국보다 현저하게 낮은 논문 발표 상황에서 미세먼지 원인 규명, 기여율평가 등 논란의 학술적 소지가 있는 분야에서 경쟁력 약화가 우려됨.

그림 41. 현상규명 및 예측 연도별 논문발표 현황

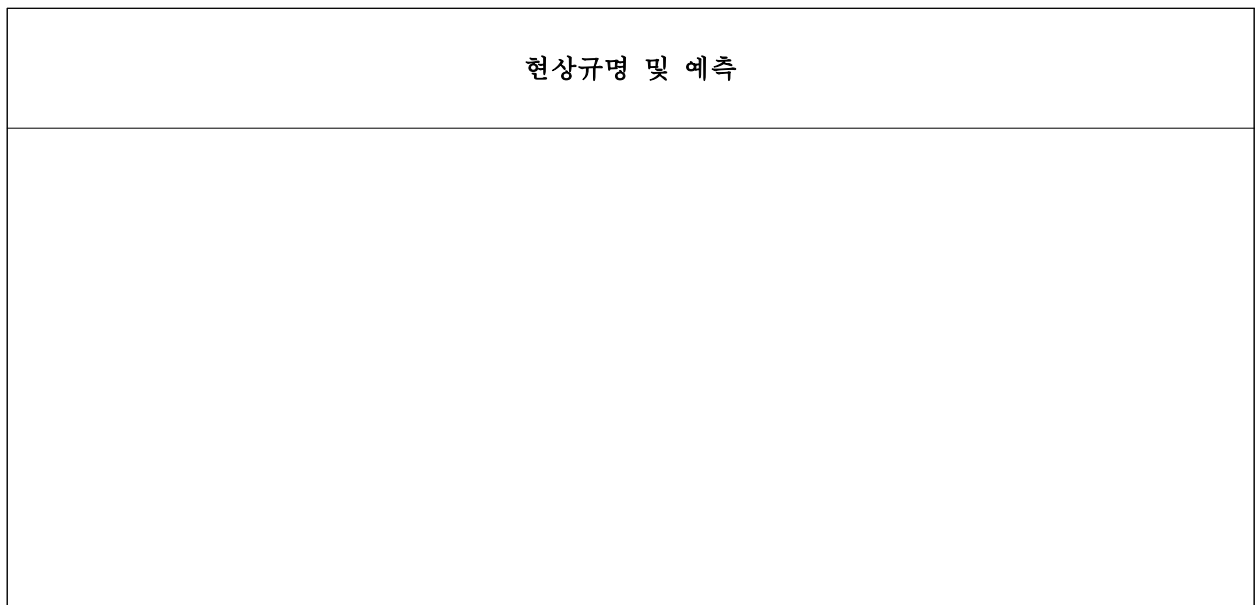


그림 42. 현상규명 및 예측분야 국가별 논문발표 현황

현상규명 및 예측

국내외 특허 동향

○ 연도별 특허 현황

- 현상규명 및 예측분야 특허출원은 연도별 차이는 있으나 년 100건 정도로 지속적으로 출원되고 있음.

그림 43. 현상규명 및 예측 연도별 특허출원 현황

현상규명 및 예측

○ 국가별 특허 현황

- 국가별 특허는 중국이 압도적으로 많고 미국이 그다음 많은 특허를 출원 하고 있음.
- 논문과 달리 특허출원 순위에서는 미국 다음으로 우리나라가 3위.

그림 44. 현상규명 및 예측 국가별 특허출원 현황



- 특허, 중국, 한국, 일본과 같은 아시아 국가에서 특허출원의 비중이 매우 높은 것으로 나타남.
- 미세먼지오염의 직접적 당사국으로 인한 자연스러운 현상이나 과학적 논문보다 특허출원에 대한 상대적 관심이 많다는 것을 뜻하는 것으로 추후 치열한 기술적 다툼을 예상하게 함.

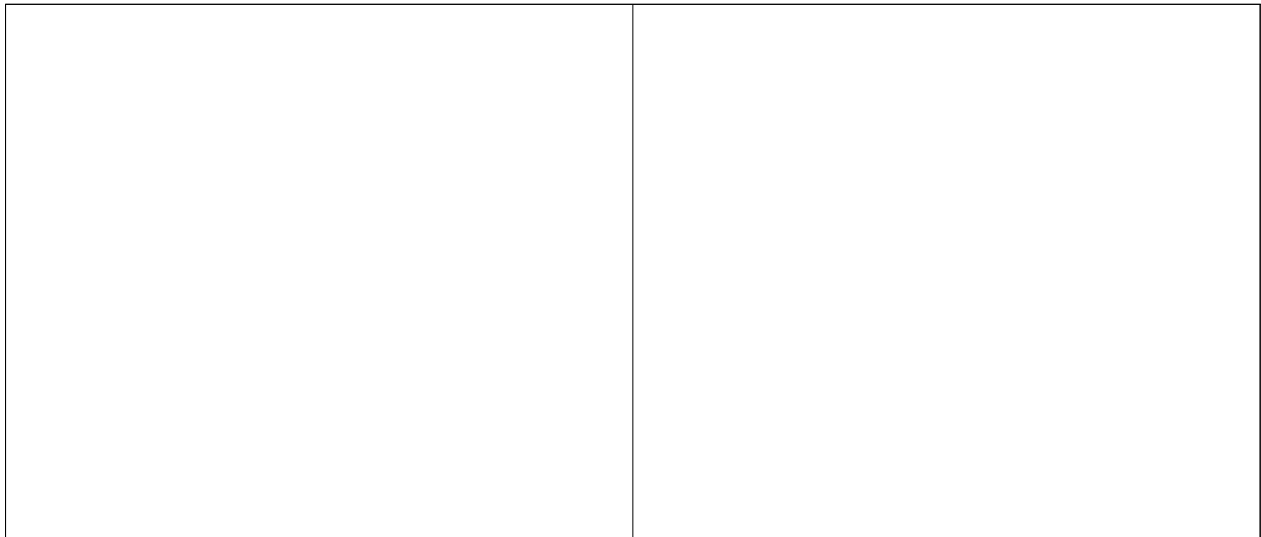
□ 시장 동향현황

- 현상규명 및 예측 관련 연구는 아직까지 공공 서비스 분야의 성격이 강함.
- 2019년 이후에는 전국으로 확대되는 대기오염사업장 배출총량관리제, 미세먼지예보모델의 정확도 향상에 대한 사회적 요구, 미세먼지 사회재난 편입에 따른 특정 사업장 및 지역의 미세먼지 기여율 산정 기법을 통한 원인자 부담 원칙이 적용될 경우 지금과 비교할 수 없는 거대 시장이 형성될 것으로 기대됨.

□ R&D 투자현황

- 2017년 총 58 개 과제, 215.3억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 전체 R&D (521억원)의 41%를 차지
- 최근 3년간 세부기술 중 투자 비중이 완만히 증가 추세
※ `16년 139억 -> `17년 215억 -> `18년 224억
- 초기에는 환경부의 지원 사업이 대부분을 차지하나 최근 과기정통부의 지원이 증가함
- 과기정통부 지원사업의 많은 대부분이 2017년 시작된 국가미세먼지전략 사업의 일환으로 추진되고 있음
- 연구 지원 부처가 환경부와 과기정통부로 치중되어 있음

그림 45. 현상규명 및 예측 R&D 현황



- 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)
 - (기술사급성) 10개 중분야에서 원인 규명분야의 시급성이 3위로 높게 나타남
 - (기술역량) 최고 기술 보유국 미국 대비 60 - 70% 수준으로, 특히 2차 생성 미세먼지의 원인을 규명할 수 있는 생성 및 변환규명 분야의 기술역량이 상대적으로 부족
 - (시장활성도) 측정 및 분석기술분야 이외에는 국내 시장이 거의 형성되지 못하고 있는 단계이고 임. 그러나 미세먼지오염의 사회화가 가장 높은 지역적인 이유로 중국, 우리나라, 아시아 지역에서의 시장 잠재력은 매우 큰 것으로 판단됨
 - (기술중요도) 전체 10개 중분야에서 원인규명분야가 3위, 현상진단 측정조사분야가 5위, 대기질 모델링 분야가 9위. 원인규명분야 중에서도 오염원 규명 분야의 기술중요도는 전체 25개 세부 분야중 2위

- (과급효과) 현상규명 및 예측 분야의 과급성이 가장 큰 것 (1위) 으로 확인됨. 기술적 난이도와 중요도는 적지만 미세먼지 원인 파악에 있어서 원인규명 기술의 확보가 매우 중요한 것을 시사

□ 주요연구 성과 선정

○ 원인규명분야

- 범부처 (과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) ‘미세먼지 국가 전략 프로젝트 사업단’의 스모그 챔버(Smog Chamber)활용을 통한 미세먼지 원인 규명 연구.
- 기존의 미세먼지 입자에 기체상 휘발성유기화합물이 기존 입자의 물리적, 화학적 조건에 따라 새로운 유기입자의 형성이 어떻게 진행되는지 분석하고 이에 따른 미세먼지의 성장을 고농도 미세먼지 발생 시기를 재현하여 분석함.
- 올해 안에 새로운 중형 스모그챔버(26 m³)이 만들어지면 현장 대기과 더 유사한 환경에서 미세먼지의 발생과정과 원인 파악이 가능할 것으로 기대됨.

○ 배출원 조사부문

[외부유입 미세먼지 유기성분 원인분류표 개발 및 국내 기여도 개발]

- 미세먼지의 주요 성분 중 정성 및 정량화가 가장 부족한 성분이 유기성분임.
- 현재 미세먼지의 배출원 기여도를 평가하고자 할 때 빈번히 사용되는 수용모델은 오염원분류표를 활용해야 하는데, 우리나라는 미국 EPA에서 개발한 오염원 분류표를 사용하고 있음. 그러나 각 국가의 배출원은 다른 특징을 지니고 있어 배출원 자료 및 그에 따른 원인분류표의 부정확성에 따른 기여도 분석의 한계가 존재함.
- 외부유입 미세먼지 유기성분 원인분류표의 개발결과를 활용하고 기존의 기여율 분석방법을 포함한 종합적이고 다각적 접근법을 이용할 수 있음. 실제 검증을 통한 국내로 유입한 미세먼지의 정밀 추적 및 노출을 과학적이고 신뢰성 있게 평가할 수 있음.

○ 측정분석 기술부분

[초미세먼지 및 미세먼지 내 바이오에어로졸과 유해 중금속 성분에 대한 실시간 현장탐지 기술개발]

- 우리나라에서는 체계적인 바이오에어로졸에 대한 연구가 미미했음.
- 기존에 미생물활성 측정기술을 개발한 사례(연세대, 2005-2008)와 현미경 이미징 분석기술을 이용하여 미생물을 모니터링하는 기술을 개발한 사례(한양대, 2002-2005)가 존재하나, 두 가지 기술 모두 현장에서 적용하기에는 아직 기술적 한계점이 있음.
- 최근 국방과학연구소는 민간업체와 협력으로 군수목적으로 화생방 대비 바이오미세먼지 탐지/감지 시스템을 개발하였으나 단가가 높고(4억원 이상) 부피가 크기 때문에

환경측정용으로 기술전환하기 어려움.

- 위 R&D 사업은 생물학적 정보를 이용한 미세먼지 오염원의 추적 및 노출평가를 목적으로 하며, 분자생물학적 기법의 접목을 통한 바이오에어로졸의 탐지기법을 개발하는 사업임.
- 마이크로콜로니 계측시스템 개발을 통해 기존에 탐지기술에 소요되던 시간을 단축할 수 있고, 바이오에어로졸 내 미생물의 기초 조사 연구를 수행함으로써 이후 전염성 병원균의 탐지 기반을 마련할 수 있음.
- 생물학적 정보를 이용한 발원지 및 미세먼지 기여율 및 영향을 산정할 수 있음.

○ 상시 및 집중측정

[산업별 화학추적자를 활용한 한반도 유입 공기괴의 기원 연구]

- 기존의 여러 대기오염 배출 기여도 산정 방법은 전반적인 규모에서 대기오염의 이동과 영향을 설명하는 데 유용하지만 특정 배출원과 배출 지역의 상세하고 정확한 기여도를 산정하는 것은 거의 불가능함. 그 이유 중의 하나는 전구물질로부터의 미세먼지 생성 기작이 비선형적이기 때문임. 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 방법이 장거리 이동 중에도 배출원이나 배출 지역의 특성이 변하지 않아 수용지역에서 추적할 수 있는 화학적 지문 정보와 감시체계를 마련하여 활용하는 것임.
- 위 연구에서 특정 산업과 지역에서 배출 후 화학적 반응이 거의 발생하지 않고 극미량에서도 분석이 가능한 화학추적자를 발굴하고 이를 적용한다면, 동북아시아의 지역별, 산업별 미세먼지의 기여와 노출영향을 평가할 수 있음.

○ 대기질 모델링분야

[대기질영향예측시스템(K-MEMs) 구축 연구]

- 최근 들어 대기질 모델의 정확도와 신뢰도가 상당히 개선되어 미세먼지정책개발, 배출 기여도 분석 등의 미세먼지 영향 진단 연구에 활발히 활용됨.

1.2. 원인 규명 연구

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 최근 5년간(`13년~`18년 4월까지) 세계 주요국들의 미세먼지 생성/변환기작 규명과 오염원 규명 및 기여도 추정 기술 관련 논문은 2016년에는 다소 주춤하는 듯했으나, 2017년도 발표논문 수가 지난 추세대로 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있음.

그림 46. 미세먼지 원인규명 연도별 논문발표 현황

원인 규명

○ 주요 연구 국가별 논문 현황

그림 47. 미세먼지 원인규명 국가별 논문발표 현황

원인 규명 연구

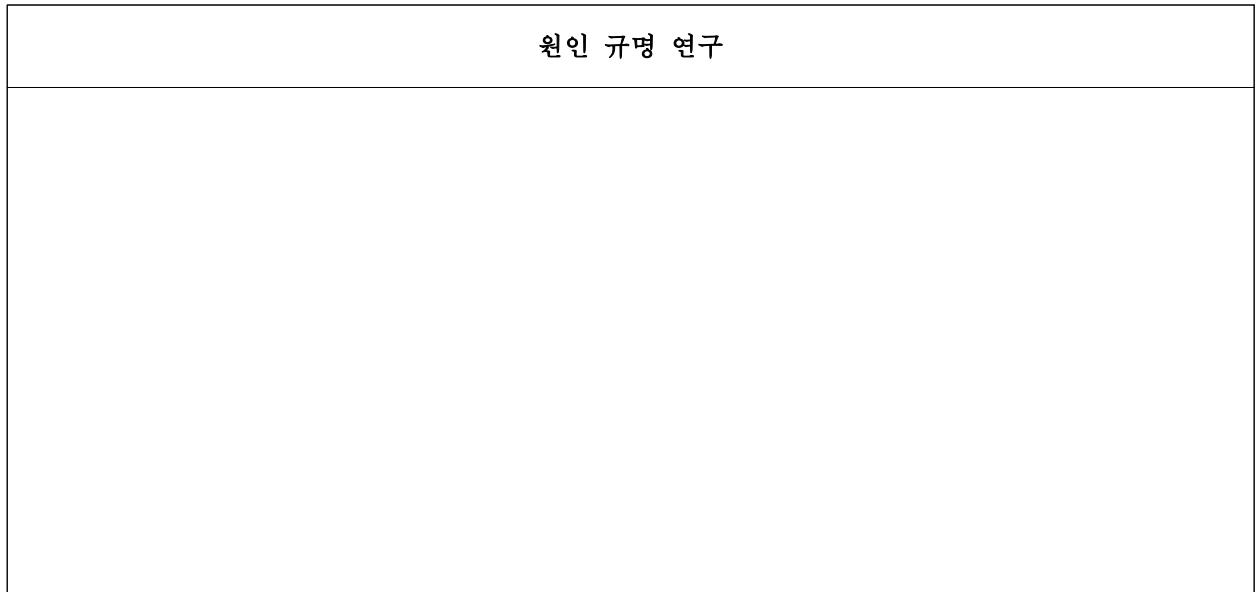
- 최근 5년간 주요 국가별 논문발표수준의 경우는 미국과 중국이 각각 205편(1위)과 119편(2위)로 전체 논문수의 60%이상을 차지하고 있으며, 영국, 독일 순으로 40~50여 편의 논문발표 순으로 나타남.
- 한국의 경우 24편(11위)으로 일본(21편)을 조금 앞서고 있음.

□ 국내외 특허 동향

○ 연도별 특허 현황

- 해외 미세먼지 발생·유입기제 규명 관련 2개 분야 모두에서 특허는 지속적으로 출원되고 있음.

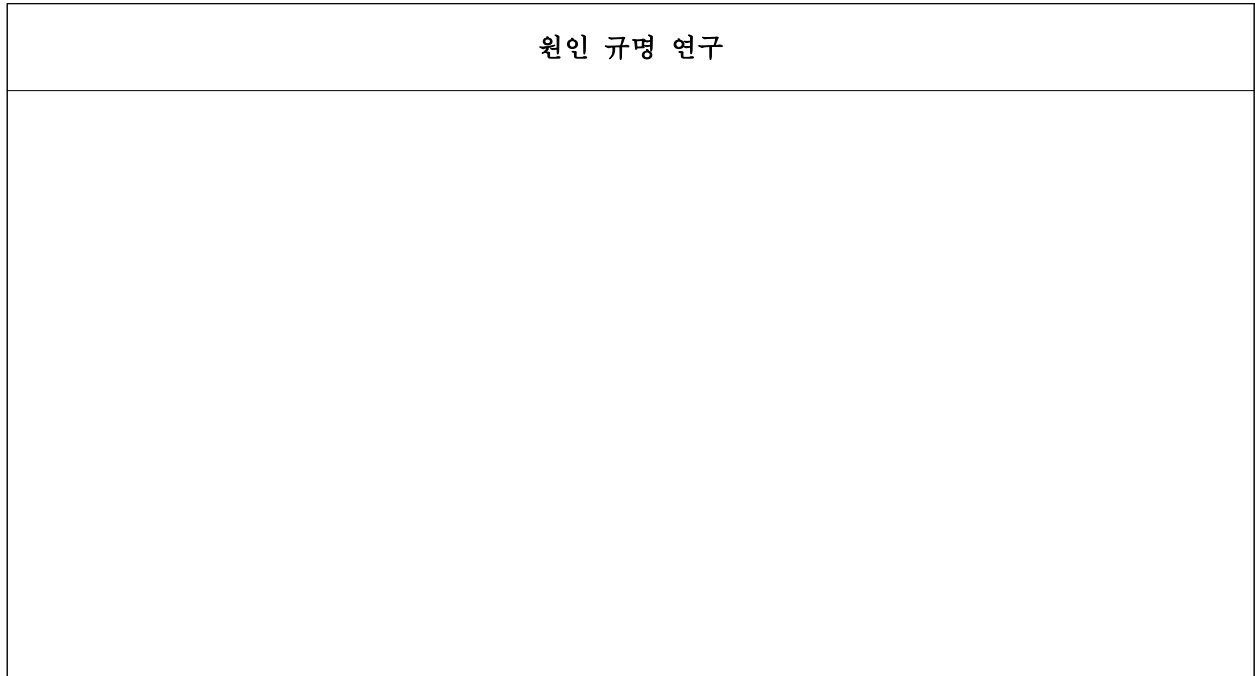
그림 48. 미세먼지 원인규명 연도별 특허출원 현황



○ 국가별 특허 현황

- 미세먼지 발생·유입 관련 특허는 중국과 미국이 가장 많은 특허를 보유하고 있음(WO 제외).
- 특히, 미세먼지 생성기작 원인규명의 경우 국가별/연도별 경향성이 나타나지 않으나, 오염원 규명 및 기여도 추정기술의 경우 미국을 제외한 중국, 한국, 일본과 같은 아시아 국가에서 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타남.
- 이러한 경향은 중국을 포함한 동아시아 지역의 지리적특성과 함께 경제적 발전 수준과도 연계된 것으로 인구밀집과 산업발전, 지리적 기후학적 특성에 따른 황사 발원과 편서풍 등 미세먼지 생성과 영향 요인이 다른 지역에 비해 높기 때문일 것임.

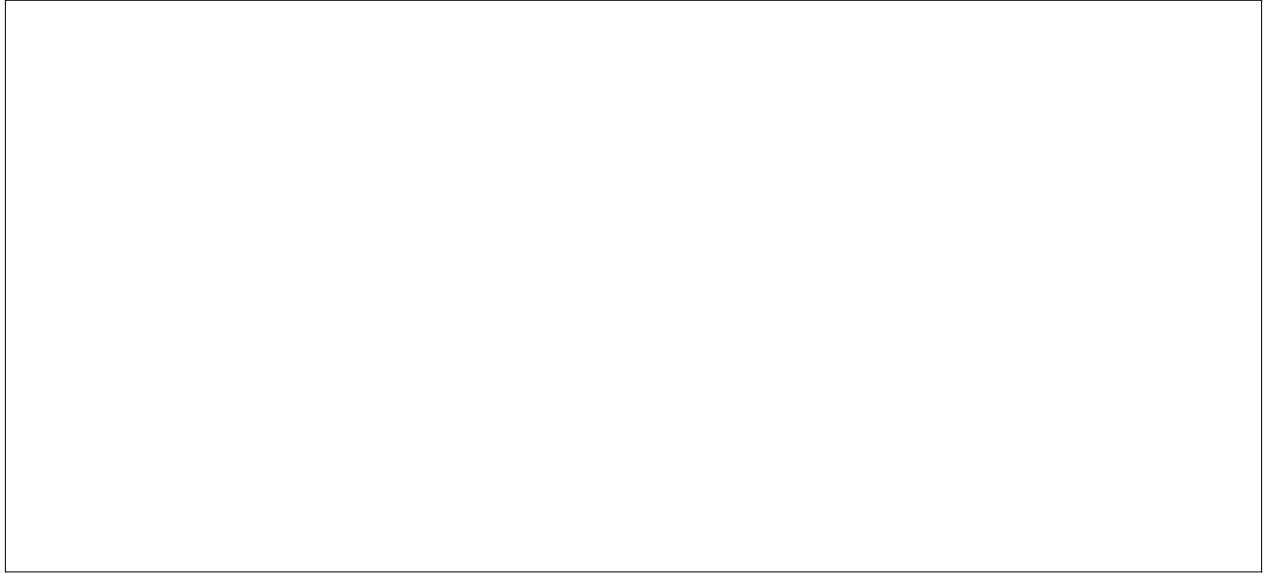
그림 49. 미세먼지 원인규명 국가별 특허출원 현황



□시장 동향현황

- 미세먼지 원인규명 관련 연구는 아직까지 특정 오염원의 미세먼지 기여율을 평가하기 위한 공적 서비스 성격이 강하나, 2016년 이후 3종 사업장까지 확대되고 2019년 이후에는 전국으로 확대되는 대기오염사업장 배출총량관리제가 본격적으로 시작할 경우, 배출허용 총량의 배출권 거래제와 연계되어 미세먼지 원인규명 관련 기술을 이용한 시장이 급격히 증가할 것으로 추정된다. 배출허용 총량의 감시와 배출권 거래의 실효성을 평가하기 위한 핵심 기술이 기여율 산정 기술과 원인규명 기술임.
- 아시아지역의 대기오염 문제가 심각하고 국내에서 경험한 관리의 시행착오와 오염 단계를 상당부분 공유할 가능성이 있기에 국내에서 개발한 원인규명 기술이 해외 사례에 활용될 가능성이 있기에 아직은 공공 서비스의 기능이 크지만 경쟁력 있는 환경영향평가 사업체를 중심으로 사업화가 될 가능성이 높음.

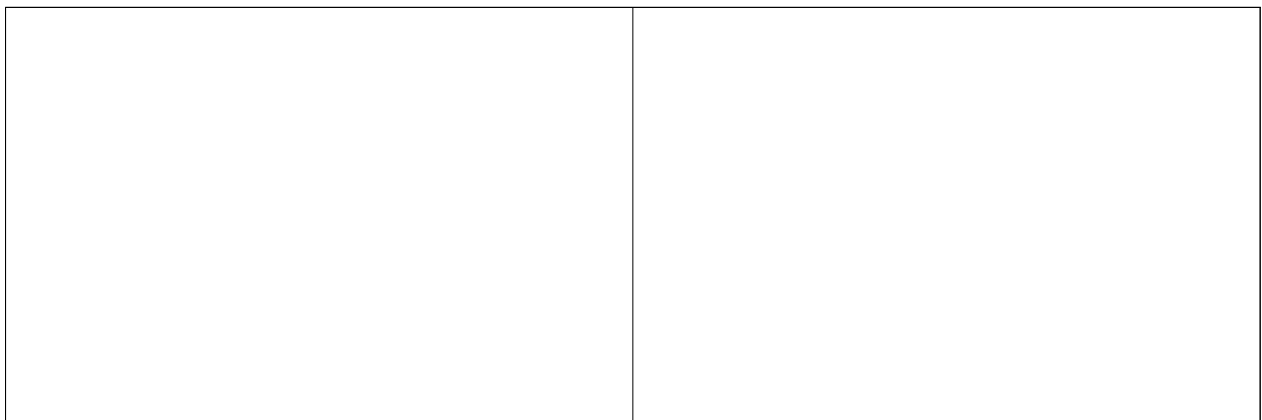
그림 50. 수도권 대기오염물질 배출허용 총량의 추이 (환경부, 2017)



□ R&D 투자현황

- `18년 총 4개 과제, 21.6억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 3.5%에 불과(8위/10위)
- 절대 연구비 규모는 작지만 최근 3년간 투자 비중이 상당히 증가
 - ※ `16년 3.4억 -> `17년 13.4억 -> `18년 21.6억
- 최근 과기정통부의 지원이 급격히 증가함
- 과기정통부의 지원 사업 대부분이 2017년 시작된 국가미세먼지전략 사업의 일환으로 추진되고 있음
- 연구지원 부처가 제한적이고 지원 프로그램과 지원예산이 확대될 필요가 높음

그림 51. 원인규명기술관련 부처별 R&D 투자 현황과 총 연구비 추이



□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- 전반적으로 시급성에 비해 기술역량, 활성화 등이 낮은 것으로 평가됨

그림 52. 원인규명기술관련 전문가 조사 결과

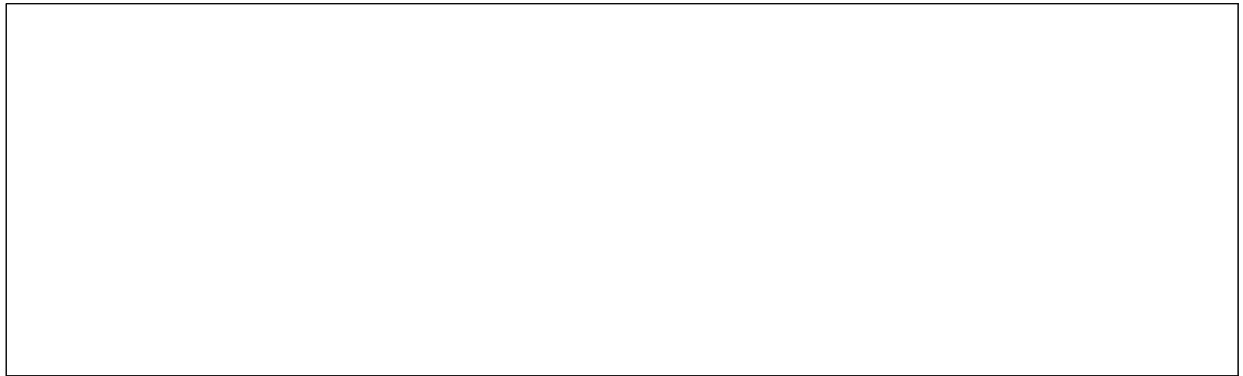


그림 52. 원인규명기술관련 전문가 조사 결과

- **(기술역량)** 최고 기술 보유국 미국 대비 60 - 70% 수준으로, 특히 2차 생성 미세먼지의 원인을 규명할 수 있는 생성 및 변환규명 분야의 기술역량이 상대적으로 부족.
 - 생성 및 변환 규명(선진국 대비 66%, 기술격차 6.3년).
 - 오염원 규명(선진국 대비 75%, 기술격차 5.0년).
- **(시장활성도)** 극히 제한적인 환경영향평가분야에서의 활용을 제외하고는 국내 시장이 거의 형성되지 못하고 있는 단계이고 미국 등 주요국가에서 미세먼지의 관심과 중요도가 낮은 이유로 시장이 크게 형성되지 못함. 그러나 중국, 우리나라, 아시아 지역에서의 시장 잠재력은 매우 큰 것으로 판단됨
- **(기술중요도)** 대기오염사업장 배출총량관리제, 환경영향평가 등 정책 지원 성격이 큰 분야로 국민생활에 민감한 사회문제 해결과 함께 활용 중요도는 높으나, 기술적인 중요도는 떨어지는 것으로 평가됨. 원인규명 기술이 특정 첨단 장비나 장치의 기술 확보를 통해서 이루어지는 것이 아니라 다양한 기술들을 융합하고 활용하는 특성을 반영함
 - 생성 및 변환 규명 53%
 - 오염원 규명 47%
 - 원인규명 기술은 비용이 많이 소요되는 스모그 챔버 활용 등 다양한 분야의 기반지식을 필요로 하는 복합기술(fusion technology)의 특성을 보유.
- **(기술시급성)** 현상규명 및 예측 분야에서 시급성이 가장 큰 것으로 확인됨. 기술적 난이도와

중요도는 적지만 미세먼지 원인 파악에 있어서 원인규명 기술의 확보가 매우 중요한 것을 시사

- 10개 중분류 중 3위

○ (중요도)

- 10개 중분류 중 3위

○ (파급효과)

- 10개 중분류 중 3위

□ 주요연구 성과 선정

○ 범부처 (과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) '미세먼지 국가 전략 프로젝트 사업단'의 스모그 챔버(Smog Chamber) 활용을 통한 미세먼지 원인 규명 연구

- 2017년 출범한 미세먼지 국가 전략 프로젝트 사업단의 연구에서 기존의 6m³ 소형 스모그 챔버를 이용한 2차 생성유기 에어로졸의 형성과 성장 원인 규명을 시도.
- 기존의 미세먼지 입자에 기체상 휘발성유기화합물이 기존 입자의 물리적, 화학적 조건에 따라 새로운 유기입자의 형성이 어떻게 진행되는지 분석하고 이에 따른 미세먼지의 성장을 고농도 미세먼지 발생 시기를 재현하여 분석함.
- 올해 안에 새로운 중형 스모그 챔버(26m³)이 만들어지면 현장 대기과 더 유사한 환경에서 미세먼지의 발생과정과 원인 파악이 가능할 것으로 기대됨.

1.3. 현상진단 및 측정 조사

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 미세먼지의 현상진단 및 측정조사에 관련된 논문발표는 2013년부터 2017년에 이르기까지 지속적으로 증가추세에 있다고 판단됨. 단, 2016년에 393편의 논문이 발표되었으나 2017년에는 378편으로 약간 감소하였음.

○ 주요 국가별 논문 현황

- 최근 5년간 주요 11개국 중 미국이 미세먼지 현상진단 및 측정조사 부문에서 가장 많은 논문을 발표하였고(691편) 전체 논문 편수의 31%를 차지하였음. 그 다음으로 중국은 483편의 논문을 발표함으로써, 미국과 중국에서 발표된 논문이 주요 11개국에서 발표된 전체 논문 수의 53%를 차지하였음.
- 그 다음으로 독일, 영국, 프랑스 순이었으며 우리나라는 79편을 발표하여 일본 다음에 위치(11위)하고 있음.

그림 53. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 연도별 논문발표 현황

현상진단 및 측정조사

그림 54. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 국가별 논문발표 현황

현상진단 및 측정조사

○ 연도별 특허 현황

- 연도별 특허출원 현황은 최근 5년간 약간의 증가 추세에 있다고 판단되나 뚜렷한 증감 추세는 나타나지 않았음. 연평균 87건의 특허가 출원되고 있어 현상진단 및 측정조사 부문의 높은 관심을 반영하고 있음. 2016년에 출원된 특허가 127건으로 가장 많이 출원됨.
- 매년 많은 수의 특허가 출원됨으로써 최근 5년간 누적 특허 수는 급속도로 증가하고 있음. 2013년에는 53건에 불과했으나 2017년 436건으로 8배 이상 증가하였음.

그림 55. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 연도별 특허출원 현황

현상진단 및 측정조사

○ 주요 국가별 특허 현황

- 최근 5년간 특허출원 현황을 살펴보면, 전체 특허 중 중국이 82%를 차지할 정도로 단연 많은 특허를 출원 하고 있음. 최근 중국에서 미세먼지 저감을 위한 노력의 일환으로 많은 연구가 진행되고 있기 때문으로 판단됨. 특히 2009년 이후 중국 특허청에서의 대기오염 관련 특허가 급증하였음. 그러나 중국 특허 대다수가 개인 차원의 발명이 주류이므로, 아직은 유의미한 활동이라 판단하기 어려움.
- 중국은 타 국가에 비해 매우 높은 특허출원 수를 보이고 있으나 논문발표 수는 특허 수에 비해 저조함. 이는, 중국이 미세먼지 개선을 위한 새로운 기술의 개발에 큰 관심을 가지고 있으며 현상진단 및 측정조사 부문 R&D에 상당히 투자한다는 것을 반영함. 또한 미세먼지 현상진단 및 측정조사 관련 산업을 새로운 기회로 인식한다는 것을 반영함.
- 중국 외 나머지 국가들은 유사한 수준이라고 볼 수 있으며 미국이 전체 특허의 8%, 우리나라가 4%를 차지하고 있음.

- 미세먼지 현상진단 및 측정조사 부문의 우리나라 특허출원 수는 전 세계에서 3위를 차지하고 있음. 우리나라는 대기업과 함께 정부출연연구소, 대학교에서 관련 특허활동이 이루어지고 있음.

그림 56. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 국가별 특허출원 현황

현상진단 및 측정조사

□ 시장 동향현황

○ 세계 시장 현황

- 대기오염 측정 장치 시장에서는 전세계적으로 상위 4개 업체(Thermo Fisher Scientific Inc. (14.4%), Teledyne Technologies Inc. (13.6%), Siemens AG(11.3%), Horiba Ltd. (8.3%))가 전체 시장의 45%를 차지하며, 공급자가 주도하는 과점시장으로 대체품에 의한 위협도가 낮음. 이들 4개 업체가 세계시장에서 강한 주도권을 갖고 있으며, 이들 기업이 작은 기업을 인수하며 시장의 우위를 굳건히 하는 동시에 상위 업체 간의 경쟁이 존재하는 상황임.
- 현상진단 및 측정조사에 관련된 시장을 성장시키는 원동력으로는 엄격한 정부규정, 대기오염 심화, 대기오염에 대한 대중의 문제의식 향상을 들 수 있으나, 불규칙한 기상조건, 기술적 한계가 성장의 제약요인으로 작용함.
- 대기오염 측정 장치의 주요 구매처는 각국의 정부이며, 대기환경 규제 수준이 높고 구매력이 충분한 선진국 정부의 대기질 관측소에서 요구하는 신규 관측 장비에 대한 수요가 시장성장을 견인하고 있음.
- 대기질 관측소에서 사용되는 주요 측정장비는 광학센서를 활용하므로 구름에 의한 산란이나 강도변화, 낮과 밤의 전환, 하루 중 관측하는 시간대에 따라 측정 결과가

영향을 받음. 또한 데이터베이스, 데이터 링크 관리, 센서 교체비용과 같은 부대비용과 위성탑재체 기획, 개발, 배치와 관련된 비용 등 대규모 투자를 수반하여 투자 여력이 있는 정부에 국한하여 성장함.

○ 국내 현황

- 우리나라는 2017년부터 미세먼지 국가전략프로젝트를 시행하고 있음. 여기에는 범부처 연구개발 협업 체계를 통해 삶의 질 개선을 위한 성공적 R&D 모델을 창출하는 전략을 수립하였음. 이 중 실시간 농도-성분 측정 원천기술을 확보하는 부문이 중요하게 포함되어 있음.
- 미세먼지 국가전략프로젝트는 공공 부문의 R&D 성과를 민간에 확산하고 산업화 촉진을 지원하여, 미세먼지 문제해결과 함께 신성장 동력을 창출하는 것을 목적으로 함. 기술산업화 및 글로벌 협력 강화 부문에서는 첫째, 미세먼지대응 기술혁신 촉진, 둘째, 미세먼지대응 협업 생태계 구축, 셋째 국내 환경기술의 글로벌 진출 지원, 넷째, 미세먼지 국제연구협력 주도를 핵심과제로 삼고 있음.
- 우리나라에서 대기오염 샘플러의 선도 기업은 POSCO, 한국전력, 삼성전자, 삼성중공업이며, 입자계수기의 선도 기업은 삼성전자임.

○ 향후 전망 및 전략

- 대기오염 측정장치 시장은 과편화되어 있고 원자재 및 부품의 가격이 매우 높아 시장에서 활동하는 제조업자의 수가 적어 특정 회사들이 지배하고 있음. 제품의 신뢰도가 중요한 구매결정 요인이므로, 대용품의 영향이 극히 제한적이기 때문에 시장에서 구매자 교섭력은 지속적으로 낮게 형성되는 것이 현실임. 따라서 가격 경쟁력의 영향은 극히 미미한 반면 초기 투자 장벽이 높고 전문적인 기술을 필요로 하므로 신규 진입자가 시장에 진입하기 위한 유인이 낮은 편임.
- 대기오염 측정장치 시장의 성장률은 아시아·태평양 시장이 높지만 시장 중심은 북미 지역임. 대기오염 측정장치 시장은 저감장치 시장에 비해 시장의 진입이 상대적으로 더 어려움.
- 또한 측정장치 자체보다는 기존의 측정장치를 활용한 종합적 원인규명 기술의 시장화가 필요함.
- 아래 표는 대기오염 측정장치에 대한 지역별 시장전망을 나타내며, BCC Research (2017), Transparent Market Research (2016)을 재구성한 것[과학기술기발 미세먼지 대응 전략 점검, KISTEP]을 참고하였음.

- 대기오염 측정장치 중 입자계수기의 시장성장률이 가장 높을 것으로 전망되어, 미세먼지 현상진단 및 측정조사의 시장 전망은 밝은 것으로 판단됨. 아래 표는 대기오염측정장치의 각 제품군별 시장전망을 나타내며, BCC Research (2017), Transparent Market Research (2016)을 재구성한 것[과학기술기발 미세먼지 대응 전략 점검, KISTEP]을 참고하였음.

- 현재 측정장치 시장에서는 광범위한 지역을 실시간으로 관측할 수 있는 기술개발, 모바일 애플리케이션을 활용한 서비스 활성화를 원하고 있음. 구체적으로는, 즉시 사용할 수 있도록 기술적으로 진보된 대기질 관측장비를 선호하고, 적용범위가 넓은 원격 센서, 광대역 센서와 같은 신기술이 대기질 관측에 도입될 것으로 예측됨. 또한 대기질을 측정하는 모바일 애플리케이션이 시장 성장 기회를 제공하고 있음.

- 현황을 바탕으로, 수직계열화와 기술개발로 구분하여 경쟁전략을 세울 수 있음. 즉, 다양한 시장요구에 부응하는 제품을 개발하기 위해, 대표적 제품군에 대한 수직계열화로 더 효율적으로 신제품을 개발하며 제품경쟁력을 강화하고 있음(수직계열화). 최근 정전식 집진기나 직물필터를 탑재한 신제품이 높은 성장률을 보이는 등 역동적 수요변화를 만족하기 위한 기술적 진보를 지속, 시장점유를 확대하는 전략을

취함(기술개발).

- 중국은 미세먼지 문제가 매우 심각하여 미세먼지 관련 조치를 적극적으로 취하고 있으므로, 미세먼지 국가전략프로젝트의 기술 산업화 전략이 중국과의 경쟁을 고려하였을 때에도 유효할 것인가가 중요한 문제임.

□ R&D 투자현황

- `18년 총 29개 과제, 127.9억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 20.6%를 점유(2위/10위)
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 103.7억 → `17년 125.5억 → `18년 127.9억원
- 우리나라의 대기오염물질 저감 및 제거기술의 R&D 투자는 정체 중이나 미세먼지 대응기술에 대한 투자는 지속적으로 증가하는 추세임.
- 2015년 부처별 미세먼지 대응기술 R&D 투자 비중은 환경부가 52%로 가장 크며, 기상청(14.8%), 국토부(12.3%), 산업부(7.2%)의 순서임.
- 2017년부터 미세먼지 국가전략프로젝트 정책사업을 시행, 사업기간 3년간 497억원을 투자할 계획에 있음. 국가전략프로젝트 사업 중에는 실시간 농도·성분 측정 원천기술을 확보하는 측정 부문이 중요하게 포함되어 있음. 또한 공공부문의 R&D 성과를 민간에 확산하고 산업화 촉진을 지원하고 있음.
- 국가전략프로젝트를 포함한 미세먼지 대응역량 강화를 위한 국가 R&D를 2023년까지 추진하고 있으며, 발생·유입, 측정·예보, 집진·저감, 보호·대응 분야의 4대 분야 연구개발을 추진 중임. 1단계(`17~`19)에서는 현안대응, 2단계(`20-`21)에서는 현장 적용 및 실증, 3단계(`22-`23)에서는 상업화를 목적으로 함.
- 미세먼지 현상진단 및 측정조사 부문을 세가지 세부기술, 즉 [배출원 조사], [상시 및 집중측정], [측정·분석기술]로 구분하였을 때, 최근 3년간 [측정·분석 기술]의 투자비중이 증가하는 추세임.
- 또한 환경위성 등을 활용한 과학적인 분석을 강화하는 방향으로 R&D가 투자되고 있음. 환경위성(`20년 발사)을 활용한 미세먼지 3차원 입체 관측 실시(`21), 미국 NASA와 국내 대기질 공동 관측의 주기적 실시(1차 `16년 5월, 2차 `21년), 미세먼지 발생원인 분석을 위해 '한국형 대기질 영향 예측 시스템(K-MEMS)' 개발(`17-`22)이 계획에 있음.
- 미세먼지 현상진단 및 측정조사 부문에 대한 2017년의 총 R&D 규모는 125.6억원이며, 이 중 환경부가 68.7억원, 과기부가 36억원을 투자하고 있음. 2018년의 경우 과기부가 40억, 환경부가 63.7억을 투자하여, 과기부의 투자액수와 기여율이 약간 증가하였음(아래 표 참조).

- 현재 총 39개 과제가 수행되고 있음. 환경부와 기상청은 정책수요 대응(미세먼지 감시체계 구축, 사업장 미세먼지 조사 등), 미래부는 원천기술개발(고정밀 측정기술 등), 중기청은 산업적 수요대응(측정장비 개발 등)을 중심으로 하고 있음. 환경부에서는 대기환경산업 육성 차원에서 일부 초미세먼지 측정시스템, 대기 중 중금속 물질 분석장치 개발 등을 지원하는 사례가 존재함.
- 39개 과제 중 연간 연구비가 가장 많은 과제는 기상청이 지원하는 [황사연구기술지원 및 활용연구(약 14억4천만원)]와 과기부가 지원하는 [미세먼지 발생원인 및 정량적 기여도 규명을 위한 현장연구(9억 5천만원)]임.

그림 57. 현상진단 측정·조사기술관련 부처별 R&D 투자 현황과 총연구비 추이

--	--

□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- 현상진단 측정·조사 부문에서는 세 가지 세부기술, 즉 [배출원 조사], [측정·분석 기술], [상시 및 집중측정]으로 분류되어 전문가 설문조사가 수행되었음.

○ 기술역량

- 세 가지 세부기술 모두에 대해 기술 최고보유국은 미국으로 조사되었으며 최고기관은 NASA, EPA, 하버드대학으로 조사되었음.
- 우리나라의 최고기술보유기관은 국립환경과학원으로 조사되었음.
- 선진국의 기술역량을 100으로 보았을 때 [배출원 조사], [측정·분석 기술], [상시 및 집중측정]의 세 가지 세부기술에 대한 국내 기술역량은 각각 평균 78.3점(70~85점), 68.8점(60~80점), 78.0점(70~85점)으로 조사되었음.
- 배출원 조사(선진국 대비 78%, 기술격차 6.0년).
- 측정·분석 기술(선진국 대비 69%, 기술격차 12.0년).

- 상시 및 집중측정(선진국 대비 78%, 기술격차 4.8년).
- 설문조사 된 세부기술별 기술격차의 이유는 아래와 같이 요약할 수 있음.

○ 기술중요도

- 배출원 조사 37%
- 측정·분석 기술 24%
- 상시 및 집중측정 39%
- 해당 기술에서 선진국과의 기술격차를 해소하기 위한 방안으로 어떠한 정책적 지원이 필요한지에 대한 설문조사로는, “연구기반(시설/정보)의 확충”, “기초분야 연구지원”, “R&D 투자재원확대”가 공통적으로 3순위 내로 조사되었음. 기타의견으로 “제도-정책지원”이 포함되었음.

○ 시장활성도

- 시장활성도의 경우 최고기술보유국의 경우 ‘활성’~‘매우활성’으로 평가되었으며, 상대적으로 국내 민간 시장활성도(기업투자 및 산업시장)는 ‘활성초기’로 조사되었음(설문조사 항목은 ‘비활성’, ‘활성초기’, ‘중간’, ‘활성’, ‘매우활성’으로 구분되어 있음).
- 또한 기술확보방안은 정부주도 또는 정부·민간 공동으로 주도해야 한다고 조사되어, 민간주도의 기술확보는 현실상 어렵다고 판단됨. 또한 국내독자개발이나 해외도입보다는 국제공동개발을 통해 기술을 확보해야 한다고 조사되었음.

○ 시급성

- 10개 중분류 중 7위

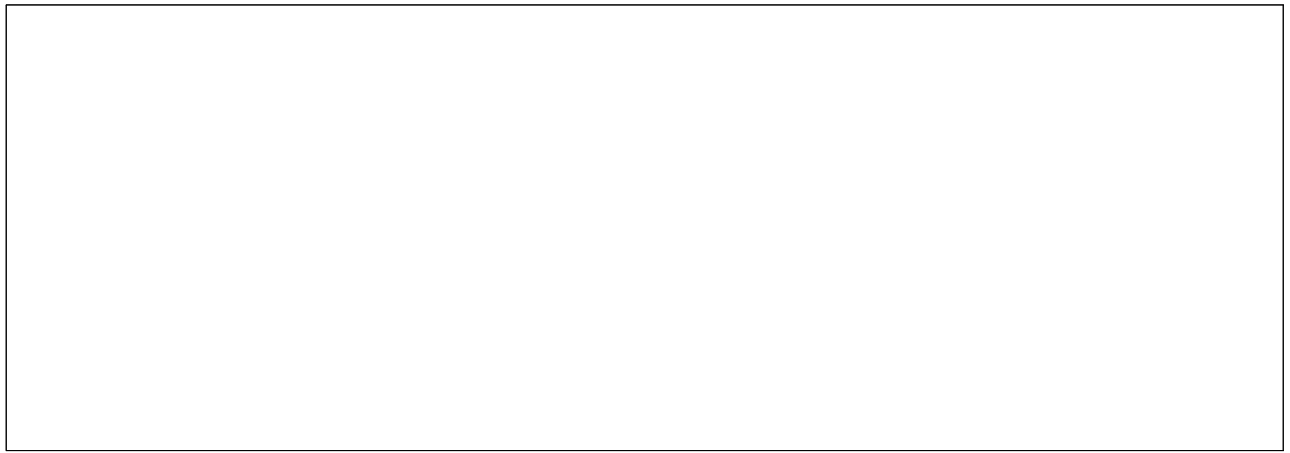
○ **중요도**

- 10개 중분류 중 5위

○ **파급효과**

- 10개 중분류 중 6위

그림 58. 현상진단 측정·조사기술관련 전문가 설문조사 결과



□ **주요연구 성과 선정**

○ 세부기술 1: 배출원 조사 부문

[외부유입 미세먼지 유기성분 원인분류표 개발 및 국내 기여도 개발]

- 미세먼지의 주요 성분 중 정성 및 정량화가 가장 부족한 성분이 유기성분임.
- 현재 미세먼지의 배출원 기여도를 평가하고자 할 때 빈번히 사용되는 수용모델은 오염원분류표를 활용해야 하는데, 우리나라는 미국 EPA에서 개발한 오염원 분류표를 사용하고 있음. 그러나 각 국가의 배출원은 다른 특징을 지니고 있어 배출원 자료 및 그에 따른 원인분류표의 부정확성에 따른 기여도 분석의 한계가 존재함.
- 외부유입 미세먼지 유기성분 원인분류표의 개발결과를 활용하고 기존의 기여율 분석방법을 포함한 종합적이고 다각적 접근법을 이용할 수 있음. 실제 검증을 통한 국내로 유입한 미세먼지의 정밀 추적 및 노출을 과학적이고 신뢰성 있게 평가할 수 있음.

○ 세부기술 2: 측정·분석기술 부문

[초미세먼지 및 미세먼지 내 바이오에어로졸과 유해 중금속 성분에 대한 실시간 현장탐지

기술개발]

- 우리나라에서는 체계적인 바이오에어로졸에 대한 연구가 미미했음.
- 기존에 미생물활성 측정기술을 개발한 사례(연세대, 2005-2008)와 현미경 이미징 분석기술을 이용하여 미생물을 모니터링하는 기술을 개발한 사례(한양대, 2002-2005)가 존재하나, 두 가지 기술 모두 현장에서 적용하기에는 아직 기술적 한계점이 있음.
- 최근 국방과학연구소는 민간업체와 협력으로 군수목적으로 화생방 대비 바이오미세먼지 탐지/감지 시스템을 개발하였으나 단가가 높고(4억원 이상) 부피가 크기 때문에 환경측정용으로 기술전환하기 어려움.
- 위 R&D 사업은 생물학적 정보를 이용한 미세먼지 오염원의 추적 및 노출평가를 목적으로 하며, 분자생물학적 기법의 접목을 통한 바이오에어로졸의 탐지기법을 개발하는 사업임.
- 마이크로콜로니 계측시스템 개발을 통해 기존에 탐지기술에 소요되던 시간을 단축할 수 있고, 바이오에어로졸 내 미생물의 기초 조사 연구를 수행함으로써 이후 전염성 병원균의 탐지 기반을 마련할 수 있음.
- 생물학적 정보를 이용한 발원지 및 미세먼지 기여율 및 영향을 산정할 수 있음.

○ 세부기술 3: 상시 및 집중측정

[산업별 화학추적자를 활용한 한반도 유입 공기괴의 기원 연구]

- 기존의 여러 대기오염 배출 기여도 산정 방법은 전반적인 규모에서 대기오염의 이동과 영향을 설명하는 데 유용하지만 특정 배출원과 배출 지역의 상세하고 정확한 기여도를 산정하는 것은 거의 불가능함. 그 이유중의 하나는 전구물질로부터의 미세먼지 생성기작이 비선형적이기 때문○임. 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 방법이 장거리 이동 중에도 배출원이나 배출 지역의 특성이 변하지 않아 수용지역에서 추적할 수 있는 화학적 지문 정보와 감시체계를 마련하여 활용하는 것임.
- 위 연구에서 특정 산업과 지역에서 배출 후 화학적 반응이 거의 발생하지 않고 극미량에서도 분석이 가능한 화학추적자를 발굴하고 이를 적용한다면, 동북아시아의 지역별, 산업별 미세먼지의 기여와 노출영향을 평가할 수 있음.

1.4. 대기질 모델링

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

- 대기질 모델링 관련 논문 수는 2013년 이후 500 편 가량으로 꾸준한 편이나, 2017년에 약간의 증가를 보임. 중국 관련 논문의 경우 2017년 들어 논문 게재수가 30% 가량 급증, 미국 관련 논문 게재 수에 근접한 수준.

그림 59. 미세먼지 대기질 모델링 연도별 논문발표 현황

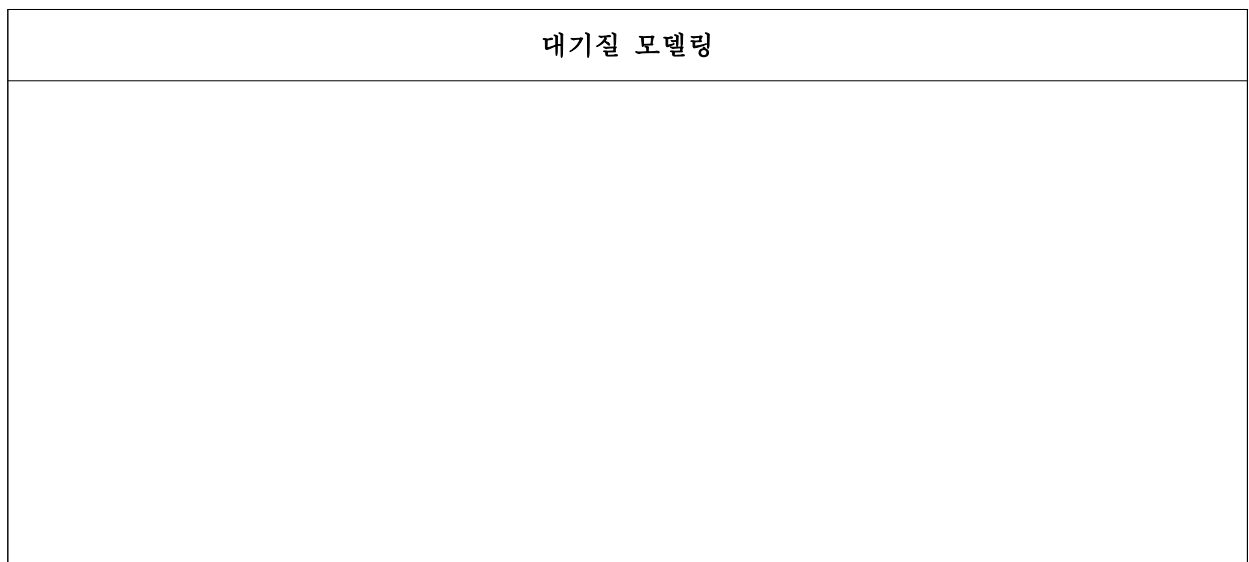
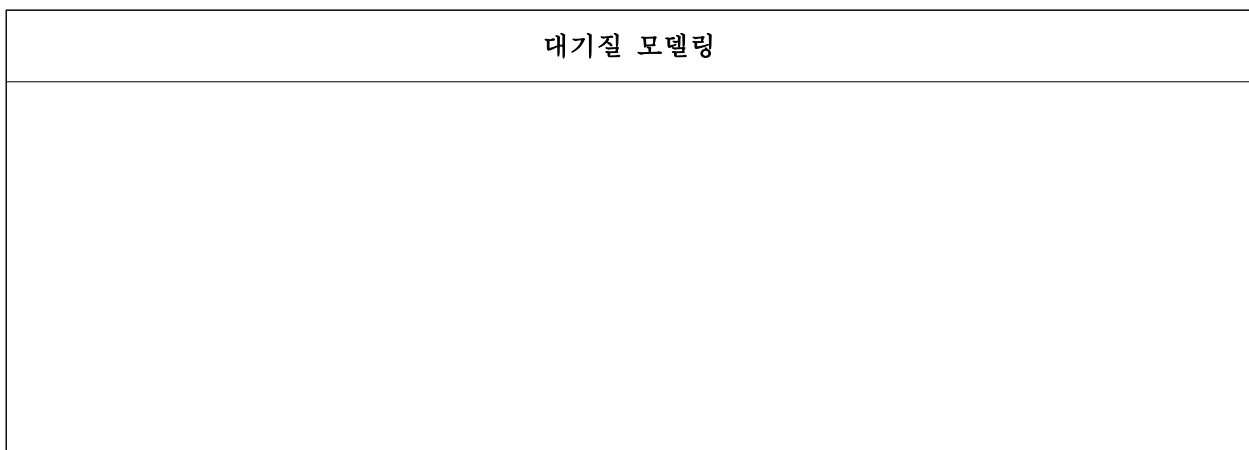


그림 60. 미세먼지 대기질 모델링 관련 연도별 국내외 논문발표 현황(Keyword : 국가별, Secondary PM, CMAQ, CAMx, WRF-Chem, GRIMS-Chem)



- 2013년 이후 대기질 모델링 관련 논문 수에서 미국을 제외하면 중국이 월등하게 많은 수를 보여주고 있음. 중국의 경우 고농도 발생 원인을 비롯하여, 기상/기후 관련 영향, 새로운 생성 메커니즘을 비롯한 자국 내 기여도 분석 등에 대한 연구 수행.
- 일본의 경우 과거에서부터 전지구 규모, 장거리 이동 등 다양한 대기질 모사 연구를 측정실험과 연계하여 수행해 오고 있으며, 최근에는 J-STREAM과 관련된 모델링 플랫폼 구축 연구를 착수하고, 그 결과를 학회지(Atmosphere)에 발표.
- 국내의 경우 국외 논문 게재 수에서 중국과 많은 차이를 보이며, 다른 문제점으로 단기간에 대한 분석이 대부분을 차지함. 또한 측정실험과의 심도 있는 다각적인 해석 도출이 향후 과제로 인식됨. 단기간에 대한 고농도 분석 역시 다각적인 접근이 필요할 것으로 판단.

그림 61. 미세먼지 현상진단 및 측정조사 국가별 논문발표 현황

대기질 모델링

○ 중국

- 중국은 1998년부터 Model Inter-Comparison Study for Asia (MICS-Asia)를 시작. 현재 진행 중인 3 단계의 주요 목표는 현재 널리 이용되는 모델의 장단점을 분석하기 위해 다양한 모델이 비교 연구 수행 중.
- 현재 대기질 모델에서 이용되는 과학적인 지식과 실제 적용에 따른 문제점과 보완점을 마련함으로써 지속적인 대기질 모델의 발전을 꾀함.
- 이러한 연구를 중국을 중심으로 한 영역에서 수행함으로써 이 지역에 최적화된 대기질 모사 시스템을 마련할 수 있는 계기가 될 것으로 판단됨.

○ 일본

- 일본은 2016년 이후 기존의 모델링 프레임에서 탈피하여 Japan's STudy for REference Air quality Modeling (J-STREAM)을 구성하였으며, 2018년 초에 그 결과를 국외 학회지에 발표하기 시작함.
- J-STREAM의 목적은 학계나 정부에서 효과적인 대기질 개선 정책을 마련하기 위해서는 대기질 모사에 대한 이해와 그 결과를 어떻게 이용할 것인가에 대한 고민을 해결하기 위해 많은 모델과 다양한 구성 옵션들을 시험하고 최적의 결과를 도출하는데 1차적인 목적을 둠.
- 이를 기반으로 향후 진단 방법들을 이용하여 미세먼지나 오존과 같은 2차 대기오염물질을 관리해 나갈 예정(Chatani et al., 2018).

○ 국내

- 최근 장거리 이동 현상과 관련된 게재 논문 수가 증가하고 있으며, 위성, 관측과의 비교연구, 특히 2016년 KORUS-AQ 관측 자료와 대기질 모사연구와의 비교 논문들이 게재되고 있으며, 계속 다수 추가 게재될 것으로 판단.
- 중국, 일본과 마찬가지로 국내 역시 다양한 모델, 구성 선택에 따른 실험을 통한 문제점 분석을 통한 개선점 도출이 우선적으로 필요.
- 중국과 일본과 같이 대기질 모사 기초 연구가 중요하며, 이러한 연구는 단발성이 아닌 지속적, 순환적으로 유지되어야 하나, 기존의 연구는 성과 도출이 우선되어, 이런 기초적인 연구가 진행되지 못하는 이유로 판단됨.
- 또한, 이러한 기초연구에는 많은 연구자 수가 필요하나, 현재 국내 상황은 그렇지 못함. 대기질 모사와 관련된 배출량, 기상, 대기화학 등을 연계한 기초 인력 양성부터가 시급한 실정으로 판단됨. 특히, 대기질 모사의 경우 관련 분야를 종합한 분석이 필요하다는 점에서 장기적인 인력양성 사업 필요.
- 향후 미세먼지 해결에 있어 중앙 정부와 지자체의 역할 분리와 국내 배출 특성을

감안할 때, 장거리 이동 뿐 아니라 지역적 배출특성을 반영한 해결책 모색이 중요하며, 지자체 특성을 반영할 수 있는 고해상도 모사 체계 준비 필요.

그림 63. 미세먼지 대기질 모델링 연도별 특허출원 현황

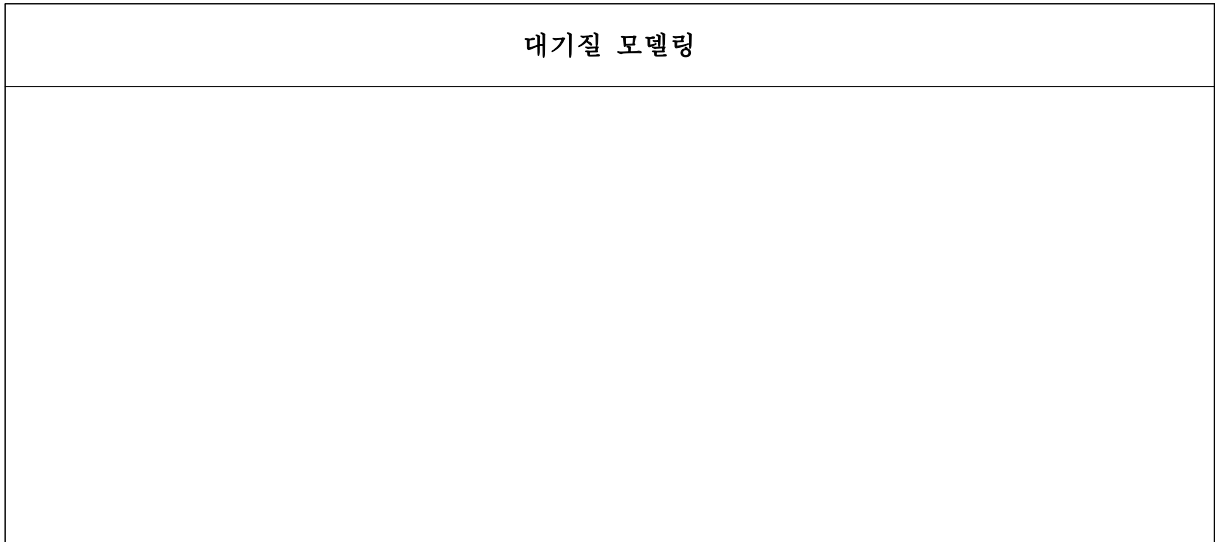
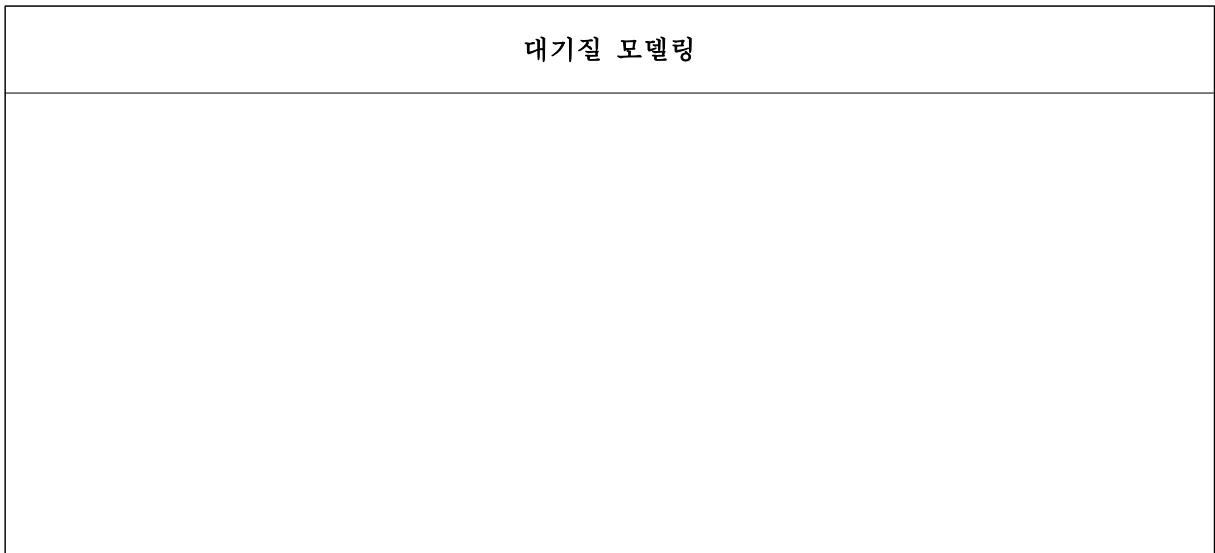


그림 64. 미세먼지 대기질 모델링 국가별 특허출원 현황



시장 동향현황

- 일부 지자체의 대기질 개선 분석 외 해당 사항 없음.

R&D 투자현황

- `18년 총 17개 과제, 74.6억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 12.0%를 점유(4위/10위).
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 29.1억 → `17년 73.2억 → `18년 74.6억원
- 현재 연구 개발 비용은 많은 증가 폭을 보이고 있으나, 미세먼지 농도 변화는 배출량 및 기상 변화에 민감함을 고려할 때, 단기 투자보다는 장기적이고, 지속적인 투자가 필요.
- 현재 ‘수도권 대기환경 개선에 관한 특별법’에 의한 기본계획 평가 시 배출량 삭감 실적에 의존하는 현실을 개선해야 함.

그림 65. 미세먼지 대기질 모델링 R&D 현황

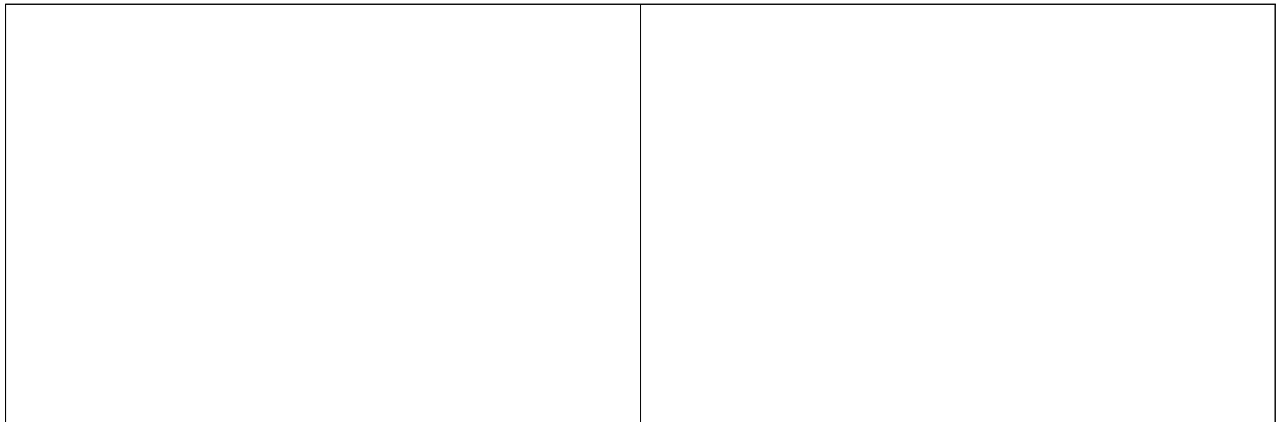


그림 65. 미세먼지 대기질 모델링 R&D 현황

- 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)
 - 국내의 경우 대기질 모델이 정책에 활용 이전에 국내 및 동북아 특성 적용성 평가가 필요하며, 기상 및 배출량 개선 연구에 편중된 것으로 판단(김용표, 2017)
 - 시장활성도는 현재 다소 낮으나, 향후 미세먼지의 관리에서 중앙 정부의 역할과 함께 지방 정부의 역할의 중요성과, 대기질 모델링의 활용은 ‘규제’와 ‘비용 효과’ 분석이라는 특수성을 고려해야 할 것으로 판단됨
 - 특히, 2차 생성과 국가간 이동이라는 측면에서 유입량 및 미세먼지의 거동 관련 해석 시, 기초자료로 활용도를 고려해야 할 것으로 판단.
 - 기술역량
 - 미세먼지 예측·예보·진단 모델링(선진국 대비 73%, 기술격차 5년)
 - 기후영향평가 모델링(선진국 대비 85%, 기술격차 4.5년)
 - 기술별 중요도

- 미세먼지 예측·예보·진단 모델링 72%

- 기후영향평가 모델링 28%

○ 시급성

- 10개 중분류 중 10위

○ 중요도

- 10개 중분류 중 9위

○ 파급효과

- 10개 중분류 중 10위

그림 66. 미세먼지 대기질 모델링 전문가 설문조사 결과



□ 주요연구 성과 선정

- Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, Kim et al., ACP, 2017: 1년 장기 모사 (2014년)에 대한 기상, 배출량 등 입력자료에 따른 PM_{2.5} 국내외 기여도 분석, 최초의 장기 기여도 분석 결과.

- Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Kim et al., SREP, 2017: 2012년 이후 풍속 변화에 따른 국내 미세먼지 증가 원인 분석

- PM_{2.5} source attribution for Seoul in May from 2009 to 2013 using GEOS-Chem and its adjoint model, Lee et al., 2017, Environ. Poll.: 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 2009~2013년 사이 5월에 대한 배출지역별 기여도 분석.

2. 미세먼지 배출저감 분야

2.1. 총괄

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 최근 5년간(`13년~`18년 4월까지) 미세먼지 배출저감 관련 논문은 점차 증가하는 경향을 보이고 있으나, 2014년에는 695건으로 다른 해의 2배 가까운 논문이 발표된 점이 특이함.

그림 67. 미세먼지 배출저감 연도별 논문발표 현황

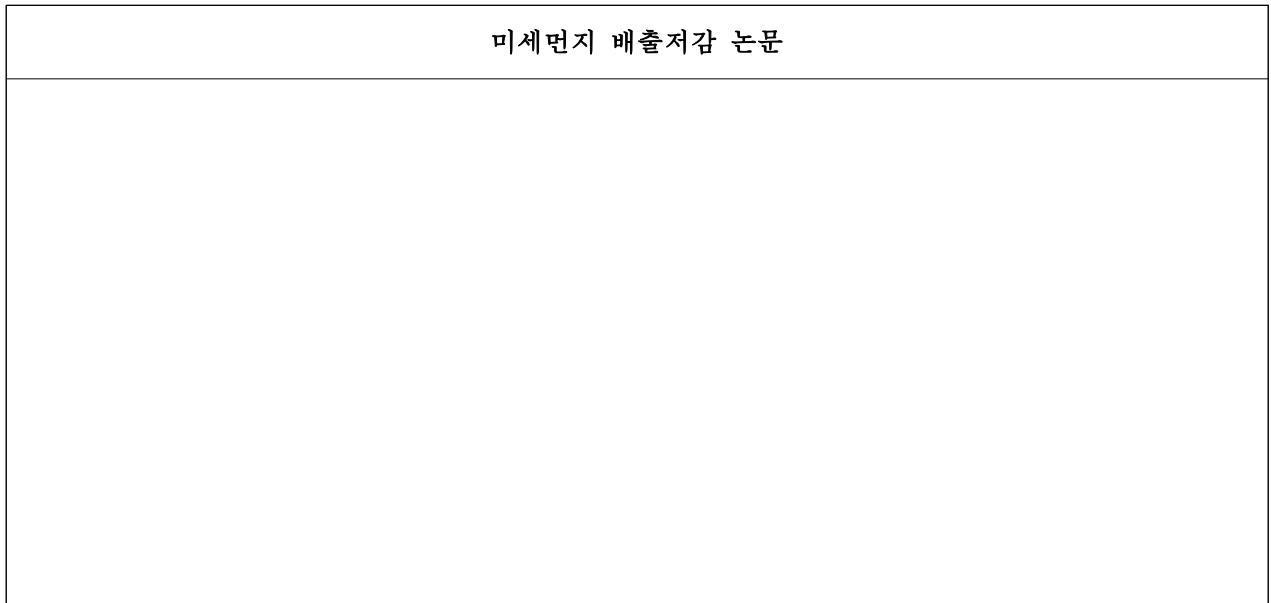


그림 67. 미세먼지 배출저감 연도별 논문발표 현황

○ 주요 연구 국가별 논문 현황

- 중국은 배출저감 연구 분야에서 가장 많은 논문을 발표하며 1위를 차지하고 있으며, 미국, 한국 순으로 나타남.
- 우리나라는 배출저감 연구 분야에서 3위를 차지하고 있으며, 1위인 중국(707건)의 1/6 수준으로 나타남.

그림 68. 미세먼지 배출저감 국가별 논문발표 현황



그림 68. 미세먼지 배출저감 국가별 논문발표 현황

□ 국내외 특허 동향

○ 연도별 특허 현황

- 미세먼지 배출저감 특허는 매년 400여 건씩 큰 증감 없이 꾸준히 출원되고 있음.

○ 국가별 특허 현황

- 미세먼지 배출저감 관련 특허는 중국이 가장 많이 보유하고 있음.

- 특히, 배출저감 특허 상위 국가는 2013년 일본, 미국, 중국 순위가 2017년에는 중국, 미국, 일본 순위로 바뀌어, 최근 5년간 중국의 상승과 일본의 하락이 두드러진 특징임.

- 연구논문 수준의 경향과 유사하게 최근 중국의 배출저감 관련 특허출원이 급격히 증가하고 있는 것은 국내기술의 국제 경쟁력에 지대한 영향을 줄 가능성이 있음.

그림 69. 미세먼지 배출저감 연도별 특허출원 현황

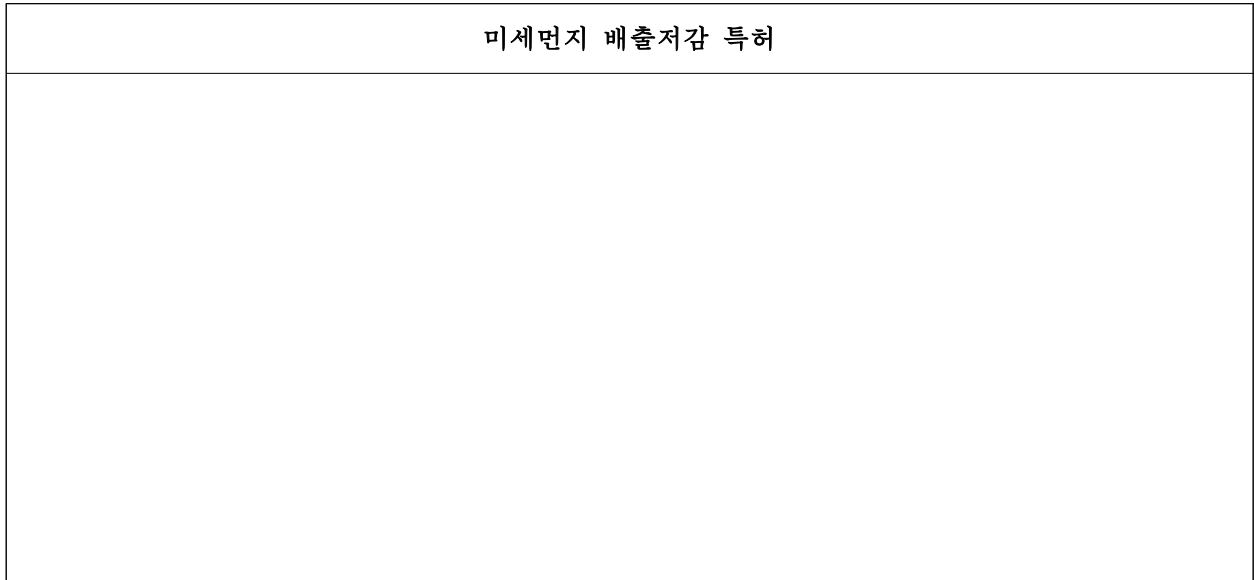


그림 69. 미세먼지 배출저감 연도별 특허출원 현황

그림 70. 미세먼지 배출저감 국가별 특허출원 현황

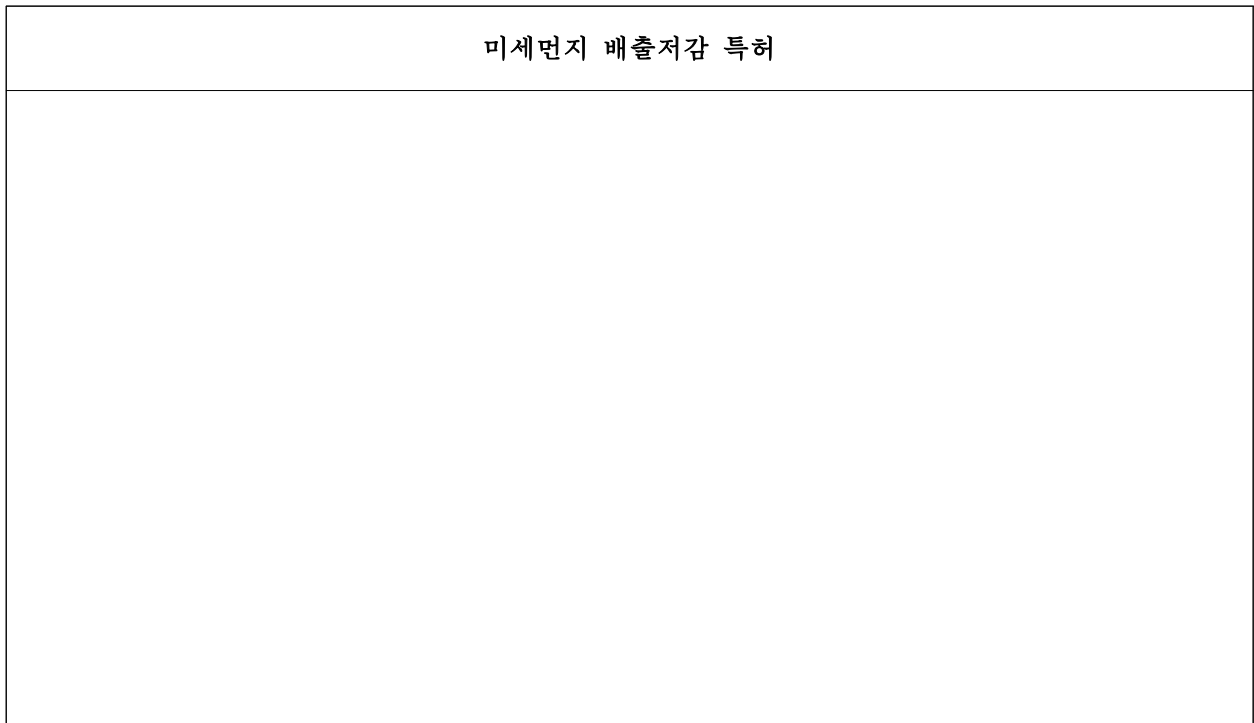


그림 70. 미세먼지 배출저감 국가별 특허출원 현황

□ 시장 동향현황

- 고정오염원에 대한 미세먼지 배출저감 기술 시장은 대기환경산업에서 가장 큰 공급과 수요를 담당하는 부분임. 전세계적으로 환경규제가 강해지고 있으며, 화력 발전이나 철강 및 코크스 수요의 증가가 지속되면서 대규모 고정오염원에 적용되는 미세먼지 관련 저감 기술 시장도 향후 크게 확대될 전망이다.
- 도로 이동오염원 배출저감 관련 시장은 자동차산업과 밀접하게 연관됨. 세계 배기가스·미세먼지 정화 촉매 시장은 `16년 약 \$100억 규모에서 `19년 약 \$140억 규모로 성장 전망(연평균 11.3%의 증가).
- 비도로 이동오염원 배출가스 저감장치는 대부분 도로이동오염원에서 활용되는 시스템(SCR, DPF 등)을 사용 중. 건설기계는 국내 45.2만대가 등록되어 있으며, `05년 배출기준을 도입하고 실도로 인증기준 도입(`19) 등 관리정책을 강화 중.
- 그간 비산먼지와 관련된 시장은 많이 미비하였는데 이는 살수차 수준(도로용)이거나 또는 건설작업 중단 등의 소극적 성격의 대처가 주를 이루었기 때문임.

□ 배출저감 R&D 투자현황

- 최근 3년간 세부기술 중 배출저감 기술에 투자하는 비중이 계속 증가하는 추세로 2016년 147억원에서 2017년 174억원, 2018년 266억원으로 증가하고 있음.
- 고정오염원 대상의 미세먼지 대응기술에 대한 R&D 투자는 2015년 이전에는 상대적으로 낮았으나, 2016년 이후 고정오염원 배출저감에 대한 정부의 R&D 연구비가 빠르게 증가하고 있음.
- 도로 이동오염원 배출저감 분야는 완성차 제조업체 및 retrofit을 위한 환경업체 등 민간 중심의 R&D가 필요한 분야로 정부는 핵심부품 및 소재의 국산화 등 핵심 원천기술 개발에 집중 필요함. 도로 이동오염원 배출저감 분야는 미세먼지 해결 측면에서 현재 수준의 R&D가 지속적으로 필요한 분야이며, 산업적 파급효과가 큰 원천기술 선정 및 투자확대가 필요함.
- 비도로 이동오염원 분야에서 대형선박, 건설기계 등은 시장이 형성되어 있고 민간(제작회사)의 투자여력이 있는 만큼 민간 중심의 R&D가 필요하고, 소형선박(연안해운 등), 농기계 등 취약 분야는 정부 차원의 투자 검토가 필요함.

그림 71. 미세먼지 배출저감 R&D 현황

--	--

□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

○ (기술역량)

- 고정오염원의 1차 직접배출저감 기술과 2차 생성 원인물질 저감 기술의 기술수준은 선진국 대비 80% 이상이며, 주요 선진국 대비 기술 경쟁력을 가지고 있다. 다만 신소재 부분과 촉매 등의 소재 기술이 취약하다고 평가됨.
- 이동오염원은 미국, 일본, 독일 등 주요국과 유사한 수준의 규제대응 기술역량을 보유하고 있으나, 원천기술은 해외 의존도가 높고 1차 배출저감에 비해 2차 생성 저감이 다소 약세임.
- 비도로 이동오염원 배출저감 분야 기술역량은 최고 기술 보유국인 미국·독일에 비하여 70~80%의 수준으로 평가됨.

○ (시장활성도)

- 고정오염원 배출저감 기술 시장은 한국에서도 상당히 활성화 되어 있으며, 주요 시장은 화력발전소와 대규모 장치산업체들임. 그러나 미국, 일본, 독일의 선진 시장에 비해 규모면에서 아직 한계가 존재하며, 최근 중국 등의 신흥 공업국을 중심으로 환경규제가 강화되면서 시장 규모가 확장하고 있으나 이에 대한 대응은 미흡함.
- 도로 이동오염원 배출저감 분야는 자동차산업 활성화와 함께 이 분야의 시장도 성숙된 것으로 평가됨.
- 비도로 이동오염원 배출저감 분야는 선박·건설기계·디젤엔진 제조업체 등을 중심으로 비교적 시장이 활성화된 상황임.

○ (기술별 중요도)

- 고정오염원 배출저감 기술은 2015년 이전에는 1차 직접배출 미세먼지 저진기술과 2차 생성 원인물질(SOx, NOx 등) 저감 기술에 대한 기술적 대응방안과 중요도가 다르게

평가되었으나, 최근에는 1차 배출이나 2차 생성 모두 미세먼지 저감을 위해 중요하게 다루어져야 하는 항목으로 인식되고 있음.

○ (시급성)

- 고정오염원에서 직접 배출되는 미세먼지 및 초미세먼지는 전체 배출량의 70% 수준이며, SOx 및 NOx 등의 원인물질의 배출비율도 매우 높음. 정부도 노후 화력발전소 조기 폐쇄 등의 강력한 조치를 취하고 있으며, 고정오염원에 대한 배출저감이 시급하다는 공감대가 형성되어 있음.
- 도로 이동오염원 배출저감 분야는 국내 미세먼지문제 해결을 위해 강조되어 왔던 분야로, 단기간 내 기술개발 및 보급 확산이 필요한 분야로 평가됨.
- 비도로 이동오염원의 기술 중요도는 평균 수준이지만, 투자 시기의 시급성은 원인규명분야에 이어 2위로 매우 높음.

□ 주요연구 성과 선정

1. 택배차량용 디젤 트럭의 하이브리드 개조기술 개발 및 실용화 연구 : 택배차량 ISG기능 개조 및 개조비용 지원가능 사업탐색, 모터: 최대토크 200N이상, Peak효율 92% 이상
2. 환경친화적 보급형 LPG직접분사(LPDi) 1톤 상용차용 연료분사 및 후처리 시스템 개발: 연비개선을 통한 LPG 엔진 및 LPG 자동차의 세계적인 경쟁력 확보로 제반 산업 동반 성장
3. 0.8L급 가솔린 엔진용 고성능 터보차저 개발: 컴프 최고효율 70%, 터빈 최고효율 60%
4. Stage V 대응 0.8L급 비도로용 가솔린 터보 2기통 엔진 후처리시스템 개발: 연비 250g/KWh, 최고출력 43/5500KW/rpm
5. 선박배가스 재순환장치 (EGR) 시스템 국산화 기술개발

2.2. 고정오염원배출저감

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 최근 5년간 (2013~2017년) 고정오염원에서 배출되는 미세먼지 저감 기술에 대해 국외에서 발표된 학술논문의 개수는 지속적으로 증가하는 추세임. 또한 2018년 4월까지 게재된 논문 개수로 추정된 2018년 전체 논문수도 예년의 수치를 상회할 것으로 예상됨.
- 이런 학술논문 게재건수의 증가 추세는 해당 학문분야가 활발하게 움직이고 있으며

관련 기술도 빠른 속도로 발전하고 있음을 반증함.

그림 72. 미세먼지 고정오염원배출저감 연도별 논문발표 현황

고정오염원배출저감

○ 주요 국가별 논문 발표 현황

- 최근 5년간의 주요 국가별로 미세먼지 고정오염원 저감 방안에 대한 학술논문 게재 추이를 살펴보면, 중국 연구자에 의한 논문수가 325건으로 절대 다수를 차지함. 이는 중국정부의 과감한 미세먼지 저감 정책 추진에 따른 고정오염원 배출저감과 저감 기술 개발의 필요성을 보여주고 있음.
- 한국은 지난 5년간 53건의 학술논문을 게재하여 국가별 순위에서 3위를 차지하였으며, 이는 국내에서 고정오염원 미세먼지 관리기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있음을 의미함. 따라서 고정오염원 미세먼지 저감 기술에 대한 국내의 기술 수요가 많으며 관련 연구자도 폭넓게 구성되어 있음을 보여줌.

그림 73. 미세먼지 고정오염원배출저감 국가별 논문발표 현황

고정오염원배출저감

○ 연도별 특허 현황

- 최근 5년간 고정오염원에서 배출되는 미세먼지 저감 기술에 대한 국제 특허는 매년 비슷한 건수가 출원되고 있으며, 이에 따라 기술시장에서 활용 가능한 누적 특허 수는 크게 증가하고 있음.
- 이는 학술논문 게재 건수의 증가 추세와 마찬가지로, 고정오염원을 대상으로 하는 미세먼지 저감 기술의 개발과 상용화 및 사업화가 활발하게 진행되고 있음을 의미함. 또한 기술개발 방향도 다양하며 발전 속도도 매우 빠르다는 것을 시사.

그림 74. 미세먼지 고정오염원배출저감 연도별 특허출원 현황

고정오염원배출저감

○ 주요 국가별 특허 현황

- 최근 5년간 주요 국가별로 출원된 고정오염원 발생 미세먼지에 대한 저감 기술 특허는 중국이 절대 다수를 차지하고 있으며, 많은 경우에는 연간 80건 이상의 관련 기술 특허를 출원함. 이는 중국정부의 과감한 미세먼지 저감 정책 추진과 이에 따른 관련 기술 시장의 폭발적인 확대를 이유로 들 수 있음.
- 반면 2013년까지 가장 많은 관련 특허를 출원했던 일본의 경우에는 특허출원 건수가 차츰 감소하여 2017년에는 10건 이하로 감소하는 추세임. 이런 경향은 자국 기술시장이 거의 포화되어 있으며 기술개발 수요가 한계 상황에 도달하였음을 의미함.
- 한국의 관련 특허는 매년 꾸준히 출원되고 있으며, 중국, 미국, 일본, 독일과 함께 세계 시장에서 경쟁할 수 있는 기술개발과 상용화 수준을 유지하고 있다고 보여짐.

그림 75. 미세먼지 고정오염원배출저감 국가별 특허출원 현황

고정오염원배출저감

□ 시장 동향현황

○ 고정오염원 미세먼지 저감 기술 시장

- 고정오염원에 대한 미세먼지 배출저감 기술 시장은 대기환경산업에서 가장 큰 공급과 수요를 담당하는 부분임. 전세계적으로 환경규제가 강해지고 있으며, 화력 발전이나 철강 및 코크스 수요의 증가가 지속되면서 대규모 고정오염원에 적용되는 미세먼지 관련 저감 기술 시장도 향후 크게 확대될 전망이다.
- 특히 중국의 경우에도 미세먼지 문제가 국가의 주요 현안이 되면서 인구 밀집 지역을 중심으로 화력발전소, 에너지 공급시설, 철강 및 석유정제업 등의 대규모 고정오염원에 대한 집중 관리가 시행되고 있음. 이에 대형 대기오염 제어설비 수요가 급증하고 있으며, 시장 규모도 전년 대비 크게 증가하는 추세임.
- 국내의 집진과 탈황 및 탈질기술 수준은 해외 선진국 기술에 거의 육박하여 경쟁력을 확보한 상황임. 국내 발전소들에 적용되는 집진 기술은 대부분 국내 기술이 사용되고 있으며 선진국에 비해 비교 우위를 점하기도 함.
- 그러나 관련 장비와 장치에 적용되는 특수 필터와 촉매 등의 소재 기술은 선진국에 비해 상당히 뒤떨어져 있어, 신소재의 개발과 성능개선 및 효율 향상을 위한 연구 개발이 필요한 상황임.

그림 76. 중국의 대기오염 투자 전망

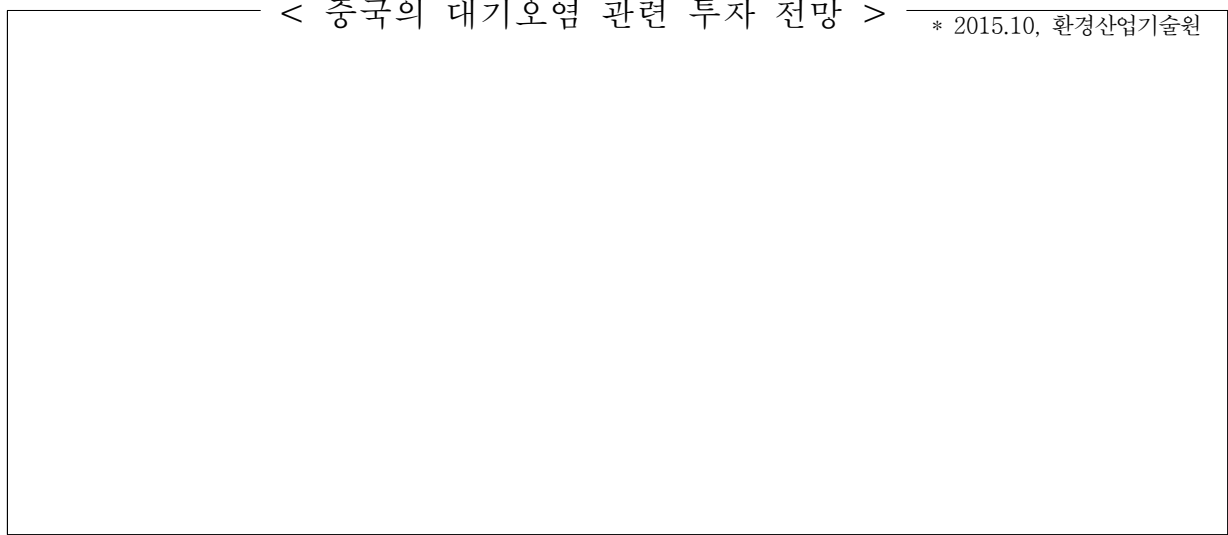


그림 76. 중국의 대기오염 투자 전망

○ 1차 (직접 배출) 미세먼지 저감 기술 시장 현황

- 석탄 화력 발전시설 등에서 직접 배출되는 미세먼지 저감 기술은 전기집진기와 여과집진 기술이 주를 이룸. 이들 집진기술들은 질량농도 기준으로 99% 이상의 고효율을 나타내지만 입자 크기가 작아질수록 제진 효율이 저하됨.
- 미세먼지 관리방향이 TSP에서 PM10을 거쳐 PM2.5로 전환되면서, 고정오염원의 1차 직접배출 미세먼지에 대한 저감 기술의 효율 목표도 TSP 질량농도 기준에서 PM2.5 이하의 초미세먼지나 극초미세먼지를 기준으로 변경되고 있음. 이에 따라 기존 여과집진이나 전기집진 기술의 성능개선 연구가 필요하며 효율 향상을 위한 신기술의 개발도 요구됨.

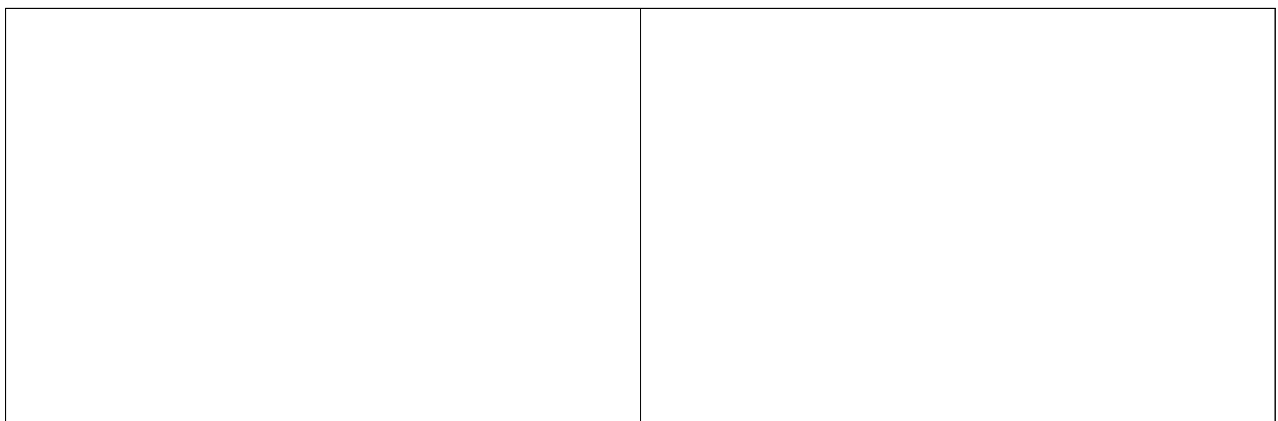
○ 2차 생성 원인물질 저감 기술 시장 현황

- 미세먼지 2차 생성 원인물질(SO_x, NO_x 등) 저감을 위한 기술로는 선택형 촉매 환원반응기(SCR), 선택형 비촉매 환원반응기(SNCR), 습식 배연탈황 장치 (FGD) 등이 사용 중임.
- 최근 2차 생성 미세먼지의 비율과 영향이 좀 더 구체적으로 알려지면서 원인물질 배출 허용 기준이 강화되고 있으며, 이에 따라 고효율 탈황 및 탈질 기술에 대한 수요가 증가하고 있음.
- 탈황 및 탈질 효율개선을 위한 신기술 개발과 촉매 등의 소재 개량 및 시스템 효율개선을 다각도로 이루어지고 있으며, 상용화 기술도 시장에 소개되고 있음. 또한 1차 생성 미세먼지와 함께 2차 원인물질을 동시에 제거하기 위한 복합 기술의 필요성도 대두되고 있음.

□ R&D 투자현황

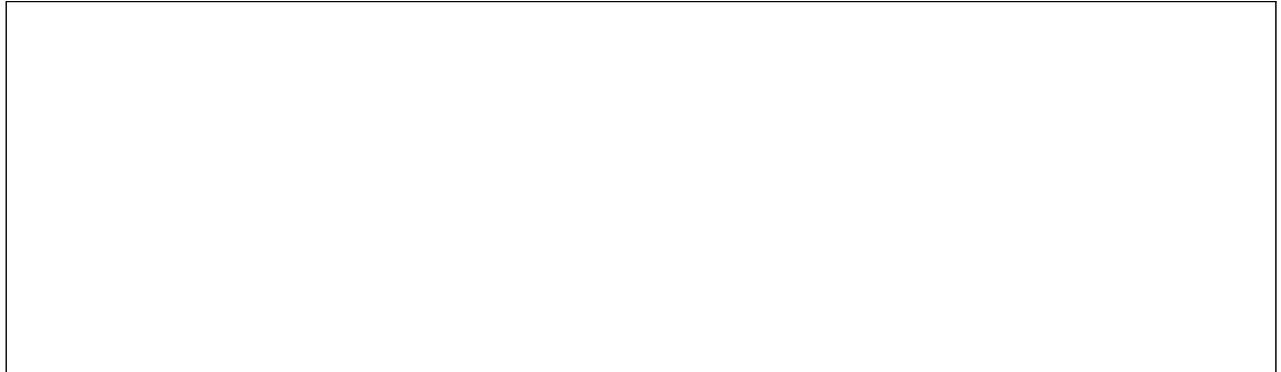
- `18년 총 28개 과제, 157억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 25.3%를 점유(1위/10위)
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 62.0억 → `17년 71.2억 → `18년 157.2억원
- 2015년 이전에는 고정오염원 대상의 미세먼지 대응기술에 대한 R&D 투자가 상대적으로 낮았으나, 2016년 이후 고정오염원 배출저감에 대한 정부의 R&D 연구비가 빠르게 증가하고 있음.
- 미세먼지 직접배출이나 2차 생성 원인물질의 배출에 있어서 고정오염원의 기여도가 다른 오염원에 비해 상대적으로 높으며, 이에 따라 고정오염원 대응 신기술의 개발과 제진효율 및 탈황 탈질 효율의 개선이 시급한 과제가 되어 있음. 이는 화력 발전소나 철강제조업 등의 대형 오염유발시설에 적용될 기술을 개발하고 현장 적용하기 위한 기본 연구 투자의 성격으로, 투자 대비 효과가 뚜렷하며 기술 수준 평가도 명확한 측면이 있음.
- 부처별 R&D 투자액은 산업자원부, 환경부, 과학기술정보통신부의 순이며, 고정오염원 대응기술의 적용이 전적으로 대규모 산업시설을 대상으로 하고 있어 산업자원부의 R&D 투자 비율이 다른 분야에 비해 높음. 고정오염원 적용기술은 관련 설비의 연구 개발과 함께 현장 적용 및 실증을 동시에 추진해야 하는 측면에서 산업자원부의 역할과 범 부처간 협업이 필요한 분야임.

그림 77. 미세먼지 고정오염원배출저감 R&D 현황



□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

그림 78. 미세먼지 고정오염원배출저감 전문가 설문조



- **(기술역량)** 1차 직접배출저감 기술과 2차 생성 원인물질 저감 기술의 기술수준은 선진국 대비 80% 이상이며, 주요 선진국 대비 기술 경쟁력을 가지고 있음. 다만 신소재 부분과 촉매 등의 소재 기술이 취약하다고 평가됨
 - 고정오염원 1차 배출저감(선진국 대비 84%, 기술격차 3.6년)
 - 고정오염원 2차 생성저감(선진국 대비 80%, 기술격차 4.6년)
- **(시장활성도)** 대기오염 대응 환경산업의 대부분을 차지하고 있는 고정오염원 배출저감 기술 시장은 한국에서도 상당히 활성화 되어 있으며, 주요 적용처는 화력발전소와 대규모 장치산업체들임. 그러나 미국, 일본, 독일의 선진 시장에 비해 규모면에서 아직 한계가 존재하며, 최근 중국 등의 신흥 공업국을 중심으로 환경규제가 강화되면서 시장 규모가 확장하고 있으나 이에 대한 대응은 미흡함
- **(기술별 중요도)** 2015년 이전에는 1차 직접배출 미세먼지 제진기술과 2차 생성 원인물질(SO_x, NO_x 등) 저감 기술에 대한 기술적 대응방안과 중요도가 다르게 평가되었으나, 최근에는 1차 배출이나 2차 생성 모두 미세먼지저감을 위해 주요하게 다루어져야 하는 항목으로 인식되고 있음
 - 고정오염원 1차 배출저감 54%
 - 고정오염원 2차 생성저감 46%
- **(시급성)** 국내의 대기오염물질 배출량 기준으로 가장 큰 비율을 차지하는 주요 배출원은 대형사업장 중심인 고정오염원임. 특히 고정오염원에서 직접 배출되는 미세먼지 및 초미세먼지는 전체의 70% 수준이며, SO_x 및 NO_x 등의 원인물질의 배출비율도 매우 높음. 따라서 정부도 노후 화력발전소 조기 폐쇄 등의 강력한 조치를 취하고 있으며, 고정오염원에 대한 배출저감이 시급하다는 공감대가 형성되어 있음
 - 10개 중분류 중 2위

○ 중요도

- 10개 중분류 중 2위

○ 파급효과

- 10개 중분류 중 2위

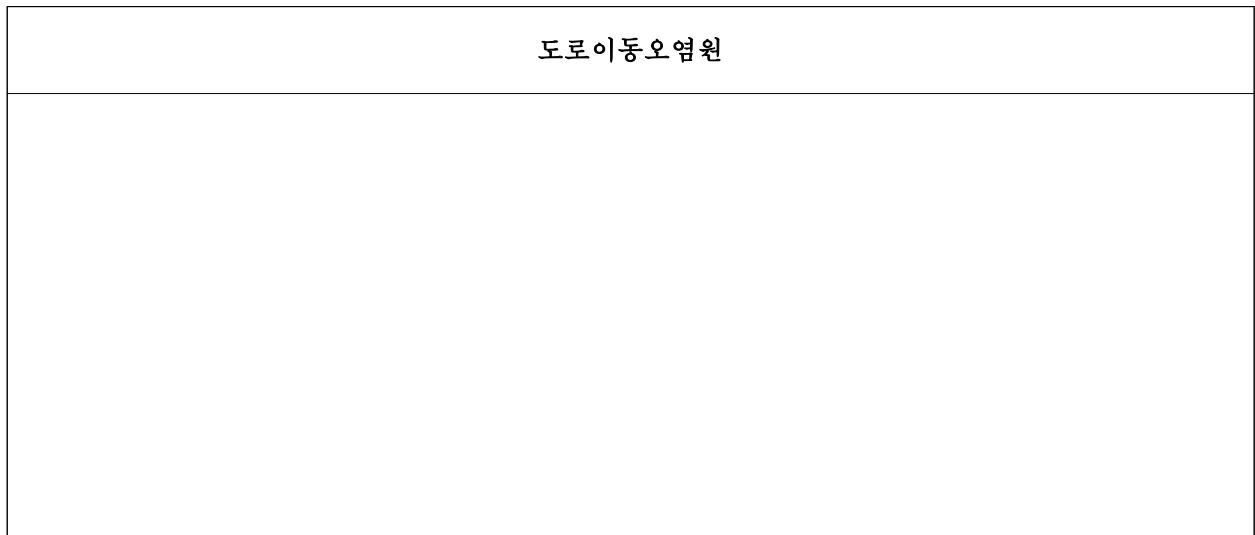
2.3. 도로이동오염원 배출저감

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문발표 현황

- 최근 5년간(`11년~`15년) 도로이동오염원과 관련된 논문은 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있음.

그림 79. 미세먼지 도로이동오염원 연도별 논문발표 현황



○ 주요 연구 국가별 논문 현황

- 중국이 가장 많은 논문을 발표하며 1위를 차지하고 있으며 미국, 한국 순으로 나타남.
- 우리나라도 자동차미세먼지에 대한 관심이 높아 연구가 활발하게 진행되고 있는 것으로 나타남.

그림 80. 미세먼지 도로이동오염원 국가별 논문발표 현황

도로이동오염원

국내외 특허 동향

○ 연도별 특허 현황

- 도로이동오염원 관련 분야 특허는 서서히 감소하고 있음.

그림 81. 미세먼지 도로이동오염원 연도별 특허출원 현황

도로이동오염원

○ 국가별 특허 현황

- 도로이동오염원 관련 특허는 급속하게 감소하고 있으며, 미국과 일본이 많았지만 최근 들어 중국에서 가장 많은 특허를 보유하고 있음.

- 핵심기술 분야인 경유차 후처리기술(DPF, urea SCR, LNT) 기술은 경유차의 표준부품으로 사용되고 있어 기술의 성숙단계에 왔기 때문에 특허는 감소하고 있음.
- 우리나라도 2015년에 가장 많았으나 이후 급속하게 감소하고 있음.

그림 82. 미세먼지 도로이동오염원 국가별 특허출원 현황

도로이동오염원

□ 시장 동향현황

- 도로 이동오염원 배출저감 관련 시장은 자동차산업과 밀접하게 연관됨.
- 세계 배기가스·미세먼지 정화 촉매 시장은 `16년 약 \$100억 규모에서 `19년 약 \$140억 규모로 성장 전망(연평균 11.3%의 증가).
- 디젤차를 위한 DPF 필터의 경우 미국의 코닝, 일본의 NGK, 독일의 보쉬 등의 제품이 사용되고 있으며, 촉매의 경우 전세계 시장을 선진국 3개사(Johnson Matthey, BASF, Umicore Group)가 약 70% 점유.

□ R&D 투자현황

- `18년 총 13개 과제, 87.4억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 14.0%를 점유(3위/10위).
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 56.5억 → `17년 70.4억 → `18년 87.4억원

○ 환경부 단독으로 지원해왔으나 산업부(`13년), 국토부(`15년)가 추가되면서 투자 규모 확대(`13년 대비 4배)

* 환경부는 경유차 NO_x 저감 기술 및 담체·촉매시스템, 산업부는 승용클린디젤엔진 핵심제어 알고리즘 및 ECU 설계기술, 국토부는 초미세먼지 제거차량 시스템 개발 중

□ 정부 R&D 투자방향

○ 도로 이동오염원 배출저감 분야는 완성차 제조업체 및 retrofit을 위한 환경업체 등 민간 중심의 R&D가 필요한 분야로, 정부는 핵심부품 및 소재의 국산화 등 핵심 원천기술 개발에 집중 필요

○ 경유차 등 도로 이동오염원은 초미세먼지의 주요 배출원*이나 관련 시장이 이미 성숙되어 있고, 노후 경유차 대체 등 정책적 차원에서 문제 해결 필요**

* 수도권 초미세먼지 배출기여도는 경유차(29%), 건설기계 등(22%), 냉난방(12%) 등의 순으로, 이동오염원(mobile source)이 가장 큰 비중(미세먼지 관리 특별대책, 2016.6)

** 경유차 대책 : 제작 경유차 실도로 배출기준 적용, 노후경유차 조기 폐차, 경유버스 친환경버스(CNG버스)로 대체, 친환경차(그린카) 보급 확대 등

○ 미세먼지 해결 측면에서 현재 수준의 R&D가 지속적으로 필요한 분야이며, 산업적 파급효과가 큰 원천기술 선정 및 투자확대 필요

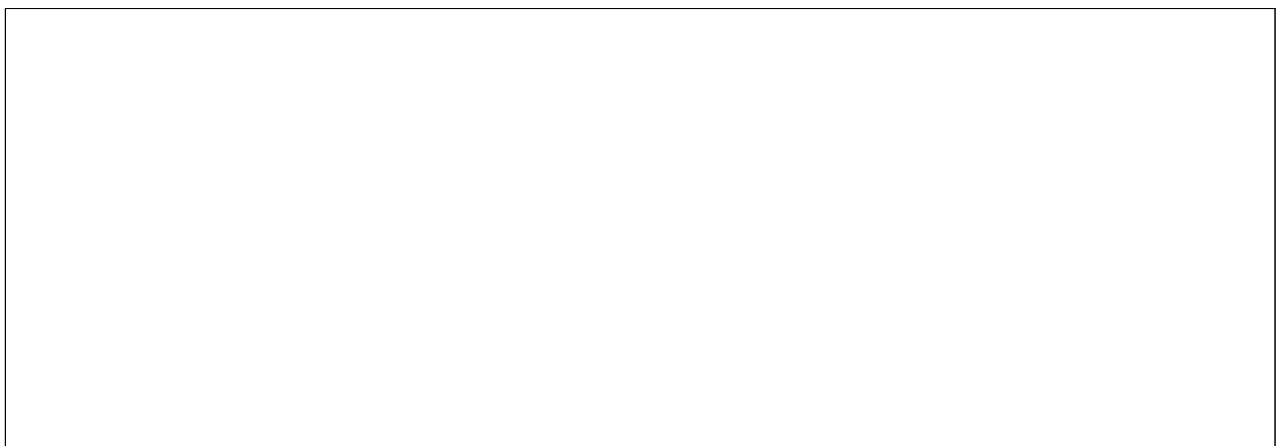
그림 83. 미세먼지 도로이동오염원 R&D 현황

--	--

□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- **(기술역량)** 미국, 일본, 독일 등 주요국과 유사한 수준의 규제대응 기술역량을 보유하고 있으나, 원천기술은 해외 의존도가 높고 1차배출저감에 비해 2차생성 저감이 다소 약세
 - 차량 1차 배출저감(선진국 대비 92%, 기술격차 3년)
 - 차량 2차 생성저감(선진국 대비 76%, 기술격차 4년)
- **(시장활성도)** 자동차산업과 함께 도로 이동오염원 미세먼지 배출저감 분야의 시장도 성숙된 것으로 평가됨
- **(기술별 중요도)** 국내 미세먼지문제 해결을 위해 강조되어 왔던 분야로, 단기간 내 기술개발 및 보급 확산이 필요한 분야로 평가
 - 차량 1차 배출저감 40%
 - 차량 2차 생성저감 60%
- **시급성**
 - 10개 중분류 중 1위
- **중요도**
 - 10개 중분류 중 1위
- **파급효과**
 - 10개 중분류 중 1위

그림 84. 미세먼지 도로이동오염원 분야 전문가 설문조사결과



주요연구 성과 선정

1. 택배차량용 디젤 트럭의 하이브리드 개조기술 개발 및 실용화 연구 : 택배차량 ISG기능 개조 및 개조비용 지원가능 사업탐색, 모터: 최대토크 200N이상, Peak효율 92% 이상
2. 환경친화적 보급형 LPG직접분사(LPDi) 1톤 상용차용 연료분사 및 후처리 시스템 개발: 연비개선을 통한 LPG 엔진 및 LPG 자동차의 세계적인 경쟁력 확보로 제반 산업 동반 성장
3. 미세먼지 및 CO₂ 저감 글로벌탑 저마모-저탄소 타이어 개발: Global-top 수준의 친환경타이어 소재 및 타이어개발 (유럽타이어 Labeling 기준 RRC=6.0 이하, Wetgrip=1.55 이상, UTQG=550이상), 실도로 주행조건의 타이어/브레이크 패드마모 미세입자 측정법 개발 및 표준화 추진
4. 글로벌탑 터보 직접분사 에탄올 혼합연료 자동차(FFV) 핵심부품 개발: 엔진연비 개선율(1.6MPI FFV 9점 연비 기준) 2.5%, 분사압력 220bar

2.4. 비도로 이동오염원 배출저감

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문발표 현황

- 비도로이동오염원 분야는 크게 관심을 받지 못하고 있어 관련된 논문이 거의 없는 수준임.

그림 85. 미세먼지 비도로이동오염원 연도별 논문발표 현황

비도로이동오염원

○ 주요 연구 국가별 논문 현황

- 비도로이동오염의 영향이 큰 선진국을 중심으로 논문이 발표되고 있으나, 미미한

수준임.

그림 86. 미세먼지 비도로이동오염원 국가별 논문발표 현황

비도로이동오염원

○ 연도별 특허 현황

- 비도로이동오염원 관련 분야에 관심이 높아지고 있어 특허는 서서히 증가하고 있음.

그림 87. 미세먼지 비도로이동오염원 연도별 특허출원 현황

비도로이동오염원

○ 국가별 특허 현황

- 비도로이동오염원 관련 특허는 중국과 한국에서 증가하고 있음.

그림 88. 미세먼지 비도로이동오염원 국가별 특허출원 현황

비도로이동오염원

□ 시장 동향현황

- 비도로 이동오염원용 배출가스저감 장치는 대부분 도로이동오염원에서 활용되는 시스템(SCR, DPF 등)을 사용 중
- 한국의 선박 수주량은 `18년 상반기 전세계 선박발주량의 40%로 3년 만에 중국(36%)을 제치고 1위를 기록(클락슨리서치, 2018)
- 건설기계는 국내 48.7만대(`17년)가 등록되어 있으며, `05년 배출기준을 도입하고 실도로 인증기준 도입(`19) 등 관리정책을 강화 중

□ R&D 투자현황

- `18년 총 7개 과제, 42.8억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 6.6% 수준(6위/10위)
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 28.2억 → `17년 13.2억 → `18년 42.8억원
- ‘선박 배출 미세먼지저감 분야’는 `18년 총 3개 과제가 진행 중(해수부, 28억원)에 있으며, 건설장비 등 ‘기타 비도로 이동오염원 배출저감’에도 투자(14.8억원)
- 대부분 건설장비 등 ‘기타 비도로 이동오염원 배출저감’에 R&D 집중

- 환경부는 기타 비도로 이동오염원 중 장기대응(Tier-4), 산업부는 현안대응 기술 개발(Tier-3, `16년~), 해수부는 선박배출 중심

그림 89. 미세먼지 비도로이동오염원 R&D 현황

--	--

□ (정부 R&D 투자방향)

- 배출규모에 비해 상대적으로 투자가 저조한 ‘선박 배출 미세먼지 저감’에 대한 투자 규모 확대 검토 필요
- 대형선박, 건설기계 등은 시장이 형성되어 있고 민간(제작회사)의 투자 여력이 있는 만큼 민간 중심의 R&D 필요
 - 소형선박(연안해운 등), 농기계 등 취약 분야는 정부 차원의 투자 검토.
- 건설기계는 제작차 이동식 배출가스 검사제도 도입(`19년 규정제정), 노후 건설기계 저공해화 사업 등 정책·제도 중심의 관리
- 선박은 일부 소규모·단편적 연구가 진행 중으로, 배출현황 파악 후 R&D 투자 규모에 대한 적정성 검토 필요

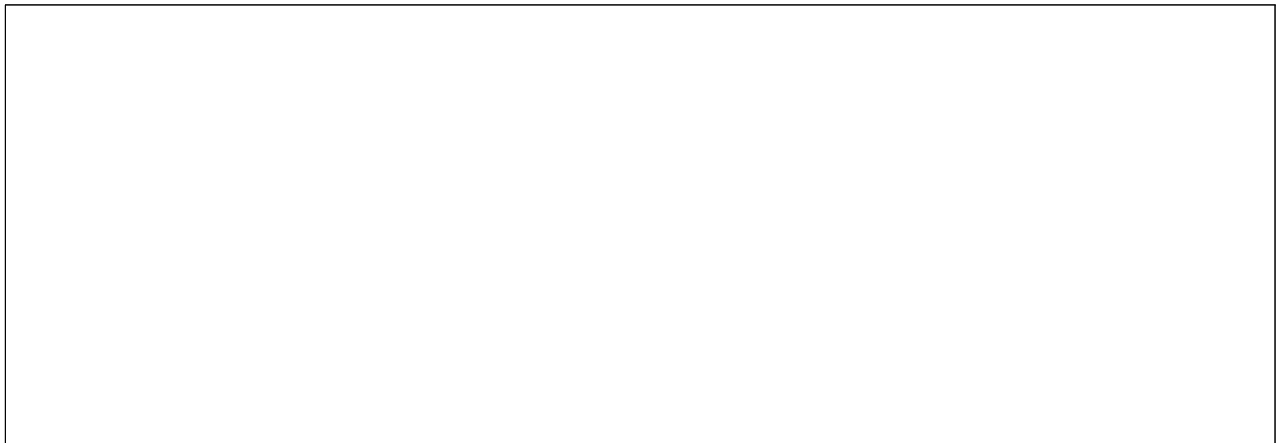
□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- (기술역량) 비도로 이동오염원 배출저감 분야 기술역량은 최고 기술 보유국인 미국·독일에 비하여 70~80%의 수준으로 평가
 - 선박배출 미세먼지 저감(선진국 대비 67%, 기술격차 5년)
 - 기타 비도로용 이동오염원 미세먼지 저감(선진국 대비 55%, 기술격차 6년)
- (시장활성도) 선박·건설기계·디젤엔진 제조업체 등을 중심으로 비교적 시장이 활성화된

상황

- (기술별 중요도) 기술 중요도는 평균 수준, 투자 시기의 시급성은 매우 높음(원인규명분야에 이어 2위)
 - 선박배출 미세먼지 저감 50%
 - 기타 비도로용 이동오염원 미세먼지 저감 50%
 - * 비도로 이동원 중 선박 배출 미세먼지는 48%로 추정(2012년 PM2.5 비도로 배출량, 환경부)
- 시급성
 - 10개 중분류 중 6위
- 중요도
 - 10개 중분류 중 8위
- 파급효과
 - 10개 중분류 중 8위

그림 90. 미세먼지 비도로이동오염원 전문가 설문조사 결과



□ 주요연구 성과 선정

1. 0.8L급 가솔린 엔진용 고성능 터보차저 개발: 컴프 최고효율 70%, 터빈 최고효율 60%
2. Stage V 대응 0.8L급 비도로용 가솔린 터보 2기통 엔진 후처리시스템 개발: 연비 250g/KWh, 최고출력 43/5500KW/rpm
3. 선박배가스 재순환장치 (EGR) 시스템 국산화 기술개발 :
- 4.모노리스타입 13인치급 매연여과장치(DPF) 필터 개발: 지름 13"이상 DPF 제작을 위한

조성 최적화(압축강도 : 50kg/cm², 열팽창계수 : 10*10⁻⁷/°C 이하)

2.5. 비산먼지저감 분야

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

- 최근 5년간 (2013~2017년) 비산먼지저감 기술에 대해 국외에서 발표된 학술논문의 개수는 2013년 이후 연도별로 증가와 감소하면서 지속적으로 증가하는 추세임.
- 이런 학술논문 게재건수의 소폭의 증가 추세는 해당 학문분야가 서서히 주목받으면서 관련 기술도 점차 발전하고 있음을 보여줌.

그림 91. 미세먼지 비산먼지 저감 연도별 논문발표 현황

비산먼지 저감

○ 주요 국가별 논문 현황

- 최근 5년간의 주요 국가별로 비산먼지저감 방안에 대한 학술논문 게재 추이를 살펴보면, 미국의 학술논문수가 34건, 중국이 31건으로 절대 다수를 차지함.
- 한국은 지난 5년간 6건의 학술논문을 게재하여 국가별 순위에서 6위를 차지하였으며, 인용횟수 측면에서 우리나라(24회)는 1위인 미국(87회), 2위인 중국(57회)에 비교하여 많이 낮은 편이나 도출된 논문의 수에 대비하여 인용된 횟수는 상대적으로 높은 편으로 논문의 질적 수준이 높아지고 보여줌.

그림 92. 미세먼지 비산먼지 저감 국가별 논문발표 현황

비산먼지 저감

○ 연도별 특허 현황

- 비산먼지 저감 분야의 특허 수는 증가하고 있는 추세이며 자동차 등의 도로운송시설과 기차, 크레인 등의 비도로운송시설에 의하여 발생하는 비산먼지 저감 기술과 관련 특허가 발생하고 있음.
- 최근 5년간 비산먼지저감 기술에 대한 국제 특허는 매년 비슷한 건수가 출원되다가 2017년에는 다소 감소하고 있으며, 이에 따라 기술시장에서 활용 가능한 누적 특허 수는 2015년 이후 크게 증가하고 있음.
- 이는 학술논문 게재 건수의 증가 추세와 마찬가지로, 고정오염원을 대상으로 하는 미세먼지 저감 기술의 개발과 상용화 및 사업화가 활발하게 진행되고 있음을 의미함. 또한 기술개발 방향도 다양하며 발전 속도도 매우 빠르다는 것을 시사.

그림 93. 미세먼지 비산먼지 저감 연도별 특허출원 현황

비산먼지 저감

○ 주요 국가별 특허 현황

- 최근 5년간 주요 국가별로 출원된 비산먼지에 대한 저감 기술 특허는 중국이 절대 다수를 차지하고 있으며, 전체 53건 중에서 19건을 출원하였으며 2015년 이후 매년 8건을 출원함. 이는 2013년 시진핑 지도부 집권 이래 국가신형도시화계획(2014년)에 따른 50% 이상의 도시화율 증가와 과감한 미세먼지저감 정책 추진에 따른 관련 기술 시장의 폭발적인 증가에 기인한다고 볼 수 있음.
- 반면 2013년까지 가장 많은 관련 특허를 출원했던 일본의 경우에는 특허출원 건수가 급격히 감소하여 2017년 이후에는 출원이 없으며, 미국도 유사한 침체 경향을 보이고 있음. 이런 경향은 자국 기술시장이 거의 포화되어 있으며 기술개발 수요가 한계 상황에 도달하였음을 의미함.
- 한국의 관련 특허는 매년 2015년까지 증가하다가 이후 다소 감소하는 추세를 보이고 있으나 전체적인 수준에서는 중국, 미국과 함께 세계 시장에서 경쟁할 수 있는 기술개발과 상용화 수준을 유지하고 있다고 보여짐.

그림 94. 미세먼지 비산먼지 저감 국가별 특허출원 현황

비산먼지 저감

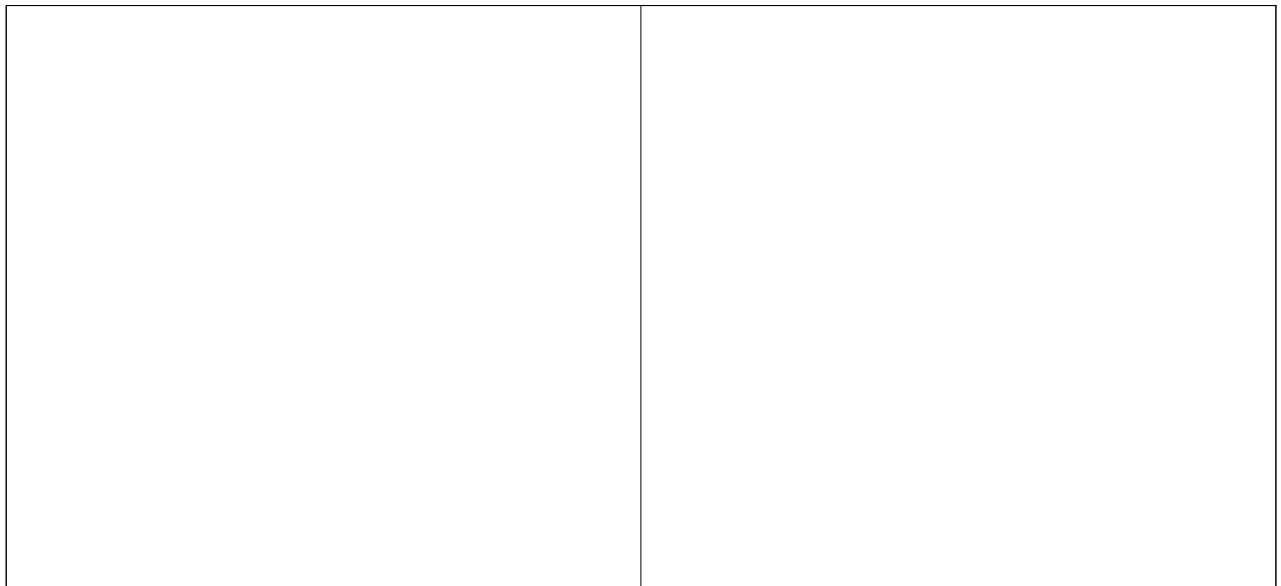
□ 시장 동향현황

- 2011년과 2012년에는 미세먼지 발생원을 비산먼지, 자동차·발전 시설들의 배출가스, 화석연료 사용 등 인위적인 발생에 두는 경우가 많았으며 그간 비산먼지와 관련된 시장은 많이 미비하였는데 이는 살수차 수준(도로용)이거나 또는 건설작업 중단 등의 소극적 성격의 대처가 주를 이루었기 때문임.
- 현재 시장에서 필요로 하는 방향은 도로청소 관련분야와 건설현장 미세먼지 저감 분야로 나눌 수 있으며, 도로청소 관련 분야는 분지흡입 청소차에 필터를 장착하여 처리하고 있으나 경제성과 효율성 갖춘 상용화된 기술은 전무한 상태이며, 건설현장에서는 전기집진이나 여과집진, 세정식 집진기술이 건설현장 상황에 따라 적용되고 있음.
- 아래의 관련 등록특허 현황을 살펴보면 이러한 시장의 영향을 잘 보여주고 있으며 특히 터널공사 시 발생하는 비산먼지 제거기술 분야의 터널공사용 차량탑재형 집진장치, 터널 공사용 집진환기 장치, 터널 공사용 습/건식 겸용 이동식 집진기가 주류를 이루고 있음.
- 도로청소 분야에서 미국의 Schwarze, Johnston, Elgin에서는 분진 청소차가 많이 보급되어 있으며, 스웨덴의 청소차 제작업체 DISAB Vacuum Technology사의 건식 고진공 청소차량(DISA-CLEAN 130)가 2단계 필터 시스템을 적용함으로써 미세먼지 제거가 가능하나 가격이 고가라는 일부 국가, 도시에서 시범적으로 도입하여 사용되고 있음.
- 유럽에서도 저전압 다단형 도로터널용 전기집진기를 개발하여 사용하고 있으나, 사용 환경 및 기술과 가격면에서 적당하지 않아 적용과 실적면에서 일본보다는 부족함. 특히, 산악지형으로 이루어져, 도로터널이 많은 일본에서 저전압 다단형인 도로터널용 전기집진기가 발달되어 있는데, 집진이 어려운 자동차 매연 및 타이어분진 등을 80%이상 제거할 수 있는 도로터널용 전기집진기가 개발되어 일본 내에 많은 설치, 가동실적을 보유하고 있음.

□ R&D 투자현황

- `18년 총 1개 과제, 1.6억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 0.3%에 불과(10위/10위)
- 비산먼지저감 기술에 대한 R&D 투자가 매우 낮으며 2016년부터 최근 2개의 과제가 추진되었으며, 2016년, 2017년에는 연구비가 전무하다, 2018년에는 1.6억원으로 지원되었으며 타 분야 대비 미약한 수준임.
- 최근 3년간 세부기술 중 간척지에서 유래하는 비산먼지 관리기술 개발에 1건.
- 2019년 이후에 자동차타이어마모 저감 기술 과제 예정.
- 2015년 이전의 건설현장 관련 연구는 국토교통부에서 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터시스템 개발(2011.9~2014.9) 추진된 바가 있으며, 미세먼지는 헤파필터를 사용하는 여과식집진기에서 처리하고 가스상 물질들은 플라즈마 및 촉매반응을 이용하여 각각 별도의 처리방법으로 제거하는 시스템을 개발을 목표로 함.
- 반면 최근에는 미진동·무진동 암반굴착공법과 관련한 연구가 진행되어 왔으며, 미진동파쇄기, 플라즈마공법, 기계식공법, 팽창성 파쇄제 등이 있으며 일반적으로 기계적 압력원리에서 100MPa 이상의 팽창압과 팽창성 파쇄제에서 30MPa 정도의 팽창압으로 암을 절개함으로써 건설현장에서 발생하는 비산먼지를 사전에 예방하는 분야의 연구로 전환되고 있는 추세에 있음.

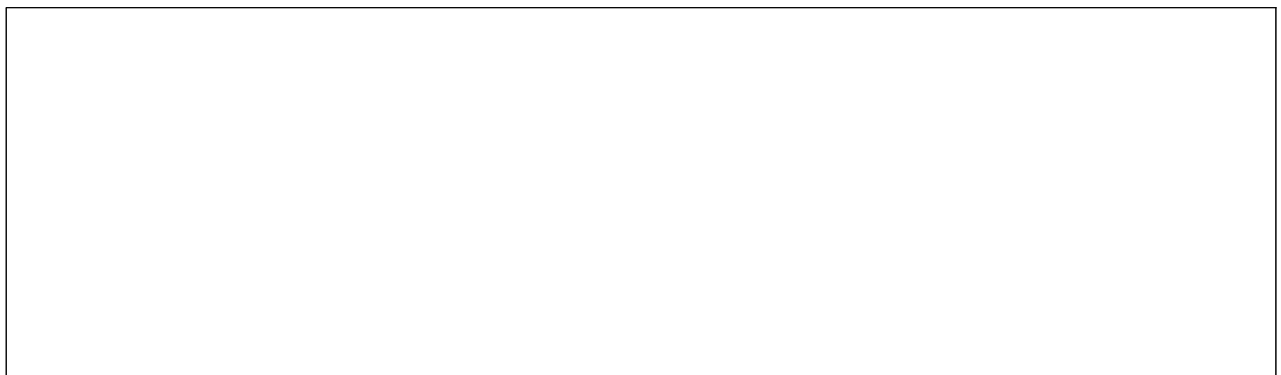
그림 95. 비산먼지 R&D 현황



□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- **(기술역량)** 도로비산먼지저감 기술과 비도로 비산먼지저감 기술의 기술수준은 선진국 대비 80% 이상이며, 주요 선진국 대비 기술 경쟁력을 가지고 있음. 다만 미세먼지저감 기술이 취약하다고 평가됨
 - 도로 비산먼지 저감(선진국 대비 79%, 기술격차 4.4년)
 - 비도로 비산먼지 저감(선진국 대비 79%, 기술격차 4.4년)
- **(시장활성도)** 비산먼지저감 분야의 대부분을 차지하고 있는 도로 비산먼지저감 분야는 국민모두 미세먼지 심각성을 느끼면서 상당히 활성화 되어 있으나, 선진 시장에 비해 규모면에서 아직 한계가 존재하고 있음
- **(기술별 중요도)** 도로 비산먼지저감 분야가 비도로비산먼지 분야에 비하여 국민이 체감할 수 있는 부분이 크므로 2배 이상의 중요도가 높게 평가됨
 - 도로 비산먼지 저감 65%
 - 비도로 비산먼지 저감 35%
- **(시급성)** 국내의 대기오염현황을 감안한 오염물질 배출량 기준으로 볼 때 고정오염원이 주요 배출원으로 인식하고 있으므로 상대적으로 도로 비산먼지저감 분야는 시급성이 다소 낮은 것으로 나타나고 있음
 - 10개 중분류 중 9위
- **중요도**
 - 10개 중분류 중 10위
- **파급효과**
 - 10개 중분류 중 9위

그림 96. 비산먼지 전문가 설문조사결과



□ 주요연구 성과 선정

- 수행과제가 적은 상태로 주로 산업부는 자동차에서 발생하는 비산먼지저감을 위한 재료 및 소재개발, 환경부는 건설현장에서 발생하는 비산먼지 포집·처리 기술, 농촌진흥청은 토양유래 비산먼지저감 기술 개발이 이루어짐.

3. 국민생활 보호 분야

3.1. 총괄

□ 미세먼지에 대한 국민적 관심과 불안

- 국민들은 국가 발전의 수준을 평가할 때 경제적 기준에 비해 환경적 기준을 더 중요한 것으로 생각하는 인식상의 큰 변화가 나타나고 있음.
 - 한국환경정책평가연구원(2017)의 「2016년 국민환경의식조사」에 따르면 우리나라의 발전 수준을 평가하는 기준으로 경제적(일자리 등), 환경적(자연환경 등), 사회적(복지 등)를 동일하게 적용해야 한다는 응답(32.6%)이 가장 높은 것으로 나타남.
 - 중요도에서는 환경적 기준(27.2%), 경제적 기준(21.3%), 사회적 기준(18.9%)의 순으로 나타나, 조사 이래 처음으로 환경적 기준에 대한 응답률이 경제적 기준을 앞선 것으로 나타남.
- 국민 대다수가 미세먼지에 대한 우려를 가지고 있으며, 국민의 절반 이상이 정부의 대응이 제대로 이루어지지 않고 있다고 생각하고 있음.
 - 한국환경정책평가연구원(2017)의 「2016년 국민환경의식조사」에 따르면 미세먼지에 ‘관심이 있다’는 답변 비율은 90.8%로 국민 거의 대부분이 미세먼지에 우려하고 있는 것으로 나타남.
 - 전체 응답자의 절반 이상(53.1%)은 미세먼지 감축을 위한 정부의 노력이 부족하다고 인식하고 있음(한국환경정책평가연구원, 2017, 「2016년 국민환경의식조사」)

□ 국민생활보호분야

- 국민생활보호 분야 R&D에는 건강영향평가, 미세먼지노출저감 기술, 정책 및 정보서비스 등이 포함됨.
 - 국민생활 보호 분야는 미세먼지에 대한 물리적 노출저감을 통한 건강보호, 정확한 정보와 신뢰할만한 정책을 통한 심리적 안심 확보가 주 내용임.

그림 97. 미세먼지와 국민건강과의 관계성



- 미세먼지 R&D는 국민건강의 보호와 향상에 궁극적 목적이 있으며, 이는 국민의 신체적·물리적 안전과 심리적 안심을 통해 확보 가능하다는 점에서 국민생활보호 분야는 국민의 관심사와 가장 직접적으로 연결된 분야임.

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

- 국민생활 보호 분야의 연구는 2013년 이후 지속적으로 증가하고 있으며, 상대적으로 건강영향평가 부문의 연구가 활발하게 이루어지고 있음.
 - 2013년 140건이었던 논문 건수는 매년 큰 폭으로 증가하여 2017년에는 논문 발표 건수가 261건으로 2013년에 비해 86%나 증가함.
 - 2017년의 경우 건강영향평가 관련 논문이 151건이며, 노출저감 기술이나 정책 및 정보서비스 분야는 각각 55건씩을 차지함.
 - 국민생활보야 분야의 논문 건수가 전체 논문의 57.9%를 차지함으로써 노출저감 기술이나 정책 및 정보서비스 분야에 비해 상대적으로 연구가 활발하고 이루어지고 있는 것으로 나타남.

그림 98. 국민생활보호 연도별 논문발표 현황

국민생활보호

○ 주요 연구 국가별 논문 현황

그림 99. 국민생활보호 국가별 논문발표 현황

국민생활보호

- 국가별 논문 발표 건수의 총합은 1,205건이며, 국가별로는 미국이 355건으로 가장 많고 그 다음으로 중국이 333건의 논문을 발표하였음.
- 미국과 중국이 688건으로 57.1%를 차지하여 관련 연구의 절반 이상을 차지한 반면,

우리나라는 42건(3.5%)에 불과하여 영국 등 다수의 유럽 국가에 비해서도 낮은 논문 발표 실적을 보이고 있음.

□ 국내외 특허 동향

○ 연도별 특허 현황

- 연도별 특허출원 건수는 2015년까지 큰 폭으로 증가하다가 감소하기 시작해 2017년에는 65건으로 2014년 수준으로 하락하였음.
- 전반적으로 노출저감 기술의 특허출원이 가장 많은 것으로 나타났는데, 2017년만을 놓고 보면 건강영향평가 10건, 노출저감 기술 40건, 정보 및 정책 서비스 15건으로 노출저감 기술이 전체의 61.5%를 차지하였음.
- 이러한 특허출원 비율의 차이는 건강영향평거나 정보 및 정책 서비스 분야의 연구 부족 때문이라기보다는 분야별 연구 내용과 결과의 특성 차이 때문인 것으로 이해할 수 있음.

그림 100. 국민생활보호 연도별 특허출원 현황



○ 국가별 특허 현황

- 국민생활보호 분야의 국가별 특허출원은 중국이 전체의 92.39%를 차지하여 절대 다수를 차지하고 있으며, 우리나라는 6.04%로 상대적으로 매우 낮은 비중을 차지함.
- 기타 인도, 독일, 베트남, 일본, 미국 등이 국민생활보호 관련 특허를 출원했으나

중국에 비해서 매우 미미한 수준임.

- 중국은 2015년에 관련 특허가 급격하게 증가하였는데 미세먼지 노출저감 기술의 경우 전년에 비해 4배 가까이 증가한 것으로 나타나, 미세먼지에 대한 관심의 증가를 반영하는 것으로 이해 가능함.

그림 101. 국민생활보호 국가별 특허출원 현황

국민 생활 보호

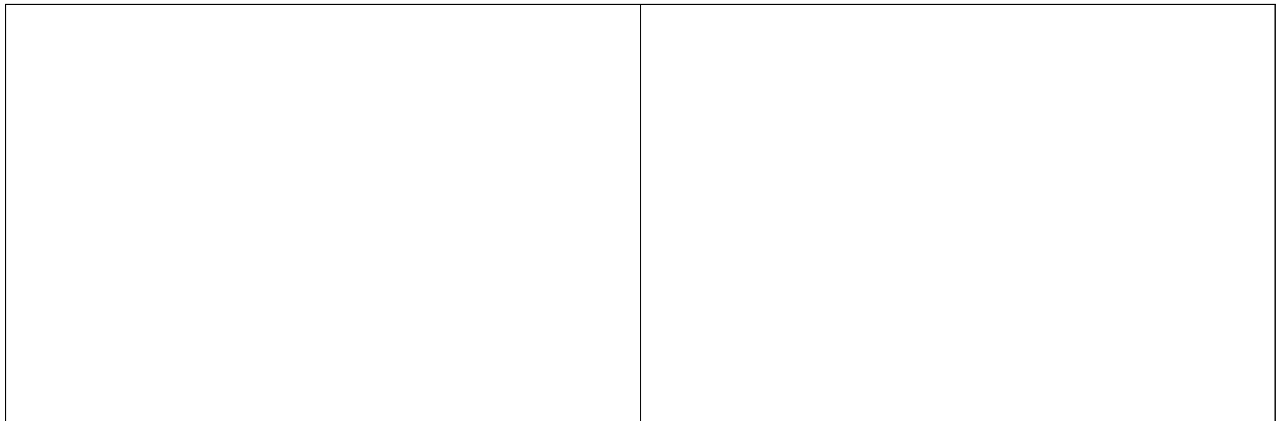
□ 시장 동향현황

- 실내공간에서의 활동 시간 증가로 미세먼지 노출저감 기술 시장은 점차 확대될 것으로 판단되며, 사업화의 가능성도 높은 것으로 판단됨.
 - 실내공간의 오염에 대한 우려가 증가하면서 국내 공기청정기 판매량이 급속하게 증가하고 있는데, 중국 등에서도 관련 수요는 꾸준히 증가할 것으로 예상됨.
 - ※ 국내 공기청정기 판매량: 250만대(014년) → 87만대(2015) → 100만(2016) → 150만대(2017년) → 200만대(2018년 예상치)(한국과학기술정보연구원/업계 추산, 뉴스핌(2018. 2. 28)에서 인용)
- 건강영향평가와 정책 및 정보서비스 분야는 공공성이 강한 분야의 특성상 시장동향의 중요성은 상대적으로 높지 않으나, 국민의 관심증가로 사회적 수요는 지속적으로 높아지고 있음.

- 정부대응에 대한 만족도가 높지 않은 상황이라는 점에서 정부의 보다 적극적 대응이 필요한 것으로 판단됨.

□ R&D 투자현황

그림 102. 국민생활보호 R&D 현황



- 국민생활분야 중 미세먼지 노출저감 분야의 R&D투자 규모가 가장 크고 정책 및 정보서비스 분야의 투자 규모가 가장 낮은 것으로 나타남.
 - 미세먼지 노출분야에 대한 R&D 투자 규모는 2017년 72.5억, 2018년 70.7억으로 상대적으로 두 분야에 비해 투자 규모가 큰 것으로 나타남.
 - 2018년의 경우 건강영향평가가 56.3억, 정책 및 정보서비스가 10억으로 상대적으로 투자 액수는 적은 것으로 나타났는데, 이러한 차이는 분야별 특성에 따른 것으로 판단됨.
- 미세먼지에 대한 국민의 관심과 불안감 증가에 따라 2017년을 기점으로 국가 미세먼지에 대한 국가 R&D 투자는 급증하였음.
 - 건강영향평가는 2017년 투자 규모가 전년에 비해 4배 이상, 정책 및 정보서비스는 3배 이상 증가하였는데, 특히 건강영향평가는 2018년에도 56.3억으로 큰 폭으로 투자규모가 증가하여 가장 증가가 큰 것으로 나타남.
 - 미세먼지 노출저감 분야는 상대적으로 증가 비율은 낮지만 R&D 투자 증가액 규모는 가장 큰 것으로 나타남.

□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- 미국과 유럽이 국민생활보호 분야 관련 기술의 최고기술 보유국인 것으로 나타났음
 - 최고기술 보유국은 미국 또는 유럽으로 나타났는데 노출저감 기술과 건강영향평가는 모두 미국이 최고기술 보유국이며, 정책 및 서비스는 미국과 유럽이 최고기술

보유국으로 나타남.

- 최고기술보유국 대비 기술 수준은 모두 75% 미만이었는데, 정책 및 서비스 분야는 70%에도 미치지 못하는 것으로 나타나 기술 수준 향상을 위한 상당한 노력이 필요한 것으로 나타남.

- 건강영향평가와 노출저감 기술은 시장성과 시장잠재력은 크나 시장 활성화 정도는 높지 않은 것으로 나타남.
 - 개인착용형 노출저감기구를 중심으로 시장이 형성되고 있으며, 실내공기정화와 생활환경 실내공기질 기술은 활성화 정도가 높지 않음.
 - 건강영향평가의 경우 인체노출 관련 산업의 시장성이 높지만 시장활성화도는 낮은 편임
 - 정책 및 정보서비스 분야는 공공성이 강한 영역으로 시장 활성화를 판단하기는 곤란하나 활성화 초기 단계로 나타남.
- 노출저감 기술과 정책 및 정보서비스, 건강영향평가의 기술 중요도와 기술시급성은 그다지 높지 않은 수준인 것으로 나타남
 - 노출저감 기술, 건강영향평가, 정책 및 정보서비스의 기술 중요도는 5-8위 사이로 전반적으로 높지 않은 것으로 나타남.
 - 기술시급성은 노출저감 기술은 10개 분야 중 4번째, 정책 및 정보서비스 5위, 건강영향평가는 8위의 순으로 노출저감 기술의 시급성을 상대적으로 더 높게 평가함.

□ 주요연구 성과 선정

- 대표적 성과로 내세울 만한 완료된 연구 성과는 현재까지 없는 것으로 나타났으나,

노출저감 기술 분야의 경우 일부 성과가 기대됨.

- 건강영향평가는 역학연구(미세먼지 노출과 사망과의 관계) 외 대부분이 현재 진행 중으로 주요 성과는 어려운 상황임.
- 정책 및 정보서비스는 상대적으로 관련 연구가 부족한 상황으로 뚜렷한 성과는 없는 것으로 판단됨.
- 노출저감 분야의 경우 「유해 초미세입자 특성화 및 미래선도형 탐지기술 개발(한국과학기술연구원 운영지원사업, 과학기술정보통신부)」이 성과가 기대되는 연구임.

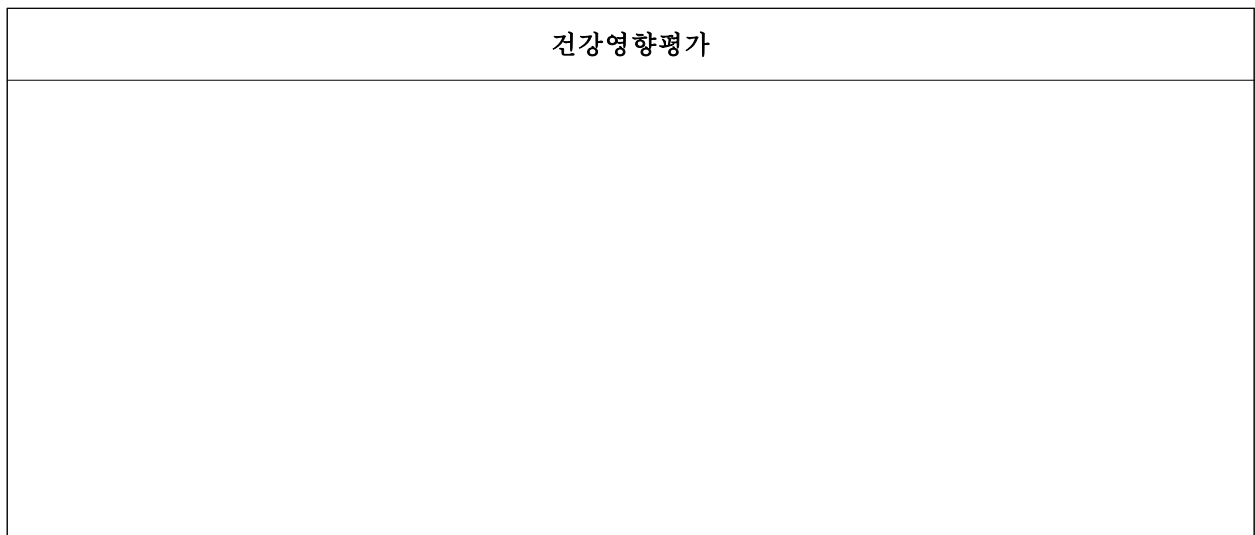
3.2. 건강영향평가

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 최근 5년간(`13년~`17년) 미세먼지의 건강영향 관련 논문은 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있음. 5년 사이 두 배로 증가함.

그림 103. 미세먼지 건강영향평가 연도별 논문발표 현황



○ 주요 연구 국가별 논문 현황

- 2013년부터 2018년 5월 현재까지 발표된 논문 929 건 중, 미국은 가장 많은 논문을 발표하며 1위를 차지하고 있으며 (235건 37.4%), 그 다음으로는 중국(151건, 24.8%), 영국(52건, 8.3%) 순으로 나타남.

- 우리나라는 26건(약 4.1%)으로 9위를 차지하고 있으며, 순위는 GDP 대비 낮지 않으나 절대적 건수에서 미국이나 중국에 비해 국내 연구가 활발하지 않은 것으로 나타남.

그림 104. 미세먼지 건강영향평가 국가별 논문발표 현황

건강영향평가

□ 국내외 특허 동향

○ 특허 현황

- 해외 미세먼지 건강영향평가 관련 특허출원 건수는 많지 않으나 지속적으로 출원되고 있으며, 2013년~2017년 간 총 33건이 출원되었음.
- 이중 91%가 중국에서 출원된 것이며 미국과 인도가 각각 6%, 3%를 차지하고 있어 최근 중국의 특허출원이 압도적인 우위를 차지하고 있음.

그림 105. 미세먼지 건강영향평가 연도별 특허출원 현황

건강영향평가

그림 106. 미세먼지 건강영향평가 국가별 특허출원 현황

건강영향평가

시장동향 현황

- 미세먼지 건강영향평가는 공공활용 성격이 강하여 해당사항 없음.

R&D 투자 현황

- `18년 총 12개 과제, 56.3억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 9.1%를 점유(5위/10위)
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 12.7억 → `17년 44.7억 → `18년 56.3억원
 - 주로 환경부와 과학기술정보통신부의 투자가 증가하였음
- 최근, 환경부와 과학기술정보통신부의 R&D 투자는 수용체중심 노출평가방법 개발과 관련 건강영향평가 방안에 주로 이루어지고 있음
 - # 환경부에서 일부 건강영향 메커니즘 연구(예: 호흡기 및 안질환)에 투자
- 2018년 현재 진행 혹은 진행예정인 12개 R&D 과제 중 인체위해성 및 역학연구는 5개, 인체노출평가 4개, 독성연구 3개로 분포

그림 107. 미세먼지 건강영향평가 R&D 현황

--	--

- 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)
 - (기술역량) 최고 기술 보유국 미국 대비 70~75% 수준으로, 독성평가, 인체노출평가, 인체위해성 역학 부문이 골고루 우수한 편
 - 독성평가(선진국 대비 70%, 기술격차 6.3년)
 - 인체노출평가(선진국 대비 70%, 기술격차 5.7년)
 - 인체위해성 역학(선진국 대비 75%, 기술격차 4.7년)
 - (시장활성도) 국민적 관심이 매우 높아 미세먼지 인체노출을 줄이기 위한 관련 산업의 시장성이 매우 높은 반면, 현재 시장활성도는 미국, 중국에 비해 매우 낮은 편임
 - (기술중요도) 전문가 설문조사 결과, 10개 중분류 중 건강영향평가는 시급성 (8위), 중요도 (7위), 파급효과 (6위)는 상대적으로 낮아 다른 저감 기술이나 오염원 파악에

비해 낮게 인식되고 있음.

- 독성평가 25.7%
- 인체노출평가 38.3%
- 인체위해성 역학 36%

○ 시급성

- 10개 중분류 중 8위

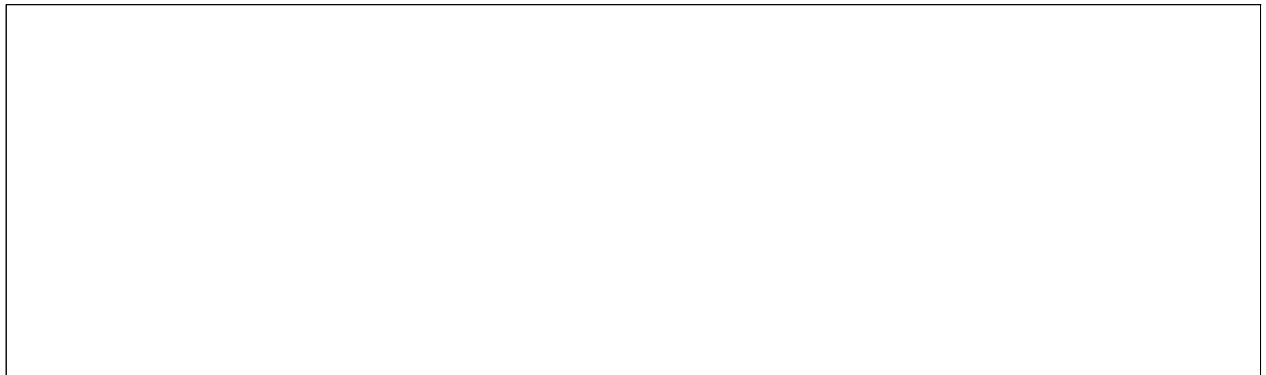
○ 중요도

- 10개 중분류 중 7위

○ 파급효과

- 10개 중분류 중 7위

그림 108. 미세먼지 건강영향평가 전문가 설문조사결과



□ 주요연구 성과 선정

- 미세먼지의 건강영향평가는 서울대학교 중심으로 이루어진 역학연구 (미세먼지 노출과 사망과의 관계 등) 성과 외 대부분의 연구는 현재 진행 중이며 조만간 독성평가(안전성평가 연구소) 및 메카니즘(고려대학교, 서울대학교 등) 연구 결과들이 도출될 것으로 기대됨.

3.3. 미세먼지 노출저감 기술

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

- 최근 5년간(`13년~`18년 4월까지) 세계 주요국들의 미세먼지 노출저감 기술 관련 논문은 2013년 29편에서 2017년 55편으로 4년간 두 배 가까이 증가하는 경향을 보이고 있음.

그림 109. 미세먼지 노출저감 기술 연도별 논문발표 현황

노출저감 기술

- 최근 5년간 주요 국가별 논문발표수준의 경우는 중국과 미국이 각각 91편(1위)과 60편(2위)으로 전체 논문수의 60%를 차지하고 있으며, 영국, 인도, 이태리, 스페인 순으로 13~18편의 논문을 발표한 것으로 나타남.
- 한국의 경우 8편(9위)으로 독일, 네덜란드(7편)를 조금 앞서고 있음.

그림 110. 미세먼지 노출저감 기술 국가별 논문발표 현황

노출저감 기술

국내외 특허 동향

○ 연도별 특허 현황

- 해외 미세먼지 노출저감 기술 분야에서 출원되는 특허의 수는 지속적으로 증가하고

있으며, 2015년의 경우 2014년 보다 168% 증가한 것으로 조사됨.

그림 111. 미세먼지 배출저감 기술 연도별 특허출원 현황

노출저감 기술

○ 국가별 특허 현황

- 미세먼지 배출저감 기술 관련 특허는 중국에서 전체의 92%에 해당되는 가장 많은 특허를 보유하고 있음.
- 특히, 중국의 경우 2015년에 전년보다 30여 건에서 4배 가까이 증가한 120건에 달하는 특허를 출원하여 미세먼지 배출저감 기술에 대한 수요가 급증한 것으로 판단되며, 2015년을 기점으로 미세먼지문제를 해결하고자 하는 인식의 전환이 된 것으로 판단됨.
- 한국을 비롯한 독일, 미국, 일본 등은 2013년부터 2017년 까지 매년 비슷한 수준의 특허를 출원 하고 있음.

그림 112. 미세먼지 노출저감 기술 국가별 특허출원 현황

노출저감 기술

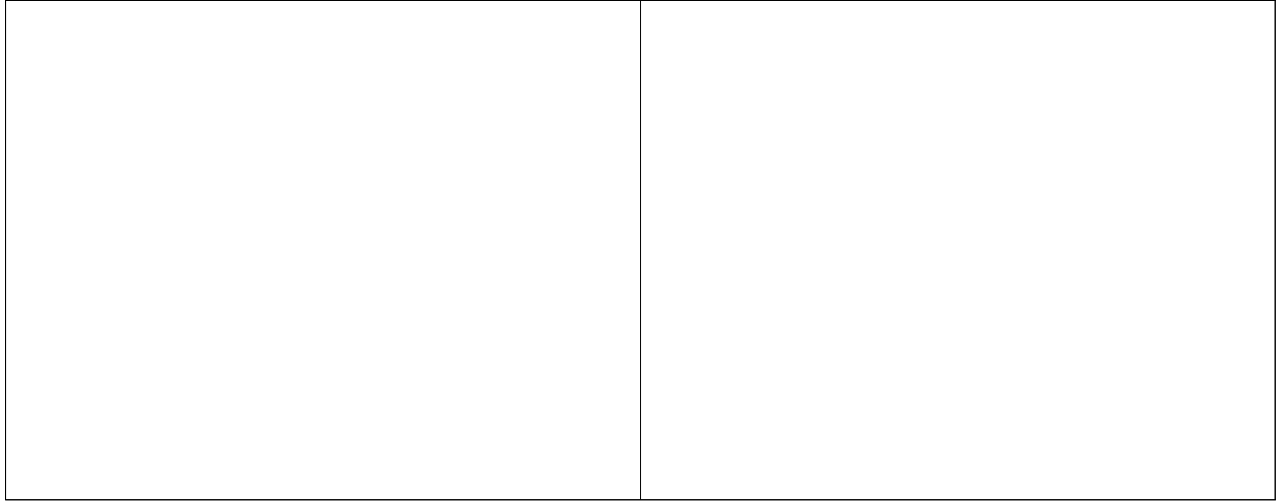
□ 시장 동향현황

- 미세먼지 노출저감 기술 시장은 실내공간에서의 활동 시간이 증가하면서 점차 확대될 것으로 판단되며, 실외대기의 미세먼지 농도가 높은 시기에는 실내공간이 미세먼지로부터 피난처(shelter) 역할을 할 것임.
- 중국의 미세먼지 문제가 심각하고 국내에서 R&D로 개발되어 실증을 거친 기술이 활용될 경우 아직까지 공공 서비스의 성격이 강하지만 경쟁력 있는 민간 기업을 중심으로 사업화가 될 가능성이 높음.

□ R&D 투자현황

- `18년 총 12개 과제, 42.6억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 6.8%를 점유(7위/10위)
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 15.4억 → `17년 35.2억 → `18년 42.6억
- 2018년 부처별로는 환경부가 전체의 38%(16억원)을 차지하여 비중이 가장 높았으며, 과기정통부, 국토부가 각각 23%(10억원), 29%(12.5억원)을 차지했음
- 2016년에는 과기정통부의 지원 업이 없었으나 2017년 시작된 국가미세먼지전략 사업으로 인해 비중이 증가하였음
- 표에서 보듯이 부처별 R&D 투자가 제한적이므로 지원 프로그램과 지원예산이 확대될 필요가 있음

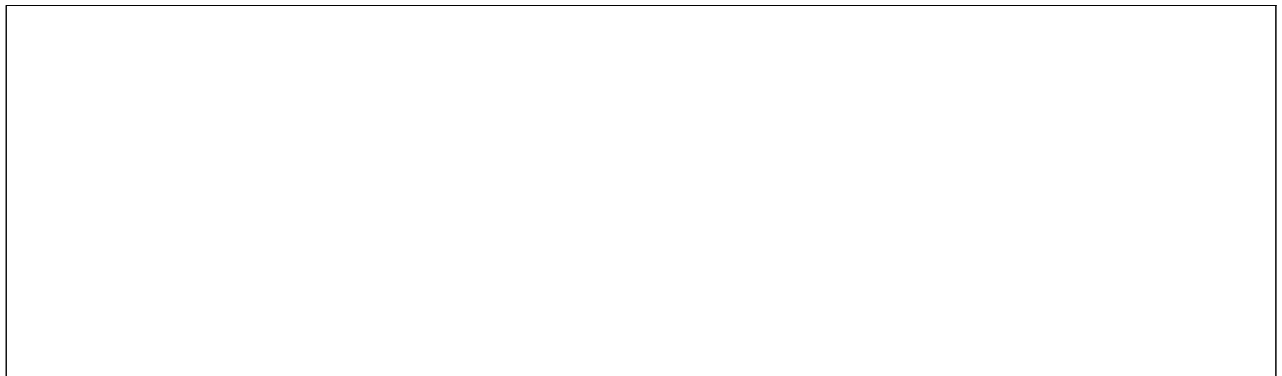
그림 113. 미세먼지노출저감 기술 부처별 R&D 투자 현황과 총연구비 추이



□ 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)

- 미세먼지 노출저감 기술이 시급성, 중요도, 파급효과에서 전체 10개 중분류 중 4번째로 조사됨

그림 114. 미세먼지노출저감 기술 전문가 설문조사 결과 분석



- **(기술역량)** 최고 기술 보유국 미국 대비 60 - 70% 수준으로, 개인착용형 노출저감기구의 경우 기술역량이 높았지만 실내공기유해성분탐지의 경우 다른 항목 보다 기술역량이 상대적으로 낮은 것으로 조사됨.
 - 실내공기 정화(선진국 대비 70%, 기술격차 3.2년)
 - 생활환경 실내공기질 관리(선진국 대비 68%, 기술격차 4.8년)

- 개인착용형 노출저감 기구(선진국 대비 78%, 기술격차 4.2년)
- 실내공기 유해성분 탐지(선진국 대비 61%, 기술격차 5.6년)
- **(시장활성도)** 미국의 기술을 80% 수준으로 했을 때 국내 기술이 미국의 60-70% 수준으로 개인착용형 노출저감기구를 중심으로 시장이 점차 형성되고 있으며, 실내공기정화와 생활환경 실내공기질 기술이 아직까지는 활성도가 높지 않지만 최근 미세먼지 문제로 시장잠재력이 큰 것으로 판단됨.
- **(기술중요도)** 기술역량, 시장 활성도 및 시급성에 비해서 기술의 중요도는 낮게 조사됨. 실내공기정화와 생활환경 실내공기질이 다소 높았으나 개인착용형 노출저감기구와 실내공기 유해성분탐지 등은 기술이 완성단계이거나 기술이 개발되더라도 활용가치가 높지 않은 것으로 판단됨.
 - 실내공기 정화 32%
 - 생활환경 실내공기질 관리 37%
 - 개인착용형 노출저감 기구 18%
 - 실내공기 유해성분 탐지 13%
- **(기술시급성)** 미세먼지노출저감 기술의 기술시급성이 전체 중과제 10개 중 4번째로 높아서 시급성이 높은 것으로 확인됨. 즉 기술적 중요도와 시장 활성도는 낮지만 기술개발이 시급한 것으로 판단됨
 - 10개 중분류 중 4위
- **중요도**
 - 10개 중분류 중 4위
- **파급효과**
 - 10개 중분류 중 5위

□ 주요연구 성과 선정

- 한국과학기술연구원 운영지원사업(과학기술정보통신부)‘미래원천연구사업’유해 초미세입자 특성화 및 미래선도형 탐지기술 개발
 - 오차범위 10% 이내의 휴대형 PM2.5 질량농도 측정기 개발이 주요 성과목표이며, 연구내용에는 2시간 이내 탐지가 가능한 온라인 부유세균 탐지기 개발과 납 0.1 $\mu\text{g/g}$ 탐지 가능한 현장형 중금속 탐지 킷 개발이 포함됨.
 - 현장형 중금속 탐지 킷은 환경부과제의 spin-off로 진행되고 있음.
 - 초미세먼지의 유해성분에 주목하여 EPA 형식승인을 받을 정도 수준의 소형 질량농도 측정기를 개발하였으며, 2시간 이내 탐지가 가능한 부유세균 탐지기, 위해성을 예측할

수 있는 DNA 칩 및 현장에서 납을 탐지할 수 있는 중금속 탐지 키트 시제품을 개발하였음.

- 2017년 연구가 완료되면 탐지 키트는 상용화 가능성이 높은 것으로 판단됨.

3.4. 정책 및 정보서비스

□ 국내외 연구 현황(논문, 특허 현황)

○ 연도별 논문 발표 현황

- 최근 5년간(`13년~`17년) 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 분야의 학술논문은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있음.
- 특히 전년도 대비 증가율은 2015년이 가장 높았으며, 2013년 29건에 불과하던 학술논문이 2017년에는 55건으로 거의 두 배 가까이 증가한 것으로 나타남.
- 학술논문 발표가 지속적으로 증가하고 있지만 논문의 절대 건 수가 많지 않아 정책 및 서비스 관련 논문발표가 활발하게 이루어지고 있다고 보기는 곤란함.
- 논문 내용도 미세먼지 관련 정책이나 대국민 정보제공과 커뮤니케이션 관련 연구는 매우 부족한 상황임.

그림 115. 미세먼지 정책 및 정보서비스 연도별 논문발표 현황

정책 및 정보서비스

○ 주요 국가별 논문 현황

- 2013년부터 2018년 5월 현재까지 발표된 논문 252 건 중, 중국이 가장 많은 논문을 발표(91건, 36.1%)하여 1위를 차지하고 있으며, 그 다음으로는 미국(60건, 23.8%), 영국(18건, 7.1%) 순으로 나타남.

- 우리나라는 단 8건(약 3.2%)으로 9위를 차지하고 있어 건강영향 분야의 국가별 순위와 동일한 것으로 나타남.
- 미세먼지에 따른 피해가 심각성에도 불구하고 미세먼지 정책 및 정보서비스 관련 연구는 상대적으로 낮은 것으로 나타나 관련 분야의 연구 강화가 필요함.

그림 116. 미세먼지 정책 및 정보서비스 국가별 논문발표 현황

정책 및 정보서비스

국내외 특허 동향

○ 특허 현황

- 해외 미세먼지와 관련된 정책 및 정보 서비스 분야의 관련 특허출원 건수는 총 50건에 불과하며, 2015년도에 약간 증가하였으나 그 이후에는 증감을 반복하는 경향을 보이고 있음.
- 특허출원 건수의 국가별 분포를 보면 단연 중국이 압도적으로 많은 78%를 차지하고 있으며, 우리나라는 16%로 2위를 차지함.
- 중국의 경우 특허출원 건수가 연도별로 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있으나 우리나라의 경우 2016년 이후 특허출원이 1건도 없는 것으로 나타남.

그림 117. 미세먼지 정책 및 정보서비스 연도별 특허출원 현황

정책 및 정보서비스

- 미세먼지 정책 및 정보서비스의 경우 영역의 특성상 관련 분야의 특허 빈도가 낮을 수밖에 없음.
 - 정책 및 정보서비스 영역 관련 특허는 미세먼지 정보서비스 제공을 위한 모니터링이나 자료수집과 표시 등 제한적 범위의 특허가 대부분을 차지함.
 - 정책 수립과 국민을 대상으로 한 정보서비스 제공이 주 내용이라는 점에서 기술적 의미의 특허출원은 타 분야에 비해 상대적으로 낮을 수밖에 없음.

그림 118. 미세먼지 정책 및 정보서비스 국가별 특허출원 현황

정책 및 정보서비스

□ 시장 동향현황

- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 분야는 사회문제 해결에 초점을 둔 공공 영역의 역할에 포함되는 특성을 지니고 있어 시장 동향의 파악 의미는 크지 않음.
 - 미세먼지는 시장 수요와 공급 차원이 아닌 사회적 수요와 공급 차원에서 이해할 필요가 있다는 점에서 미세먼지에 대한 사회적 관심과 요구 파악이 중요함.
 - 다만, 미세먼지와 관련된 정보 서비스 분야에서 부분적으로 민간영역의 참여가 이루어진다는 점에서 관련분야의 시장동향에 관심을 둘 필요는 있음.
- 미세먼지에 대한 국민의 관심과 건강에 대한 불안감은 급속하게 높아지고 있음.
 - 한국환경정책평가연구원(2017)의 「2016년 국민환경의식조사」에 따르면 미세먼지에 ‘관심이 있다’는 답변 비율은 90.8%로 국민 거의 대부분이 미세먼지에 우려하고 있는 것으로 나타남.
 - 공기청정기 시장의 급성장은 미세먼지에 대한 국민의 높은 불안감과 우려를 반영하는 것임.
- ※ 공기청정기 판매량: 250만대(014년) → 87만대(2015) → 100만(2016) → 150만대(2017년) → 200만대(2018년 예상치)(한국과학기술정보연구원/업계 추산, 뉴스핌(2018. 2. 28)에서 인용)

- 높은 국민적 불안감에도 미세먼지 해결을 위한 정부 대응에 대한 만족도는 낮은 것으로 나타나 국민의 불안감 해소를 위해서는 정부의 적극적 역할이 필요함.
 - 한국환경정책평가연구원(2017)의 「2016년 국민환경의식조사」에 따르면 응답자의 절반 이상(53.1%)이 미세먼지 감축을 위한 정부의 노력이 부족하다고 인식함.
 - 동 조사에서 미세먼지 감축을 위한 정부의 노력이 충분하다는 응답은 5.4%에 불과하여, 미세먼지 해결을 위한 정부의 적극적인 노력이 필요한 것으로 판단됨.

□ R&D 투자현황

- `18년 총 1개 과제, 10억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(622억원)의 1.6%에 불과(9위/10위)
- 최근 3년간 투자 금액
 - * `16년 4.3억 → `17년 14.9억 → `18년 10.0억원
- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 분야의 연구개발 투자 규모의 부처별 분포를 보면, 주로 환경부와 과학기술정보통신부가 관련 투자를 주도하는 것으로 나타남.
 - 부처별 연구개발 투자 규모 분포를 보면 2016년의 경우 환경부 담당 규모가 100%로 나타났으나, 2018년에는 과학기술정보통신부가 전체 투자 규모의 70%를 차지함.
 - 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 분야의 연구개발 투자 규모의 경우 환경부의 투자 규모는 4억원대를 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 과학기술정보통신부의 경우 2017년도부터 급격히 증가하였음.
- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역에서 2018년 현재 연구 중이거나 연구 예정인 주제는 크게 네 가지 영역으로 제한됨.
 - 도시숲 관련 연구(산림청, 10800백만원, 2019 ~ 2023)
 - 미세먼지 예방을 위한 보건용 마스크 연구(과학기술정보통신부, 100백만원, 2017 ~ 2018)
 - 미세먼지 국가전략 프로젝트 기획 관리 평가(과학기술정보통신부, 2900백만원, 2017 ~ 2020)
 - 수도권 대기관리 연구 및 배출허용기준 설정 연구(국립환경과학원, 1110백만원, 2015 ~ 2017).

그림 119. 미세먼지 정책 및 정보서비스 R&D 현황

--	--

- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역의 성격을 고려할 때 정책 목표와 방향의 설정, 정보서비스를 위한 수요관점의 연구는 부족한 상황임.
 - 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역은 미세먼지 R&D의 하위 기술영역 중 하나라기보다 타 영역의 결과 활용이나 타 영역의 R&D 방향을 제시하는 성격의 분야임.
 - 현상규명과 예측을 바탕으로 한 정책 방향과 내용을 설정, 이를 바탕으로 한 미세먼지 배출과 노출저감을 위한 R&D 방향의 설정, 정보서비스를 위한 전략과 내용 등에 관련된 R&D는 거의 이루어지지 않고 있는 상황임.

- 전문가 설문조사 결과 분석(기술역량, 시장활성도, 기술중요도 및 시급성)
 - (기술역량) 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 분야의 최고 기술 보유국은 주로 미국과 유럽인 것으로 나타났으며, 최고 기술 보유국 대비 우리나라의 기술 역량은 60%대에 불과한 것으로 나타남.
 - 미세먼지 정보관리 및 서비스(선진국 대비 64%, 기술격차 4.2년)
 - 과학기술 연구 결과의 정책연계(선진국 대비 65%, 기술격차 4년)
 - 기술의 글로벌화(선진국 대비 68%, 기술격차 4.8년)
 - 기술 격차의 원인에 대한 전문가 의견을 보면 미세먼지 정보관리 및 서비스 영역의 경우 위험 의사소통 기전에 대한 기초 연구 부족, 정보의 부족, 정보 통합 분석 및 서비스 체계 미흡, 정보의 신뢰도 부족 등의 문제들을 지적하고 있음.
 - 과학기술 연구결과 정책 연계 영역의 경우 정책의 정합성 유지를 위한 정책 기초 연구 부족, 통분야적 정책 모델에 대한 기초 연구 부족, 부처별 소통 및 협업 체계 모델에 대한 기초 연구 부족 등을 언급하고 있음.
 - 기술의 글로벌화의 경우 국제협력 모델에 대한 기초 연구 부족, 민간 영역의 국제협력

부족, 동북아 지역의 공동연구 부족, 국제협력에 대한 지원 부족 등을 지적하고 있음.

- (시장활성도) 미세먼지의 정책 및 정보 서비스 영역은 공공성이 높은 영역이므로 민간 시장의 활성도를 파악하기 어려운 측면이 있으나, 전문가의 의견 조사 결과 활성화 초기 단계인 것으로 나타남.
- (기술중요도) 전문가 설문조사 결과, 10개 중분류 중 정책 및 정보 서비스 영역은 시급성 5위, 중요도 6위 등으로 나타나 전반적으로 다른 영역에서 비해 상대적으로 낮은 수준인 것으로 나타남.
 - 미세먼지 정보관리 및 서비스 36%
 - 과학기술 연구 결과의 정책연계 38%
 - 기술의 글로벌화 26%
 - 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스의 하위 영역 중에서 과학기술의 정책연계 영역이 다른 하위 영역에 비하여 시급성과 중요도에서 높은 수준으로 나타남.
- (시급성)
 - 10개 중분류 중 5위
- (중요도)
 - 10개 중분류 중 6위
- (과급효과) 전문가 설문조사 결과, 10개 중분류 중 정책 및 정보 서비스 영역의 과급효과는 4위로 나타나 중간 정도의 순위를 보였음.
- (정책적 지원 우선순위) 전문가 설문조사 결과, 정책적 지원 우선순위의 경우 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역에서는 제도 및 정책 지원이 가장 많이 지적되었으며, 국제협력 활성화, 기초분야 연구지원 등이 제시되었음.

그림 120. 미세먼지 정책 및 정보서비스 전문가 설문조사결과



□ 주요연구 성과 선정

○ 정책 및 정보서비스 부문은 상대적으로 연구 개발 과제 및 성과 미흡

- 그간 미세먼지 관련 기술개발은 주로 저감 기술, 현상 진단, 원인 규명 등 상향식 측면의 개별 기술개발 형태로 진행됨.
- 미세먼지 예장을 위한 보건용 마스크, 국가전략 프로젝트 기획관리평가, 대기관리 및 배출허용 기준 설정 등의 연구가 수행되고 있지만, 미세먼지 저감을 위한 정책과 정책 수단과 관련된 특별한 연구 성과는 없는 것으로 판단됨.
- 정보서비스의 경우에도 미세먼지에 대한 정보 제공과 커뮤니케이션을 통해 국민 불안감 해소가 필요하지만 이와 관련된 의미가 있는 연구성과는 없는 것으로 판단됨.
- 궁극적 목표인 국민 위해성 저감이라는 정책 목표 달성을 위한 개별 기술의 기여 및 단계적 부문별 기술개발 목표 달성을 위한 세부 계획 수립 미흡.

IV. 미세먼지 관련 투자 방향

1 조기성과 창출(기술개발 경과 등)

□ 부처별 기술개발 경과 및 계획

○ 과기정통부

- 미세먼지국가전략사업단 중심의 통합적 기술개발 추진 (`17-`19)
- 스모그챔버를 이용한 2차 생성 규명 연구 도출
- 미세먼지 예보모델의 고도화 진전
- 한중일 미세먼지 공동연구 시작
- 관측, 모델을 활용한 종합적 미세먼지 발생원인 및 정량적 기여도 산정 시스템 구축 및 심화 계획
- 다양한 지시종(동위원소, 유기성분, 불화화합물 등)을 이용한 외부 기여율 산정 연구 도입
- 대형고정오염원의 미세먼지 전구물질 저감을 위한 연구 진행
- 비도로이동오염원 배출저감을 위한 나노촉매-플라즈마 하이브리드 개발진행
- 주택 미세먼지 노출저감 기술개발 진행
- 기초원천기술 R&D 발굴 및 계속 지원계획
- 산재된 부처별 R&D의 통합 및 패키지화 계획 수립

○ 환경부

- 그린패트rollers사업을 통한 미세먼지 성분분석 기술상용화(`14-`20)
- 친환경자동차기술사업단의 제작차 및 운행차 저감 기술 확보(`11-`20)
- 미국 NASA와 국제공동연구를 통한 미세먼지 발생 원인분석 및 기여율 산정
- 미세먼지 종합 감시를 위한 중형 연구용 비행기 구축
- 미세먼지 배출량산정 고도화를 위한 꾸준한 연구 지원과 성과 달성
- 미세먼지 및 유해대기오염물질의 관측망 구축 및 운영
- 미세먼지 국내외 기여율산정 및 국제협력
- 다양한 고정오염원 배출저감 기술개발 지원 및 추가 지원 계획
- 미세먼지 유해 메카니즘 규명을 위한 다각적 연구 진행

- 도로에서의 미세먼지 노출저감을 위한 연구 개발 지원 계획
- 수도권 대기질 개선 통합시스템 구축의 성과와 지역별 확장 계획

○ 산자부

- 자동차 및 대형 고정오염원의 미세먼지저감 기술개발에 집중
- 배출가스의 후처리 기술 및 동시 저감을 위한 기술개발 성과
- 조사된 41개 과제 중 고정오염원 관련 30개, 자동차 관련 8개, 현상규명 3개
- 현재 진행 중인 과제(19개), `18년 이후 계획된 과제(22개)
- 고정오염원 R&D 중 석탄 화력발전소 미세먼지저감 기술개발(12개)이 다수

○ 보건복지부

- 미세먼지 국가전략사업을 통한 5건의 취약계층(가정주부, 노인, 어린이)의 미세먼지 건강영향평가 연구 수행을 통해 국민생활 보호를 위한 정보 제공 가능

○ 국토교통부

- 총 5건의 도로 및 비도로 이동오염 저감 기술 개발수행 중
- 터널 등 지하구간의 노출저감 기술 개발 계획

□ R&D 분야별 우수성과

- 현상규명 및 예측 분야, 배출저감 분야의 연구 성과가 많음
- 미세먼지 국가전략프로젝트를 통한 현상규명분야, 기초 원천기술 R&D 분야에 기술 성공 가능성이 상대적으로 높음
- 배출저감 분야에서 아직은 환경부 지원에 의한 연구개발 성과가 대부분이나 앞으로 산업통상부의 R&D 지원이 크게 확대될 경우 그에 따른 다양한 성과 도출이 기대됨
- 아직까지 국민생활보호분야의 R&D지원과 성과가 가장 미흡한 것으로 판단됨

□ 부처별, 분야별 기술개발 경과, 성과, 현황의 시사점

- 최근 1년 전부터 국가전략프로젝트에서 집중 투자되고 있는 현상규명분야, 기초 원천기술 R&D 분야에 지속적 지원과 성과 확대 필요
- 환경부, 산업통상부 등 부처 차원에서 계획된 중장기 실증적 배출저감 기술 분야 R&D 가 성공적으로 계속 추진될 필요가 있으며, 정부투자 방향과 부처별 역할분담이 가능한 통합적인 R&D 패키지형 투자모형에 따라 수행될 경우 효율적 운영이 가능할 것으로 기대됨
- 현재까지는 국민생활보호분야의 R&D지원과 성과가 가장 미흡한 것으로 판단되어 이 분야에 대한 집중적인 연구가 절실함
- 지금까지 기술개발 계획과 성과가 모두 국내 전반 현황 개선을 대상으로 하여 지자체나 지역 미세먼지 현안의 해결에 직접적인 적용이 어려움
- 조속한 국민건강 보호를 위해서 고농도 미세먼지발생 시기를 최소화하거나 노출을 최소화 할 수 있는 능동형 사전 예방적 기술을 위한 R&D 계획이 상대적으로 부족

□ 투자 방향에 대한 분석틀

- 미세먼지에 대한 기초 연구를 통해 조기에 성과를 창출하기 위하여 SWOT (strength, weakness, opportunity, threat) 분석틀을 이용하였음. SWOT 분석틀은 미세먼지로 인한 문제 해결 능력의 장단점과 현상에 대한 기회와 위기 등의 현황을 결합하여 최상의 조건을 창출하는 전략 도출 방법임
- 미세먼지 관련 이슈의 주요 문제에 대한 현황을 바탕으로 축적된 역량을 위주로 한 강점, 약점, 위협, 기회에 대한 평가를 기준으로 신속한 문제해결을 위한 전략적인 중장기 R&D 도출을 마련하고자 함
- SWOT 분석틀에 따른 강점과 약점, 기회와 위협 등의 내용을 간략하게 요약하면 아래와 같음
 - 강점: 높은 국민적 관심, 정부의 지원, 분야별 전문 연구 자원
 - 약점: 사회과학적 연구 부족, 소통과 정책 연계 전략 부족, 고농도 미세먼지 노출 증가
 - 위협: 고령화 등 사회변화, 기후 변화, 국민 불안 고조, 지역별 미세먼지 현안의 다양성
 - 기회: 사회적 과학적 수요 증가
- SWOT 분석에 따른 투자 방향은 강점의 강화, 약점의 극복, 위협에 대한 적절한 대처 및 기회 활용 등이지만, 역량과 현상을 결합한 방식으로 구축될 수 있음. (1) 강점과 위협을 결합한 방식의 경우 높은 국민적 관심과 분야별 전문 연구자원을 이용하여 고령화 등 사회변화와 기후변화 및 국민 불안에 대한 적극적인 대응을 위한 투자. (2) 강점과 기회를 결합한 방식의 경우 사회적 과학적 수요와 높은 국민적 관심을 이용하여

전문 연구자원의 활용을 극대화하는 투자. (3) 약점과 위협을 결합한 경우 사회 및 기후 변화와 국민 불안에 대응하기 위한 사회과학적 연구 및 소통 강화에 투자. (4) 약점과 기회를 결합한 경우 사회적 과학적 수요에 대응할 수 있는 사회과학적 연구, 소통 및 정책 연계 강화에 투자.

- 이상의 네 가지 전략 방향을 통해 기대되는 성과를 바탕으로 우선순위를 설정할 수 있음.

□ R&D 투자 방향

○ SWOT 분석 기반 R&D 주요 투자 방향

- 지속적인 미세먼지 저감을 위한 연구
- 기후변화 대응을 같이 고려한 미세먼지 저감 연구
- 적극적인 국제협력(북한포함)
- 중앙정부주도에서 도심 지역 및 지자체 현안 문제 해결 지원
- 근원적 문제해결을 위한 기초, 원천기술개발 확대와 지원
- 연평균 농도 저감 위주 기술에서 고농도 현상 대응 중심
- 효과적인 정책 수립, 시행, 평가와 소통 체계 구축

○ 2017년 정부종합대책에 따른 정책적 기본투자 방향

- 오염도 높은 '우심지역' 중점관리
 - * 수도권·대도시 중심 ⇒ 수도권 외 지역 관리로 전환
- 통합적인 저감 대책 추진
 - * 2차 생성 고려한 원인물질 관리 강화, 에너지 정책과의 정합성 제고
- 국제협력을 통한 공동노력 강화
 - * 한·중 양자협력, 다자간 협력을 통해 미세먼지 문제 공동 대응
- 인체위해성 관리에 중점
 - * 민감계층 활동 공간 관리강화, 보호 서비스 강화 등 집중보호
- 과학기반의 미세먼지 대응역량 제고
 - * 인벤토리 정교화, 위성·항공기 등을 통한 입체적 미세먼지 분석

○ 투자방향 설정 모델

- 연구개발의 투자 방향은 SWOT 분석, 정책적 기본 투자 방향 등을 기반으로 위험관리모델 (risk management model)을 활용하여 구체적인 주제를 선정할 수 있음.
- 위험관리모델의 일반적 절차와 과정은 유해위험요인의 확인, 노출 평가, 위험평가, 대응전략 마련, 실행 모니터링, 환류 등으로 이루어짐.
 - (1) Hazard Identification
 - (2) Exposure
 - (3) Risk Assessment or Risk Evaluation
 - (4) Mitigation(risk avoidance, risk sharing, risk reduction, risk transfer, etc)
 - (5) Monitoring
 - (6) Feedback
- 미세먼지와 관련하여 유해위험요인 확인의 경우 미세먼지 발생과 관련된 부분으로 기존의 연구개발 범주에 따르면 현상규명과 예측, 미세먼지 배출저감 등이 해당됨. 두 번째 노출의 경우 기존 연구개발 범주에 따르면 노출 및 건강영향 최소화 등이 해당되며, 세부적으로 현상규명 및 예측에 포함된 하위 과제 등도 노출 평가에 포함될 수 있음. 세 번째 위험평가의 경우 노출 및 건강영향 부분이 해당됨. 대응전략의 경우 정책과 정보서비스 부분이 해당될 수 있을 것임. 모니터링과 환류의 경우도 정책과 정보서비스 부분에 해당될 수 있음.
- 미세먼지를 대상으로 한 위험관리모델은 단선적인 모델을 적용한 것으로 평가될 수 있음. 예를 들어 미세먼지의 정확한 발생 현황을 모를 경우 노출 평가가 제대로 이루어지기 힘들며, 노출평가가 정확히 이루어지지 않을 경우 건강영향 평가의 정확성과

신뢰성을 담보하기 어려움. 따라서 기존의 미세먼지에 대한 다양한 대응 정책과 연구개발의 한계를 위험관리모델에 기반 하여 찾아볼 수 있음.

○ 위험의사소통 모델

- 반면 미세먼지에 대한 투자 방향을 알아본 SWOT 모델은 우선순위를 설정하여 투자 규모와 순서를 설정할 수 있을 뿐만 아니라, 병렬로도 추진할 수 있음. SWOT 모델과 위험관리모델과 함께 위험의사소통을 적극적으로 도입하는 것이 필요할 것으로 기대됨. 특히 분야별 전문가들의 통합 연구를 추진하고, 미세먼지와 관련된 다양한 이해당사자들과 정책실행자 및 전문가 집단들 간의 의사소통을 위하여 위험의사소통을 활성화하는 것이 시급함.

- 위험의사소통을 위험관리의 각 단계별로 모두 적용되며, SWOT의 투자 방향 범주마다 모두 적용되어야 할 과제임.

○ 우선 투자방향 설정 경과

- SWOT 분석을 통해 도출된 R&D 투자 방향과 정책적 기본투자방향, 위험관리모델 기반 투자방향의 연계성을 분석.

- SWOT 분석 기반 R&D 방향 중 연계성 빈도가 높은 순으로 중요.
- 우심지역 및 지자체 현안 지원, 고농도 미세먼지 대응, 기초 원천기술개발 확대, 효과적인 정책 수립 및 소통체계구축, 적극적인 국제협력, 지속적인 연구지원, 기후변화대응을 같이 고려한 미세먼지 저감 연구 순서로 연구 방향의 우선순위 결정.

2 성과연계(과제 간 유사중복, 성과연계 필요 분야 도출)

□ 공백기술 도출 결과

- 본 연구에서 공백기술은 분야별 전문가들의 학술적 연구, 특허기술 동향, 범부처 R&D 총 174개의 현황분석을 바탕으로 최근에 발표된“미세먼지기초원천기술보고서”에서 제안된 9개 과제와 R&D 패키지형 투자 분석에서 제안된 36개 과제, 전문가들의 추가 제안과제 14개를 종합적으로 분석 검토하여 공백기술을 도출하였음.

□ R&D 현황 분석

<1-1. 원인규명연구>

- 2017년 총 3개 과제, 10억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D 전체 (521억원)의 2%에 불과함
- 2020년 이후 계획된 과제 부재로 지속적 R&D 지원 투자 필요
- 다상반응에 의한 동북아 고농도 미세먼지 생성기 작 규명 및 입자모듈 개발” 연구 이외에

소액규모

- 다양한 지역적 미세먼지 발생원 규명을 위한 과제 필요
- 2차 생성미세먼지 생성 규명을 위한 지속적 연구 필요

<1-2. 현상진단 및 측정 조사>

- 미세먼지 현상진단 및 측정조사 부문을 세 가지 세부기술, 즉 [배출원 조사], [상 시 및 집중측정], [측정·분석기술]로 구분하였을 때, 최근 3년간 [측정·분석 기술]의 투자비중이 증가하는 추세임.
- 현재 총 39개 과제(환경부 25개, 과기부 11개, 기상청 1개, 산자부 1개)가 수행되고 있음. 환경부와 기상청은 정책수요 대응(미세먼지 감시체계 구축, 사업장 미세먼지 조사 등
- 과학기술정보통신부는 원천기술개발(고정밀 측정기술 등), 환경부는 산업적 수요대응(측정 장비 개발 등)을 중심으로 하고 있음.
- 환경부에서는 대기환경산업 육성 차원에서 일부 초미세먼지 측정시스템, 대기 중 중금속 물질 분석 장치 개발 등을 지원 하는 사례가 존재함.
- 39건의 과제 중 3건의 과제인 기상청(1건), 환경부(2건) 이외에 2022년까지 진행되는 과제는 없어 장기적 지원 과제 도출 필요
- 다양한 오염원의 기여도 산정과제가 2020년이면 모두 종료되며 특정 산업이나 지역의 기여도와 고농도 원인 규명을 위한 과제가 추가적으로 시급
- 배출자료 산출 R&D가 2022년까지 환경부 등에서 꾸준히 진행되나 최근 문제화되고 있는 암모니아 배출량 산정을 위한 연구가 부재함

<1-3. 대기질 모델링>

- 다양하고 장기적인 모델링 연구가 진행될 예정으로 다른 분야에 비해서 연구 추진 계획이 우수함
- 2022년까지의 장기적인 과제들이 거의 모두 환경부 현업지원을 위한 과제로 추진됨
- 현재 연구 개발 비용은 많은 증가 폭을 보이고 있으나, 미세먼지 농도 변화는 배출량 및 기상 변화에 민감함을 고려할 때, 단기 투자보다는 장기적이고, 지속적인 투자가 필요.
- 현재 '수도권 대기환경 개선에 관한 특별법'에 의한 기본계획 평가 시 배출량 삭감 실적에 의존하는 현실을 개선해야 함.
- 지역적 현안 분석을 위한 동북아시아지역부터 지자체 규모까지 다중 시공간을 위한 모델 개발 R&D 필요

<2-1. 고정오염원 배출저감>

- 2015년 이전에는 고정오염원 대상의 미세먼지 대응기술에 대한 R&D 투자가 상대적으로 낮았으나, 2016년 이후 고정오염원 배출저감에 대한 정부의 R&D 연구비가 빠르게 증가하고 있음
- 고정오염원 대응 신기술의 개발과 제진효율 및 탈황 탈질 효율의 개선이 시급한 과제
- 화력 발전소나 철강제조업 등의 대형 오염유발시설에 적용 될 기술을 개발하고 현장 적용하기 위한 기본 연구 투자의 성격으로, 투자 대비 효과가 뚜렷함
- 부처별 R&D 투자액은 과학기술정보통신부, 산업자원부, 환경부의 순이며, 고정오염원 대응기술의 적용이 전적으로 대규모 산업시설을 대상으로 하고 있어 산업자원부의 R&D 투자 비율이 다른 분야에 비해 높음.
- 고정오염원 적용기술은 관련 설비의 연구 개발과 함께 현장 적용 및 실증을 동시에 추진해야 하는 측면에서 산업자원부의 역할과 범 부처간 협업이 필요한 분야이다.
- 다른 분야에 비해서 중장기적인 R&D 계획이 상대적으로 다수를 차지함
- 대규모 산업시설의 R&D 계획이 이미 상당 부분 설정된 반면 미관리 중소오염배출원의 배출저감 기술 R&D는 매우 제한적임

<2-2. 도로 이동오염원 배출저감>

- 도로 이동오염원 배출저감 분야는 완성차 제조업체 및 retrofit을 위한 환경업체 등 민간 중심의 R&D가 필요한 분야로, 정부는 핵심부품 및 소재의 국산화 등 핵심 원천기술 개발에 집중 필요
- 경유차 등 도로 이동오염원은 초미세먼지의 주요 배출원이나 관련 시장이 이미 성숙되어 있고, 노후 경유차 대체 등 정책적 차원에서 문제 해결 필요
- 미세먼지 해결 측면에서 현재 수준의 R&D가 지속적으로 필요한 분야이며, 산업적 파급효과가 큰 원천기술 선정 및 투자확대 필요
- 도로변, 승차장 등 미세먼지 우심지역에서의 노출저감 측면에서 배출저감 기술의 확보를 위한 노력이 추가적으로 필요

<2-3. 비도로 이동오염원 배출저감>

- 배출규모에 비해 상대적으로 투자가 저조한 '선박 배출 미세먼지 저감'에 대한 투자 규모 확대 검토 필요
- 대형선박, 건설기계 등은 시장이 형성되어 있고 민간(제작회사)의 투자 여력이 있는 만큼 민간 중심의 R&D 필요
 - 소형선박(연안해운 등), 농기계 등 취약 분야는 정부 차원의 투자 검토

- 건설기계는 제작차 이동식 배출가스 검사제도 도입('19년 규정제정), 노후 건설기계 저공해화 사업 등 정책·제도 중심의 관리
- 선박은 일부 소규모·단편적 연구가 진행 중으로, 배출현황 파악 후 R&D 투자 규모에 대한 적정성 검토 필요

<2-4. 비산먼지 저감>

- 타 분야 대비 미약한 수준임
- 도로변 등 민간계층, 취약계층을 위한 맞춤형 저감 방안 필요

<3-1. 건강영향 평가>

- 국민적 관심에 힘입어 2017년 미세먼지 건강영향평가 R&D 투자가 급증함
- 최근, 환경부와 과학기술정보통신부의 R&D 투자는 수용체 중심 노출평가방법 개발과 관련 건강영향평가 방안에 주로 이루어지고 있음
- 고농도시기의 국민 건강보호를 위한 영향평가 실시 필요

<3-2. 미세먼지 노출저감 기술>

- 다양하고 R&D가 진행되고 있으나 15개의 과제 모두 2021년까지 종료됨
- 노출회피와 저감 방안에 대한 국민적 관심이 가장 높은 분야로 지속적인 지원이 필요한 분야임
- 지금까지는 대부분의 연구가 일상적인 상황에서 미세먼지 노출저감에 대한 기술위주임
- 미세먼지 고농도시기의 노출저감 최소화를 위한 기술개발이 절실함

<3-3. 정책 및 정보 서비스>

- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역의 성격을 고려할 때 정책 목표와 방향의 설정, 정보서비스를 위한 수요관점의 연구는 부족한 상황임.
- 현상규명과 예측을 바탕으로 한 정책 방향과 내용을 설정, 이를 바탕으로 한 미세먼지 배출과 노출저감을 위한 R&D 방향의 설정, 정보서비스를 위한 전략과 내용 등에 관련된 R&D는 거의 이루어지지 않고 있는 상황임.
- 대부분의 연구가 내년까지 종료되며 2022년까지 과제는 모두 도시숲 조성 평가 과제로 미세먼지 정책 및 정보기술과 직접적인 연관성이 떨어져 새로운 과제의 발굴이 시급함
- 국민들의 미세먼지에 대한 불안감 해소와 해결을 위한 소통방안을 위한 과제의 도출이 시급

□ 정부 R&D 패키지형 연구개발 투자플랫폼 투자모형 제안 과제 분석

- 기술별 4대 분류: 현상규명 및 예측, 미세먼지 배출저감, 노출 및 건강영향 최소화, 제도 및 소통체계 개선
 - 사업별 추진 주체: 국가전략 프로젝트, 환경과학원 사업
 - 내용별 관련 부처: 과기정통부, 환경부, 농촌진흥청, 국토부, 산업부, 해양수산부, 기상청, 보건복지부
 - 기진행 유무: 진행 중 과제(기추진), 확대 또는 신규 추진 과제
 - 투자 분야: 핵심·기반지식, 기술·정보 융합, 공공 서비스
 - 4대 분류별, 사업별 추진 주체별, 기진행 유무, 투자 분야에 따라 정리하면 다음 표 23-27과 같음
- ⇒ 패키지 사업목록 중 확대 또는 신규 추진 사업 중 추진 주체가 없는 사업과 패키지 사업목록에 기재되지 않았어도 추진되지 않은 사업을 공백기술로 고려
- ⇒ 기 추진 중인 사업이더라도 '시급성 또는 지속성을 가지고 (우선적으로) 추진될 필요가 있는 사업을 공백기술로 고려

□ 미세먼지기초원천보고서 분석

- 미세먼지 저감과의 관련성, 과학기술정보통신부 사업으로써의 적합성, 기초·원천 연구로써의 적합성, 기존연구와의 차별성 등을 고려하여 9개의 사업을 추천함.
- 본 연구에서는 제안된 미세먼지기초원천보고서 최종 선정과제가 본 연구의 목표와 방향성에 부합되는지 평가하여 반영.

□ 전문가 제안

- 본 기획에 참여한 16인의 전문가가 미세먼지 전체 R&D 현황, 패키지 투자모형, 기초원천과제 제안 기술 등의 과제 검토 후 추가로 14건의 공백기술과제를 제안했으며 그 내용이 표 29 임.
- 제안된 과제는 중복성을 최소화하면서 시급성과 파급효과가 높은 과제 위주로 검토됨

□ 연계 및 기술 검토

- 정부 R&D 패키지형 연구개발 투자플랫폼 투자모형 제안 과제, 미세먼지기초원천보고서 제안과제, 전문가 제안 과제들의 기술내용과 상호 연계성을 검토하여 융합적이며 효율적인 과제를 새로이 도출함
- 전문가 제안 과제의 국가 정책적 R&D 투자 방향, SWOT 분석기반 R&D 투자 방향, 위험관리모델 기반 R&D 투자 방향과 연계 분석
- 공백기술의 발굴이 국가 정책의 전략적 목적에 부합하는 내용이 도출될 수 있는 과제를 우선 선정함
- 이를 통해 표 30과 같이 10개 과제 선정 및 전략적 R&D의 목적에 맞게 연구 내용 보완함

3. 공백기술 발굴

- 도출된 공백기술은 단순히 제한된 기술 분류의 틀에서 벗어나 다양한 기술 분류에 해당하는 과급효과와 기술지원이 가능하도록 구성함
- 많은 R&D 기회에서 지적된 연구과제 성과의 단편성을 최소화하고 연계성을 극대화 추구
- SWOT 분석 기반 R&D 투자 방향, 위험관리모델 기반 R&D 투자 방향 설정, 최근 정부종합대책에 따른 정책적 R&D 기본투자 방향에서 우선순위로 도출된 기초원천기술, 지자체 현안지원 기술, 고농도발생 시기의 노출 최소화 기술을 우선적으로 발굴함

3.1. 원인규명기술 중분야

□ 연구 현황

- 대기오염에 대한 EU의 장기계획과 이에 대한 평가를 통해 우리나라의 대기질개선 계획과 방향을 검토할 필요가 있음
 - 유럽은 질소배출, 산성비 등 대기오염으로 인한 농작물, 건축물의 피해 등을 포함한 직접적 사회비용으로 연간 230억 유로 발생(EU, 청정대기프로그램).
 - 오염방지를 위한 국제협력프로그램 수행으로 대기오염 저감을 위한 2030년 목표설정 및 달성, 대기오염 저감, 국제 협력 등을 통해 정책 시행 중.
 - 대기오염영향 감소를 위한 장기계획에서도 WHO기준과 생태계 허용한계(tolerance limit)를 동시에 충족시킬 새로운 대기정책 목표 수립.
 - 청정대기 정책목표(2030년까지)-대기오염에 의한 조기사망 예방(2005년 대비 2030년까지 조기사망 52%감소)과 질소오염으로 인한 (산림)생태계 보전.
 - 2030년까지 농업분야 암모니아배출량 27%감축목표와 선박에 의한 황배출농도를 2015년 0.1%(발틱해, 북해), 2020년부터 모든 유럽연합해양 지역에서 최대 0.5%로 제한할 예정. [2017년 유럽환경국, Clearing the Air—a critical guide to the new national emission ceilings directive, 2017, EEB].
- 국내는 대부분 도심과 산업지역, 인구밀집지역의 주요 배출원 관리 중심
- 농축산업분야의 온실기체배출연구로 기후변화문제해결과 함께 질소성분배출(NO/NO₂/NH₃)의 미세먼지/오존생성 중요성 높아짐.
- 국내미세먼지 농도증가에 따른 국민들의 우려를 해결하고 간접온실기체로서의 역할과 함께 2차 미세먼지 생성과 광화학생성물(오존 등) 발생에 기여하는 전구체인 질소산화물(NO와 NO₂)과 암모니아(NH₃)의 농업분야 배출정보를 보다 정확히 파악해야 함.
- 미국은 1950년대부터 스모그챔버 연구를 했으며, 기체상 휘발성 유기화합물의 대기 산화 반응, 반휘발성 유기생성물의 기체-입자 분배를 통한 이차유기물 생성 및 수율, 입자 표면에서의 비균일 반응 등 이론적으로 많이 정립된 상태임. CMAQ, GEOS-Chem 등 대기질 모델에 모듈을 제공하고 있으나, 동북아 대기조건과는 차이가 있음. Caltech (실내 27 m³), UC Riverside (실내 90 m³), Georgia Tech (실내 13 m³) 등 챔버 보유. 첨단 측정 장비를 이용하여 입자의 구성 성분 분석 및 반응 메커니즘을 개발하여 이차유기물 생성 및 유기-무기(고분자)화합물 생성 등 세계 최고 수준의 연구를 수행함.
- 유럽의 경우도 미국 못지않게 다양한 연구가 수행되었으며, 특히 비균일 반응에 의한 고분자화를 처음으로 첨단 질량분석기를 통해 규명하였음. 또한 스페인의 대형 실외 챔버 EUPHORE 건립으로 실제대기조건(광원)에서 연구수행중임. EUPHORE (스페인, 실외 200 m³), PSI (스위스, 실내 27 m³). Nucleation 및 이차유기물 생성, 고분자 화합물 생성 연구를 세계 최고 수준으로 수행.
- 중국에서는 비록 뒤늦게 연구가 시작되었지만, 연구개발에 대한 많은 투자로 현재는 아시아 최고 기술 보유국임. 특히 고농도로 유명한 중국 미세먼지를 측정, Source Apportionment, 스모그챔버로 생성 기작을 규명하는 등 다양한 연구를 통해 미세먼지

현상을 규명하면서 저감에 노력하고 있음.

- 현재 국내에는 소형챔버 (5~7 m³)가 KIST (쌍둥이 챔버)와 경북대에 있음. KIST에서는 과거 2000년 초에 Toluene, α-pinene 등의 광화학반응 연구와 실제 대기 및 경유차 배출가스의 광화학적 노화를 연구했고, 현재는 glyoxal과 methylglyoxal을 표준역상 전구체로 NO_x조건에서 다상반응 및 흡습성 증대를 연구하고 있음. 경북대에서는 2009년 이후로 암모니아 등의 무기인자에 의한 비균일 미세먼지 생성을 연구해왔고 현재는 복잡계 무기·유기 인자에서 비균일반응에 의한 생성 및 수율증대를 연구하고 있음.
- 이제 미세먼지 생성기작 규명에 대한 1차년도 연구를 마쳤으며, 체계적인 규명을 위해 더 많은 시도와 노력이 필요함.

□ 시장 동향

- 이 중 분야의 연구는 현상규명 및 예측 관련 연구로 공공 서비스 분야의 성격이 강함.
- 2019년 이후에는 사업장 배출총량관리제가 전국으로 확대되고, 미세먼지예보모델의 정확도 향상의 사회적 요구와 미세먼지 사회재난 편입에 따른 특정사업장 및 지역의 미세먼지 기여율 산정 기법을 통한 원인자 부담 원칙이 적용될 경우 지금과 비교할 수 없는 큰 시장 형성될 것으로 기대됨.
- “지역맞춤 미분류 배출원 규명”연구는 지역미세먼지 기여율 산정을 위한 핵심정보를 제공하는 수단으로 사용될 것이며 경쟁적인 사업화 기대됨.

□ 정부 R&D 투자(2018년 기준 R&D 중 3.6% 투자, 7위/10위)

- 원인규명연구로 2017년 3개 과제, 13.4억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D (521억원)의 2.6%에 불과. (`16년 3.4억 -> `17년 13.4억 -> `18년 21.6억)
- 과기정통부의 지원사업으로 2017년 시작된 국가미세먼지전략 사업의 일환으로 추진되고 있음.
- 과기정통부는 국가전략프로젝트사업을 통한 미세먼지 발생유입규명 연구에 집중지원하고 있으나, 스모그챔버를 활용한 원인규명 연구는 미세먼지 국가전략프로젝트의 과제로 수행되고 있는“스모그챔버를 이용한 동북아 미세먼지 생성기작 규명”연구가 유일함(2017.9-2020.5 수행 예정)
- 연구 지원 부처가 제한적이고 지원 프로그램과 지원예산이 확대될 필요가 높음.
- 산림청, 농업과학원, 축산과학원 등의 질소성분물질의 지표-식생-대기순환과 연관된 기후변화 관련 온실기체배출량 측정연구와 연계 또는 융합연구를 통해 2차생성 미세먼지와 오존, 식생 VOC배출 영향을 측정 평가하는 방향으로 연구를 유도할 필요 있음.

- 지역대기질에 미치는 영향과 대기질평가, 예측모델의 입력자료 생산 등 모델개선에 필요한 양질의 자료생산 가능으로 예보기술력 향상.

□ 투자 방향

- ▷ 현재까지는 주로 통합기반 다중규모 대기환경분석시스템 구축을 통한 지역별 미세먼지 (PM10) 생성 메커니즘 및 영향 배출원 규명(교육부)연구를 통해 주로 지역의 주요 이동 오염원과 산업시설의 고정오염원 배출특성에 의한 미세먼지 전구물질 배출량과 그에 따른 영향연구를 중심으로 수행하였으며,
- ▷ air mass 케적분석을 위해 HYSPLIT/PSCF모델을 활용, 고농도 사례일의 권역별 기류 패턴 분석에 따른 기존 부처연구와 연계하여 오염원의 원인과 영향 검토.
- ▷ 대단위 산업시설과 오염원 영향이 높을 것으로 예상되는 도심 수준의 인구밀집지역위주의 오염원과 함께 미세먼지와 광화학 생성 오존과 같은 2차오염물질의 생성에 영향을 주는 전구물질(암모니아를 포함한 질소산화물과 유기탄소화합물 등) 배출이 예상되는 농업용지(농경지, 축산농지, 축사, 산림지 등)에서의 NO, NO₂, NH₃, VOC의 배출량 측정 필요 있음.
- ▷ 자동차, 농경지와 축산분야 미세먼지 전구체(NH₃/NO/NO₂)의 오염원으로부터 순플럭스(net flux)산정과 함께 기체배출에 주요 요인으로 작용하는 토양의 물리화학적 특성 분석은 지역 환경 특성이 반영된 오염원 규명 연구결과를 제시할 수 있을 것임.
- ▷ 결과적으로 대도시와 대규모 오염으로 인한 영향만이 아니라, 최근 빈번히 나타나고 있는 지역특성이 고려된 고농도 현상을 규명하고, 그에 따른 지역맞춤형 대기오염개선정책 수립을 위해 필요한 정보(측정자료)를 가능토록 하는 연구방향 추진.
- ▷ 챔버를 활용한 원인규명 분야 연구는 **기존 연구와의 지속성 및 타 과제와의 연계를 통한 효과 극대화 차원**에서 투자가 필요함. 현재 국가전략프로젝트 사업을 통해 수행하고 있지만, 2020년 이후 계획된 과제가 부재한 상태이므로, 지속적인 R&D 지원 투자가 필요함. 현재 수행 중인 3년간의 연구를 통해서도 중형 스모그챔버 관련하여 시설 구축 및 성능평가, 챔버 특성화 등에 대부분의 연구기간이 할애되기 때문에 장거리 유입의 영향을 규명하기 위한 본격적인 연구가 수행되기 어려움. 따라서 **국민적 관심사인 장거리 유입 및 국내 정체의 영향을 규명**하기 위해서는 지속적인 투자로 후속 연구가 진행되어야 함.
- ▷ 전문가들 설문조사 결과 원인규명 분야는 **시급성, 기술 중요성, 파급효과에서 높은 평가**를 받아 우선적인 투자가 필요할 것으로 판단됨. 또한 이동형 스모그챔버 결과와 기존 소형 및 중형 스모그챔버 연구를 연계함으로써 **저감 대책 수립을 위한 과학적 자료를 생산**할 수 있을 것으로 기대되므로, 우선적인 투자가 필요함.

□ 공백기술

가. 지역맞춤 미분류 배출원 규명 (지역 환경 특성에 따른 미세먼지 오염원 규명)

- 원인규명분야에서 환경부의 환경정책기반공공사업과 농림축산식품부의 농업과학기술 연구 개발 사업의 농업기후변화대응과 지속가능한 농업환경 유지보전기술과의 연계와 함께, 미세먼지 국가전략프로젝트에서 축적된 역량과 기술을 바탕으로 지역맞춤 미분류 배출원과 그 특성을 규명하고, 보완 활용하여 지역별, 산업별 미세먼지 배출 기여도 산정의 정확도를 높여 국제협력 및 효율적 정책대응이 가능하도록 지원하는 역할을 할 것임.
- 토지이용 특성에 따른 지표배출량 산출을 위해 극미량의 기체상 성분(NO , NO_2 , NH_3 , N_2O) 분석과 지표이용에 따른 토양배출에 영향을 주는 토양의 주요 물리화학인자(토양수분, 토양온도, soil-N (NH_4^+ , NO_3^-), pH, Porosity, BD)들이 지표배출량과 함께 분석될 것임.
- 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 1 참조

나. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성 평가

- 본 공백기술은 미세먼지 국가전략프로젝트 과제에서 진행된 연구의 후속 연구에 해당됨. 기존 연구에서의 스모그챔버 제작 및 운영한 노하우를 활용하여 이동형 스모그챔버를 제작하고, 이를 타 과제에서 개발된 Mobile Laboratory과 연계하여 최초로 현장에서 주요 배출원의 이차입자 생성특성을 규명하여 저감 대책 수립을 위한 과학적 자료를 생산하고자 하는 연구임
- 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 3 참조

- ▶ 공백 기술 달성시 국외 미세먼지 기여율의 신뢰도 2017년 현재 $\pm 15\%$ 를 2022년까지 $\pm 12\%$, 2025년까지 $\pm 10\%$
- ▶ 국내 미세먼지배출인벤토리 개선에 따른 진단모델 정합도 IOA (index of agreement) 2014년 전국평균 기준 0.7 (대기오염 배출 인벤토리 개선 및 신뢰도 향상기술 개발, 장영기 등 2014)에서 2022년까지 0.8, 2025년까지 0.85 달성에 기여. 또한 이를 통해 예보모델 정확도 목표인 2022년 75% 달성지원

3.2. 현상진단 및 측정기술 중분야

□ 연구 현황

- 미국은 1980년대부터 NARSTO, SOS, TeXASQS, MCAQ 등 대규모 대기오염 측정 및 분석 프로그램 수행을 통해 과학적 대기오염 규명
- 미국 NASA, NCAR, NOAA 등은 GTE, INTEX, AGAGE 등의 프로그램을 통해서 대기오염의 기초 원천 기술을 축적하고 활용함
- 유럽의 경우도 EUROTRAC, EMEP, LOOP, LOTOS 등의 다양한 대규모 측정 프로그램을 운영하고 있으며 최근에는 PANDA 프로그램 등 중국과 협업을 통해서 중국의 대기오염현상 진단을 지원하고 있음
- 국내에서는 국립환경과학원이 다수의 대학과 같이 미국 NASA와 공동연구를 통해서 2016년 KORUS-AQ를 수행한 것이 대규모 대기오염 종합관측을 시초이고 현재는 연구 역량을 확대하고 있는 중
- 2017년부터 미세먼지국가전략프로젝트를 통해서 본격적인 현상진단 연구 수행하고 있으나 오염 원인의 정밀추적 기술은 제한적임

□ 시장 동향

- 현상진단 및 측정의 시장 전망은 대기오염 측정장치에 집중됨
- 대기오염 측정 장치에 대한 지역별 기술선도 및 시장전망은 북미와 유럽이 대부분을 차지하지만 아시아지역의 시작이 최근 들어 확대됨
- 본 분야에서 미국은 앞에서 소개된 대규모 대기오염분석 프로그램 추진 중 개발된 장치를 Aerodyne, PICARRO 등 벤처회사가 상용화하는 과정을 거쳐 전세계 첨단 측정장비의 생산과 판매를 거의 독점함
- 국내에서는 환경부의 글로벌탐지원사업인 그린패트론행사사업단에서 개발된 과제들의 성과를 통한 상용화가 진행 중
- 하지만 시장의 진입이 상대적으로 어려워 측정 장치 자체보다는 기존의 측정 장치를 활용한 종합적 원인규명 기술의 시장화가 필요함

대기오염 측정 장치에 대한 지역별 시장전망 [과학기술기발 미세먼지 대응 전략 점검, KISTEP]

지역(백만달러,%)	2015	2016	2021	CARG(`16-21)
아시아·태평양	930.2	995.8	1,582	9.7
북미	1,670.2	1,747.2	2,489.8	7.3
유럽	1,286.6	1,339.1	1,995.2	8.3
기타	349.7	358.9	478.2	5.9
전체	4,128.7	4,441.5	6,545.2	8.1

□ 정부 R&D 투자 (2018년 기준 전체 R&D 중 21.4% 투자, 2위/10위)

- 과기정통부는 국가전략프로젝트사업을 통한 미세먼지 발생유입규명연구에 집중지원
- 환경부는 글로벌담환경기술개발사업을 통한 장비개발, 환경정책기반공공사업을 통한 정책대응기술지원 연구에 집중

□ 투자 방향

- 다양한 연구와 투자에도 불구하고 지금까지 주로 활용되는 대기확산모델 분석, 화학성분 및 수용모델분석만으로 외부 및 국내 지역배출 기여도산정의 논란지속
 - 미세먼지의 국외, 지역별, 산업별 기여율을 높은 신뢰도로 규명할 수 있는 혁신적인 기술의 투자 필요
 - 초정밀 추적 확산자를 이용한 대기확산모델의 검증 및 기여율산정 지원 연구 필요
- 미세먼지와 그 전구물질은 주변국 배출원에서 발생 이동 중 비선형적 거동을 보이거나 이를 고려한 미세먼지 발생원 추적 및 평가 연구가 매우 부족
 - 발생 후 이동과정 중 화학적, 생물학적 특성이 변하지 않는 보전성 추적자 물질을 활용한 추적 연구 필요
- 과기정통부 미세먼지 국가전략프로젝트와 환경부 환경정책기반공공사업에서 진행 중인 유기 지표성분, 중금속 및 중금속 동위원소, PAHs, 미세먼지내의 C, N, S 동위원소분석을 통한 추적자 연구, 유해화학물 거동연구 등은 지역 및 산업활동을 광의적으로 지시하는 지표로 이들 선행연구는 중요한 기초연구로 대부분 2019년 종료 예정
 - 이들 선행연구의 응용, 발전연구의 개발 지원이 필요하며 이들 기존 연구의 결과물을 기반으로 정밀 추적이 가능한 화학적, 생물학적 지문 정보를 활용할 경우 좀 더 신뢰성 있는 미세먼지 기여 평가 가능
- 미세먼지 현상진단 및 추적분야의 선진국과의 격차는 최근 환경부와 NASA의 공동연구, 과기정통부 미세먼지 국가전략프로젝트를 통해 상당히 해소되고 연구 역량이 선진국 수준으로 강화됨
 - 미세먼지의 성분분석을 이용한 기여도 산정이 아니라 특정 지역별, 산업별 배출원을 정밀 추적 가능한 물질들을 발굴할 신속한 투자 필요
 - 현재 미세먼지 국가전략프로젝트에서 수행 중인 초정밀 할로젠 화학추적자를 특정 산업 및 지역 배출원 추적에 확장 필요
 - 국내에서는 아직 체계적인 연구가 수행되지 못한 생물학적 정보를 이용한 발원지 및 미세먼지 기여율, 영향 산정과 국외기원 전염성 병원균의 탐지 기반을 동시 마련할 필요 있음

□ 공백기술 : 화학적, 분자생물학적 지문을 이용한 배출원 정밀 추적 및 기여도 평가기술

- 도출된 공백기술은 “화학적, 분자생물학적 지문을 이용한 배출원 정밀 추적 및 기여도 평가기술”로 현상진단 및 측정분야에서 환경부의 환경정책기반공공사업과 미세먼지 국가전략프로젝트에서 축적된 역량과 기술을 바탕으로 혁신적인 발생원 정밀 추적 기술을 추가적으로 보완 활용하여 지역별, 산업별 미세먼지 배출 기여도 산정의 정확도를 높여 국제협력 및 효율적 정책대응이 가능하도록 지원하는 연구
- 극미량 기체상, 미세입자상 할로겐 성분 분석과 분자생물학적 지문을 이용한 초정밀 오염원추적 및 기여도 산정을 위한 기초, 원천과학기술이며 상세내용은 5 장과 별첨의 공백기술 2 참조

- ▶ 공백 기술 달성시 국외 미세먼지 기여율의 신뢰도 2017년 현재 $\pm 15\%$ 를 2022년까지 $\pm 12\%$, 2025년까지 $\pm 10\%$
- ▶ 국내 미세먼지배출인벤토리 개선에 따른 진단모델 정합도 IOA (index of agreement) 2014년 전국평균 기준 0.7(대기오염 배출 인벤토리 개선 및 신뢰도 향상기술 개발, 장영기 등 2014)에서 2022년까지 0.8, 2025년까지 0.85 달성에 기여. 또한 이를 통해 예보 모델 정확도 목표인 2022년 75% 달성지원

3.3. 대기질 모델링 중분야

□ 연구 현황

- 최근 비상저감 조치기간 등 **고농도 사례**에 대한 **지자체별 원인 분석** 및 지자체 **배출 특성에 맞는 대책 마련 및 효과 분석**에 대한 요구가 높아짐
- 대기질 모사는 이용되는 대기질 모델 외에 배출량 및 기상 등 입력 자료의 품질이 매우 중요함. 또한 지역 특성에 맞는 모델링 기법 도출 필요
- 미국의 경우 SIP 단계에서 **고도화된 입력자료** 개발 및 개선되고 있으며, 이를 기반으로 예보 등에 활용. 중국의 경우 MICS-Asia, 일본의 경우 J-STREAM 플랫폼 개발을 통해 대기질 개선 대책 마련 시 **대기질 모델링** 결과를 보도 **과학적으로 활용**하기 위해 노력 중
- 미세먼지, 오존 등 광역적 거동이 중요한 **2차 대기오염물질**에 대한 진단 및 예보를 위해서는 동북아 지역을 대상으로 한 **거시적 분석**과 함께, 지역 배출 및 지리적 특성을 감안할 수 있는 **미시적 분석** 모델 기법이 동시에 필요
- 이를 통해 지자체 배출 특성 분석, 대기질 개선 대책별 비용-효과, 비용-편익 분석을 가능케 함. 현재는 국내 또는 지자체별 자료를 이용한 **대책 -배출량 저감 - 농도 변화 - 노출 개선** 등을 **정량적으로 평가**할 수 있는 기반 미비

□ 시장 동향

- 대기질 진단 및 예보 모델 플랫폼 개발은 대기질 개선 계획 수립에 있어 중요한 정책 근거로 활용되며, 대기질 개선 대책에서 투자비용의 효율적인 관리라는 측면에서 시장성을 평가하는 것이 타당할 것으로 판단됨
- 김은혜 등 (2018)*에 의하면 국내 배출량 저감 대책에 의해 미세먼지 농도 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소를 위해 2조 4천억원이 소요되는 것으로 추정
- Han et al. (2018)**에 의하면 2015년 미세먼지에 의한 국내 조기사망자 수는 11,924명에 달하며, 지역적인 차이를 보임

* 미세먼지 농도 개선을 위한 배출량 저감 대책 효과 분석, 한국대기환경학회지, 34(3), 469-485

** Spatial and Temporal Trends of Number of Deaths Attributable to Ambient $\text{PM}_{2.5}$ in the Korea, JKMS, 33(30), <https://doi.org/10.3346/jkms.2018.33.e193>

□ 정부 R&D 투자 (2018년 기준 전체 R&D 중 12.5% 투자, 4위/10위)

- 과기정통부는 국가전략프로젝트사업을 통한 미세먼지 기여도 분석 등을 수행하고 있으나, 단기 연구로는 전반적 현황 이해에 제한적이며, 국내 지자체별 특성을 고려한 효과 분석 등은 어려움
- 환경부 과제는 2022년 이후 R&D 과제는 아직 미정이며, 향후 환경부 R&D에서는 정책 연계성 중심으로, 다른 R&D에서는 이를 지원할 수 있는 기초 역량 강화가 필요

□ 투자 방향

- 다양한 대기질 모델링 연구가 수행 중이고, 연구비용 또한 증가되고 있으나, 배출량 및 기상 등 입력자료에 대한 민감성과, 배출의 지역 특성을 감안하면 지속적이고 장기적인 투자가 적합함.
- KORUS-AQ에서 국내외 기여율 산정 등 농도 중점 분석이 수행되었으나, 해당 기간이 5월~6월초에 국한되어 계절적 변화 등을 감안하기 어려움. 장기평가 필요
- 현재 ‘수도권 대기환경 개선에 관한 특별법’에 의한 기본계획 수립이나, 대기환경규제지역의 실천계획 수립 시 배출량 삭감 실적에 의존하는 현실에서 탈피가 필요함
- ‘농도’ 중심의 정책을 마련하기 위해서는 배출-이동-생성-제거 등 대기질 현황에 대한 이해 증진이 필요하며, 이를 위해서는 측정과 함께 대기질 모델링의 역할이 중요
- 특히, 이러한 농도 평가 기법은 향후 대기질 관리의 핵심이 되는 국민 건강보호와 관련된 노출 평가와 연계하여 지역별 전반적인 농도 수준과, 국지적 hot-spot에 대한 노출 평가 등을 연계 가능
- 지역별 농도 기반 평가를 위해서는 기본적인 모델링 플랫폼이 마련되어야 하며, 국내 지역적인 배출, 지리적 특성이 감안되어야 함. 최적의 모사읍선 도출 필요
- 대기질 모델링 플랫폼 마련 시, 농도 예측 및 예보가 가능하며, 고농도 기간에 대한 원인 분석 등을 수행하여 지역 맞춤형 미세먼지 개선정책 도출 가능
- 고농도 미세먼지 현상에 대한 접근은 국지적인 배출 영향 뿐 아니라, 국내 다른 지역의 배출 영향과 국외 유입 등에 대한 정량적 분석이 필요하며 시공간적으로 다중 규모의 접근이 필요
- 최종적으로는 대책별 배출량 저감, 농도 개선, 노출 피해 감소를 연계한 비용-효과, 비용-편익 분석이 가능하여, 대책의 정량적 평가 가능
- 국내에서 대기질 모델링과 관련하여 대기질 모사 기법 외에 전문 인력 부족도 현재 문제점으로 대두되는 바, 이에 대한 고려 필요
- 미세먼지 모사 개선을 기본 시스템 마련 및 지속적 개선을 위한 보완은 구성 요소인 기

상, 배출량, 대기 화학수송*으로 구분하여 접근

* 연구 진행은 모델 개발이 아닌, 대기질 모사 차원에서 모듈 검토 및 최적화로 진행. 실질적인 기상 및 배출량 개선은 별도 과제에서 추진.

□ 공백기술 : 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발

- 도출된 공백기술은 “다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발”로 미세먼지 국가 전략프로젝트에서 도출된 고농도 미세먼지에 대한 원인 규명 및 국내외 기여율 산정기술과, 환경부의 에코이노베이션과 환경정책기반공공사업 등에서 구축하는 사업을 연계하여 국민 실생활에서의 농도 및 노출평가를 진단할 수 있는 시스템을 마련하는 연구
- 본 공백기술은 기존, 원천과학기술로 향후 다부처 및 환경부의 미세먼지 개선을 위한 중앙정부 및 지방정부의 정책 도출 시 활용 가능
- 상세내용은 5장과 별첨의 공백 기술 4 참조

- ▶ 본 공백기술 개발 시, 현재 배출량 위주의 평가에서 농도 위주의 평가로 전환할 수 있는 계기를 확보할 수 있으며, 대책-배출량 저감 - 농도 변화 - 노출 평가를 비용 면에서 평가할 수 있는 원형 (prototype) 제시 가능.
- ▶ 예보모델 정확도 목표를 각 지자체별 2022년 75% 달성지원

3.4 고정오염원 배출저감 기술 중분야

□ 연구 현황

- 최근 5년간 고정오염원에서 배출되는 미세먼지의 직접 저감 기술과 2차 생성 원인물질 제거 기술에 대한 국내외 연구 성과가 증가하고 있음
- 특히 2차 생성 미세먼지의 비율과 영향이 좀 더 구체적으로 알려지면서 원인물질 배출 허용기준이 강화되고 있으며, 이에 따라 고효율 탈황 및 탈질 기술에 대한 연구와 특허 출원이 증가하고 있음
- 탈황 및 탈질 효율개선을 위한 신기술 개발과 촉매 등의 소재 개량 및 시스템 효율개선을 다각도로 이루어지고 있으며, 상용화 기술도 시장에 소개되고 있음. 또한 1차 생성 미세먼지와 함께 2차 원인물질을 동시에 제거하기 위한 복합 기술에 대한 연구가 활발함
- 비도로 이동오염원 분야는 그동안 크게 관심을 받지 못하여 관련 연구와 논문 및 특허가 거의 없는 수준임. 최근 비도로 이동오염원의 비중에 대한 연구가 진행되면서 관련 분야에 관심이 높아지고 있으며 특허도 서서히 증가하고 있음
- 비도로 이동오염원용 배출가스 저감장치는 대부분 도로 이동오염원에서 활용되는 시스템(SCR, DPF 등)을 사용 중이며, 비도로 이동오염원에 특화된 저감장치의 개발이 필요함

□ 시장 동향

- 고정오염원에 대한 미세먼지 배출저감 기술 시장은 대기환경산업에서 가장 큰 공급과 수요를 담당하는 부분임. 전세계적으로 환경규제가 강해지고 화력 발전이나 철강 코크스 수요 증가가 지속되면서, 대규모 고정오염원에 적용되는 미세먼지 관련 저감 기술 시장도 향후 크게 확대될 전망이다
- 그럼에도 불구하고 1차 생성 미세먼지와 2차 원인물질 동시 제거기술에 대한 신규 시장은 초기 단계이며, 향후 동시저감 분야에 대한 투자 확대가 예상됨
- 비도로 이동오염원 배출가스 저감장치는 대부분 도로이동오염원에서 활용되는 시스템(SCR, DPF 등)을 사용 중. 건설기계는 국내 45.2만대가 등록되어 있으며 '05년 배출 기준을 도입하고 실도로 인증기준 도입('19) 등 관리정책을 강화 중임. 따라서 비도로 이동오염원에 특화된 저감 기술의 개발과 상용화가 필요함

□ 정부 R&D 투자(2018년 기준 전체 R&D 중 26.3% 투자, 1위/10위)

- 미세먼지 직접배출이나 2차 생성 원인물질의 배출에서 고정오염원의 기여도가 다른 오염원에 비해 상대적으로 높으며, 이에 따라 고정오염원 대응 신기술의 개발과 제진효율 및 탈황 탈질 효율의 개선이 시급한 과제가 되어 있음
- 이에 따라 최근 3년간 미세먼지 배출저감 기술에 투자하는 정부 R&D 비중이 계속 증가하는 추세로, 2016년 62억원에서 2017년 71.2억원, 2018년 157.2억원으로 증가하고 있음
- 부처별 R&D 투자액은 산업자원부, 환경부, 과학기술정보통신부의 순이며, 고정오염원 대응 기술의 적용이 대부분 대규모 산업시설을 대상으로 하고 있어 산업자원부의 투자 비율이 다른 분야에 비해 높음. 고정오염원 적용기술은 관련 설비의 연구 개발과 함께 현장 적용 및 실증을 동시에 추진해야 하는 측면에서 범 부처간 협업이 필요한 분야임

□ 투자 방향

- 고정오염원 1차생성 미세먼지 및 2차생성 원인물질 저감 기술에 대한 R&D 투자는 대형오염원(화력 발전소, 철강제조업 등)에 대한 기본 연구 투자의 성격으로, 투자 대비 효과가 뚜렷하며 기술 수준 평가도 명확한 측면이 있음
- 1차 직접배출 미세먼지 저감 기술과 2차 생성 원인물질 저감 기술의 기술수준은 선진국 대비 80% 이상이며, 주요 선진국 대비 기술 경쟁력을 가지고 있음. 다만 신소재 부분과 촉매 등의 소재 기술이 취약하다고 평가됨
- 대기오염 대응 환경산업의 대부분을 차지하고 있는 고정오염원 배출저감 기술 시장은 한국에서도 상당히 활성화 되어 있으며, 주요 적용처는 화력발전소와 대규모 장치산업체들임. 그러나 미국, 일본, 독일의 선진 시장에 비해 규모면에서 아직 한계가 존재하며, 최근 중국 등의 신흥 공업국을 중심으로 환경규제가 강화되면서 시장 규모가 확장하고 있으나 이에 대한 대응은 미흡함
- 2015년 이전에는 1차 직접배출 미세먼지 제진기술과 2차 생성 원인물질(SOx, NOx 등) 저감 기술에 대한 기술적 대응방안과 중요도가 다르게 평가되었으나, 최근에는 1차 배출이나 2차 생성 모두 미세먼지 저감을 위해 주용하게 다루어져야 하는 항목으로 인식되고 있음
- 향후 1차생성 미세먼지와 2차 원인물질 동시제거 기술분야에 대한 민간과 정부 차원의 R&D 투자가 요구됨
- 비도로 이동오염원 분야에서 대형선박, 건설기계 등은 시장이 형성되어 있고 민간(제작회사)의 투자 여력이 있는 만큼 민간 중심의 R&D가 필요함. 그러나 소형선박(연안해운 등), 농기계 등 취약 분야는 정부 차원의 R&D투자 검토가 요구됨
- 배출규모에 비해 상대적으로 R&D 투자가 저조한 '선박 배출 미세먼지 저감'에 대한 투자 규모 확대 검토 필요함. 건설기계는 제작차 이동식 배출가스 검사제도 도입('19년 규정제정), 노후 건설기계 저공해화 사업 등 정책·제도 중심의 관리와 이에 대응하는 연구 투자가 요구됨

□ 공백기술 : 관리공백인 중소형 사업장 및 비이동오염원 미세먼지 배출저감 방안

- 대규모 고정오염원에 대한 연구개발 및 정부차원의 R&D 투자는 다양하게 추진되고 있으며, 민간 차원의 투자 여력도 있음
- 그러나 중소규모 고정오염원은 전국적으로 산재되어 있고 측정 및 관리의 사각지대에 있으며 적용 가능한 적정 제어기술도 부재한 상태임. 중소규모 고정오염원은 고가의 장비의 설치와 운영에 한계가 있으며, 소규모 시설에서 빈번히 나타나는 비정상 운전이나 급격한 변동부하에 대응하는 능력이 떨어지는 문제가 있음
- 이에 중소규모 고정오염원에서 배출되는 NO_x 제어를 위한 친환경 촉매 환원기술을 국산화하고 경제성과 현장 적용성을 확보할 필요가 있음. 또한 배가스 자동측정장치와 연계한 스마트 제어기술을 접목하여 측정과 관리의 한계를 극복하고, 비정상 운전 조건에서도 대응할 수 있어야 함
- 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 5 참조

- ▶ 공백 기술 달성 시, 중소규모 사업장 고정오염원 및 비도라이동오염원에서 배출되는 2차 원인물질 제거율 30% 달성 가능

3.5. 도로이동오염원 저감 기술 및 비도로이동오염원 배출저감 기술 중분야

□ 연구 현황

- 경유승용차뿐만 아니라 버스와 트럭을 포함한 모든 경유자동차가 매연여과장치와 함께 질소산화물저감 후처리장치인 Urea SCR 장치를 표준장치로 사용하고 있으며, 따라서 운행되고 있는 모든 경유차의 후처리장치가 정상적으로 작동되도록 감시, 관리하는 정책과 기술이 매우 중요하게 됨
- 자동차 배출가스에서 배출되는 미세먼지는 직경 50nm(PM_{0.05})에 집중되어 있으며, 제작 자동차에서는 나노입자 개수(PN)로 배출량을 규제(배출허용기준(6x10¹¹개/km))하고 있음. 자동차의 나노미세먼지는 폐암과 심혈관질환을 유발하는 것으로 밝혀져 있는 등 PM_{2.5}에 비해서 인체 유해성이 훨씬 큰 것으로 밝혀지고 있어 이의 저감 대책 기술이 중요함
- 서울 도심 도로변의 NO_x과 PM 등의 공기오염도는 대기농도의 3-5배가 높으며, 서울시 도로변 노출 위험인구는 38.4%(인하대학교 임종한교수)로 대단히 높아 도로변 주택과 아파트 주민과 도로 보행자의 건강에 대한 관리대책도 시급함
- 수도권외의 미세먼지 공해가 사회적인 주요한 이슈가 되면서, 자동차와 화력발전소, 공장 등이 주 발생원으로 지목되어 대책들이 수립되고 있음. 그러나 도심에서 작업하는 건설 기계와 인천시의 연근해 선박에서 발생하는 미세먼지도 상당한 영향을 미치는 것으로 분석되고 있어 비도로이동오염원의 저감 대책도 시급함
- 미국과 유럽 등에서는 도로변과 항구 등의 도심지역의 미세먼지 관리와 저감 대책 정책을 이미 시행하고 있으며, 자동차 나노입자의 인체유해성과 기준강화에 대한 연구도 진행되고 있음
- 우리나라도 수도권대기개선대책으로 경유자동차의 매연과 PM10은 크게 개선하였으며, 현재 시행중인 2기 수도권대기개선 대책에서 비도로이동오염원을 포함하는 수송분야에서의 PM_{2.5}, NO_x 저감 대책을 추진하고 있음

□ 시장 동향

- 세계 배기가스·미세먼지 정화 촉매 시장은 `16년 약 \$100억 규모에서 `19년 약 \$140억 규모로 성장 전망(연평균 11.3%의 증가)
 - 디젤차를 위한 DPF 필터의 경우 미국의 코닝, 일본의 NGK, 독일의 보쉬 등의 제품이 사용되고 있으며, 촉매의 경우 전세계 시장을 선진국 3개사(Johnson Matthey, BASF, Umicore Group)가 약 70% 점유.
 - 세계 배기가스·미세먼지 정화 촉매 시장은 `16년 약 \$100억 규모에서 `19년 약

\$140억 규모로 성장 전망(연평균 11.3%의 증가).

- 운행중인 경유차 후처리장치의 정상작동을 실시간으로 모니터링하는 비접촉식 장치는 초기 개발단계로서 아직 상용화된 시장은 없음
- 비도로 이동오염원용 배출가스 저감장치는 대부분 도로이동오염원에서 활용되는 시스템(SCR, DPF 등)을 사용 중
- 한국의 선박 수주량은 `14년 기준 중국(40.9%)에 이어 2위(33%)이며, 선박용 미세먼지 저감장치 시장은 `11년 10억 달러로 추정
- 건설기계는 국내 45.2만대가 등록되어 있으며, `05년 배출기준을 도입하고 실도로 인증 기준 도입(`19) 등 관리정책을 강화 중

□ 정부 R&D 투자(전체 R&D 중 14.6% , 2.5% 투자, 3위, 8위 /10위)

- `18년 총 87.4억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(597.1억원)의 14.6%를 점유 (중분류 3위)
 - 환경부 단독으로 지원해왔으나 산업부(`13년), 국토부(`15년)가 추가되면서 투자 규모 확대(`13년 대비 4배).
 - * 환경부는 경유차 NOx 저감 기술 및 담체·촉매시스템, 산업부는 승용클린디젤엔진 핵심제어 알고리즘 및 ECU 설계기술, 국토부는 초미세먼지 제거차량 시스템 개발 중
- 비도로이동오염원은 `18년 총 4개 과제, 14.8억원의 R&D가 진행 중으로, 미세먼지 대응 기술 R&D(597억원)의 2.5%를 점유(10개 중분류상 8위)
 - 환경부는 기타 비도로 이동오염원 중 장기대응(Tier-4), 산업부는 현안대응 기술 개발(Tier-3, `16년~), 해수부는 선박배출 중심.

□ 투자 방향

- 도로 이동오염원 배출저감 분야는 완성차 제조업체 및 retrofit을 위한 환경업체 등 민간 중심의 R&D가 필요한 분야로, 정부는 핵심부품 및 소재의 국산화 등 핵심 원천기술 개발에 집중 필요
- 경유차 등 도로 이동오염원은 초미세먼지의 주요 배출원*이나 관련 시장이 이미 성숙되어 있고, 노후 경유차 대체 등 정책적 차원에서 문제 해결 필요**
 - * 수도권 초미세먼지 배출기여도는 경유차(29%), 건설기계 등(22%), 냉난방(12%)

등의 순으로, 이동오염원(mobile source)이 가장 큰 비중(미세먼지 관리 특별대책, 2016.6)

** 경유차 대책 : 제작 경유차 실도로 배출기준 적용, 노후경유차 조기 폐차, 경유버스 친환경버스(CNG버스)로 대체, 친환경차(그린카) 보급 확대 등

- 미세먼지 해결 측면에서 현재 수준의 R&D가 지속적으로 필요한 분야이며, 산업적 파급효과가 큰 원천기술 선정 및 투자확대 필요
- 비도로 이동오염원 배출저감 분야에서는 배출규모에 비해 상대적으로 투자가 저조한 '선박 배출 미세먼지 저감'에 대한 투자 규모 확대 검토 필요
- 대형선박, 건설기계 등은 시장이 형성되어 있고 민간(제작회사)의 투자 여력이 있는 만큼 민간 중심의 R&D 필요
 - 소형선박(연안해운 등), 농기계 등 취약 분야는 정부 차원의 투자 검토
- 건설기계는 제작차 이동식 배출가스 검사제도 도입('19년 규정제정), 노후 건설기계 저공해화 사업 등 정책·제도 중심의 관리
- 선박은 일부 소규모·단편적 연구가 진행 중으로, 배출현황 파악 후 R&D 투자 규모에 대한 적정성 검토 필요

- 공백기술 : 도로변, 항구 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출저감 방안연구
 - 수송 분야에서 배출되는 미세먼지를 저감하는 기술인 후처리기술과 저공해자동차 기술은 국내에서 오랫동안 개발되어 왔으며, 이제는 모든 경유자동차에 PM과 NOx 저감 후처리장치가 표준장치로 사용하고 있다.
 - 그러나 이들 후처리장치가 정상적으로 작동되지 않으면 경유차로부터 배출되는 미세먼지를 방지할 수 없기 때문에 운행되고 있는 모든 경유차의 후처리장치가 정상적으로 작동되도록 감시, 관리하는 기술이 매우 중요하며 공백기술의 핵심이 되어야 한다.
 - 또한 도로 및 비도로 이동오염원에서 발생된 미세먼지가 대도시 도로변이나 항구 등의 도심지역에 고농도로 분포되어 있으면서, 특히 민감계층이나 취약계층에 미치는 유해성이 매우 크지만 아직은 여기에 대한 연구나 대책이 없는 실정으로, 본 공백기술의 주요 연구 분야로 선정되었다.
 - 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 6 참조

- ▶ 공백 기술 달성시 2025년에 수송 분야 미세먼지(PM_{2.5}) 및 자동차 나노미세먼지(PM_{0.05}) 30% 저감
- ▶ 2030년에 비도로이동오염원(선박, 건설기계)의 미세먼지 배출량 50% 저감

3.6. 미세먼지 노출저감 기술 중분야

□ 연구 현황

- 호주 National Health and Medical Research Council은 실내오염물질로 라돈(Rn), 폼알데하이드(HCHO), 납(Pb), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 총휘발성유기화합물질(TVOC), 개별 휘발성유기화합물질, 황산염, 이산화황, 총 부유분진, 오존의 12가지 오염물질 관리목표 농도(goal concentration)를 설정하고 있음.
- 미국 연방 정부가 실내공기질 관리에 대한 직접적인 통제를 하지 않으나, 관련 기관(ASHRAE, AIHA, EPA, NIOSH, OSHA)이 실내공기질 기준을 마련하는 역할을 함.
- 아시아-태평양 지역: 비정부기구(NGO)인 APARCIE 주도로 실내공기 정화 시스템 개발, 건강 위험 평가, 실내공기질 측정 표준 지원을 수행함 (Cambodia, India, Indonesia, Laos, Mongolia, Nepal, Thailand, and Vietnam).
- 홍콩 Guidance Notes for Managing of Indoor Air Quality in Offices and Public Places는 개별오염물질의 8시간 평균 농도 값을 기준으로 매우 양호와 양호로 구분하며, 이산화탄소의 경우 800 ppm 이하를 매우 양호 기준으로, 1000 ppm을 양호 기준으로 채택하고 있음. 미세먼지(PM₁₀)의 경우 20 µg/m³ 이하를 매우 양호로, 180 µg/m³을 양호 기준으로 설정함.

□ 시장 동향

- 세계 공기질 시장은 2021년까지 267.4억 달러 규모로 성장이 예측됨. 전체 시장 중 공기조화 설비 시장의 비중은 60%, 공기질 서비스 시장의 비중은 40%임(TECHNAVIO, 2016)
 - 실내 공기질 시장 규모: 2016년 204.8억 달러 -> 2021년 267.4억 달러
 - 공기조화 설비 시장 규모: 2016년 122.6억 달러 -> 2021년 158.4억 달러
 - 공기질 서비스 시장 규모: 2016년 82.2억 달러 -> 2021년 109억 달러

<표> 세계 실내 공기질 시장 현황 (단위: 십억 달러)

구분	2016	2017	2018	2019	2020	2021	CAGR
실내 공기질	20.48	21.15	22.07	23.28	24.82	26.74	5.48
공기질 서비스	8.22	8.49	8.87	9.39	10.06	10.90	-
공기조화 설비	12.26	12.66	13.20	13.89	14.76	15.84	-

- 실내 공기 정화 시장은 2020년까지 7.3% 수준의 연평균 성장률(CAGR)로 확대될 것으로 전망되며 광촉매 산화, 자율 공기 청정기, 저비용 고효율 공기 청정기술이 시장의 주요 영역으로 확대될 것으로 전망됨(Frost & Sullivan, 2016).

□ 정부 R&D 투자 (2018년 기준 전체 R&D 중 7.7% 투자, 6위/10위)

- 과기정통부는 국가전략프로젝트사업을 통한 미세먼지 발생유입규명연구에 집중지원
- 환경부는 글로벌담환경기술개발사업을 통한 장비개발, 환경정책기반공공사업을 통한 정책대응기술지원 연구에 집중
- 최근 3년간 투자 금액 `16년 15.4억 → `17년 35.2억 → `18년 45.8억원

□ 투자 방향

- 현재까지의 대부분의 미세먼지 노출저감 연구는 대부분 휴대용 미세먼지 측정기를 이용한 특수 민감 계층의 실내공간에서 활동 시 및 이동시 호흡에 의한 노출저감 연구에 집중됨
- 또 다른 예로서 연구자가 버스, 지하철, 자동차 등 각기 다른 교통수단을 이용하여 출퇴근 등 동일한 경로를 이동시 유사한 조건에서 미세먼지 및 쾌적성을 평가한 사례가 다수 있음
- 다중이용시설 등에서 특수 민감 계층의 미세먼지 노출도 중요하지만 체류자나 이용자가 급증하는 시간대를 사전에 예측하고, 이때의 미세먼지 농도를 빅 데이터 분석을 통해 예측

하고 이에 맞게 공기질을 관리하면 미세먼지 노출에 의한 영향을 최소화할 수 있을 것으로 기대됨

- 다중이용시설의 미세먼지 농도를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 저가, 다량의 실시간 미세먼지 측정 센서의 설치가 필요함. 또한 교통수요 예측 기법을 이용해서 해당 공간의 이용자의 수를 예측하고, 빅 데이터 분석을 통해 1, 2 시간 후의 미세먼지 농도를 예측하여 능동적으로 대응한다면 보다 효과적으로 관리가 될 것으로 기대됨
- 미세먼지 농도의 정확한 예측과 능동형 대응은 인프라의 수준에 따라서 결정되므로 저가지만 자체 보정기능과 센서의 상태를 판단할 수 있는 기술이 필요함
- 다중이용시설 중에서도 시민의 이용이 많은 시설을 분류하여 모니터링 대상을 설정하여 투자대비 효과를 최대화 할 수 있는 전략이 요구됨

□ 공백기술 : 고농도 미세먼지 사전대응 능동 관리형 노출저감 방안

- 본 공백기술은 그 동안 각 부처에서 산발적으로 수행되어 기술 및 인프라의 축적이 이루어지지 않았던 연구를 통합하여 모니터링-데이터 수집-빅 데이터 분석-미세먼지 농도 예측-피드백을 통한 공기질 관리의 선 순환을 통해 실질적으로 지하철, 지하 쇼핑몰, 공공시설, 학교 등 대표적인 다중이용시설에서 미세먼지 노출저감이 이루어지는 연구임
- 대표적인 다중이용시설에서 모니터링 지점, 데이터 수집을 위한 서버의 수준 등 세부적인 사항은 연구기간 및 연구비 수준에 따라서 결정됨
- 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 7 참조

- ▶ 공백 기술 달성시 1시간 후 대표적인 다중이용시설의 미세먼지 농도 예측 정확도 75% 수준
- ▶ 고농도 미세먼지 사전대응으로 대표적인 다중이용시설의 미세먼지 노출영향 30%로 저감

3.7. 건강영향평가기술 중분야

□ 연구 현황

- 미국의 Havard six cities study (Dockery et al. 1993) 연구 결과를 계기로 미세먼지의 건강 악영향에 대한 문제가 제기되고 이후 다양한 역학 연구 결과가 축적되면서 2013년 WHO는 미세먼지를 1급 발암 물질로 규정하게 됨
- 초기 미세먼지의 건강영향은 주로 호흡기질환 및 심혈관질환 사망 혹은 병원 내원에 대한 단기영향(short-term effect)에 대한 연구에서 시작하였으나 최근 미세먼지의 장기영향(long-term effect)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있음
- 대상 질환(health outcome)으로는 주로 호흡기질환, 심/뇌혈관 질환 등이었으나, 최근 류머티즘 관절염, 알레르기질환, 피부질환, 안질환, 심리적 영향(우울, 자살 등) 등 다양한 질환으로 확대하여 활발한 연구가 이루어지고 있음
- 역학 연구, 독성 연구 등에서 나아가 미세먼지 노출의 질환 발생 혹은 악화 메커니즘에 대한 연구 관심이 높아지고 있음
- 국내에서는 2017년부터 미세먼지국가전략프로젝트를 통해서 다양한 인구 그룹(어린이, 주부, 노인인구)을 대상으로 노출평가 및 건강영향을 평가하기 위한 패널 연구를 진행하고 있음. 또한 미세먼지 포함 대기오염물질의 인체노출평가를 위한 모델링 이용 노출평가 고도화 기술 개발과 수용체 중심 노출평가 시스템을 개발 중임
- 또한 미세먼지에 대한 역학연구, 독성연구 등이 제한적이거나 진행되어 왔으나 고농도 미세먼지 발생 시의 성분특성 및 유해성 평가, 인체노출평가 및 건강영향 정량화 연구는 이루어진 바 없음

□ 시장 동향

해당사항 없음

□ 정부 R&D 투자 현황 (2018년 기준 전체 R&D 중 9.4% 투자, 5위/10위)

- 국민적 관심에 힘입어 2018년 미세먼지 건강영향평가 R&D 투자가 급증
 - 2015, 2016년 각각 12.2억, 12.7억 투자되었으나 2018년에는 56.3억 투자로 약 4배 이상 증가
 - 주로 환경부와 과학기술정보통신부의 투자가 주를 이룸.
- 2018년 현재 진행 혹은 진행예정인 15개 R&D 과제 중 인체위해성 및 역학연구는 8개, 인체노출평가는 4개, 독성연구는 3개임

□ 투자 방향

- 미세먼지 건강영향평가 연구의 기본 방향은 1. 국민 미세먼지 노출 최소화, 2. 민감군 건강영향 최소화 (단기), 3. 근거기반 국민 건강영향 최소화 전략(장기)이 되어야 할 것이며 이를 고려한 투자 우선순위가 결정되는 것이 바람직함
- 미세먼지의 건강영향평가는 일반적으로 미세먼지 노출과 건강영향 간의 연관성평가 즉 역학 연구를 기반으로 하는데, 특히 취약계층을 포함 인구 특성 별, 질환 별 노출-반응(건강영향) 함수의 파라미터가 다르므로, 정책지원 우선 대상을 선별하기 위한 근거를 제공해줄 수 있는 인구 특성별, 물질 특성 별, 질환 별 노출-반응 연구가 광범위하게 필요함
- 고농도 미세먼지 발생에 대한 국민체감 위험은 매우 높은 데 반해 실제 고농도 미세먼지 발생 사례의 유형(시간, 공간 특성 반영), 유형별 특성(화학적 조성, 물리적 특성 등)에 대한 정보 및 그에 따른 건강영향에 대한 정보가 부재하여 막연한 불안감만 커지고 있는 것이 현 상황임. 따라서 국민 불안 해소를 위한 과학적 근거 마련 및 올바른 정보 제공을 위해서 고농도 발생 사례의 노출 특성과 건강영향 특성에 대한 연구가 시급히 이루어져야 함
- 미세먼지 건강영향을 효율적으로 최소화하기 위해서는 민감군과 취약계층에 대한 우선 고려가 필요함. 따라서 고농도 미세먼지 발생으로 인한 노출 취약계층 파악, 민감군 건강영향을 우선 파악하여 최적 투자 방향을 정하는 것이 필요함
- 국민 건강영향 최소화를 위해서는 고농도 미세먼지의 노출평가가 선행되어야 하는 바 효율적이고도 신뢰성 있는 미세먼지 인체노출평가 기술이 선행되어야 함. 가령 IoT, 센서, 빅데이터 기반의 노출평가 방법을 적극 활용할 필요가 있음
- 또한 한정된 자원의 효율적 이용을 위해서는 시민참여 형 미세먼지 인체노출평가 시스템을 마련하기 위한 투자가 필요함.

표 37. 건강영향평가분야 공백기술 투자 방향 및 기대효과

분야	현재까지의 투자 방향	공백기술의 투자방향	기대 효과
연구 주체	중앙정부	중앙 및 지자체 수요 반영	균형적 정책 추진
참여 주체	연구자 중심	시민, 전문가 참여	정책 수용성 제고
연구 대상	전 국민 대상	민감군, 취약계층 중심	실질적 피해저감
노출 평가	단기 위주 건강평가	단기 및 근거기반 장기 영향 평가	전주기적 건강 영향평가 강화
위험 최소화 방안 평가 방법	일반 유형분석에 따른 노출저감 건강 평가 통계	고농도 시기 특성 중심 빅데이터기반 건강평가	고위험발생 시기 및 고위험군 위주 정책개발 건강평가 신뢰도 확보

□ 공백기술 : 고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구

- 본 공백기술은 국내 고농도 미세먼지 발생의 발생특성, 성분특성, 노출특성, 건강영향 특성을 파악하는 것으로 효율적인 국민 건강영향 최소화를 위한 가장 시급한 연구이고 건강영향을 고려한 미세먼지 노출저감이 가능하도록 지원하는 연구
- 독성평가, 노출평가, 역학 연구 등을 포함하는 종합적인 미세먼지 건강영향평가로서 지역특성과 인구 특성을 고려하고 동시에 민감군/취약계층을 우선 배려함으로써 고농도 미세먼지 피해 저감을 위한 최적화 전략을 제시할 수 있는 연구임
- 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 8 참조

3.8. 정책 및 정보서비스 중분야

□ 연구 현황

- 미세먼지관련 “정책 및 정보서비스” 분야는 환경부 정책기반 공공기술개발사업 (2011-2020) 중 대기환경정책 대응 기술 분야에서 중점 지원
- 그간 미세먼지 국가 R&D는 주로 과학적 현상 규명 및 배출저감에 집중되어 왔으며 과학기술에 근거한 정책 마련이나 정책 효과 극대화 방안, 우선순위 선정, 사회적 수용성 제고를 위한 연구는 제한적
- 2차 수도권대기질개선기본계획 및 변경과 관련된 다양한 정책지원연구와 서울시, 경기도, 충남, 부산 등 지자체별 미세먼지 대응 정책 및 서비스지원 연구가 다수 수행
- 과학기술정보통신부의 국가전략프로젝트에서 “R&D 기획관리”, “마스크를 이용한 노출저감 효용성연구” 등이 최근 수행
- 국제공동 연구는 정부차원인 국립환경과학원 주도의 LTP(한중일, 장거리이동오염물질 공동연구), EANET (일본주도 아시아 13개국 참가 동아시아산성비 관측 네트워크) 으로 매우 제한됨
- 외교부 주동의 NEASPEC은 중국, 러시아, 북한참여의 전반적 환경 대응 정부 간 협력체
- 한중 대기환경연구센터 ; 2015년부터 중국 CRAES에 한중 공동설립 및 운영 중

□ 시장 동향

- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 분야는 사회문제 해결에 초점을 둔 공공 영역의 역할에 포함되는 특성을 지니고 있어 시장 동향의 파악 의미는 크지 않음
 - 미세먼지는 시장 수요와 공급 차원이 아닌 사회적 수요와 공급 차원에서 이해할 필요가 있다는 점에서 미세먼지에 대한 사회적 관심과 요구 파악이 중요함.
 - 다만, 미세먼지와 관련된 정보 서비스 분야에서 부분적으로 민간영역의 참여가 이루어진다는 점에서 관련분야의 시장동향에 관심을 둘 필요는 있음.
 - 그에 반해 공기청정기 시장의 급성장은 미세먼지에 대한 국민의 높은 불안감과 우려를 반영하는 것임.
 - ※ 공기청정기 판매량: 250대(014년) → 87만대(2015) → 100만(2016) → 150만대(2017년) → 200만대(2018년 예상치)(한국과학기술정보연구원/업계 추산, 뉴스핌(2018. 2. 28)에서 인용)
- 미세먼지는 시장 수요와 공급 차원이 아닌 사회적 수요와 공급 차원에서 이해할 필요가 있다는 점에서 미세먼지에 대한 사회적 관심과 요구 파악이 중요함
- 그러나 사회적 관심과 건강중요도로 볼 때 미세먼지 정책과 정보가 정보통신기술과 융합할 경우 4차 산업혁명에 선도적인 분야로 폭발적인 시장형성이 기대
- 환경부는 환경 분야 빅데이터 플랫폼 구축을 2020년까지 계획하고 있음

□ 정부 R&D 투자 (2018년 기준 전체 R&D 중 1.7% 투자, 9위/10위)

- 2016년에 4.3억원, 2017년에 14.9억원으로 크게 증가하다, 2018년에는 10억 수준으로 감소
- 2016년의 경우 환경부가, 2018년에는 과학기술정보통신부가 전체 투자 규모의 100%를 차지함.

□ 투자 방향

- 아직까지 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역의 투자는 중앙정부의 정책추진기반 연구 마련을 위한 top-down 차원에서 추진됨
 - 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역의 성격과 사회적 관심을 고려할 때 정책 목표와 방향의 설정, 정보서비스를 수요관점, bottom-up 차원에서 추진 필요.
- 정책 및 정보 서비스 투자가 타 영역인, 영향평가. 배출저감 분야의 결과 활용이나 R&D방향을 지원하는 하위 기술과 투자 요인으로 인식되고 있음
 - 정책방향 설정, 이를 바탕으로 한 미세먼지 배출과 노출저감과 그 성과의 확산, 사회적 지원을 연계하는 능동적 정보서비스 투자전략 필요.
- 현재 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역의 기술역량이 선진국대비 60% 수준이며 기술격차가 4년
 - 위험 의사소통 기전에 대한 기초연구 부족, 정보의 부족, 정보 통합 분석 및 서비스체계 미흡, 정보의 신뢰도 부족 등에 따른 기술역량 문제를 조속히 해결할 투자 방향 필요.
- 미세먼지 관련 정책 및 정보 서비스 영역의 성격을 고려할 때 정책 목표와 방향의 설정, 정보서비스를 위한 수요관점의 연구는 부족한 상황임.
- 많은 경우 정보서비스투자 결과가 단순한 농도 위주의 단편적 정보 제공으로 국민적 불안과 눈높이를 해소하기에 역부족
 - 사회적 관심과 위험에 대응하는 맞춤형 서비스 발굴과 투자가 절실함.
- 국민과 이해당사자의 참여가 미흡하여, 수립된 정책의 정당성과 타당성에 대한 논란이 지속되고 있음
 - 미세먼지 등의 환경 관리 정책 수립, 시행에는 국민, 이해당사자 등의 공중(public)의 참여를 통해 국민의 불안을 최소화하고, 수립된 정책의 정당성을 확보할 투자 방향이 필요함.
- 미세먼지 등 대기오염의 외부 기여율 분석에 양자간 합의가 어려운 정부주도 연구와 단편적 연구결과 위주의 평가로 인한 신뢰도와 하락
 - 국제협력 모델에 대한 기반한 기초 - 활용 연구와 민간차원의 국제협력을 통해 장기적인 신뢰도 구축을 위한 투자 필요.

- 정보서비스 분야가 현재는 정부 주도형 사업 일변도로 정보의 확산, 산업화를 위해서는 민간 차원의 연구와 서비스개발이 시급히 필요
 - 미세먼지 자료의 활용, 서비스 확산에 민간참여를 위한 투자의 방향설정 필요.
- 미세먼지의 외부유입기여율을 중국과의 협력으로만 해결하려는 입장
 - 북한을 포함한 동북아지역 국가 참여의 다국적 공동연구와 국제기구를 통한 국제적 연구 협의체 구성을 통한 연구의 신뢰도와 책임성 확보.
- 지금까지는 미세먼지만을 대상으로 한 국제 공동 연구와 협력 추진
 - 에너지, 기후, 생태 등의 종합적인 차원의 문제 접근과 협력을 위한 투자 필요.

□ 공백기술

가. 동북아 기후 및 대기오염 공동연구를 위한 동아시아 (북한포함) 민간전문가 연구협력체

- 본 공백기술은 정책 및 정보서비스 분야에서 크게 떨어진 기술격차와 사회적 수요를 적기에 대응하기 위해 지금까지 정부주도, 단순한 대중 양자 협력모델에서 발전된, 사회적 요구 및 수요자 맞춤형, 에너지 기후를 포함한 세계적으로 공신력을 제고할 수 있는 능동적 국제연구 협력 투자모델을 제시하여 미세먼지의 공신력이 있는 외부 영향 및 기여도 제시가 가능
- 제안된 공백기술의 핵심은 학술적 자유도가 매우 떨어지는 기존의 정부 간 국제협력연구의 틀에서 탈피하여 민간 전문 연구 플랫폼을 지향하는 대기환경연구협력체의 구성과 운영이며 이를 통해 미세먼지 뿐만 아니라 세계적 대기환경 협력기구의 인증아래 대기환경, 에너지, 기후, 생태, 대민 소통 등의 과학적 분석 및 지원 위한 기초, 원천과학기술이

며 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 9 참조

나. 미세먼지 문제 해결을 위한 정책 결정 및 소통 지원 시스템 개발

- 국민적 관심도가 높은 사회현안인 미세먼지 문제 해결을 위해서는 과학 기술 R&D외에 이에 근거한 정책 수립·이행과 사회적 소통을 위한 사회경제 측면을 고려한 융복합 기술 개발 필요
- 미세먼지 문제는 에너지, 사회구조와 밀접하게 연관되어 과학적 원인규명 및 현상 진단 등을 위한 기술개발 R&D 외 사회경제 측면을 고려한 융복합적 접근을 고려
- 과학기술 기반의 원인 및 현상 규명, 저감 기술 뿐 아니라 사회경제적 여건을 반영한 통합적 영향 관리를 위한 의사결정 지원 시스템 구성
- 미세먼지 문제 해결은 한 가지 대책으로는 불가능하며 여러 부문의 대책 및 노력을 융합하여 다양한 부문의 대책 및 기술에 대한 다양한 정보 및 데이터를 종합해 우선순위 및 효과 평가를 위한 정책지원 시스템 개발 목표
- 상세내용은 5 장과 별첨의 공백 기술 10 참조

▶ 공백 기술 달성시 국외 미세먼지 기여율의 신뢰도 2017년 현재 $\pm 15\%$ 를 2022년까지 $\pm 12\%$, 2025년까지 $\pm 10\%$

▶ 공백 기술 달성시 미세먼지를 포함한 기후, 생태, 에너지의 국제협력 플랫폼 기능

▶ 공백 기술 달성 시 향후 미세먼지 저감 목표 달성을 위한 단계적 R&D 개발 목표 및 우선

순위 선정 가능

- ▶ 미세먼지 저감 정책 및 기술에 대한 수요자와 공급자간 소통 강화로 정책의 수용성 제고 가능

V. 추진 방향 달성을 위한 공백기술 또는 필요기술

1. 시급성, 중요성, 파급효과 별 우선순위 도출

- 미세먼지 기술 R&D 중분류상 모든 분야의 시급성, 기술역량, 파급효과 지수가 10 분위 중 모두 6-7 이상 값을 나타내어 각 중분류에서 적어도 1 건 이상의 기술도출이 필요함
- 중분야별 기술 중요성과 시장 활성화도에 편차가 커서 이들 점수로 전체 중분야별 우선순위가 좌우됨. 이들 요소는 진행 중이거나 계획된 부처별 미세먼지 R&D 에 이미 핵심지표로 반영되어 본 연구에서 목적하는 공백기술 우선순위 지표로 산정하는데 부적절함
- 이에 본 연구에서는 중분야별 우선순위의 반영은 시도하지 않음. 그러나 위험관리모델에 기반한 R&D 투자 방향에 따르면 목표 달성을 위해 선행적으로 지원할 분야와 시급성을 반영할 분야가 정해지는데 이를 근거한 우선순위의 추가 조정이 합리적으로 수행될 수 있음
- 다음 장에 공백기술로 확인된 중분야별 기술 내역이 간략히 정리되어 있으며 상세 내용은 별첨에 붙임

2. 공백기술 1. 지역맞춤 미분류 배출원 규명

- 국내 미세먼지 생성연구는 고농도생성에 대한 것으로 연구와 관심은 주로 수도권(주로 인구 밀집된 도심지역과 인근 산업지역)을 중심으로 하는 연구가 진행.
- 그러나 실제 전국 규모에서의 측정결과와 고농도 상황은 서울과 수도권, 경기, 충남과 함께 전북지역 등지에서도 심각한 수준으로 나타나고 있음. 특히 2016년의 경우 PM_{2.5}는 오히려 서울과 수도권에서 보다는 높게 나타나 해당지역민의 우려가 높아짐. (관계부처합동, 2017).
- 지역기반 주요생산시설과 농축산업 또는 지역여건 등 수도권과는 상이한 전구물질배출환경 특성에 따른 오염원배출 특성연구를 통해 지역 미세먼지 생성에 기여하는 요인들을 규명하는 연구의 필요성 요구됨.

핵심 목표

- ▶ 농업, 축사, 산림, 생물성 연소, 비산먼지, 자동차 NO/NO₂/NH₃배출계수 개발
- ▶ 지역 배출 미세먼지 전구물질 (SO₂, NO_x, VOCs) 배출 특성 분석

□ 과제 추진형태 : 총괄과제로 다음과 같은 세부과제의 형태로 수행

- 지역 환경 특성에 따른 미세먼지 오염원 규명
 - 1-1 생활성 연소, 농업지역 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
 - 1-2 축산농업 지역 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
 - 1-3 산림지 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
 - 1-4 자동차에서 배출되는 비산먼지, 암모니아 현황 및 대기환경에 미치는 영향 분석
- 이상의 4개 세부과제로 구성

□ 지원 기간 및 예산

- ※ 지원기간은 5 년으로 구성
- ※ 예산은 총액 및 1차 년도에 대해 제시
 - 기간 : 1단계 3년 (6억/년)
 - 예산 : 총액 30/5년

□ 현재 기술 수준 및 목표 설정

- 각 분야 현재 기술 수준은 최종목표 기준 평균 20% 수준으로 판단됨
- 1 단계 수행 후 현재 수준을 평균 최종목표 대비 40~50% 수준으로 향상.
 - ▶ 지역 주요 발작물에서의 NO/NH₃ 배출계수 개발
 - ▶ 축종별 축사환경에서의 NH₃ 배출계수 개발
 - ▶ 산림지표에서의 VOCs, NH₃/NO 배출계수 개발
 - ▶ 자동차에서 배출되는 암모니아 현황 및 대기환경에 미치는 영향 분석

□ 연구방법 및 내용

- 농축산, 산림분야 연구내용
 - 지역 주요 발작물의 선정; 지역행정 단위 기준 가장 재배면적이 넓은 발작물을 우선 선정하고, 해당 작물 대상으로 하여 밭 경작지 실험과 실내조절 실험을 병행연구.
 - 산림지역의 경우 역시 산림배출 자연VOCs와 산림지표에서의 NO_x배출과 미세먼지생성,

오존량 변화 측정연구.

- 산림VOC와 산림 내 NO_x 등 2차 미세먼지 전구물질 측정과 생성물 발생량 영향조사.
- 외부유입과 더불어 한반도 내의 장거리 이동에 따른 고농도미세먼지의 영향권 내에서 풍하 측에서 가중된 오염도 조사와 배출영향연구. .
- 산림지역은 항시측정 지점설치에 따른 장기간 측정계획이 필요하며, 지역내 주요 산림군락을 이루며 측정관리가 가능한 국가관리 산림 중 한 곳으로 선정하여 지속적인 자료생산.
- 측정방법 : 플릭스챔버, 연구기간 중 NO/NO₂/NH₃의 경우 flow-through dynamic flux chamber system 제작하고 활용함.
- 연속NO/NH₃농도분석장치: 화학발광법 적용.
- 플릭스챔버방식에 의한 지표 NO_x/NH₃플릭스 측정.
- 측정항목 : 실측기간 선정 후 실제 농작지토양의 물리화학 특성과 주변 기상상태 조사 분석 (기본측정항목: soil moisture, soil temperature, soil N).

3. 공백기술 2. 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지 정밀 추적 및 노출평가

- 대기확산모델 분석, 화학성분 분석 및 수용모델분석을 통한 기존의 여러 대기오염 배출 기여도 산정 방법은 전반적인 규모에서 대기오염의 이동과 영향을 설명하는데 유용하지만 특정 배출원과 배출 지역의 상세하고 정확한 기여도를 산정하는 것은 거의 불가능함
- 가장 큰 이유는 국외의 배출원과 배출활동에 대한 정보가 매우 미흡하고 전구물질들로부터의 미세먼지 생성 기작이 비선형적이기 때문임
- 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 방법이 장거리 이동 중에도 배출원이나 배출 지역의 특성이 변하지 않아 수용지역에서 추적할 수 있는 화학적, 생물학적 지문 정보와 감시체계를 마련하여 활용하는 것임
- 이에 본 연구에서는 특정 산업과 지역에서 배출 후 화학적 반응이 거의 발생하지 않고 극미량에서도 분석이 가능한 할로젠화합물, POPs와 미생물학적 유전정보를 이용한 추적자를 발굴하고 이를 적용하여 동북아시아의 지역별, 산업별 대기오염의 기여와 노출 영향을 평가하고자 함

핵심 목표

- ▶ 미세먼지 중 화학적, 생물학적 정보의 실시간 측정시스템 개발 및 활용
- ▶ 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동북아시아 미세먼지의 정밀 추적 및 노출 평가

과제 추진형태 : 총괄 및 국제 공동연구

지원 기간 및 예산

○ 예산 : 총 예산

구분	합계	1 단계			2 단계			
		2019년 (1차년도)	2020년 (2차년도)	2021년 (3차년도)	2022년 (1차년도)	2023년 (2차년도)	2024년 (3차년도)	2025년 (4차년도)
연구비(억원)	70	10	10	10	10	10	10	10

연구방법 및 내용

○ 1 단계:

▶ 발생원의 화학적 지문(기체상 및 입자상 할로겐 화합물) 작성 기법 개발 및 정보 구축

- 1) 산업별, 지역별 기체상 할로겐 화합물의 정보 구축
 - 배출 시설 및 지역에서 CFCs, HCFC, HFC, PFCs 지문 확보
 - 기체상 할로겐 화합물 emission inventory 구축
- 2) 유기할로겐 계열의 POPs 지역별 지문 구축
 - 배출 시설 및 지역에서 HCHs, PCBs, PCDD/F 지문 확보
 - 입자상 할로겐 화합물 emission inventory 구축

▶ 바이오미세먼지 실시간 모니터링 및 생물정보 분석 기술 개발

- 1) 바이오미세먼지 고농축 포집 기술 개발
- 2) 고속 생균콜로니 탐지시스템 개발
- 3) 바이오미세먼지 내 유해생물학적 물질 DB 기반 고속 PCR 탐지기술 개발
- 4) 단백질 기반의 바이오미세먼지 내 미생물 실시간 동정 시스템의 개발

- 2 단계: 종합 화학적 지표종 실시간 모니터링을 이용한 미세먼지 기여율 산정
 - 1) 할로젠 화학 지표종 분석을 통한 발생원 기여율 산정
 - 2) 통합적 화학 지표종 분석을 통한 발생원 기여율 산정

바이오미세먼지 실시간 모니터링 및 생물정보를 이용한 미세먼지 기여율 산정

- 1) IoT 기반 운영시스템 최적화 및 현장 적용 연구 수행
- 2) 미세먼지상의 유전정보와 인공지능(AI) 기반 제어시스템 통합 운영기술 개발

4. 공백기술 3. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성평가

미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 이차입자 생성특성 연구

- 중형 스모그챔버를 이용한 장거리이동에 의한 영향 규명
- 실제 대기시료를 이용한 이차입자 생성 규명
- 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 모사 대기 연구

저감 대책 수립을 위한 주요 배출원 이차입자 생성특성 규명

- 이동형 소형 스모그챔버를 이용한 배출원 특성 규명

이차생성 미세먼지 유해성 평가

- 흡입노출 평가용 노출챔버를 이용한 건강영향 평가

핵심 목표

- ▶ 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 이차입자 생성특성 연구
- ▶ 저감 대책 수립을 위한 주요 배출원 이차입자 생성특성 규명 및 유해성 평가

과제 추진형태 : 총괄

- 본 연구는 (1) 실제 대기를 대상으로 미세먼지 생성 핵심인자를 규명하는 연구와 (2) 주요 배출원 이차입자 생성특성 연구, (3) 미세먼지 유해성 평가의 3가지 큰 주제로 구성되

어 있으며, 연구 항목별로 구분된 단위 과제들로 구성된 총괄과제로 추진하는 것이 효율적인 것으로 판단됨.

□ 지원 기간 및 예산

- 기간 : 총 7년 (1단계 3년+2단계 4년)
- 예산 : 총 160억(이동형챔버 구축비용 25억 포함), 1차 년도 25억

□ 연구방법 및 내용

○ 1단계 목표 및 연구 내용

- 목표 : 실제 대기 및 다양한 미세먼지 생성 시나리오를 구성하여 고농도 미세먼지 생성을 모사함으로써 실제 대기 중 미세먼지 생성 핵심인자를 규명하기 위한 과학적 자료를 확보함
- 연구 내용
 - 현재 수행중인 프로젝트를 통해 구축 예정인 중형 스모그챔버를 활용하여 장거리유입 및 장거리유입+국내정체의 영향을 규명함.
 - 스모그챔버 및 흐름반응기를 활용한 이차입자 생성 및 변환 실험 :
 - 이차입자 성분의 상세 화학분석 및 화학반응 메커니즘 규명 :
 - 물리화학적 특성 평가(상분배, 흡습성, 상분리, 점성도) :
 - 한국형 미세먼지 예측모델에 적용 가능한 입자생성 모듈의 모수 개발 :
 - 이동형 소형 스모그챔버와 Mobile Laboratory를 연계하여 배출원 현장에서 이차입자의 생성을 모사할 수 있는 시스템을 구축함.
 - 이차생성 미세먼지에 의한 흡입노출 유해성을 평가하기 위해 flow reactor와 균일한 농도로 전신노출이 가능한 동물노출챔버로 구성된 미세먼지 흡입노출 평가시스템을 개발함.

○ 2단계 목표 및 연구 내용

- 목표 : 이동형 스모그챔버 시스템을 활용하여 배출원 현장에서 미세먼지 이차생성을 모사하며, 기존 소형 및 중형 스모그챔버와 연계하여 주요 배출원별 저감 대책 수립을 위한 핵심 자료를 제공함. 또한 이차생성 미세먼지 흡입노출에 따른 유해성 자료를 생산하여 저감 대책 우선순위 도출에 활용함.
- 연구 내용
 - 1단계에서 구축한 이동형 스모그챔버 시스템을 활용하여 주요 배출원 현장에서 미세먼지의 이차생성을 모사함.
 - 1단계에서 개발한 이차생성 미세먼지의 발생장치 및 동물 전신노출챔버를 이용하여 미세먼지 주요 화학조성별로 노출실험을 수행하고 노출된 동물을 해부하여 호흡기, 심장, 뇌조직, 망막 등 생체기관의 병리현상 연구를 수행함. 건강위해성뿐 아니라 저감 대

책의 우선순위 도출을 위한 기초자료로 활용하고자 함.

5. 공백기술 4. 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발

□ 연구의 필요성

- 대기질 모사는 관측 자료와 함께 배출량과 농도의 정량적 관계를 이해하고, 배출량 변화에 따른 농도 변화를 예측에 활용됨.
- 국내에서도 대기질 모사 시스템 개선 연구가 우선적으로 진행되어야 하며, 이를 위해서는 대기질 농도가 재현되는 요소인 대기질 모델 외에 주요 입력 자료인 기상과 배출량 자료에 대한 종합적인 불확도 평가와 개선이 요구됨.
- 미세먼지의 예측성은 연평균 농도와 고농도 사례 시 모두 농도 예측이 중요하나, 국민의 눈높이 관점에서는 고농도 사례에 대한 예측성을 높일 수 있는 방안 모색이 필요.

□ 주요 연구내용

- 동북아 및 국내에서의 미세먼지 모사 개선을 기본 시스템 마련 및 지속적 개선을 위한 보완점 제시. 구성 요소인 기상, 배출량, 대기 화학수송*로 구분하여 접근.
 - * 연구 진행은 모델 개발이 아닌, 대기질 모사 차원에서 모듈 검토 및 최적화로 진행. 실질적인 기상 및 배출량 개선은 별도 과제에서 추진.
 - 고농도 미세먼지 예측성 향상을 기상모사 최적화: 이동 경로 및 패턴 정립, 고농도 발생 시 기상요인, 이동 경로 (수평, 수직) 에 따른 농도 및 구성성분 변화, 복잡한 해안가에 점오염원에 대한 고려, 토지피복도와 지형 최신화, 풍향, 기온 등 기상 조건이 미세먼지 농도 및 성분에 미치는 영향 분석, 복잡한 해안선 및 지형 효과.
 - 고해상도 시공간 배출량 자료 활용: CleanSYS 등 실시간 고해상도 배출 자료 활용, 지역 배출량, 변화 추세, 계절별/일별/시간별 변화, 기상요소 적용, 기존 상향식 배출목록에 대한 평가, 중국 등 동북아 지역의 배출량 변화 추세를 고려한 위성 등 관측자료 기반의 상향식 배출량 추정기법 활용, 암모니아 등 배출량 평가.
 - 지역별 고농도 발생원인 분석 시스템: 고농도 시 배출현황 적용을 통한 분석 시스템 마련, 국내 미세먼지 농도의 계절적 변화와 생성-성장의 중요도 분석, 계절별 농도 변화의 주요원인, 장기 모사 수행에 따른 계절별 주요 농도 원인물질 생성 및 이동 해석, 국내외 (중국, 북한 등) 기여도 고도화, 주요 물질별 유입량 및 전환율 변화, 동북아 배출 특성에 맞는 미세먼지 생성 및 성장 가설 제시, 기준 강화에 따른 효율적인 관리 수단 등.
- 기본적인 대기질 모사 플랫폼이 마련되면 대기질 모사를 통해 고농도 미세먼지 발생 시 동북아 및 국내 거동과 관련된 이해 증진을 위해 다양한 진단 도구를 활용 가능. 연구 초기에는 개선점 도출에 활용

- * 진단도구는 기본적인 농도 모사 외에 농도가 생성되는 과정이나 기여도 분석을 위한 방법으로 크게 민감도 (Sensitivity) 방법과 표식자 (Tagging) 방법, 과정 분석 (Process Analysis), DDM (Direct Decoupled Method) 등이 있다.

□ 활용방안

- 중앙 정부 및 지자체에서의 국가 간, 지역 간 미세먼지 등 대기오염물질 거동 분석: 농도 및 기여도
- 지역 배출 특성을 고려 가능한 대기질 모사 기본 플랫폼 마련
- 권역별 기여도 분석을 통한 고농도 시 원인 분석 등

□ 지원 기간 및 예산

- 기간 : 총 7년 (1단계 4년+2단계 3년)
- 예산 : 총 80억, (단계별 1차 년도 15억)

6. 공백기술 5. 중소형 사업장 및 비도로 이동오염원 미세먼지 배출 저감 방안

□ 연구 추진 배경

- 현재 사용되고 있는 SCR 촉매는 국내기술의 부재로 인하여 비싼 값에도 불구하고 전량 수입에 의존하고 있어 국산화 필요성이 지속적으로 제기됨. 그러나 독자적인 SCR 촉매 개발을 위해서는 촉매의 핵심소재인 제올라이트의 혁신적인 개발이 선행되어야 함.
- 따라서 연구개발 과제를 추진하여 실제 운전조건에서 배기가스 제거 성능이 우수한 제올라이트 기반 SCR 촉매의 원천기술을 개발할 필요가 있음. 개발된 촉매의 물리·화학적 성질을 최적화하여 지속적으로 엄격해지는 배출규제에 탄력적으로 대응하여야 함.
- 또한 중소규모 고정오염원은 전국적으로 산재되어 있고 측정 및 관리의 사각지대에 있으며 적용 가능한 적정 제어기술도 부재한 상태임. 중소규모 고정오염원은 대기오염 배출에 대한 인식이 부족하고, 고가의 장비의 설치와 운영에 한계가 있으며, 전문적인 관리인에 의한 최적 운전이 어려우며, 소규모 시설에서 빈번히 나타나는 비정상 운전이나 급격한 변동부하에 대응하는 능력이 떨어지는 문제가 있음.
- 이에 중소규모 고정오염원에서 배출되는 NOx 제어를 위한 친환경 촉매 환원기술을 국산화하고 경제성과 현장 적용성을 확보할 필요가 있음. 또한 배가스 자동 측정 장치와 연

제한 스마트 제어기술을 접목하여 측정과 관리의 한계를 극복하고, 비정상 운전 조건에서도 대응할 수 있어야 함.

핵심 목표

- ▶ 새로운 구조 및 조성을 갖는 제올라이트 지지체 합성
- ▶ 저온의 높은 NO_x 제거 성능과 고온 내구성이 우수한 질소산화물 저감 촉매 제조
- ▶ 중소규모 고정오염원에 적용 가능한 촉매 설계 및 NH₃-SCR 시스템 개발
- ▶ 자동 배가스 측정 장치와 연계한 스마트 제어기술 현장적용

□ 과제 추진형태 : 3개 세부연구진으로 구성된 연구단 형태의 공동연구

- 새로운 구조의 고효율/고내열성 SCR 촉매 소재 원천기술 개발
 - 신규 구조와 조성을 갖는 제올라이트 소재를 제안하고 필요한 원천기술 개발.
- 저온의 높은 NO_x 제거 성능과 고온 내구성이 우수한 질소산화물 저감 촉매 제조
 - 구리를 담지한 CHA 촉매를 비롯한 다양한 종류의 작은 세공 제올라이트를 합성하여 SCR 반응의 저온 성능과 고온 수열 안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 촉매 개발.
 - SCR 반응의 활성이 높은 금속산화물 담지 다공성 티타니아 촉매에 반응 활성과 안정성을 향상시킬 수 있는 조촉매나 증진제를 추가로 담지하여 성능이 개선된 금속산화물 촉매 개발.
- 중소규모 배출원에 폭넓게 적용 가능한 SCR 시스템 현장적용 및 능동제어
 - 오염원의 종류, 배출 가스의 특성, SCR 정화 시스템 운전 조건 등을 동시에 고려하여 각 용도에 맞는 최적화된 SCR 시스템 설계 및 현장적용
 - IoT에 기반 한 능동제어 기술을 현장용 SCR 시스템과 결합하여, 다양한 운전조건에서도 고효율을 달성할 수 있는 현장기술 완성

□ 지원 기간 및 예산

- 기간 : 2019 ~ 2025년 (7년)
 - 1단계 : 2019 ~ 2021년 (3년) 원천기술 확보
 - 2단계 : 2022 ~ 2025년 (4년) 현장적용 및 상용화
- 예산 : 총액 70억원 (1차 년도 10억원)

연구방법 및 내용

- 1단계(3년): 저온 활성과 고온 안정성이 향상된 촉매 개발
- 2단계(4년): 다양한 시설의 배출가스 저감 시스템에 적용하기 위하여 촉매 최적화와 스마트 제어기술 적용

7. 공백기술 6. 도로변, 항구 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출저감 방안 연구

[1] 개요

- 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발
- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발
- 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발
- 기존 과제와의 차별성 및 시사점

< 기존 R&D와의 차별성 분석 >

본 R&D 사업	기존부처 R&D	차별성
<ul style="list-style-type: none"> - 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발 - 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발 - 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 추진된 연구사례가 없음 - 대도시 도로변 도로오염 현황 측정 및 분석을 환경부 사업으로 부분적으로 진행하였음 - 해수부에서 사업 타당성 기획연구 시행 	<ul style="list-style-type: none"> - 운행차의 배출가스 실시간 관리와 정기검사 체계 획기적 개선에 활용 - 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지에 대한 종합적인 분석과 정책 수립에 활용 - 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감을 위한 종합적인 대책 수립

핵심 목표

- ▶ 운행차 배출가스 관리기술 개발 및 시스템 운영
- ▶ 자동차 나노미세먼지(50nm) 현황분석과 관리정책 수립
- ▶ 연근해 선박(어선)의 미세먼지 저감 대책 수립

과제 추진형태 : 총괄

지원 기간 및 예산

○ 예산 : 총 예산

구 분	합 계	1 단계			2 단계			
		2019년 (1차년도)	2020년 (2차년도)	2021년 (3차년도)	2022년 (1차년도)	2023년 (2차년도)	2024년 (3차년도)	2025년 (4차년도)
연구비(억원)	170	10	10	10	40	40	30	30
- 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발(5개 세부과제)	64	4	4	4	15	15	11	11
- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발(3개 세부과제)	42	2	2	2	10	10	8	8
- 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발(2개 세부과제)	64	4	4	4	15	15	11	11

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발
- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50 nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발
- 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진 개발

실증방안

- 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발
- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50 nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발
- 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신 엔진 개발

8. 공백기술 7. 고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구

고농도 미세먼지 성분 특성 조사 및 유해성 평가

- 시기별, 지역별 고농도 미세먼지 발생 시 성분 특성 조사
- 고농도 미세먼지의 독성 평가 (in vitro/in vivo)

고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출평가

- 지역별, 권역별 고농도 미세먼지 노출평가
- 시간활동 반영 다양한 인구그룹 별 (민감군/취약군 포함) 인체노출평가
- 인구 특성 별 고농도 미세먼지 노출저감 방안 마련

고농도 미세먼지-질환 역학 연구 및 위험인구 파악

- 고농도 미세먼지의-질환 연관성 분석
- 고농도 미세먼지의 건강영향 위험인구 도출

고농도 미세먼지 발생의 건강영향 최소화 방안 마련

핵심 목표

- ▶ 고농도 미세먼지 발생 사례의 유해성 평가, 인체노출평가, 역학 연구에 기반한 건강영향평가
- ▶ 고농도 미세먼지 발생에 의한 국민 건강영향 최소화 방안 마련

과제 추진형태 : 총괄

지원 기간 및 예산

- 기간 : 3년
- 예산 : 50억(1차 년도: 15억)

연구방법 및 내용

○ 고농도 미세먼지 성분 특성 파악 및 유해성 평가

- 실제 고농도 미세먼지 발생 사례의 유형(시간, 공간 특성 반영)을 분류하고, 유형별 특성(화학적 조성, 물리적 특성 등)을 파악
- 고농도 미세먼지의 독성(in vitro/in vivo) 평가.
- 심혈관질환, 호흡기질환, 알레르기질환 등에 대한 고농도 미세먼지-질환영향 임상연구 (단 임상연구는 한 가지 이상 포함)

○ 고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출평가

- 다양한 인구그룹(지역별, 사회계층별, 연령별 등)에 대한 시간활동 반영 인체노출평가
- 민감군/취약군 포함. 민감군의 경우 심혈관질환, 호흡기질환, 알레르기질환 등 한가지 이상 환자군 포함 실제 고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출을 평가. 또한 고위험 노출군(취약군)에 대한 실제 인체노출평가*
- 민감군/취약군 고려 고농도 미세먼지 사례시 노출저감 최소화 방안 제시

* 고농도 사례 시 민감군/취약군의 도로 이동 중 노출, 실외 근로자(예, 건설현장 근로자, 톨게이트 수금원 등)의 실제 인체노출을 고려하여 평가할 것

○ 고농도 미세먼지-질환 역학 연구 및 건강영향 최소화 방안 마련

- 고농도 미세먼지 노출-질환 연관성 분석 및 노출 반응 함수의 파라미터 도출*
- 고농도 미세먼지 노출의 국민 질병부담(Burden of disease) 산정
- 고농도 미세먼지의 건강 위험인구 도출 및 취약성 분석

- 고농도 미세먼지의 건강영향을 최소화하기 위한 피해 저감 방안 제시

* 국민건강보험공단 빅데이터 등을 활용하되, 심혈관질환, 호흡기질환, 알레르기질환 등을 포함

9. 공백기술 8. 고농도 미세먼지 사전대응 능동관리형 노출저감 방안

미세먼지 고농도시기 미세먼지 노출을 예방적으로 최소화 절실

- 고농도 미세먼지 발생 예보 시 사전에 미세먼지의 배출저감을 위한 대응과 실행 방안 마련이 고농도 발생을 최소화하는 방법
 - 미세먼지 배출시설의 운영 축소, 연료전환, 자동차 운행억제 등 능동적 배출 최소화 방안 마련이 필요 .
- 다중이용시설은 전 국민의 생활공간으로 자리매김하고 있으며, 특히 지하상가, 대형 쇼핑몰, 대심도 지하터널 등은 매일 생활하는 공간임
- 근래에 사회적 문제로 대두된 미세먼지 농도 증가는 다중이용시설 내부의 공기질에 영향을 미치는 중요한 요인이 될 수 있으나, 다양한 기술적 문제점으로 인하여 공기의 쾌적성 확보에 어려움을 겪고 있음.
 - 지하공간과 같은 다중이용시설, 학교, 어린이집 등을 대상으로 하는 시설들에 대한 공기의 쾌적성 확보에 대한 방안은 상대적으로 엄격하지 않음.
 - 다중이용시설에 대한 미세먼지 저감 기술 확보, 측정과 예보 인프라 확보는 매우 시급함.

핵심 목표

- ▶ 고농도 미세먼지 발생 예보 시 사전 대응 및 정책 구현 방안 마련
- ▶ 고농도 미세먼지 발생 시 다중이용시설에서 재실자 및 이용자의 (초)미세먼지 노출저감

과제 추진형태 : 단위, 국제공동 연구

지원 기간 및 예산

- 기간 : 2023.4~2025.3
- 예산 : 총액 (80억원), 1차 년도(20억원)

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 현재는 고농도 미세먼지 발생 시 적용할 수 있는 전략 및 기술의 부재
- 현재 운영 중인 미세먼지예보의 정확도가 낮아 사전 대응이 어려우나 2022년 예보정확도가 75% 이상을 도달할 경우 적극적인 사전적 조치가 가능
- 현재는 저가의 미세먼지 측정 센서로 농도를 측정해서 환기 및 공기질 제어에 활용하는 수준임

□ 연구목표

- 고농도 미세먼지 발생 예보 시 2-3일전에 종합적인 예방적 배출 최소화 정책을 적용하여 발생 농도 수준을 낮추어 고농도 노출저감 실현
- 고농도 미세먼지 발생 시 인공지능 기반 다중이용시설 미세먼지 농도 예측 및 저감 - 미세먼지 예측신뢰도 80% 이상

□ 연구방법 및 내용

- 고농도 미세먼지 발생 예보 시 사전 대응 방안 마련
 - 고농도 발생 시 배출저감 최적화 방안 도출(배출원별 저감 방안 제시, 비용편익분석 등)
- 고농도 미세먼지 발생 시 다중이용시설에서 재실자 및 이용자의 (초)미세먼지 노출저감
 - 인공지능 기반 다중이용시설 미세먼지 농도 예측 기술
 - 고농도 미세먼지 발생 시 인공지능 기반 다중이용시설 최적 공기질 제어기술 개발

□ 실증방안

- 미세먼지 예보 수준과 사전 대응 후 관측 수준의 차이를 통한 성과분석
- 예측된 미세먼지 농도 값을 이용해서 환기시스템을 가동하여 기술 적용 전과 후의 효과를 비교하여 미세먼지 저감 효과를 평가함

10. 공백기술 9. 동북아 기후 및 대기오염 민간전문가 연구 협력체

□ 기존 대기 오염 기여도 평가의 한계

- 제한적 수준의 정부 간 합의 기반
 - 정부 간 합의의 특성상 장기간 소요

- 주로 과거 사례위주로 시의성 결여
- 부정확한 국가별 과거 배출원과 배출활동도 사용으로 신뢰도 부족
- 민간 차원의 국제적 전문협력 부족
 - 장기적인 민간 전문 연구 협력 플랫폼 부재
 - 동아시아 국가의 주도적인 국제협력 부족
- 대기환경문제의 단편적 접근
 - 장기적이고 종합적인 민간 전문 연구 협력 부족
 - 미세먼지 등의 이슈를 대기환경, 기후, 생태, 정책, 소통 등을 포함한 종합 분석 부족

□ 동아시아 대기환경연구 플랫폼의 역할

- 동아시아국가 (한, 북한, 중, 일, 몽고 등) 민간 전문가 주도의 국제 협력프로그램
 - 대기오염 및 기후변화 연구의 주도적 국제 역할 수행
 - 과학적이며 신속한 대기환경문제의 공동 분석 및 접근
 - 동아시아 국가의 자발적인 국제협력 지향
 - 대기오염, 기후, 생태, 대민 소통 등을 포함한 종합적, 지역적 대기환경 문제 해법 제시
- 대기오염, 기후 영향 및 기여도 연구 결과의 공신력 확보
 - IGAC, iLEAPS, Future Earth 등 국제협력 프로그램에서 인증 추진
 - 공신력 있는 외부영향 및 기여도 제시 가능
 - 종합적인 동아시아환경 협력 및 소통의 모델

핵심 목표

- ▶ 국제적으로 공신력 있는 대기환경 외부 기여도, 영향 분석 및 미래 환경 변화의 중간평가
- ▶ 동아시아 환경 협력의 주도적 역할 수행

□ 과제 추진형태 : 총괄 및 국제 공동연구

□ 지원 기간 및 예산

○ 예산 : 총 예산

구 분	합 계	1 단계			2 단계			
		2019년 (1차년도)	2020년 (2차년도)	2021년 (3차년도)	2022년 (1차년도)	2023년 (2차년도)	2024년 (3차년도)	2025년 (4차년도)
연구비(억원)	80	15	15	15	10	10	10	5

○ 동아시아대기과학센터 설립 추진

- 동아시아국가를 중심으로 자발적인 연구 플랫폼 기반 조성
- 북한을 포함한 동아시아 국가의 대기환경/과학 공동연구 플랫폼 지향

○ 국제공동 연구주제 기획 및 선정

- 기존 국제공동 연구 SWOT 분석
- 미세먼지와 오존 생성의 주요 경로 파악 및 지역별 미세먼지 생성 영향도 정량화
- 대기환경, 에너지, 기후, 생태 등을 포함한 포괄적이며 체계적 연구 우선 지원

○ 국제협력 전문가 참여 및 지원

- 과학적, 객관적 분석의 공통된 이해를 바탕으로 연구협력 공동체 구축
- 장기적인 연구 지원과 결과 도출 지원

○ 국제공동연구 사업으로의 인증

- iLEAPS 또는 IGAC의 인증(endorsement)를 추진
- Future Earth의 인증프로그램으로 추진

○ 전문가 및 대민 소통 마련

- 신진 전문가 지원 및 육성
- 과학적 분석 결과의 소통 지원

- 기존 부처의 중장기 대기환경연구 로드맵과의 연계
- 새로운 여건의 대기환경 연구에서 선도적 역할 수행
 - GEMS 환경위성의 활용 등 새로운 모니터링, 모델기법을 활용한 연구의 발 굴 및 지원
 - 새로운 모니터링 및 추적 기법의 확산 적용

11. 공백기술 10. 미세먼지 정책의 효과적인 집행 방안 및 소통방안

- 국민적 관심도가 높은 사회현안인 미세먼지 문제 해결을 위해서는 과학 기술 R&D외에 이에 근거한 정책 수립·이행과 사회적 소통을 위한 사회경제 측면을 고려한 융복합 기술 개발 필요
- 과학기술 기반의 원인 및 현상 규명, 저감 기술 뿐 아니라 사회경제적 여건을 반영한 통합적 영향 관리를 위한 의사결정 지원 시스템 필요
- 복잡한 초연결 사회에서 국민 불안 해결을 위해서는 국민수요 및 사회적 평가를 고려한 소통방안 마련 필요

핵심 목표

- ▶ 정책 목표 달성을 위해 사회경제 여건, 배출량, 배출저감 정책·기술의 효과 및 비용 등의 복잡하고 다각적 정보를 통합적으로 고려한 정책결정 지원 시스템 개발
- ▶ 미세먼지 정책의 전과정에 걸친 국민 수용성 제고를 위한 소통 체계 개발

지원 기간 및 예산

- 기간 : 2019-2022
- 예산 : 50억

연구방법 및 내용

- 미세먼지 정책·기술의 의사결정 지원 시스템 개발
 - 사회경제 여건 변화 분석
 - 배출량 인벤토리
 - 정책/기술 DB
 - 상세 시공간 모델링
 - 건강영향 분석
 - 사회경제적 영향 분석: 관광, 농업 등
 - 온실가스 저감 등 공편익 분석

- 정책/기술 별 통합적 비용편익 분석
- 정책목표 달성을 위한 최적 정책조합 발굴 시스템 구축
- 미세먼지 정책·기술의 모니터링 및 평가 방법론 개발
 - 미세먼지 정책·기술의 성과 평가 지표 및 방법론 개발
 - 미세먼지 정책·기술의 효과 모니터링 시스템 개발
- 미세먼지 위험관리 단계별 쌍방향 의사소통 시스템 개발
 - 미세먼지 유해위험요인에 대한 정보 의사소통
 - 미세먼지 유해위험요인 노출 정보에 대한 의사소통
 - 미세먼지 위험성 평가 방법 절차 및 결과 정보에 대한 의사소통
 - 미세먼지 위험 대응 방법별 장단점 등에 대한 정보 의사소통
 - 미세먼지 위험 대응 사업에 대한 모니터링 정보 의사소통
 - 미세먼지 위험 대응 사업 결과의 평가 및 사후 개선 방안에 대한 정보 의사소통

12. 과제별 예산규모

- “지역맞춤 미분류 배출원 규명”, “고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구”, “미세먼지 정책의 효과적인 집행 방안 및 소통방안”은 초기 3-5년에 집중 계획
- “고농도 미세먼지 사전대응 능동관리형 노출저감 방안”은 미세먼지예보모델의 정확도가 충분히 담보된 4차년 이후에 진행

VI. 공백 기술 확보를 위한 연차별 계획

※ 공백기술 발굴 및 R&D 추진 방법에 대한 추가 제안

○ 공백기술 발굴지원 및 R&S(Solution)D 개방 플랫폼 구축·운영

- 다양한(국민 및 수요자, 연구자, 기관 간) 협력 플랫폼 구축
 - 기존의 Quirky와 같은 유사한 협업 플랫폼을 구축·활용하여 다양한 아이디어, 현장의 문제점을 수집하고, 기술전문가 등의 기술자문과 해결방안(R&D 계획서, 제안서 등) 제시하고, 사업특성에 따라 정부 지원 또는 투자를 연계하는 형태
- ※ 영국 혁신청(Innovate UK)은 개방형 경쟁 프로그램*을 통해, 다양한 분야의 개발 단계 최신 기술 혁신에 총 1500만 파운드를 지원(`17.6.)
- ※ Quirky(미국)는 발명가와 기업을 연결시켜주는 발명 플랫폼. General Electric, Mattel, Harman and PepsiCo.등의 기업과 파트너 협약
- ※ Seebo(미국)는 IoT 제품 개발을 위한 엔드-투-엔드(End-to-End) 플랫폼
- ※ 와디즈(WADIZ: 한국)는 초기 스타업에서부터 중소기업까지 자금조달 클라우드 펀딩 플랫폼

○ 공백기술 발굴을 위한 대안

- 1) 공백기술 도출 수시 기획 프로그램 및 기술동향조사 확대 및 탄력적 투자 필요

2) 부처간 협업 특히 빅데이터를 분석하여 원천·핵심 특허 확보가 가능한 공백기술을 도출하고 R&D 지원방향 제시(환경산업 협력 매트릭스 구조)

3) 국민생활연구 중점영역 발굴 및 추진

- 수요자 의견 반영 및 현장 사전 적용을 위해 리빙랩(Living Lab)을 적극 활용, 실험·실증 병행

4) 문제해결 중심의 융합 기획을 강화하고, 도전·창의성 중심의 연구 관리·평가제도 개선 및 체계적 연구지원 실시

1. 지역맞춤 미분류 배출원 규명 로드맵

2. 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지 정밀 추적 및 노출평가

3. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성평가

4. 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발

5. 중소형 사업장 및 비도로 이동오염원 미세먼지 배출저감 방안

6. 도로변 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출저감 방안 연구

7. 고농도 미세먼지 사례시 건강영향평가 및 피해저감을 위한 방안 연구

8. 미세먼지 노출저감 기술 방안

9. 동북아 기후 및 대기오염 민간전문가 연구협력체

10. 미세먼지 정책의 효과적인 집행 방안 및 소통방안

참고문헌

- 국립환경과학원, 2017. KORUS-AQ 예비종합보고서.
- 국립환경과학원, 2018. 2018 중국 미세먼지 현황 및 대책, 행정간행물등록번호 11-480523-003134-01, NIER-GP2018-060.
- 국회뉴스. 2016, 리얼미터 미세먼지 여론 조사 결과, 2016.06.02.
- 과학기술정보통신부. 2018, 과학기술을 통한 국민생활문제 해결을 위한 국민생활연구 추진전략(안) 국민 문제 해결형 연구개발사업 필요성.
- 과학기술정책연구원. 2013, 사회문제 해결형 연구개발사업 발전방안 연구.
- 관계부처 합동. 2016a, 미세먼지 관리 특별대책.
- 관계부처 합동. 2016b, 과학기술기반 미세먼지 대응 전략(안).
- 관계부처 합동, 2017, 미세먼지 관리 종합대책.
- 김순태, 배창한, 유 철, 김병욱, 김현철, 문난경, 2017, 수도권 초미세먼지 농도모사: (II) 오염원별, 배출물질별 자체 기여도 및 전환율 산정, 한국대기환경학회지, 33, 377-392.
- 김영욱, 이현승, 장유진, 이혜진, 2015. 언론은 미세먼지 위험을 어떻게 구성하는가?. 한국언론학보, 59(2), 121-154.
- 김영욱, 이현승, 이혜진, 장유진, 2016. 미세먼지 위험에 대한 전문가와 일반인의 인식차이와 커뮤니케이션 단서 탐색. 커뮤니케이션 이론, 12(1), 53-117.
- 김용표, 2016, 대기환경학 2장, 향문사.
- 김유미, 김진영, 이승복, 문길주, 배커남, 2015. 최근 중국의 초미세먼지 오염 연구 동향, 한국대기환경학회지, 31(5), 411-429.
- 김인선, 이지이, 김용표, 2011. 북한 에너지 사용과 대기오염물질 배출 현황, 한국대기환경학회지, 27, 303-312.
- 김정환, 김영성, 한진석, 박승명, 신혜정, 이상보, 김정수, 이강웅, 2018. 국내 기준성 대기오염물질의 권역별 장기 추이 및 원인 분석. 한국대기환경학회지, 34(1), 1-15.
- 녹색기술센터, 2018. 미세먼지 협의체 운영을 통한 R&D 투자모델 개발 연구보고서.
- 배민아, 김현철, 김병욱, 김순태, 2018. 수도권 초미세먼지 농도모사: (V) 북한 배출량 영향 추정, 한국대기환경학회지, 34, 294-305.
- 송길영, 2018. 미세먼지에서 살아남기, 환경재단 미세먼지센터 창립기념 심포지움.
- 안상진, 2018, 과학기술기반 미세먼지 대응 전략 점검: 산업기술 경쟁력 분석, 한국과학기술기획평가원.

여민주, 김용표, 2018. 북한의 생태적자 추이 및 영향요인 분석, 환경영향평가, 27(1), 56-72.

연합뉴스, 2018. "지진·북핵보다 걱정되는 미세먼지"...국민 불안도 1위, 2018.05.14.

에어코리아, 2018, 대기오염물질, <https://www.airkorea.or.kr/airMatter> (2018. 05. 28).

이수철, 2017. 일본의 미세먼지 대책과 미세먼지 저감을 위한 한중일 협력, 자원·환경경제연구, 26(1), 57-83.

일본환경성, 2013. 일본의 PM2.5는 어디에서 오는가. <http://www.env.go.jp/council/07air-noise/y078-2/mat-03/%E8%B3%87%E6%96%99%EF%BC%93%E3%80%80%E8%B6%8A%E5%A2%83%E5%A4%A7%E6%B0%97%E6%B1%9A%E6%9F%93%EF%BC%88%E9%87%91%E8%B0%B7%E5%A7%94%E5%93%A1%EF%BC%89.pdf> (2018. 06. 05).

일본환경성(環境省水・大気環境局大気環境課). 2015. 대기 오염 대책에 관한 국제협력(大気汚染対策に関する国際協力について).

일본환경성, 2018. 헤세이 27년도(2015) 대기 오염 상황, https://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h27/full_h27.pdf (2018. 06. 05).

전소현, 김용표, 2015. 중국의 스모그 저감 정책에 대한 고찰, Particle and Aerosol Research, 11, 63-75.

한국과학기술기획평가원, 2016. 사회문제해결형 R&D사업 운영·관리 가이드라인.

한국과학기술기획평가원, 2018. Issue Weekly 2018-14호, 국가혁신체제 관점의 과학기술 분야 정책 추진 우선순위 제안.

한국과학기술연구원, 2018. 미세먼지 대응 기술개발 전략 연구.

한국과학기술한림원, 2016. 동북아 (초)미세먼지 오염현황과 대책.

한국정보화진흥원, 2017. 미세먼지 이슈와 빅데이터 활용 방안.

한국환경산업기술원, 2012, 블랙카본의 추적 메커니즘 규명 기반진단·예측기술.

한림원(한국공학한림원·한국과학기술한림원·대한민국의학한림원), 2017. 미세먼지 문제의 본질과 해결방안 ① 미세먼지 무엇이 문제인가?

한림원(한국공학한림원·한국과학기술한림원·대한민국의학한림원), 2018. 미세먼지 문제의 본질과 해결방안 ② 미세먼지, 어떻게 해결할 것인가?

한혁, 정창훈, 금현섭, 김용표. 2017, 미세먼지(PM10) 저감 정책의 비판적 검토: 1차 수도권 대기환경관리 기본계획의 정책 대상, 수단, 효과를 중심으로. 환경정책 25(1), 49-79,

환경부, 미세먼지PM2.5 관리 종합대책(안), 2013.

Andreae, M.O., Gelencsér, A.. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. Atmospheric Chemistry and Physics,

- European Geosciences Union, 2006, 6 (10), pp.3131–3148.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). Outdoor Air Pollution a Leading Environmental Cause of Cancer Deaths; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2013.
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). Exposure to PM2.5 in Countries and Regions. 2017. Available online: <http://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=72722> (accessed on 20 October 2017).
- Ju-Hee Kim, Hyo-Jin Kim and Seung-Hoon Yoo, 2018, Public Value of Enforcing the PM2.5 Concentration Reduction Policy in South Korean Urban Areas, Sustainability, 10, 1144; doi:10.3390/su10041144
- Zheng, Bo & Tong, Dan & Li, Meng & Liu, Fei & Hong, Chaopeng & Geng, Guannan & Li, Haiyan & Li, Xin & peng, liqun & Qi, Ji & Yan, Liu & Zhang, Yuxuan & Zhao, Hongyan & Zheng, Yixuan & He, Kebin & Zhang, Qiang. (2018). Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 10.5194/acp-2018-374.
- Apte, J.S., Marshall, J. D., Cohen, A. J., and Brauer, M., 2015. Addressing global mortality from ambient PM2.5. Environ. Sci. Technol, 49, 8057–8066.
- Cai, W., Li, K., Liao, H., Wang, H. and Wu, L., 2017. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change, Nature Climate Change, 7, 257–263.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2018. Air Research, <https://www.epa.gov/air-research> (accessed on 28 May 2018).
- Feng, Z., Hu, E., Wang, X., Jiang, L. and Liu, X., 2015. Ground-level O3 pollution and its impacts on food crops in China: A review, Environmental Pollution, 199, 42–48.
- Frost & Sullivan, 2016, Technologies Enabling Indoor Air Purification
- JTBC, 2018. 두루뭉술한 미세먼지 예보 못미더워...직접 나선 엄마들, 2018.05.28.
- Kim, H. C. et al., 2017. Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Scientific Reports, 7, doi:10.1038/s41598-017-05092-8.
- Kim, I. S., Lee, J. Y., and Kim, Y. P., 2013. Impact of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the Air Quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, Atmospheric Environment, 70, 159–165.
- Kim, N. K., Kim, Y. P., Morino, Y., Kurokawa, J.-I., and Ohara, T., 2014. Verification of NOx emission inventory over North Korea, Environmental Pollution, 195,

236–244.

- Li, W., Cao, Y., Li, R., Ma, X., Chen, J., Wu, Z., Xu, Q., 2018. The spatial variation in the effects of air pollution on cardiovascular mortality in Beijing, China. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 28, 297–304.
- Li, K., Liao, H., Cai, W., & Yang, Y., 2018. Attribution of anthropogenic influence on atmospheric patterns conducive to recent most severe haze over eastern China. *Geophysical Research Letters*, 45, 2072–2081. <https://doi.org/10.1002/2017GL076570>.
- Liu, H., Liu, S., Xue, B., Lv, Z., Meng, Z., Yang, X., Xue, T., Yu, Q. and He, K., 2018. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China, *Atmospheric Environment*, 173, 223–230.
- MEP (Ministry of Environmental Protection, China), 2017. 2016 Report on the State of the Environment in China.
- Rogge, W. ., Mazurek, M. A., Hildemann, L. M., Cass, G. R., and Simoneit, B. R. T., 1993. Quantification of urban organic aerosols at a molecular level: identification, abundance and seasonal variation, *Atmos. Environ.*, 27, 1309–1330.
- Seinfeld, J.H, Pandis, S.N., 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics—From Air Pollution to Climate Change*, 3rd ed., Wiley.
- Souri, A. H., Choi, Y., Jeon, W., Woo, J.–H., Zhang, Q. and Kurokawa, J.–I., 2017. Remote sensing evidence of decadal changes in major tropospheric ozone precursors over East Asia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2016JD025663.
- TECHNAVIO, 2016. *Global Indoor Air Quality Market 2017–2021*
- Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y. F., Li, L. and Zhang, L., 2017. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects, *Science of the Total Environment*, 575, 1582–1596.
- Yeo, M. J., Kim, Y. P., 2017. Electricity Output Trend in North Korea Using the Data Produced by North Korea, 10th Asian Aerosol Conference, Jeju, Korea.



별첨 1. 미세먼지 기술분야별 R&D PTR 현황

붙임

미세먼지저감 기술확보 로드맵(PTR)

중분류1. 원인규명 연구

◆ `17년 미세먼지 원인규명 연구 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 13.4억원(과기부 10억원, 산자부 3.4억원)이며, `17년 과제는 3개(과기부 2개, 산자부 1개)

※ (범례)  : 계획 기간,  : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 다상반응에 의한 동북아 고농도 미세먼지 생성기작 규명 및 입자모듈 개발	과기부 (한국과학기술연구원)	7.2											
② NOx, SO2, NH3가 이차 유기입자의 생성에 미치는 영향규명	과기부 (경북대)	2.8											
③ 자동차향 실내 부유 초미세먼지 감지센서모듈 개발 및 Calibration 시스템 개발	산자부 (주)삼영에스)	3.35											
④ 간척지 영농 실태조사 및 작물 생산성 취약성 평가	농촌진흥청 (국립식량과학원)	-											

중분류2. 현상진단 측정·조사

◆ `17년 미세먼지 현상진단 측정·조사 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 125.5억원(환경부 65.7억원, 과기부 39억원, 기상청 14.4억원, 산자부 6.5억원)이며, `17년 과제는 36개(환경부 24개, 과기부 10개, 기상청 1개, 산자부 1개)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), --→ : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 수용모델을 이용한 권역별 오염원 기여도 산정	과기부 (서울대)	1.9											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
② 복합감지	과기부 (재료연구소)	8											
③ 미세먼지 입체감시를 위한 항공측정 시스템 구축	과기부 (한서대)	7.7											
④ 미세먼지 발생원인 및 정량적 기여도 규명을 위한 현장연구	과기부 (한국외대)	9.5											
⑤ 3차원 광화학 모델을 이용한 미세먼지 국내외 기여도 및 배출저감 효과 분석	과기부 (아주대)	1.9											
⑥ 미세먼지 국제공동 관측을 통한 외부유입 규명	과기부 (광주과기원)	3.6											
⑦ 외부유입 미세먼지 유기성분 원인분류표 개발 및 국내 기여도 분석	과기부 (목포대)	1.2											
⑧ 고분해능 분석기반 외부유입 미세먼지 유기성분 및 동위원소 지표물질 발굴	과기부 (한국기초과학지원연구원)	1.4											
⑨ 미세먼지의 안정동위원소분석을 통한 오염원 추적 연구	과기부 (서울시립대)	3											
⑩ 산업별 화학추적자를 활용한 한반도 유입 공기괴의 기원 연구	과기부 (경북대)	0.8											
⑪ 미세먼지 및 자외선 차단 복합기능을 갖는 안티폴루션 화장품용 고기능성 세라믹 복합소재 개발	산자부 (씨큐브(주), 한국세라믹기술)	6.5											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
	원)												
⑫ 황사연무기술지원 및 활용연구	기상청 (국립기상원)	14.36											
⑬ 도로이동 오염원에 의한 미세먼지 배출원 분석 기법 개발	중소벤처부 (한국원자력연구원)	-											
⑭ 환경위성탐재체 알고리즘 개발 연구단	환경부 (연세대)	-											
⑮ 환경위성탐재체 전구체 감시 관련 자료처리 알고리즘 개발 및 대기화학모델 모의평가	환경부 (광주과학기술원)	-											
⑯ 도시지역 우선관리 유해대기오염물질 모니터링 기술 개발	환경부 (한국과학기술연구원)	3.5											
⑰ 유해대기오염물질 실시간 공간분포 매핑기술 및 관리시스템 개발	환경부 (주)선도소프트	1.5											
⑱ 실내 생활환경 유해요인 측정장치 개발	환경부 (주)세스코	3.9											
⑲ 선택적 선별 적용이 가능한 실내공기질 측정용 PM10, Rn, TVOC 그리고 HCHO 복합센서 모듈 개발	환경부 (주)센코	3.94											
⑳ X선 형광법을 이용한 대기 중 중금속 물질 연속 분석 장치 개발	환경부 (주)에이피엠 엔지니어링	5.17											
㉑ 센서(IoT 등)기술을 활용한 환경오염물질 배출 시설 및 방지지설 스마트 관리 지원 환경 구축	환경부 (주)이쓰리	2.17											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
㉒ 중량농도 자동보정이 가능한 베타레이 흡수법 초미세먼지 측정시스템 개발	환경부 (주)켄텍	2.97	■										
㉓ 도시지역 우선관리 유해대기오염물질 측정망 구축 및 운영전략 연구	환경부 (울산과기원)	1	■										
㉔ 도시지역 우선관리 유해대기오염물질의 시공간 분포 모델링 및 위해성 평가 연구	환경부 (아주대)	1.5	■										
㉕ 초미세먼지 초경량 블랙카본 분석장치개발	환경부 (순천향대)	2.59	■										
㉖ 대중교통차량 IAQ 실시간 및 장기간 측정 평 가기술개발	환경부 (코웨이(주))	0.6	■			■							
㉗ 대중교통차량 내 실내공기질 측정 신뢰성 확보 를 위한 측정방법 및 평가 기술개발	환경부 (평택대)	2.6	■			■							
㉘ 환경감시 업무의 첨단 기술(드론, 로봇 등) 적 용 및 통합 관리체계 기법 개발 연구	환경부 (한국국토정보 조사)	2.18	■			■							
㉙ 초미세먼지 유기원소탄소 분석장치 개발	환경부 (한국표준연)	2.86	■										
㉚ 산업단지 지역 내 유해대기오염물질 입체적 측 정 및 탐지 기술 개발	환경부 (한국표준연)	5.7	■			■							
㉛ 환경감시 업무의 첨단 기술(드론, 로봇 등) 적 용 및 통합 관리 기술	환경부 (한국환경정책 평가연)	3.97	■			■							

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
㉔ 초미세먼지 질량 및 수농도 측정기술을 통한 초소형 측정장비 개발	환경부 (한양대 에리카)	6.57	■										
㉕ 대기오염물질 배출자료 신뢰도 향상 및 통합인벤티리 개선 연구('17)	환경부 (국립환경원)	1.9	■			■							
㉖ 미세먼지의 국내외 기여율 산정 및 수용모델 적용 가이드라인 마련(III)	환경부 (서울대)	2	■										
㉗ 산단지역 유해대기오염물질 모니터링(III)	환경부 (영남대)	2	■			■							
㉘ 대기오염물질 및 온실가스 배출량 산정 DB구축 -2015년 기준-	환경부 (위더인(주))	2	■			■							
㉙ 특정 대기 유해물질 배출 허용기준 마련연구(I)	환경부 (인하대)	1.5		■									
㉚ 특정 대기 유해물질 배출 허용 기준 마련연구(II)	환경부 (인하대)	1.31		■									
㉛ 입체관측을 통한 유기미세입자 및 주요입자 상물질의 국가 간 이동과약(I)	환경부 (한서대)	2.25		■			■						

중분류3. 대기질 모델링

◆ `17년 대기질(미세먼지) 모델링 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 73.2억원(과기부 38억원, 환경부 27.3억원, 산자부 7.8억원)이며, `17년 과제는 19개(환경부 13개, 과기부 4개, 산자부 2개)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 이동형 저고도 미세먼지 관측 시스템 개발	과기부 (세종대)	12											
② 동아시아 기상·대기질 입체 관측망 자료 통합 체계 구축	과기부 (울산과기원)	8.7											
③ 한국형 대기질 예보 모델링 시스템 개발	과기부 (광주과기원)	16.3											
④ 인버스 모델을 활용한 동아시아 암모니아 오염원 정량화	과기부 (한국환경정책평가연)	1											
⑤ 먼지 탈착 기능을 가진 MEMS 기반 초소형 미세먼지 센서 개발	산자부 (알앤에스랩)	5.4											
⑥ 이동형 광학 센싱 기술 및 IoT 기반 실시간 미세먼지 정보 공유 서비스를 통한 유해물질 신속 대응 시스템 개발	산자부 (주)파이버피아)	2.4											

⑦ 동아시아 지역 단기체류 기후변화물질과 기후 변화 상호연관성 분석	환경부 (강릉원주대)	1.36	
⑧ 환경위성탐재체 공용산출물 자료처리 알고리즘 고도화	환경부 (강릉원주대)	1	
⑨ 온실가스 및 대기오염물질 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발	환경부 (건국대)	2.3	
⑩ 통합관리 의사결정 지원 플랫폼 개발	환경부 (그린에코스 주식회사)	1.1	
⑪ 온라인 대기 화학-기후 통합모델 개발 및 활용	환경부 (서울대)	7.32	
⑫ 온실가스 및 대기오염물질 통합관리 비용편익 모형 개발	환경부 (숙명여대)	2	
⑬ 환경위성탐재체 알고리즘 개발 연구단(II)	환경부 (연세대)	4	
⑭ 환경위성탐재체 표준 모의자료 생산 및 검보정 고도화	환경부 (이화여대)	2.2	
⑮ 온라인 대기화학-기후통합모델의 신뢰도 평가	환경부 (전북대)	2	
⑯ 동아시아지역 단기체류기후변화 물질과 기후 변화 상호작용 기작 연구	환경부 (한양대 에리카)	1.36	
⑰ 생활악취 관리기준 모델 개발	환경부 (사)한국냄새환경 학회)	0.49	
⑱ 동북아 대기오염국가간 상호 영향 공동연구 (V)-LTP4단계 종합 평가를 중심으로-	환경부 (국립환경원)	1.33	
⑲ 동북아 대기오염 플룸의 물리·화학적 특성 연구 (V)	환경부 (국립환경원)	0.9	

중분류4. 고정오염원 배출저감

◆ `17년 미세먼지 고정오염원 배출저감 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 71.2억원(산자부 44억원, 과기부 15억원, 환경부 12.1억원)이며, `17년 과제는 21개(산자부 12건, 과기부 5건, 환경부 4건)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 질소산화물 저감을 위한 요소수 무활용 신개념 촉매 원천기술 개발	과기부 (한국화학연)	-											
② 오염물질 동시 저감 하이브리드 시스템 개발	산자부 (한국에기연)	-											
③ 저비용 고성능 Long Bag Filter 실규모 실증	과기부 (주)한빛과워	3											
④ 미세먼지 저감을 위한 선택적 SO2 분리 공정 기술 개발	과기부 (한국과학기술연구원)	2											
⑤ 중소사업장 SOx, NOx 입자전환 및 고점도 입자상물질 여과집진시스템 개발	과기부 (한국생기원)	3											
⑥ 저온 SCR 탈질촉매 기술개발 및 제철소 소결로 실증	과기부 (한국과학기술연구원)	5											
⑦ SO2 및 산성가스 제거를 위한 건식 다공성 반응제 제조 기술 개발 및 제철소 소결 공장 실증	과기부 (제)포항산업과	2											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
	학연구원												
⑧ 3D 스캐닝을 통한 오염발생 최소화 연소로 제어 기술	산자부 (미정)	-											
⑨ Wide Temperature Window NOx 촉매 개발	산자부 (미정)	-											
⑩ NOx 촉매 입체형 금속구조체 개발	산자부 (미정)	-											
⑪ 산업용 초 내열 여과필터 개발	산자부 (미정)	-											
⑫ 스크리버용 비표면적 극대화 막접촉기 개발	산자부 (미정)	-											
⑬ 고성능·저비용 VOC 저온 산화촉매 개발 및 적용	산자부 (미정)	-											
⑭ 多연료 맞춤형 오염저감 연소기술	산자부 (미정)	-											
⑮ 미세먼지 통합공정혁신 시스템 개발	산자부 (미정)	-											
⑯ 저온 탈질 기술 연계 신공정 개발	산자부 (미정)	-											
⑰ 습식 탈황장치(FGD) 연계 SOx/NOx 처리 기술 개발	산자부 (미정)	-											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
⑱ 배가스 미세먼지 전구물질 회수·자원화 개발	산자부 (미정)	-											
⑲ 신규제 대응 수은 복합 제어 기술 개발	산자부 (미정)	-											
⑳ 화력발전소 미세먼지 배출저감 대책 수립을 위한 미세먼지 배출특성 평가 및 자동측정기술개발	산자부 (한국전력공사)	5.21											
㉑ 화력발전소 발생 미세먼지/전구물질의 거동 및 확산 패턴 분석을 위한 통합관제 시스템 개발	산자부 (한국생기연)	8.29											
㉒ 화력발전 배가스 내 PM1.0 미세먼지 90% 제거를 위한 하이브리드 정전 분무 습식 전기집진기 개발	산자부 (동원중공업(주))	4.41											
㉓ PM2.5 제거를 위한 허니컴형 습식 전기집진기 개발	산자부 (주)에어릭스	3.89											
㉔ 초미세먼지 및 중금속 동시제거 Ø156×3000mm 크기의 흡착식 하이브리드형 PTFE 멤브레인 필터 국산화 개발	산자부 (주식회사 마이크로원)	4.24											
㉕ 석탄화력발전소 기존 전기집진장치 활용을 위한 초 미세먼지(2.5µm 이하) 제거용 고효율 융합형 정전여과집진장치 개발	산자부 (주)와이티	2.4											
㉖ 2차 미세먼지 및 에너지 저감을 위한 석탄화력 발전소용 SO3 센싱 기반 공정최적화 제어 기술 개발	산자부 (주)현암바세스	5.68											
㉗ 석탄화력발전소 초미세먼지 제거를 위한 500W 코로나 전계방식 습식 전기집진기 개발	산자부 (주)벤투란코리아	1.66											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
㉘ 석탄 화력 발전소의 석탄 비산 분진 저감을 위한 FOG 분무 기술 개발	산자부 (보령그린(주))	1.98											
㉙ 발전소의 탈황설비 성능개선을 위한 튜브형 열교환기 실시간 건식 세정 설비 개발	산자부 (주)지스코	1.38											
㉚ 화력발전용 석탄처리 공정배출 고습분/미세석탄먼지제거용 2단와류혼합기술을 활용한 복합세정집진장치 개발기술 개발	산자부 (주)제앤지테크	2.4											
㉛ ICT 기반 화력발전소 환경설비 정밀계측 및 자동제어 시스템 개발	산자부 (미정)	-			2018년	신규예정							
㉜ 500MW급 석탄화력발전소 고효율 습식 탈황 기술개발	산자부 (미정)	-			2018년	신규예정							
㉝ 500MW급 석탄화력발전소 습식 전기집진 기술개발	산자부 (미정)	-			2018년	신규예정							
㉞ 화력발전소 탈질설비(SCR) 효율개선을 위한 증진제 활용 및 최적 촉매시스템 기술개발	산자부 (미정)	-			2018년	신규예정							
㉟ 공기감염억제를 위한 항균성 99.99% 이상 및 미세먼지 분해 70% 이상을 동시에 구현하는 무기 가시광촉매를 이용한 필터 소재 개발	산자부 (주)세명하이트	2.5											
㊱ 설치면적 최소화를 위한 보급형 백필터 집진장치 개발	환경부 (한국에기연)	-											
㊲ 에너지 회수형 건식 소각 방식을 이용한 폭발성 가스 및 DCS 처리 시스템 개발	환경부 (사)고등기술연구원 구원연구조합	-											

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
㉘ 화학공정 중 폭발성물질 및 HCl 동시저감 기술개발	환경부 (한국기계연)	-	■										
㉙ 중소 산업공정의 황산화물, 질소산화물 및 2차 생성물 처리를 위한 습식 펄스 복합공정 개발	환경부 (주)벨이앤씨	2		■		■							
㉚ 정전분무 시스템과 전기집진기가 결합된 미세 먼지 제거기술 개발	환경부 (주)에니텍	4.55		■		■							
㉛ 난연자재 등 유기용제 사용시설에서 발생하는 백연 및 휘발성가스 처리 시스템 개발	환경부 (주)태종이앤씨	3.56	■		■								
㉜ SRF사용 사업장(소각기) 미세먼지 등 복합대기 오염물질 저감	환경부 (미정)	-			■								
㉝ 미성형 고품연료 저NOx 연소시스템 개발	환경부 (미정)	-			■								
㉞ 최소 100 CMM 이상의 VOCs 흡착 및 탈착 system 실증사업화	환경부 (미정)	-			■								
㉟ 초미세먼지 전구물질의 변환·저감용 수막형 나노펄스 기술 개발	환경부 (한국기계연)	2		■		■							

중분류5. 도로 이동오염원 배출저감

◆ `17년 미세먼지 도로이동오염원 배출저감 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 70.4억원(환경부 47.4억원, 국토부 12.3억원, 산자부 10.8억원)이며, `17년 과제는 15개(환경부 10건, 국토부 3건, 산자부 2건)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017년 예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① SCR 담체 클리닝 기술개발	환경부 (주)동아이엔씨	2	[실제 수행기간]										
② 미세먼지 및 CO ₂ 저감 글로벌탑 저마모-저탄소 타이어 개발	환경부 (주)금호타이어	6.75	[실제 수행기간]		[계획 기간]								
③ 환경친화적 보급형 LPG 직접분사(LPDi) 1톤상용차용 엔진연소 성능최적화 및 배출가스 저감 기술개발	환경부 (고려대)	2.75	[실제 수행기간]		[계획 기간]								
④ 글로벌탑 저배기/저탄소 자동차 신연소기술 개발	환경부 (한국과학기술원)	1	[실제 수행기간]		[계획 기간]								
⑤ 운행차정비·점검용저가형매연/NOx분석기개발	환경부 (한국산업기술시험원)	3.5	[실제 수행기간]		[계획 기간]								
⑥ 글로벌탑 터보 직접분사 에탄올 혼합연료 자동차(FFV) 핵심부품 개발	환경부 (현대자동차(주) 남양주연구소)	11.5	[실제 수행기간]		[계획 기간]								
⑦ 환경친화적 보급형 LPG직접분사(LPDi) 1톤 상용차용 연료분사 및 후처리 시스템 개발	환경부 (현대자동차(주) 남양주연구소)	7.92	[실제 수행기간]		[계획 기간]								

⑧ EURO 5 대응 125cc 이륜차용 연료분사 및 후처리 시스템 개발	환경부 (주)대림자동차	4.79	
⑨ EURO 5 대응 이륜차용 연료분사 및 후처리 시스템 개발	환경부 (한국에기연)	2.17	
⑩ EURO 4 이하 중대형 운행차량용 선택적환원촉매(SCR) 시스템 개발	환경부 (주)에코닉스	5	
⑪ 택배차량용 디젤 트럭의 하이브리드 개조기술 개발 및 실용화 연구	국토부 (한국과기원)	9.56	
⑫ 미세먼지 및 초미세먼지 제어용 필터 원천기술 개발	국토부 (재료연구소)	1.4	
⑬ 터널부유 미세먼지 객실유입 차단기술 개발	국토부 (한국철기연)	1.3	
⑭ 1 리터카급 디젤하이브리드 원천기술개발	산자부 (자동차부품연구원)	-	
⑮ 승용디젤엔진용 고효율저배기 융합연소시스템 기술개발	산자부 (서울대 산학협력단)	1	
⑯ Euro 6 배기규제 대응을 위한 2L급 디젤자동차 SCR용 탱크일체형 Urea 공급 시스템 개발	산자부 (주)화영	9.8	
⑰ 미세먼지 저감 내마모 마찰 소재 적용 고성능 브레이크 패드 제조 기술 개발	산자부 (미정)	-	
⑱ 자동차 비배기관 유래 미세먼지 저감을 위한 필터링 소재 및 부품화 기술 개발	산자부 (미정)	-	





⑮ 수송분야 비배기관 미세먼지 평가 및 실증 기술 개발	산자부 (미정)	-												
⑳ 수송분야 비배기관 미세먼지 저감 플랫폼 구축	산자부 (미정)	-												

중분류6. 비도로 이동오염원 배출저감

◆ `17년 미세먼지 비도로 이동오염원 배출저감 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 13.2억원(환경부 11.5억원, 국토부 1.7억원)이며, `17년 과제는 4개(환경부 3건, 국토부 1건)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 배출저감 기술 평가 및 인증체계 개발 및 구축	해수부 (미정)	-											
② 저가 보급형 PM-Nox 동시저감을 위한 p-SDPF 시스템 개발	해수부 (미정)	-											
③ 저배압 미세먼지 전기집진 복합장치 개발	해수부 (미정)	-											
④ 선박배출 대기오염물질 동시저감이 가능한 고효율 스크러버 개발	해수부 (미정)	-											
⑤ 선박배출 대기오염물질 동시저감 후처리시스템 실증 및 상용화	해수부 (미정)	-											
⑥ 초미세먼지 집진차량 흡진환경 개발	국토부 (한국철기연)	1.71											

⑦ 저탄소/저공해를 위한 나노촉매-플라즈마 하이브리드 기술개발	과기부 (한국기계연)	-	
⑧ 0.8L급 가솔린 엔진용 고성능 터보차저 개발	환경부 ((주)계양정밀)	2.25	
⑨ Stage V 대응 0.8L급 비도로용 가솔린 터보 2기통 엔진 후처리시스템 개발	환경부 ((주)블루플래닛)	4.3	
⑩ 모노리스타입 13인치급 매연여과장치(DPF) 필터 개발	환경부 ((주)세라캡)	4.9	

중분류7. 비산먼지 저감

◆ `17년 미세먼지 비산먼지 저감 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 0억원이며, `17년 과제는 0개

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 간척지토양 및 용수염 농도에 따른 조기 녹화 프로그램 개발	농촌진흥청 (국립농업과학원)	-			 								
② 내마모고무 컴파운드 적용 친환경·고성능 타이어제조기술 개발	산자부 (미정)	-											

중분류8. 건강영향평가

◆ `17년 미세먼지 건강영향평가 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 44.7억원(환경부 38.7억원, 과기부 6억원)이며, '17년 과제는 9개(환경부 7건, 과기부 5건)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 우리나라 미세먼지 등 대기오염 건강영향 연구 및 건강영향 지도 구축	과기부 (서울대)	2											
② 어르신 인구 패널을 이용한 미세먼지 건강영향 평가	과기부 (서울대)	1.2											
③ 가정주부 코호트를 이용한 미세먼지 건강영향 평가	과기부 (울산대)	1.9											
④ 어린이 인구 패널을 이용한 미세먼지 건강영향 평가	과기부 (단국대)	0.9											
⑤ 미세먼지의 건강영향 및 건강위험 평가 연구	과기부 (한국환경정책평가연구원)	-											
⑥ 실내 환경오염인자 노출평가 기술 개발	환경부 (태구가톨릭대)	2.1											

중분류9. 미세먼지 노출저감 기술

◆ `17년 미세먼지 노출저감 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 35.2억원(국토부 15.3억원, 과기부 10억원, 환경부 6.7억원, 범부처 3.2억원)이며, `17년 과제는 10개(과기부 5건, 환경부 3건, 국토부 1건, 범부처 1건)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 주택 미세먼지 대응 생활보호제품의 실환경 평가 및 테스트베드 운영기술 개발	과기부 (한국기계연구원)	2.4											
② 주택 미세먼지 노출저감을 위한 생활보호제품의 관리기술개발	과기부 (주)에코피쳐스)	0.6											
③ 고기능성 필터용 유·무기 필터소재 및 나노섬유 필터 개발	과기부 (광주과학기술원)	3.5											
④ 음식 조리 시 발생하는 미세먼지의 실내·외 배출저감 기술 개발	과기부 (연세대)	1.9											
⑤ 공기정화용 MERV 12등급의 나노필터팩 제작 Pleating 공정개발	과기부 (전자부품연구원)	1.6											
⑥ 주택 실환경 미세먼지 통합 관리 기술 및 실환경 평가 인증규격 개발	범부처 (한국기계연구원)	3.2											
⑦ 환경유해인자 모니터링 및 공기정화식물 개발	농촌진흥청 (경상대)	-											
⑧ 식물의 미세먼지 제거원리 및 효율 규명	농촌진흥청 (국립원예특작과학원)	-											




	학원)																				
⑨ 초음파를 이용한 비접촉식 독성 박테리아 등 제거기술개발	환경부 (한국철기연)	1.47																			
⑩ 초음파를 이용한 실내환경 오염물질 (초미세먼지 등) 저감장치 기술 개발	환경부 (주)세라콤)	2.3																			
⑪ 버스정류장 공간분리형 미세먼지 저감 시스템 개발	환경부 (미정)	-																			
⑫ 차량 부착형 도로 먼지 건식 집진시스템 개발 및 실증	환경부 (미정)	-																			
⑬ 공동주택 환기설비와 레인지후드 통합형 스마트 환기시스템 개발	환경부 (한국건설기술연구원)	2.95																			
⑭ 도시철도 터널 Hot spot 구간 공기질 관리기술 개발	국토부 (한국철기원)	15.28																			

중분류10. 정책 및 정보서비스

◆ `17년 미세먼지 정책 및 정보서비스 관련 대기환경분야 R&D 연구비는 총 14.9억원(과기부 10억원, 환경부 4.9억원)이며, `17년 과제는 5개(과기부 3건, 환경부 2건)

※ (범례) : 계획 기간, : 실제 수행기간, △ : 계획상의 종료시점, ▲ : 실제 종료시점, ○ : 계획상의 성과도출 시기, ● : 실제 성과 도출 시기, → : 성과 활용(직접), - - → : 성과 활용(간접), ★ 주요행사(성과발표회, MoU 등)

연구과제명	소관부처 (수행기관)	2017 년예산 (억원/년)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026~ 2030
① 도시숲의 사회경제적 가치 평가 및 활용기술 개발	산림청 (국립산림원)	-											
② 도시숲 그린 정보망 작성 연구	산림청 (국립산림원)	-											
③ 도시숲 생태계 서비스의 시공간 확장 연구	산림청 (국립산림원)	-											
④ 그린 웰터 앱 개발 및 운영 연구	산림청 (국립산림원)	-											
⑤ 미세먼지·황사 건강피해 예방관리 및 보건용 마스크 효용성 연구	과기부 (고려대)	1											
⑥ 미세먼지 국가전략프로젝트 기획관리평가	과기부 (한국과학기술연구원)	9											

⑦ 수도권 대기개선 통합관리 시스템 구축(III)	환경부 ((주)에코씨앤에이)	1.45											
⑧ 수도권 대기환경관리 기본계획 성과평가 방법론 연구	환경부 ((주)에코씨앤에이)	0.9											
⑨ 2020년 배출시설 및 배출허용기준 설정 연구(II)	환경부 (한국환경정책평가원)	2.5											

별첨 2. 지역환경특성에 따른 미세먼지 오염원 규명

과제명	지역환경특성에 따른 미세먼지 오염원 규명 1-1 농업지역 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성 1-2 축산농업 지역 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성 1-3 산림지 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성 1-4 자동차 배출 암모니아 현황 및 지역대기환경에 미치는 영향 분석
분류(대/중/소)	현상규명 및 예측 / 원인규명 연구 / 오염원 규명
키워드	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농축산업 배출 암모니아 / 농축산업 배출 질소산화물/산림 배출 질소화합물 / 지역기반 미세먼지생성 오염특성/차량배출 암모니아 ○ agricultural NH₃ emission / agricultural NO_x emission / NO_x and NH₃ emission from forest soil / understanding in characteristics of PM_{2.5} formation in different land usages/ vehicle NH₃ emission

[1] 개요

- 국내 미세먼지 생성연구는 고농도생성에 대한 것으로 연구와 관심은 주로 수도권(주로 인구 밀집된 도심지역과 인근 산업지역)을 중심으로 하는 연구가 진행.
- 그러나 실제 전국 규모에서의 측정결과와 고농도 상황은 서울과 수도권, 경기, 충남과 함께 전북지역 등지에서도 심각한 수준으로 나타나고 있음. 특히 2016년의 경우 PM_{2.5}는 서울과 수도권에서 보다는 높게 나타나 해당지역민의 우려가 높아짐. (관계부처합동 미세먼지관리 종합대책, 2017.9.26.).

[2] 연구 현황 및 필요성

- 서울 수도권과 발전/에너지생산시설이 집중된 지역을 제외한 고농도 지역으로 나타난 전북지역의 경우는 우수한 산림자원과 함께 서해의 해수면과 접한 청정지역으로 인지되어 있는 지역임. 이러한 측정 결과가 풍상 측의 수도권과 대기오염밀집 지역의 고농도 영향 때문일 수 있을 것임. 이러한 영향을 오염물질 이동에 관련된 조사 연구는 필연적임.
- 그러나 풍상 측 수도권과 발전/에너지생산단지와의 오염도 인과성 연구와 함께 전북지역의 주요산업 기반인 농축산활동과 산림지역의 미세먼지생성 전구체(precursor)와 연관된 지역대기환경특성의 차이로 관심지역의 미세먼지생성특성이 수도권PM생성기작과는 매우 다를 수 있음.
- 지역기반 주요생산시설과 농축산업 또는 지역여건 등 수도권과는 상이한 전구물질배출환경 특성에 따른 오염원배출 특성연구를 통해 지역미세먼지생성에 기여하는 요인들을 규명하는 연구의 필요성 요구됨.
- 2차 미세먼지 생성에 기여하는 질소산화물(NO와 NO₂), 그리고 암모니아(NH₃)는 지역기반이 주로 농업활동(경작과 축산)과 관련된 지역의 경우 농경지와 축사, 비료사용과 축분 관리 등으로 주변 대기환경으로 배출되며, 그로인한 지역대기오염을 악화시킬 우려 높음.
- 2차 미세먼지는 자동차나 공장, 발전소 등에서 발생하는 질소산화물이 수증기, 오존, 암모니아 등과 결합하는 화학반응을 통하여 생성되는 것으로 알려져 있음.(미세먼지 도대체 뭘까?, 환경부 2016.4)
- 이러한 전구물질들은 대기 내에서 광화학반응 또는 2차 반응을 거쳐 환경대기 내에 미세입자들을 생성시키는 주요 원인물질(전구물질)로 작용함.
- 그 예로 위 그림의 전국 미세먼지 측정결과에서 이미 확인되었듯이 전북지역의 경우, 서해안 인근 발전단지와 산업단지의 풍하 측 여건과 함께 지역농축산활동으로 배출되는 NO_x와 NH₃에 의한 영향으로 고농도 상황이 더욱 심해질 수 있으며, 해당지역에 대한 대책마련은 물론이고, 전국적으로도 지역에 따른 유사한 환경여건을 갖은 지역에 대한 대책 마련이 필요.

[3] R&D 현황 및 시사점

기존 R&D 현황

- 현재 국내농업분야 배출연구들은 주로 기후변화문제해결에 우선한 벼논에서의 온실기체(CH₄, N₂O)배출량 조사와 평가, 감축 위주의 연구를 수행해 오고 있음.
- 국내미세먼지 농도증가에 따른 국민들의 우려를 해결하고 간접온실기체로서의 역할과 함께 2차 미세먼지 생성에 기여하는 질소산화물(NO와 NO₂)과 암모니아(NH₃)의 농업분야 배출정보를 보다 정확히 파악해야 함.
- 이러한 우려는 최근 미국 캘리포니아 주 농업지역(California's Central Valley)에서 예기치 않게

높아진 인위적 질소배출량이 주로 비료사용과 질소생성식물로 인해 과거 60년 전에 보다 5배 많아졌다고 보고된 사실에 기인함. [Almaraz et al., Sci. Adv. 2018; 4: eaao3477, 31 January 2018]

- 결과적으로 탄소량 증가에 따른 기후변화문제와 더불어 지구대기 중 가용질소 증가는 심각한 지구환경문제를 야기할 수 있는 물질임을 시사. 이 때 주요 N성분은 온실기체인 N₂O와 NO, NO₂, NH₃가 지표층을 통해 배출될 수 있으며, 이들의 지표배출정도는 지역의 광화학생성물질(O₃ 등)과 미세먼지 생성과정에 의미 있는 수준의 영향을 미칠 수 있음. (29 August 2017, “Unprecedented levels of nitrogen could pose danger to Earth’s environment” <https://blogs.agu.org/geospace/2017/08/29/unprecedented-levels-nitrogen-pose-danger-earths-environment/>)
- 향후 지속적인 연구개발을 통해서 농경지/축산분야 암모니아/NO지표배출량측정연구를 통한 지표플럭스 측정기술확보 (플럭스측정 챔버와 미기상학 측정기반의 inter-comparison 연구, NH₃와 NO지표배출의 영향인자들과의 상관성연구 등 요소기술 요구됨.

연구과제명	소관부처 (수행기관)	예산 (억원/ 년)	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 ~이 후
통합기반 다중규모 대기환경분석시스템 구축을 통한 지역별 미세먼지(PM10) 생성 메커니즘 및 영향 배출원 규명	교육부	총 1억5천			3.7 5	5	5	1.2 5					

- 기존 과제와의 차별성 및 시사점

<기존 R&D와의 차별성 분석>

본 R&D 사업	기존부처 R&D	차별성
지역환경특성에 따른 미세먼지 오염원 규명	통합기반 다중규모 대기환경분석시스템 구축을 통한 지역별 미세먼지(PM10) 생성 메커니즘 및 영향 배출원 규명(교육부)	<ul style="list-style-type: none"> • MAN-HYSPLIT/PSCF모델 활용 고농도 사례일의 권역별 기류 패턴 분석에 따른 기존부처연구와는 달리, 농경지와 축산분야 미세먼지 전구체(NH3/NO/NO2)의 오염원으로부터 플럭스측정과 함께 배출요인분석에 따른 지역환경특성이 반영된 오염원 규명 연구로 대도시와 대규모 오염으로 인한 영향만이 아니라, 최근 빈번히 나타나고 있는 지역의 고농도 현상을 규명하고, 그에 따른 지역맞춤형 대기오염개선정책을 수립할 수 있는 자료 확보 가능할 수 있음.

기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

지속적인 연구개발을 통해서 농경지/축산분야 암모니아/NO지표배출량측정연구를 통한 지표플럭스 측정 기술 확보. (플럭스측정 챔버와 미기상학 측정기반의 inter-comparison 연구, NH₃와 NO/NO₂지표배출의 영향인자들과의 상관성연구 등 요기술 요구됨)

[4] 추진 전략

핵심 목표
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 주요 발작물에서의 NO/NO₂/NH₃배출계수 개발 ▶ 축종별 축사환경에서의 NH₃배출계수 개발 ▶ 산림지표에서의 NH₃/NO배출계수 개발

과제 추진형태 : 총괄과제로 다음과 같은 세부과제의 형태로 수행

지역환경특성에 따른 미세먼지 오염원 규명

- 1-1 농업지역 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
- 1-2 축산농업 지역 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
- 1-3 산림지 환경특성에 따른 미세먼지 오염원 특성
- 1-4 자동차에서 배출되는 암모니아 현황 및 대기환경에 미치는 영향 분석

이상의 4개 세부과제로 구성

지원 기간 및 예산

※ 지원기간은 5 으로 구성

※ 예산은 총액 및 1차 년도에 대해 제시

- 기간 : 1단계 3년 (6억/년)
- 예산 : 총액 30/5년

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

각 분야 현재 기술 수준은 최종목표 기준 평균 20% 수준으로 판단됨

1 단계 수행 후 현재 수준을 평균 최종목표 대비 40~50%수준으로 향상.

- ▶ 지역 주요 발작물에서의 NO/NH₃배출계수 개발
- ▶ 축종별 축사환경에서의 NH₃배출계수 개발
- ▶ 산림지표에서의 NH₃/NO배출계수 개발
- ▶ 자동차에서 배출되는 암모니아 현황 및 대기환경에 미치는 영향 분석

연구방법 및 내용

▶ 농축산, 산림분야 연구내용

- 지역 주요 발작물의 선정; 지역행정 단위 기준 가장 재배면적이 넓은 발작물을 우선 선정하고, 해당 작물 대상으로 하여 밭 경작지 실험과 실내조절 실험을 병행연구
- 산림지역의 경우 역시 산림배출 자연 VOCs와 산림지표에서의 NO_x 배출과 미세먼지생성, 오존량 변화 측정연구
- 산림VOC와 산림 내 NO_x 등 2차 미세먼지 전구물질 측정과 생성물 발생량 영향조사
- 외부유입과 더불어 한반도 내의 장거리 이동에 따른 고농도미세먼지의 영향권 내에서 풍하 측에서 가중된 오염도 조사와 배출영향연구.
- 산림지역은 항시측정 지점설치에 따른 장기간 측정계획이 필요하며, 지역내 주요 산림군락을 이루며 측정관리가 가능한 국가관리 산림 중 한 곳으로 선정하여 지속적인 자료생산.
- 측정방법 : 플릭스챔버, 연구기간 중 NO/NO₂/NH₃의 경우 flow-through dynamic flux chamber system 제작하고 활용함.
- 연속NO/NH₃농도분석장치: 화학발광법 적용

- 플럭스챔버방식에 의한 지표 NO_x/NH₃플럭스 측정
- 측정항목 : 실측기간 선정 후 실제 농작지 토양의 물리화학 특성과 주변 기상상태 조사 분석 (기본측정항목: soil moisture, soil temperature, soil N)

□ 실증방안

- 현장측정을 기반으로 하는 측정연구 과제임

따라서 기존에 활용되고 있는 대기오염모델에 적용되고 있는 배출계수와의 비교연구를 통한 모델개선에 활용될 수 있음.

모델개선을 통해 이루어진 결과를 바탕으로 측정결과와 측정연구의 수행결과 제시된 성과물을 실증할 수 있을 것임.

[6] 기대효과

- NO/NO₂와 NH₃의 생태지표(농경지와 산림)에서의 배출량을 지표플럭스챔버법에 따른 실측을 통해 모델과의 차이를 확인할 수 있으며, 그에 따른 지표플럭스 모델개선에 기여할 수 있음.

- 질소화합물의 초극미량 고감도 정밀 분석기기(연구/모니터링용)

- 핵심 질소화합물의 주요 배출지역 농도분포
- 질소화합물 주 배출원 배출량 정량적 기여도
- 핵심 입자상 변환과정과 미세입자 생성 기여도

- 미세먼지 생성기작의 과학적 이해 향상

- 서로 다른 생태환경에서의 국지적 영향에 따른 미세먼지생성 기작 이해 증진

- 저감 대책 수립을 위한 핵심 기초자료 생산

- 주요 외부 배출원과 지역배출원의 영향수준을 이해할 수 있으므로 그에 따른 적절한 대응책 선택의 과학적 신뢰를 높일 수 있을 것임.

별첨 3. 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지의 정밀 추적 및 노출 평가

화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지의 정밀 추적 및 노출 평가

과제명	화학적, 생물학적 지문을 이용한 동아시아 미세먼지의 정밀 추적 및 노출 평가
분류(대, 중, 소)	현상규명 및 예측, 영향도 규명, 영향도(기여도) 규명 현상규명 및 예측, 현상진단 측정·조사, 측정·분석 기술 제도 및 소통체계 개선, 제도 개선, 실효성있는 국제협력
키워드	○ 화학적 지문, 생물학적 지문, 기여도 평가 ○ Chemical, biological fingerprint, source attribution

[1] 개요

대기확산모델 분석, 화학성분 분석 및 수용모델분석을 통한 기존의 여러 대기오염 배출 기여도 산정 방법은 전반적인 규모에서 대기오염의 이동과 영향을 설명하는데 유용하지만 특정 배출원과 배출 지역의 상세하고 정확한 기여도를 산정하는 것은 거의 불가능하다. 가장 큰 이유는 국외의 배출원과 배출활동에 대한 정보가 매우 미흡하고 전구물질들로부터의 미세먼지 생성

기작이 비선형적이기 때문이다. 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 방법이 장거리 이동 중에도 배출원이나 배출 지역의 특성이 변하지 않아 수용지역에서 추적할 수 있는 화학적, 생물학적 지문 정보와 감시체계를 마련하여 활용하는 것이다. 이에 본 연구에서는 특정 산업과 지역에서 배출 후 화학적 반응이 거의 발생하지 않고 극미량에서도 분석이 가능한 할로겐화합물, POPs 와 미생물학적 유전정보를 이용한 추적자를 발굴하고 이를 적용하여 동북아시아의 지역별, 산업별 대기오염의 기여와 노출 영향을 평가하고자 한다.

화학적 정밀 지문을 이용한 미세먼지 오염의 추적 및 노출 평가

○ 화학적 지문 추적

- 화학적 성질이 변하지 않는 화학종을 이용한 산업별 및 지역별 지시종 선별
- 기체상 할로겐 화합물 산업별 지역별 지문 구축
- 유기할로겐 계열의 POPs 지역별 지문 구축

생물 유전정보를 이용한 미세먼지 오염의 추적 및 노출 평가

○ 생물학적 노출 평가

- 바이오미세먼지의 고농축 액상 포집 시스템 개발
- 마이크로콜로니 분석 시스템을 이용한 생균콜로니 농도 고속 측정
- 분자 생물학적 탐지기술을 적용, 바이오미세먼지 측정의 특성화
- 인공지능 탑재 IoT 시스템의 바이오미세먼지 탐지/운영 시스템 구축

○ 생물학적 지문 추적

- MALDI-TOF 지문 정보를 이용한 미생물 동정법의 타진
- 공기유래의 병원성 미생물 중 지역별 지시종 선별
- 지역별 지시종의 생물학적 지문의 구축

[2] 연구 현황 및 필요성

국의 지역의 미세먼지 오염 기여도, 국내에서의 특정 산업과 지역의 미세먼지 발생 기여율에 대한 과학적 평가는 학술적 기준과 국민적 관심이 요구하는 수준을 만족하지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 복합적인 화학적 정밀 지문과 미세먼지내 생물유전 정보를 이용한 국내·외 주요 산업별 지역별 배출 분포 특성을 규명하고 이를 활용하여 한반도 고농도 미세먼지 발생 및 환경오염 발생시 지역적, 산업적 근원을 정량화 할 수 있는 체계를 구축하고자 한다.

이를 위해 1 단계(2019-2021) 기간 중 지역별, 산업별 유용 가능한 화학적, 생물학적 지문을 확보하고 이를 장기 모니터링 할 수 있는 기술과 기반을 구축한 뒤, 2 단계 (2022- 2025)에서 이를 적용하여 국내외 미세먼지 배출원들의 기여도와 환경 노출 영향을 기존의 방식과 현저히 높은 정확도를 통해서 평가하고자 한다.

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

- 미세먼지 국가전략프로젝트내에서 화학지문과 밀접한 연관이 있는 세부 연구가 현재 진행 중에 있으며 그 내용은 아래와 같음

< 미세먼지 중 미생물정보 지문 관련 과제 현황 >

- 국가전략프로젝트 뿐만 아니라 아직 국내에서는 체계적인 바이오미세먼지에 대한 연구는 수행되지 못함.
- 기존의 ATP발광을 이용한 미생물 활성 측정 기술을 공기 중 부유 세균을 대상으로 적용, 과기부 과제를 통해 ATP 발광 준 실시간 측정 기술을 개발 (연세대, 2005-2008).
- 환경부에서는 현미경 이미징 분석기술을 개발하여 미생물을 모니터링 하는 기술을 개발 (한양대, 2002-2005).
- 두 가지 기술 모두 현장에서 적용하기에는 아직 기술적 한계점이 있음.
- 최근 국방과학연구소는 민간업체와 협력으로 군수목적으로 화생방 대비 바이오미세먼지

탐지/감시 시스템을 개발하였으나, 단가가 높고 (4억원 이상) 부피가 크기 때문에, 환경 측정용으로 기술 전환하기 어려움.

- 또한 공기를 통해 유포되는 생물 무기 또한 바이오미세먼지 관리의 일환으로 신속하고 안전하게 탐지하기 위한 목적으로 연구가 진행 (한국생물공학연구원, 2011).
- 공기 유래 병원성 미생물의 발원지에 대한 연구는 주로 전체 유전체(genome)의 분석을 통한 비교유전체 분석을 통해 이루어지므로 보통 많게는 수년에 걸친 대규모 프로젝트를 통해 이루어짐.
- MALDI-TOF를 이용한 미생물의 동정은 미생물 분류학에서 사용하는 방법 가운데에도 빠르고 정확한 방법으로 평가되나 아직 일부 분야에서 시험적으로 적용하는 단계. 그 중에도 의학진단의 목적으로 많은 성공사례가 보고됨. 최근 5년 사이에 국제연구들을 통해 음용수와 식품의 안전성 평가를 위한 수단으로써 MALDI-TOF를 적용한 성공 사례들 또한 보고되고 있음.
- 아직은 환경시료의 미생물 군집의 복합적인 MALDI-TOF 지문으로부터 패턴을 인식하고 종을 동정하는 수준에는 발전이 이루어지지 않았음.

기존 과제와의 차별성 및 시사점

□ 본 전략과제의 위치

본 과제는 “미세먼지 국가전략 프로젝트“의 ”발생유입“ 분야가 추구하는 관측데이터 기반의 발생 메카니즘 발생원별 기여도 산정 연구에 혁신적인 발생원 추적 기술을 추가적으로 보완 활용하고 기여도 산정의 정확도를 높여 분쟁의 소지를 최소화할 수 있는 연구에 집중함.

□ 기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 기존의 미세먼지 국가전략프로젝트'에서 진행 중인 유기지표성분, 중금속 및 중금속 동위원소, PAHs, 미세먼지내의 C, N, S 동위원소분석을 통한 추적자 연구 등은 모두 특정 지역 및 산업 활동을 지시하는 주요 지표의 거동을 파악할 수 있는 매우 중요한 연구.
- 이들 기존 연구의 결과물을 기반으로 새롭게 추가되는 화학적, 생물학적 정보를 활용할 경우 훨씬 신뢰성 있는 미세먼지 기여 평가 가능.
- 특히 본 연구에서 제안하는 기체상 입자상 할로젠화합물과 바이오에어로졸의 생물학적 유전 정보는 미세먼지의 기원과 기여도 평가에 절대적 기준이 될 수 있으며 국제적으로도 선도적 연구.

[4] 추진 전략

핵심 목표

- ▶ 미세먼지 중 화학적, 생물학적 정보의 실시간 측정시스템 개발 및 활용.
- ▶ 화학적, 생물학적 지문을 이용한 동북아시아 미세먼지의 정밀 추적 및 노출 평가

□ 본 연구는 미세먼지의 화학적, 생물학적 정보를 추가로 활용하여 기존의 기여율 분석 방법을 포함한 종합적이고 다각적 접근법을 제시하고 실제 검증을 통한 국내 미세먼지의 정밀 추적 및 노출을 과학적이고 신뢰성 있게 평가하는데 있다. 이에 대한 세부 연구 추진 전략은 다음과 같음.

○ 기체상 및 입자상 할로겐 화합물의 발생원 profile 작성

- 산업별, 지역별 기체상 할로겐 화합물의 source profile 및 emission inventory 구축.
- 유기할로겐 계열의 POPs 지역별 지문 구축.

○ 기존 화학적 지표종과의 연계를 통한 발생원 산정 기법 개발

- 산업별, 지역별 종합적 source profile 개발.
- 기여율 산정 모델에 적용 및 개선.

○ 미세먼지 중 생물학적 정보 관측 시스템 개발

- 주요 생물 지표종 실시간 모니터링 기술개발.
- 미세먼지 중 생물 유전 정보 분석 및 지역별 특성 정보 구축 .

○ 바이오미세먼지 고농축 포집 시스템 개발:

- 대기 중 미량의 바이오미세먼지를 농축/액상화 처리를 위한 가상임팩터(Virtual Impactor)와 액상사이클론(Wet-Cyclone), 연속시료 이송부로 구성된 바이오미세먼지 고농축 포집시스템 개발.

○ 생균콜로니 고속 측정용 마이크로 콜로니 분석 시스템 개발:

- 고농축 액상시료 내 생균콜로니를 고속으로 배양/측정하기 위한 미세유체(Microfluidics) 제어기술과 온칩현미경(On-chip Microscopy) 측정기술을 이용한 고속 마이크로콜로니 분석시스템 개발.

○ 바이오미세먼지 연속 모니터링 트리거(trigger) 기술개발:

- 대기 중 바이오미세먼지를 분류/농축할 수 있는 입자제어계, 바이오미세먼지의 특이적 광학 특성을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 광학계 및 신호처리부로 구성된 바이오미세먼지 연속 모니터링 트리거 기술 개발.

○ 바이오미세먼지 지문 구축의 타진:

- 실험실 환경에서 모델 미생물(세균과 바이러스)에 대한 MALDI-TOF를 미생물 동정법의 적용 및 검증.
- 실험실 환경에서 제작된 모형(mock) 미생물 군집에 대한 MALDI-TOF를 미생물 동정법의 적용 및 검증.
- 본 연구과제에서 개발될 고농축 액상 포집법과의 융합 시스템 구축.
- 병원성 미생물(세균과 바이러스 예정)의 지역별 지시종의 선별.
- MALDI-TOF를 이용한 지역별 생물학적 지문의 구축.
- 현장에서 바이오미세먼지의 지속적 관리 및 제어를 위한 IoT 기반 시스템 및 인공지능 기반 탐지 운영 시스템의 개발:
 - 다양한 환경에 적용 가능할 수 있도록, 바이오미세먼지 고농축 포집시스템과 마이크로콜로니 분석시스템을 통합 제어하고, 원격 관리가 가능할 수 있도록 IoT 기반 운영기술을 개발.
 - 앞선 바이오미세먼지 연속 모니터링 트리거 기술과 초고속 분자생물학적 탐지기술을 인공지능을 기반으로 한 효율적 운영 시스템 개발.

과제 추진형태 : 총괄 및 국제 공동연구

지원 기간 및 예산

○ 예산 : 총 예산

구 분	합 계	1 단계			2 단계			
		2019년 (1차년도)	2020년 (2차년도)	2021년 (3차년도)	2022년 (1차년도)	2023년 (2차년도)	2024년 (3차년도)	2025년 (4차년도)
연구비(억원)	76	12	12	12	10	10	10	10

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 현재 미세먼지 전략 프로젝트의 기여도 평가 및 추적은 다양한 지표 물질을 이용한 공간적 규모에 따라 오일리안 및 라그랑지안 확산 모델, PMF 등을 활용.
- 기존의 지표 종을 이용한 기여도 평가의 신뢰도가 50 - 80% 수준.

- 신뢰성 높은 추가적인 화학 및 생물학적 정보를 활용 시 신뢰도가 70-90% 정도 상승.

□ 연구방법 및 내용

○ 1 단계:

발생원의 화학적 지문(기체상 및 입자상 할로젠 화합물) 작성 기법 개발 및 정보 구축

- 1) 산업별, 지역별 기체상 할로젠 화합물의 정보 구축
 - 배출 시설 및 지역에서 CFCs, HCFC, HFC, PFCs 지문 확보.
 - 기체상 할로젠 화합물 emission inventory 구축.
- 2) 유기할로젠 계열의 POPs 지역별 지문 구축
 - 배출 시설 및 지역에서 HCHs, PCBs, PCDD/F 지문 확보.
 - 입자상 할로젠 화합물 emission inventory 구축.

바이오미세먼지 실시간 모니터링 및 생물정보 분석 기술 개발

- 1) 바이오미세먼지 고농축 포집 기술 개발
 - 공기역학렌즈 및 가상임팩터를 이용한 고효율 바이오미세먼지 분리/농축기술개발.
 - 실시간, 연속 액상사이클론기술을 이용한 바이오미세먼지 액상화 기술 개발.
- 2) 고속 생균콜로니 탐지시스템 개발
 - 미세유체칩기술을 이용한 연속 생균콜로니 배양칩 기술 개발.
 - 초소형 온칩(On-chip) 디지털현미경 알고리즘기술 개발 및 생균콜로니 인식/분석 자동화 기술 개발.
- 3) 바이오미세먼지 내 유해생물학적 물질 DB 기반 고속 PCR 탐지기술 개발
- 4) 단백질 기반의 바이오미세먼지 내 미생물 실시간 동정 시스템의 개발
 - 가장 간단하며 상용화가 용이한 단백질 기반의 미생물 동정 기법인 항원/항체법을 이용한 바이오미세먼지의 실시간 동정 시스템 개발의 타진.
 - 보다 정밀하고 진보된 방식인 MALDI-TOF (Matrix assisted laser desorption/ionization time-of-flight)를 이용한 바이오미세먼지의 실시간 동정 시스템 개발의 타진.

○ 2 단계:

종합 화학적 지표종 실시간 모니터링을 이용한 미세먼지 기여율 산정

- 1) 할로젠 화학 지표종 분석을 통한 발생원 기여율 산정
 - 발원지 정보와 확산 모델 활용 기여율 산정
 - 산업별, 지역별 source profile과 수용모델 활용 기여율 산정
- 2) 통합적 화학 지표종 분석을 통한 발생원 기여율 산정

- 미세먼지전략프로젝트 산출 지표종과 통합 분석.
- 기여율 산정 모델에 추가 적용 및 개선 효과 분석.

바이오미세먼지 실시간 모니터링 및 생물정보를 이용한 미세먼지 기여율 산정

- 1) IoT 기반 운영시스템 최적화 및 현장 적용 연구 수행
 - 현장 적용을 위한 바이오미세먼지 고농축 포집 및 생균콜로니 탐지시스템 최적화 연구 및 시제품 개발.
 - 각 시스템 자동제어를 위한 IoT 기반 운영시스템 개발 및 운영최적화.
 - 다양한 국민 생활환경에서의 현장 적용 연구 수행 및 보완사항 검토
- 2) 미세먼지상의 유전정보와 인공지능(AI) 기반 제어시스템 통합 운영기술 개발
 - 다양한 생활환경 내 바이오미세먼지의 DB 특성화.
 - 유전자정보 기반의 바이오미세먼지 동정 시스템 현장 적용.
 - 바이오미세먼지 연속 모니터링 트리거 신호의 정확도 향상을 위한 인공지능 적용 기술 개발.
 - 바이오미세먼지 고속 PCR 탐지기술 내 환경 DB 특성화를 이용한 정확도 향상 연구 수행.
 - 소형 바이오미세먼지 트리거 시스템을 네트워크로 구현, 바이오미세먼지 전파 확산 특성을 인공지능을 통해 예측 및 역추적기술을 이용한 바이오미세먼지 소스 트래킹 (Source Tracking) 기술 개발.
 - 다양한 국민 생활환경에서의 현장 적용 연구 수행 및 보완사항 검토.

□ 실증방안

- 바이오에어로졸의 생물유전 정보를 활용한 기여율 산정의 국제적 학술 인증을 통한 실증.
- 배출원 지역에서 할로젠화합물 추적자 농도 배출을 통한 장거리 확산 및 기여도 정밀 검증.
- 2019년 발사 예정인 대기환경정지 위성을 활용한 장거리 수송 검증 및 기여율 고도화.

[6] 기대효과

산업 활동을 통해 인위적으로 생산·배출되는 다종의 할로젠화합물들의 산업별 배출 분포 특성 및 생물 유전정보는 미세먼지 산업 및 지역 기원 규명을 위한 추적자 정보가 되며, 기타 대기 오염물질들의 산업 배출원 연구에도 활용 가능성이 매우 큼.

- 한반도와 동북아시아 고농도 미세먼지에 대한 산업별 배출의 영향과 배출원들의 지역 분포 이해는 미세먼지와 원인물질 배출량의 세부 정량화를 위한 필수 자료이자, 배출량의 시·공간

변동성을 이해하는 기반임.

○ 연구 결과의 타 부처와의 연계 활용 방법 및 내용 제시

- 산자부: 신뢰도 높은 고농도 미세먼지 산업 배출원에 대한 자료는 산업배출원의 저감 노력의 효율을 극대화할 수 있음
- 환경부: 미세먼지 예보 모델의 입력 자료 및 기여율 산정 정확도 개선을 통한 예보 모델 산출 결과의 신뢰도 향상에 기여함.
- 외교부: 국가 미세먼지 저감 정책 개선을 위한 기초자료이며, 미세먼지와 원인물질의 원격 배출원에 대한 국가의 외교적 노력을 뒷받침하는 과학적 근거로 활용됨.

별첨 4. 저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성 평가

과제명	저감 대책 수립을 위한 미세먼지 이차생성 규명 및 유해성 평가
분류(대, 중, 소)	현상규명 및 예측, 원인·영향도 규명, 생성 및 변환 규명 노출·건강영향 최소화, 건강영향 평가, 인체노출 평가
키워드	○ (국문키워드) 스모그챔버, 미세먼지, 이차생성 및 노화, 배출원, 유해성 ○ (영문키워드) Smog Chamber, Particulate Matter (PM), Secondary Formation and Aging, Emission Source, Toxicity

[1] 개요

미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 이차입자 생성특성 연구

- 중형 스모그챔버를 이용한 장거리이동에 의한 영향 규명
- 실제 대기시료를 이용한 이차입자 생성 규명
- 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 모사 대기 연구

저감 대책 수립을 위한 주요 배출원 이차입자 생성특성 규명

- 이동형 소형 스모그챔버를 이용한 배출원 특성 규명

이차생성 미세먼지 유해성 평가

- 흡입노출 평가용 노출챔버를 이용한 건강영향 평가

[2] 연구 현황 및 필요성

국내 연구 현황

- 현재 국내에는 소형챔버 (5~7 m³)가 KIST(쌍둥이 챔버)와 경북대에 있음.
- 이제 미세먼지 생성기작 규명에 대한 1차년도 연구를 마쳤으며, 체계적인 규명을 위해 더 많은 시도와 노력이 필요함.

국제 연구 현황

- 미국
 - Caltech (실내 27 m³), UC Riverside (실내 90 m³), Georgia Tech (실내 13 m³) 등 챔버 보유.
 - 이차유기물 생성 및 유기-무기(고분자)화합물 생성 등 세계 최고 수준의 연구를 수행.
- 유럽
 - EUPHORE (스페인, 실외 200 m³), PSI (스위스, 실내 27 m³)
 - Nucleation 및 이차유기물 생성, 고분자 화합물 생성 연구를 세계 최고 수준으로 수행.
- 중국
 - 비록 뒤늦게 연구가 시작되었지만, 연구개발에 대한 많은 투자로 현재는 아시아 최고 기술 보유국임.
 - GIG-CAS (실내 30 m³), 칭화대 (실내 2 m³), Zhejiang University (실내 3m³)

□ 필요성

- 현재 동북아시아(우리나라 및 중국)는 고농도 미세먼지 사례가 빈번하여 국민 보건 및 환경문제에 큰 영향을 끼치나 저감 대책을 위한 생성 기작 규명과 보건을 위한 유해성 특성화는 체계적으로 수립되지 못한 실정임.
- 생성기작 규명의 필요:
- 전구물질 배출저감과 미세먼지 생성 간 비선형적 관계에 대한 과학적 이해 필요:
- 스모그 챔버는 이차입자의 생성기작을 연구하기에 매우 유용한 장치임
 - 동북아 대기 화학조성의 영향:
 - 실제 대기 및 배출원 연구의 필요성:
 - 다양한 시나리오 모사의 필요성:
 - 장거리 유입의 영향:
 - 이차생성 미세먼지 유해성 연구의 필요성:

□ 기초·원천연구의 추진방안(7년간)

- 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 이차입자 생성특성 연구(1단계)
 - 1단계 3년간은 현 국가전략프로젝트에서 도출된 3가지 가설에 의한 고농도 미세먼지 생성 규명에 주력함. 현재 수행중인 프로젝트를 통해 구축 예정인 중형 스모그챔버를 활용하여 장거리유입 및 장거리유입+국내정체의 영향을 규명함.
- 저감 대책 수립을 위한 주요 배출원 이차입자 생성특성 규명(1단계+2단계)
 - 배출원에서 미세먼지 생성 특성을 연구하기 위하여 이동형 소형 스모그챔버를 구축하는

것이 1단계 목표임.

- 2단계에는 1단계에서 구축한 이동형 스모그챔버 시스템을 활용하여 배출원 현장에서 실험을 수행하며, 주요 배출원별 미세먼지 생성 핵심인자 규명 및 저감 대책 수립을 위해 기존 소형 및 중형 스모그챔버와 연계하여 연구함.

○ 이차생성 미세먼지 유해성 평가(1단계+2단계)

- 이차생성 미세먼지에 의한 흡입노출 유해성을 평가하기 위해 우선적으로 flow reactor(흐름반응관)와 균일한 농도로 전신노출이 가능한 동물노출챔버로 구성된 미세먼지 흡입노출 평가시스템을 개발함.

[3] R&D 현황 및 시사점

기존 R&D 현황

기존 과제와의 차별성 및 시사점

본 전략과제의 위치

- 본 과제는 수행 중인 국가전략프로젝트와 연계되어 미세먼지의 저감 방안을 개발하는 기초연구로써 이차입자 생성의 특성 및 고농도 에피소드 발생의 원인을 규명하고 저감 방안 개발 및 예측모델 개선에 필요한 과학적 자료를 확보하는 전략적 특성을 가짐.

기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 중형 스모그 챔버의 활용:
- 스모그챔버 제작/운영 노하우 및 Mobile Laboratory 활용:
- 과학적 연구결과 연계 활용:

[4] 추진 전략

핵심 목표

- ▶ 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위한 이차입자 생성특성 연구
- ▶ 저감 대책 수립을 위한 주요 배출원 이차입자 생성특성 규명 및 유해성 평가

과제 추진형태 : 총괄

- 본 연구는 (1) 실제 대기를 대상으로 미세먼지 생성 핵심인자를 규명하는 연구와 (2) 주요 배출원 이차입자 생성특성 연구, (3) 미세먼지 유해성 평가의 3가지 큰 주제로 구성되어 있으며, 연구 항목별로 구분된 단위 과제들로 구성된 총괄과제로 추진하는 것이 효율적인 것으로 판단됨.

지원 기간 및 예산

- 기간 : 총 7년 (1단계 3년+2단계 4년)
- 예산 : 총 200억(이동형 챔버 구축비용 25억 포함), 1차년도 25억

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 현재 기술 수준
 - 소형 스모그챔버를 이용한 청정 공기 중 유기입자의 생성 실험을 통해 이차유기입자의 생성 특성을 규명하고 미세먼지 예보 모델의 모수 확보 가능

연구방법 및 내용

- 1단계 목표 및 연구 내용
 - 목표 : 실제 대기 및 다양한 미세먼지 생성 시나리오를 구성하여 고농도 미세먼지 생성을 모사함으로써 실제 대기 중 미세먼지 생성 핵심인자를 규명하기 위한 과학적 자료를 확보함
 - 연구 내용
 - 현재 수행중인 프로젝트를 통해 구축 예정인 중형 스모그챔버를 활용하여 장거리유입 및 장거리유입+국내정체의 영향을 규명함. 중국 대기질 조건에서(고농도 SO₂, NO_x, NH₃, 방향족 VOC, 다습) Ammonium Sulfate 또는 황산 Seed Particle을 사용하여 중국 PM을 생성하여 수율 및 흡습성을 조사. 그 후 장거리 이동을 모사하기 위해 다중일 반응을 광화학반응/암반응을 번갈아하여 화학적 노화를 조사. 그리고 국내 유입후 정체에 의한 이차생성을 규명하기 위해 국내조건(고농도 NO_x, 다습: NH₃와 방향족 VOC는 농도조절) 생성 기작 및 수율을 측정.
 - 스모그챔버 및 흐름반응기를 활용한 이차입자 생성 및 변환 실험 : 대기 및 청정공기를 매체로 한 비교 연구 수행을 통해 실제 대기에서 일어나는 이차입자 생성 특성 규명. 국내 배출량이 많은 방향족 유기화합물을 우선 연구 대상 물질로 함.
 - 이차입자 성분의 상세 화학분석 및 화학반응 메커니즘 규명 : 고분해능질량분석기 등

첨단 분석장비를 활용한 온라인 및 오프라인 분석을 통해 상세한 이차입자의 성분 자료를 확보하고 이를 이차입자의 생성경로를 규명하기 위한 화학반응 메커니즘 개발 및 이차입자 생성 핵심인자 규명에 활용함.

- 물리화학적 특성 평가(상분배, 흡습성, 상분리, 점성도) : 이차입자의 변환 및 노화에 영향을 주는 물리화학적 특성 평가 및 예측모델에 필요한 자료 확보.
- 한국형 미세먼지 예측모델에 적용 가능한 입자생성 모듈의 모수 개발 : 예보모델에 적용을 위한 박스 모델링을 통해 화학반응의 단순화 및 이차입자 생성효율 등 모수 확보.
- 이동형 소형 스모그챔버와 Mobile Laboratory를 연계하여 배출원 현장에서 이차입자의 생성을 모사할 수 있는 시스템을 구축함.
- 이차생성 미세먼지에 의한 흡입노출 유해성을 평가하기 위해 flow reactor와 균일한 농도로 전신노출이 가능한 동물노출챔버로 구성된 미세먼지 흡입노출 평가시스템을 개발함. 이차유기입자를 모사하는 경우 입자뿐만 아니라 반응성 및 유해성이 높은 오존, OH 라디칼 등이 유동 중에 포함되어 있기 때문에 이차유기입자만의 영향을 구분하기 위하여 control 챔버, 가스 노출 챔버, 가스+입자 노출 챔버로 구성함.

○ 2단계 목표 및 연구 내용

- 목표 : 이동형 스모그챔버 시스템을 활용하여 배출원 현장에서 미세먼지 이차생성을 모사하며, 기존 소형 및 중형 스모그챔버와 연계하여 주요 배출원별 저감 대책 수립을 위한 핵심 자료를 제공함. 또한 이차생성 미세먼지 흡입노출에 따른 유해성 자료를 생산하여 저감 대책 우선순위 도출에 활용함.

- 연구 내용

- 1단계에서 구축한 이동형 스모그챔버 시스템을 활용하여 주요 배출원 현장에서 미세먼지의 이차생성을 모사함. 또한 주요 배출원별 미세먼지 생성 핵심인자 규명을 위해 기존의 소형 및 중형 스모그챔버를 활용하여 전구체 변화에 따른 생성 특성을 연구하며 저감 대책 수립과 연계함.
- 이차입자 상세 화학분석, 화학반응 메커니즘 규명, 물리화학적 특성 평가 등을 위해 Mobile Laboratory에 필수적인 측정 및 분석장비를 설치하여 현장 분석을 수행하며, 그 외 내용은 1단계 연구내용에서 기술한 내용과 기본적으로 유사함.
- 1단계에서 개발한 이차생성 미세먼지의 발생장치 및 동물 전신노출챔버를 이용하여 미세먼지 주요 화학조성별로 노출실험을 수행하고 노출된 동물을 해부하여 호흡기, 심장, 뇌조직, 망막 등 생체기관의 병리현상 연구를 수행함. 이차생성 미세먼지의 유해성을 직접적으로 규명한 자료를 활용하여 건강위해성뿐 아니라 저감 대책의 우선순위 도출을 위한 기초자료로 활용하고자 함.

□ 실증방안

- 고농도 미세먼지 발생 원인을 국내발생, 장거리이동, 유입 후 국내정체로 구분하여 이차생성 미세먼지의 기여도를 각각 산출. 즉 고농도가 국내 생성, 중국발 생성 및 이동에 의한 생성의 합에서 시너지 효과가 있는 것인지를 규명. 특히 국내조건에서 고농도 NO_x, 오존과 VOC-limited조건을 고려.
- 실제 대기를 이용한 스모그챔버에서 생성된 이차입자 농도와 박스모델을 이용한 예측 농도의 비교를 통해 연구를 통해 확보된 모델 자료의 정확도 평가 및 개선 방안 도출.
- 실제 대기의 상태는 계절 및 시간에 따라 크게 변화하기 때문에 실증을 위한 실험은 이를 반영하여 계절별 일간 시간별 대표적 대기에 대해 실시함.

[6] 기대효과

- 미세먼지 생성기작의 과학적 이해 향상
 - 기존의 LA스모그 생성에 초점에 맞추어 유기화합물 기체상 대기화학반응, 생성의 휘발성, 기체-입자 분배 등으로 정립된 미세먼지 생성이 동북아의 다양한 조건에서(즉, 무기가스, 다상/비균일 반응, 습도와 흡습성에 따른 입자 수분 생성, 입자의 산도(acidity)) 미세먼지 생성을 이해할 수 있음. 특히 한반도에서 고농도 발생 원인에 대해 핵심인자를 규명함으로써 저감 대책 수립 기초자료로 활용할 수 있음.
- 저감 대책 수립을 위한 핵심 기초자료 생산
 - 주요 배출원을 대상으로 이차입자 생성특성을 규명함으로써 배출원별 미세먼지 조성 및 이차입자 생성 yield 등을 제공할 수 있고, 어떤 배출원이 미세먼지 문제를 해결하는데 중요한지 판단할 수 있는 근거자료와 함께 배출원별 저감 방안에 대한 제언도 가능할 것임.
 - 또한 미세먼지 유해성과 관련하여 건강영향과의 직접적인 관련성을 규명함으로써 유해성 관점에서는 어떤 미세먼지 성분이 중요한지 제시할 수 있으며, 이를 이용하여 저감 대책 수립을 위한 우선순위 도출에 기여할 수 있을 것임.
- 생성기작의 과학적 이해로 대기 모델 예측력 향상
 - 대기질 모델인 CMAQ 및 GEOS-Chem 등에 동북아 조건에서의 생성기작을 모수화한 동북아(한반도)모듈을 보완시켜 예측력을 향상시킴
 - 한반도 모듈개발로 한국형 모델 개발이 가능하며, 이를 통해 국내 대기질 변화에 따른 보건, 기후/기상, 식생 등 환경에 미치는 영향에 대한 과학적 예측 능력 확보.
- 복잡한 미세먼지 성분 분석을 첨단 장비를 사용함으로써 분석기술 향상, 장비개발 동기 부여
- 예측 및 유해성 분석 향상을 통한 국민보건 향상

연구 결과의 타부처와의 연계 활용 방법 및 내용 제시

- 환경부의 미세먼지 예측 및 효율적 저감 및 관리를 위한 정책개발 자료로 활용.
- 산업부 및 환경부의 미세먼지 저감 기술 개발을 위해 배출원 연구결과 활용.
- 보건복지부의 미세먼지 노출저감을 위한 정책자료로서 유해성 결과 활용.
- 기상청의 기후변화 예측 및 대응 전략을 위한 기본 자료로 활용.

별첨 5. 다중 시공간 대기질 진단 및 예보모델 플랫폼 개발

□ 연구의 필요성

- 대기질 모사는 관측 자료와 함께 배출량과 농도의 정량적 관계를 이해하고, 배출량 변화에 따른 농도 변화를 예측에 활용됨
 - 미세먼지의 경우 Primary PM (1차 미세먼지) 외에 전구물질 (NO_x, SO_x, NH₃, VOC 등) 배출 조건에 의해 비선형적으로 변화하는 바, 배출량-농도 관계를 정량적으로 이해하기 위해 대기질 모델이 이용됨.

- 아래 그림은 대기질 모델이 대기질 개선 대책 마련에 활용되기 전에 필요한 항목을 보이는 것으로 국내에서는 이러한 중요 체크 포인트가 종합적으로 검토된 적이 없음.
- * 국내 특성에 맞는 대기질 모사 개선도 불확도 범위 검토를 통해 우선순위적으로 적용되는 것이 바람직. 이러한 시도는 중국의 MICS-Asia, 일본의 J-STREAM, 미 환경청의 주 시행계획 (SIP; State Implementation Plan)을 위한 모델 Platform 제공과 같은 맥락으로 이해됨.

- 국내에서도 대기질 모사 시스템 개선 연구가 우선적으로 진행되어야 하며, 이를 위해서는 대기질 농도가 재현되는 요소인 대기질 모델 외에 주요 입력자료인 기상과 배출량 자료에 대한 종합적인 불확도 평가와 개선이 요구됨
- 미세먼지의 예측성은 연평균 농도와 고농도 사례 시 모두 농도 예측이 중요하나, 국민의 눈높이 관점에서는 고농도 사례에 대한 예측성을 높일 수 있는 방안 모색이 필요
 - 국내 미세먼지는 중국, 북한 등 국외 영향이 높으며, 효과적인 대책 마련을 위해서는 국내 요인과 함께 국외 유입 영향에 대한 정확한 평가 필요.
 - 현재 미세먼지 현황 농도와 기여도 분석 시, 난이점으로는 주목 받는 기상, 배출량, 대기질 화학 모델의 모듈별 최적화 연구를 적용 단계 관점에서 수행 필요.

□ 주요 연구내용

- 동북아 및 국내에서의 미세먼지 모사 개선을 기본 시스템 마련 및 지속적 개선을 위한 보완점 제시. 구성 요소인 기상, 배출량, 대기 화학수송*로 구분하여 접근
 - * 연구 진행은 모델 개발이 아닌, 대기질 모사 차원에서 모듈 검토 및 최적화로 진행. 실질적인 기상 및 배출량 개선은 별도 과제에서 추진.

- 고농도 미세먼지 예측성 향상을 기상모사 최적화: 이동 경로 및 패턴 정립, 고농도 발생 시 기상요인, 이동 경로 (수평, 수직) 에 따른 농도 및 구성성분 변화, 복잡한 해안가에 점오염원에 대한 고려, 토지피복도와 지형 최신화, 풍향, 기온 등 기상 조건이 미세먼지 농도 및 성분에 미치는 영향 분석, 복잡한 해안선 및 지형 효과.
 - 고해상도 시공간 배출량 자료 활용: CleanSYS 등 실시간 고해상도 배출 자료 활용, 지역 배출량, 변화 추세, 계절별/일별/시간별 변화, 기상요소 적용, 기존 상향식 배출목록에 대한 평가, 중국 등 동북아 지역의 배출량 변화 추세를 고려한 위성 등 관측자료 기반의 상향식 배출량 추정기법 활용, 암모니아 등 배출량 평가.
 - 지역별 고농도 발생원인 분석 시스템: 고농도 시 배출현황 적용을 통한 분석 시스템 마련, 국내 미세먼지 농도의 계절적 변화와 생성-성장의 중요도 분석, 계절별 농도 변화의 주요원인, 장기 모사 수행에 따른 계절별 주요 농도 원인물질 생성 및 이동 해석, 국내외 (중국, 북한 등) 기여도 고도화, 주요 물질별 유입량 및 전환율 변화, 동북아 배출 특성에 맞는 미세먼지 생성 및 성장 가설 제시, 기준 강화에 따른 효율적인 관리 수단 등.
- 기본적인 대기질 모사 플랫폼이 마련되면 대기질 모사를 통해 고농도 미세먼지 발생 시 동북아 및 국내 거동과 관련된 이해 증진을 위해 다양한 진단 도구를 활용 가능. 연구 초기에는 개선점 도출에 활용
- * 진단도구는 기본적인 농도 모사 외에 농도가 생성되는 과정이나 기여도 분석을 위한 방법으로 크게 민감도 (Sensitivity) 방법과 표식자 (Tagging) 방법, 과정 분석 (Process Analysis), DDM (Direct Decoupled Method) 등이 있음

활용방안

- 중앙 정부 및 지자체에서의 국가간, 지역간 미세먼지 등 대기오염물질 거동 분석: 농도 및 기여도
- 지역 배출 특성을 고려 가능한 대기질 모사 기본 플랫폼 마련
- 권역별 기여도 분석을 통한 고농도 시 원인 분석 등

지원 기간 및 예산

- 기간 : 총 7년 (1단계 4년+2단계 3년)
- 예산 : 총 185억, (단계별 1차년도 30억, 나머지 25억)

별첨 6. 중소규모 대기배출원에 적용 가능한 저온촉매와 SCR 원천기술 개발 및 스마트 제어기술 현장적용

과제명	중소규모 대기배출원에 적용 가능한 저온촉매와 SCR 원천기술 개발 및 스마트 제어기술 현장적용
분류(대, 중, 소)	미세먼지 배출저감, 고정오염원 배출저감, 고정오염원 2차생성 저감
키워드	<ul style="list-style-type: none"> ○ (국문키워드) 질소산화물 제거, 선택적 촉매 환원법, 저온 촉매, 중소규모 배출원, 스마트제어 ○ (영문키워드) NO_x removal, Selective catalytic reduction, Low temperature Catalyst, Small emission sources, Smart control

[1] 개요

□ 연구 추진 배경

- 최근 미세먼지 경보 발령 일수가 증가함에 따라 대기환경에 대한 국민의 불안이 심해져 미세먼지 저감 대책 마련이 시급함. PM₁₀의 오염도는 최근 정체 상황인 반면 인체 위해성이 훨씬 큰 PM_{2.5}는 증가하는 추세.
- 미세먼지는 고체 상태로 배출되는 분진 및 탄소입자에 기인한 1차 미세먼지와 가스 상태로 배출된 물질이 공기 중의 다른 물질과 광화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 2차 미세먼지로 나뉨.
- PM_{2.5}는 질산염과 황산염 등이 58.3%로 대부분을 차지하고 있으며, 탄소류와 검댕이 16.8%를 구성하고 있음. 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 암모니아(NH₃), 휘발성 유기화합물(organiсs) 등이 대기 중에서 화학반응을 일으켜 생성되는 2차 미세먼지는 대부분 위해성이 더 높은 초미세먼지에 해당되므로 이를 저감하기 위한 기술개발이 시급함.
- 미세먼지는 제조업의 연소 시설에서 가장 많이 배출되고 있으며, 자동차 및 선박 등 이동오염원에서도 많이 배출됨. 인체 위해성이 더 높은 초미세먼지의 원인인 질소산화물과 황화합물의 저감 장치에 대한 기술적 한계가 있어 지속적인 연구가 필요함.
- 주로 발전기나 소각로 등의 고정된 설비(고정오염원)에서 발생하는 NO_x를 제거하기 위해 암모니아를 이용한 NH₃-선택적 촉매환원법(selective catalytic reduction, SCR)이

적용되고 있으며, 대규모 공정을 중심으로 현장 적용기술이 상용화되어 현업에 활용되고 있음.

- NH₃-SCR은 NO_x 전환율이 높고 온도 범위가 넓어 질소산화물 제거에 매우 효율적인 기술로 엄격해지는 환경규제를 충족시키기 위한 기술로 평가되고 있음.
- 현재 사용되고 있는 SCR 촉매는 국내기술의 부재로 인하여 비싼 값에도 불구하고 전량 수입에 의존하고 있어 국산화 필요성이 지속적으로 제기됨. 그러나 독자적인 SCR 촉매 개발을 위해서는 촉매의 핵심소재인 제올라이트의 혁신적인 개발이 선행되어야 하며, 이를 통하여 고온에서의 (> 750℃) 우수한 열적 내구성과 함께 엔진시동 초기 물이 포함된 낮은 배기가스 온도영역 (< 200℃)에서 NO_x 제거 성능이 확보되어야 함.
- 따라서 연구개발 과제를 추진하여 실제 운전조건에서 배기가스 제거 성능이 우수한 제올라이트 기반 SCR 촉매의 원천기술을 개발할 필요가 있음. 개발된 촉매의 물리·화학적 성질을 최적화하여 지속적으로 엄격해지는 배출규제에 탄력적으로 대응하여야 함.
- 또한 중소규모 고정오염원은 전국적으로 산재되어 있고 측정 및 관리의 사각지대에 있으며 적용 가능한 적정 제어기술도 부재한 상태임. 중소규모 고정오염원은 대기오염 배출에 대한 인식이 부족하고, 고가의 장비의 설치와 운영에 한계가 있으며, 전문적인 관리인에 의한 최적 운전이 어려우며, 소규모 시설에서 빈번히 나타나는 비정상 운전이나 급격한 변동부하에 대응하는 능력이 떨어지는 문제가 있음.
- 이에 중소규모 고정오염원에서 배출되는 NO_x 제어를 위한 친환경 촉매 환원기술을 국산화하고 경제성과 현장 적용성을 확보할 필요가 있음. 또한 배가스 자동측정장치와 연계한 스마트 제어기술을 접목하여 측정과 관리의 한계를 극복하고, 비정상 운전 조건에서도 대응할 수 있어야 함.

[2] 연구 현황 및 필요성

□ 연구 현황

- 2013년 전국 대기오염물질 총배출량은 347만톤이 넘었으며, 이 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출량이 각각 12만톤과 7만 7천톤으로 산정되었음. 2차 미세먼지의 주범인 NO_x와 SO_x의 배출량이 각각 109만톤과 40만톤에 달하는 점을 감안하면 매우 심각한 수준임.
- 석탄 및 석유와 같은 화석 연료를 사용하는 내연 기관에서 배출되는 1차 미세먼지는 전기 집진 방식 및 Diesel Particulate Filter로 대부분 제거 가능함.
- 2차 미세먼지 발생원 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 질소산화물(NO_x)을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 기술로 알려진 NH₃-SCR 관련 연구는 1990년대 이후부터 연구소, 대학 및 일부 기업체를 중심으로 많이 진행되어 왔으며 현장 적용기술이 상용화되었음.
- SCR 방법은 배기가스 유로에 촉매층을 장착하고 별도의 환원제를 분사하여 환원제와 질소산화물이 촉매작용에 의해 선택적으로 반응하게 하는 기술임. 환원제로는 암모니아, 요

소(Urea), 탄화수소(HC), 일산화탄소, 수소 등이 사용되는데, 특히 암모니아나 요소 등 암모니아계 환원제의 환원성이 뛰어나 점차 강화되는 배기가스 배출 허용기준에 대처할 수 있는 기술로 주목받고 있음.

- 그러나 국내 기술의 부재로 인해 핵심 구성 요소인 SCR 촉매를 전량 수입에 의존하고 있어 국산화 필요성이 지속적으로 제기되며, 기존 해외기술과 경쟁 가능한 수준의 독자적인 SCR 촉매 개발을 위해서는 핵심 소재와 개발의 원천기술 확보가 절실함.
- NH_3 -SCR 반응의 촉매로는 바나듐계 산화물 촉매와 전이금속을 이온 교환한 제올라이트 촉매가 주로 사용되는데, 이들 촉매는 300°C 이상의 고온에서 90% 이상의 NO_x 를 제거하지만, 200°C 이하의 저온에서는 활성이 매우 낮다는 단점이 있음.

□ 연구 필요성

- 향후 대규모 고정오염원을 비롯한 중소형 고정오염원에서 발생하는 미세먼지 문제를 해결에 적용하기 위해서는 고온에서도 활성을 유지할 수 있는 담체 개발이 필요함. 또한 고온에서 분해되어 독성을 보이는 바나듐을 대체할 수 있는 새로운 활성 성분을 개발하여 담체에 효과적으로 잘 분산할 수 있는 기술을 꾸준히 연구 개발하여야 함.
- 독자적인 제올라이트 합성 기술을 바탕으로 기존에 보고되지 않은 새로운 구조/조성을 갖는 제올라이트를 개발 하여 궁극적으로 배기가스 후처리 촉매 개발의 한계를 극복하여야 함. 이를 위하여 다양한 유기구조유도물질 (Organic structure directing agents) 들을 이용하여 SCR 촉매로 사용가능한 제올라이트 지지체를 합성하고, 합성된 제올라이트를 바탕으로 SCR 촉매의 활성점으로 작용하는 구리 혹은 철 이온과 같은 전이금속의 담지 방법 및 함량을 최적화하여 NO_x 제거율을 향상시킴.
- 또한 제올라이트 합성 시 Si 함량이 높아짐에 따라 수열안정성이 좋아지는 점을 착안하여, 높은 실리카 함량 ($\text{Si}/\text{Al} > 5$)의 제올라이트 합성연구를 진행하고 SCR 촉매의 구조적 안정성을 확보할 필요가 있음.
- 최근 자동차용 NH_3 -SCR 촉매로 전이금속이 이온 교환된 제올라이트가 넓은 온도 범위에서 NO_x 전환율이 높고 고온의 수열처리에도 활성을 상당히 유지하여 대형차와 중형차 등에 도입되고 있음. 그러나 이러한 제올라이트 기반 촉매들 역시 저온과 고온 활성이 급격히 낮아지는 단점이 있어 이를 해결할 수 있는 핵심 기술 개발이 필요함. 따라서 이러한 제올라이트 기반 촉매들은 저온 활성을 높이기 위한 연구와 더불어 고온에서의 수열 안정성 확보를 위한 연구도 병행하여 진행되어야 함.
- 또한 중소규모 오염원에서 배출되는 미세먼지 2차반응물질을 실질적으로 저감하기 위해서는 NH_3 -SCR 반응의 DeNO_x 효율 및 배가스의 NO_x 농도와 연계한 능동 제어의 도입이 필수적임. 특히 유입 고농도 조건이나 변동 부하 조건에서도 NH_3 -SCR 반응효율을 안정적으로 확보하기 위한 스마트 능동제어 기술을 적용하여야 함.

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

- 세계적으로 미세먼지 저감을 위하여 입자상물질(PM)을 비롯한 2차 미세먼지의 발생원인인 NO_x 및 SO_x 저감 기술 개발을 중점적으로 진행하고 있으며, 중소 고정오염원뿐만 아니라 이동오염원에 대해서도 다양한 SCR 기술이 개발 적용되고 있음.
- 새로운 SCR 촉매 개발을 위하여 2000년 이후 Ag/Al₂O₃, Ag/AlF₃/Al₂O₃, Rh/Al₂O₃, Rh/SiO₂, Ag페로브스카이트(La_{1-x}Ag_xMnO₃) 등과 같이 금속이 담지 또는 포함된 산화 금속 계열의 SCR 촉매에서 많은 연구가 진행됨. 제올라이트의 경우 Cu-SSZ-13 및 Fe-ZSM-5을 이용한 저온활성, 수열안정성 증진 등에 대한 연구가 주를 이루고 있음.
- 그러나 제올라이트에 기반한 SCR 촉매는 CHA 제올라이트와 소수의 제올라이트를 중심으로 국내의 연구가 편중되어 있으며, 저온 활성에 대한 연구와 고온 수열안정성을 중심으로 한 연구는 미흡하며, 특히 고온 희박조건과 재생조건에서의 제올라이트 안정성 향상에 관한 연구는 없음.
- 최근 국내에서 미세먼지 저감에 대한 사회적 요구와 기술적 수요가 증가하면서 관련 기술에 대한 연구가 시작되는 단계임. 특히 현장 적용과 상용화 필요성이 크게 대두되고 있음.

□ 기존 과제와의 차별성 및 시사점

- 본 제안 연구과제는 미세먼지 발생의 가장 큰 원인인 질소산화물 배출저감을 위하여 기존의 다양한 연구 결과를 토대로 저온 활성과 고온 수열안정성을 동시에 구현할 수 있는 촉매 개발을 목표로 하고 있음.
- 기존 연구개발 사업들은 이미 성능이 우수하다고 알려진 SCR 촉매를 이용한 공정 시스템 개발 혹은 후처리를 통한 촉매 성능 개선에 초점을 두고 있어 촉매의 상용화 및 현장 적용에 있어 한계가 명확함.

- 본 연구개발에서는 독자적인 제올라이트 합성 기술을 바탕으로 기존에 보고되지 않은 새로운 구조/조성을 갖는 제올라이트를 개발하여 원천기술을 확보.
- 발전소, 산업 공장 등 고정오염원에 폭넓게 적용 가능한 금속산화물 촉매에 대한 연구는 상업용 아나타제 티타니아에 담지된 바나듐 계열 촉매에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 고온 안정성이 향상된 담체 개발과 독성이 있고 값이 비싼 바나듐을 대체할 활성 성분 개발에 대한 연구는 많지 않음.
- 구리 담지 제올라이트 촉매에 관한 연구가 많이 진행되고 있기는 하지만, 저온 활성을 향상시키는 데는 모두 한계점을 보이고 있음. 따라서 제올라이트의 알루미늄 함량을 조절을 통해 활성점을 확보한 후 다양한 종류의 금속을 추가로 담지하여 저온 활성을 획기적으로 향상시키고자 함.

□ 기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 기존 개발된 SCR 촉매에 대한 내구성 및 내열성을 개선 연구를 통해 확보된 데이터베이스를 기반으로 새로운 제올라이트 촉매에 대한 가이드라인을 제시.
- 독자적인 제올라이트 합성 기술을 기반으로 수입에 의존하고 있는 SCR 촉매의 국산화 및 핵심 원천소재 기술의 개발.
- 개발된 촉매를 다양한 분야의 오염원 배출저감에 적용하며, 각 오염원의 배출 특성과 실제 산업 현장의 적용 과정에서 발생할 수 있는 여러 변수를 예측.
- 이를 토대로 연구 단계에서부터 발생 가능한 여러 인자를 고려할 수 있으므로 개발된 기술의 상용화 단계 진입을 앞당김.

[4] 추진 전략

핵심 목표

- ▶ 새로운 구조 및 조성을 갖는 제올라이트 지지체 합성
- ▶ 저온의 높은 NO_x 제거 성능과 고온 내구성이 우수한 질소산화물 저감 촉매 제조
- ▶ 중소규모 고정오염원에 적용 가능한 촉매 설계 및 NH₃-SCR 시스템 개발
- ▶ 자동 배가스 측정장치와 연계한 스마트 제어기술 현장적용

□ 과제 추진형태 : 3개 세부연구진으로 구성된 연구단 형태의 공동연구

- 새로운 구조의 고효율/고내열성 SCR 촉매 소재 원천기술 개발
 - 신규 구조와 조성을 갖는 제올라이트 소재를 제안하고 필요한 원천기술 개발.
 - 합성된 제올라이트 촉매를 바탕으로 전이금속의 담지방법 및 함량을 최적화하여 NO_x 제거 활성 향상.
 - 고온 수열 처리후 촉매의 활성 저하 및 내열성 평가 및 SCR 촉매의 물리·화학적 특성 변화 규명.
- 저온의 높은 NO_x 제거 성능과 고온 내구성이 우수한 질소산화물 저감 촉매 제조
 - 구리를 담지한 CHA 촉매를 비롯한 다양한 종류의 작은 세공 제올라이트를 합성하여 SCR 반응의 저온 성능과 고온 수열 안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 촉매 개발.
 - 제올라이트의 Si/Al 몰비를 고온의 수열 안정성이 확보되는 범위로 적절히 조절하여 합성한 후 활성 성분의 종류와 함량을 폭넓게 변화시키며 활성 조사.
 - SCR 반응의 활성이 높은 금속산화물 담지 다공성 티타니아 촉매에 반응 활성과 안정성을 향상시킬 수 있는 조촉매나 증진제를 추가로 담지하여 성능이 개선된 금속산화물 촉매 개발.
- 중소규모 배출원에 폭넓게 적용 가능한 SCR 시스템 현장적용 및 능동제어
 - 오염원의 종류, 배출 가스의 특성, SCR 정화 시스템 운전 조건 등을 동시에 고려하여 각 용도에 맞는 최적화된 SCR 시스템 설계 및 현장적용.
 - IoT에 기반한 능동제어 기술을 현장용 SCR 시스템과 결합하여, 다양한 운전조건에서도 고효율을 달성할 수 있는 현장기술 완성.

□ 지원 기간 및 예산

- 기간 : 2019 ~ 2025년 (7년)

- 1단계 : 2019 ~ 2021년 (3년) 원천기술 확보
- 2단계 : 2022 ~ 2025년 (4년) 현장적용 및 상용화
- 예산 : 총액 54억원 (1차년도 6억원)

[5] 세부 추진 방안

□ 현재 기술 수준 및 목표 설정

- 현재 전세계적으로 상용과 승용을 포함해서 제품화된 Urea-SCR 촉매 중 가장 높은 NOx 제거 성능은 대략 97~98% 수준임. 따라서 본 연구개발 사업에서는 현 시점 세계 최고 수준의 SCR 효율을 출발점으로 하여 NOx 제거 효율을 99%까지 끌어 올리는 초고 효율 SCR 촉매를 개발함.
- 이는 세계적으로도 미국의 SwRI (Southwest Research Institute) 등 일부 연구소에서 타당성 검토(Feasibility study)가 진행되는 수준인 바, 원천기술개발을 추진하고자 하는 본 연구는 그 혁신성이 큼.

□ 연구방법 및 내용

○ 연구내용

- 신규 연구개발 사업을 통해 제안된 독자적인 제올라이트 합성 기술을 기반으로 수입에 의존하고 있는 제올라이트를 국산화 할 수 핵심 원소재 원천기술을 확보함.
- 개발된 SCR 촉매에 대한 활성 및 내구성을 개선.

○ 1단계(3년): 저온 활성과 고온 안정성이 향상된 촉매 개발

- 합성 방법의 개선으로 알루미늄 함량이 높은 CHA 촉매를 제조하여 구리를 비롯한 이원 전이 금속 담지 후 반응성 평가.
- 다양한 종류의 작은 세공 제올라이트인 AEI와 AFX 등을 합성하여 전이 금속 담지 등 기능화를 통해 SCR 촉매로 활용 가능한지 평가.
- 다공성 티타니아의 열적 안정성 향상 연구를 통해 금속산화물 촉매의 적용 가능한 영역을 확장하는 한편, 다양한 종류의 활성 성분 및 증진제의 추가로 활성을 향상시켜 질소산화물 제거 효율 극대화.

○ 2단계(4년): 다양한 시설의 배출가스 저감시스템에 적용하기 위하여 촉매 최적화와 스마트 제어기술 적용

- 대규모 배출원뿐만 아니라 중소규모 대기오염물질 배출원에도 적용할 수 있는 경제성과 효율성을 잘 조화시킨 촉매 설계를 목표로 함.
- 다양한 분야의 현장에 적용할 수 있도록 촉매 작동 온도 범위 확대와 촉매 수명 연장

에 대한 연구 진행.

- 개발한 촉매의 현장 적용 및 시스템 특성 평가를 통해 각각의 현장에 맞는 최적 구동 조건을 제시하는 한편, 다양한 연료 사용이 촉매에 미칠 수 있는 영향을 파악하여 내구성과 피독 특성 평가를 통한 개선 방안 도출.
- 대기오염물질 배출특성에 따른 최적 제어 효율을 달성하기 위해 자동 배가스 측정장치와 연계한 스마트 능동제어 기술 적용과 현장 실증.

□ 실증방안

- 다양한 방법으로 제조한 촉매의 특성 분석을 통하여 SCR 촉매로 사용 가능성 여부 평가.
- 제올라이트 물성 및 전이금속에 따른 열적 내구성 (850℃ 이상) 향상 평가.
- 실차 테스트 및 산업 현장 테스트를 통해 제조된 촉매의 성능 평가.
- 배기가스 자동 측정장치와 연계한 능동제어 기술을 적용하고, 부하 변동과 비정상 운전 조건에서의 성능 검증.

[6] 기대효과

○ 기술적 측면

- 기존 대규모 고정오염원에만 적용되던 배기가스 저감 기술의 문제점인 미세먼지·NO_x 처리 및 에너지 효율의 한계를 극복하여 진보된 기술개발을 유도.
- 중소규모 고정오염원 배출가스 정화 촉매에 관한 원천 기술의 확보를 통해 지속적으로 강화되고 있는 환경 규제에 효율적으로 대처할 수 있는 경쟁력 확보.

○ 경제·산업적 측면

- SCR 촉매 원천기술 개발로 기존 상용 SCR 촉매 대체하여 DeNO_x 공정의 효율성 향상 및 비용절감.
- 관련 촉매 기술에 대한 물질특허 획득으로 국제적인 기술 경쟁력 확보.

별첨 7. 도로변 등 도심지역에서 민감계층, 취약계층 미세먼지 노출 저감 방안 연구

과제명	도로변 등 고농도 도심지역에서 민감계층, 취약계층의 미세먼지 노출저감 방안연구
분류(대, 중, 소)	미세먼지 배출저감- 도로 및 비도로 이동오염원- 차량 및 선박 배출 저감
키워드	<ul style="list-style-type: none"> ○ (국문키워드) 경유차 후처리장치, 나노미세먼지, 경유어선 ○ (영문키워드) Diesel Aftertreatment, Nano Particles, Diesel fishing boat

[1] 개요

운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발

- 운행중인 경유차의 후처리장치(DPF, SCR)의 정상작동을 감시관리 할 수 있는 비파괴방식 장치 개발
- 자동차 배출가스 데이터 실시간 online 취득 및 빅데이터 처리기술개발 (1단계는 OBD 정보, 2단계는 별도로 추가 센서 정보로 확장)
- 자동차 배출가스 실시간 감시용 통합 센서(PM, NOX, NH3, CO2, CO, THC) 기술 개발
- 자동차의 배출가스 빅데이터를 이용한 자동차 배출량 산출 기술개발
- 자동차의 배출가스 빅데이터를 이용한 자동차 결함확인 및 정기/정밀검사 기술개발

대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발

- 도로변 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 측정과 인체유해성 분석기술개발
- 수도권 도로변 오염도지도 및 유해지도 작성과 관리방안
- 자동차 sub-23nm 미세먼지 배출현황과 저감 기술 개발

연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발

- DPF와 SCR 장치를 장착한 선박용 경유엔진 개발
- 선박용 가스엔진(LPG, CNG) 개발

[2] 연구 현황 및 필요성

- 모든 경유자동차에는 매연여과장치(DPF)와 질소산화물저감장치(urea SCR, LNT) 등 후처리장치가 표준부품으로 사용되며, 따라서 운행 중에 이들 장치가 정상적으로 작동하도록 감시, 관리할 수 있는 기술과 제도가 매우 중요하며, 이를 지원 할 수 있는 기술개발이 필요함.
- 운행경유차 후처리장치의 정상 작동 여부를 쉽고 빠르게, 그리고 간편하게 측정하여 확인할 수 있는 장치(측정기기)를 개발하여, 도로변에서의 수시검사와 정기검사에서 사용 등을 추진할 필요가 있으며, 가격이 저렴하고, 작동과 운반이 용이하며, 측정방법이 간편하고, 측정시간도 길지 않으며, 무엇보다도 DPF 장치를 분해하지 측정할 수 있는 비접촉방식의 필터파손 측정장치가 필요함.
- 자동차에 도입되어 있는 OBD 제도와 배출가스 측정센서를 개발하여 사용하면, 실시간으로 배출가스 수준을 모니터링할 수 있기 때문에 검사기관에 차량이 직접 가지 않아도 배출가스의 합격여부를 알 수 있어, 자동차정기검사 제도를 효율적으로 운영할 수 있으며, 차량 소유자의 검사비용 부담도 대폭 줄일 수 있음.
- 자동차 배출가스 중에는 50nm 크기(PM_{0.05})의 나노미세먼지가 다량 배출되며, 이는 PM_{2.5}에 비해서 인체 유해성이 훨씬 크며, 자동차 통행량이 많은 도심 도로변에 고농도로 분포되어 있고, 폐암과 심혈관질환을 유발하는 것으로 밝혀져 있음.
- 따라서 도로변의 나노미세먼지와 NO_x 등의 도로변 오염도를 측정하여 실태를 분석하고 이를 기반으로 하는 도로오염도 지도와 유해도 지도를 작성하여, 도로변의 대기오염 관리정책을 수립하는 데에 사용.
- 내륙에 영향을 크게 미치는 연근해 어선에 대해서 가장 먼저 미세먼지 저감 대책이 집중적으로 이루어져야 할 것이며, 선박용 디젤엔진은 구조와 작동측면에서 자동차용 디젤엔진과 거의 유사하기 때문에, 자동차에서 이미 상용화된 DPF와 SCR 장치 등 후처리기술을 그대로 사용할 수가 있고, 아울러 청정연료인 천연가스와 LPG 가스엔진도 자동차용으로 이미 기술이 개발되어 있기 때문에 선박의 운행 여건에 적합하게 개발하여 사용하도록 함.

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

- 친환경차량이 중점적으로 개발되어 왔음: 환경친화적 보급형 LPG직접분사(LPDi) 1톤 상용차용 연료분사 및 후처리 시스템, 택배차량용 디젤 트럭의 하이브리드 개조기술 개발 및 실용화 연구, 터보 직접분사 에탄올 혼합연료 자동차(FFV) 핵심부품 등
- 디젤엔진(차량 및 선박)의 배출가스 및 후처리기술 개발도 중요한 연구대상이었음: 디젤자동차 SCR용 탱크일체형 Urea 공급 시스템, 고효율 복합 SCR/AOC 촉매, 모노리스타입 13인치급 매연여과장치(DPF) 필터, 선박배가스 재순환장치 (EGR) 시스템 등

- 친환경타이어와 브레이크 개발도 추진되었음 : 미세먼지 및 CO₂ 저감 글로벌탑 저마모-저탄소 타이어, 미세먼지 저감 내마모 마찰 소재 적용 고성능 브레이크 패드 제조 기술

기존 과제와의 차별성 및 시사점

기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발은 환경부에서 그동안 부분적으로 진행해 온 결과와 연구팀을 활용하면 효율적으로 추진할 수 있음.

(국내에서 개발되어 운용되고 있는 MEL; KIST 배귀남박사)

(수도권 도로이동오염원 기여 오염물질 농도분포지도; 안양대 구윤서교수)

(CT로 촬영한 DPF필터 크랙)

[4] 추진 전략

핵심 목표
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 운행차 배출가스 관리기술 개발 및 시스템 운영 ▶ 자동차 나노미세먼지(50nm) 현황분석과 관리정책 수립 ▶ 연근해 선박(어선)의 미세먼지 저감 대책 수립

과제 추진형태 : 총괄

지원 기간 및 예산

○ 예산 : 총 예산

구 분	합 계	1 단계			2 단계			
		2019년 (1차년도)	2020년 (2차년도)	2021년 (3차년도)	2022년 (1차년도)	2023년 (2차년도)	2024년 (3차년도)	2025년 (4차년도)
연구비(억원)	350	60	70	60	60	50	30	20
- 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발(5개 세부과제)	150	30	30	20	20	20	20	10
- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발(3개 세부과제)	100	10	20	20	20	10	10	10
- 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발 (2개 세부과제)	100	20	20	20	20	20		

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

○ **운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발**

- 현재 기술수준 : 자동차 OBD 기준이 시행되고 있어서 배출가스를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 기반은 마련되어 있음.
- 목표 : 1. 운행경유차의 후처리장치 작동을 감시관리 할 수 있는 비파괴방식 장치 개발
2. 자동차 배출가스 데이터 실시간 online 취득 및 빅데이터 처리기술개발 (1단계는 OBD 정보, 2단계는 별도로 추가 센서개발과 이를 통한 정보로 확장)
3. 자동차의 배출가스 빅데이터를 이용한 자동차 배출량 산출과 자동차 결함확인 및 정기/정밀검사 기술개발

○ **대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석기술개발**

- 현재 기술수준 : 자동차 나노입자 개수(PN) 기준 시행중이며, MEL(Mobile Emission Lab) 차량으로 도로변 PM과 NOx를 측정하고 이를 기반으로 도로변공기오염지도를 작성하는 프로세스는 확립되어 있으나, 도로변 대기오염관리정책의 부재로 체계적이고 범국가적인 프로그램이 없음.
- 목표 : 1. 수도권 도로변 오염 측정과 오염도지도 및 유해지도 작성과 관리방안
2. 자동차 sub-23nm 미세먼지 배출현황과 저감 기술 개발

○ **연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발**

- 현재 기술수준 : 선박의 미세먼지 영향과 저감 대책에 대한 관심이 높아지고 있으며, 기획사업이 진행되고 있음.
- 목표 : 1. 후처리장치(DPF, SCR)부착 선박용 경유엔진과 선박용 가스엔진(LPG, CNG) 개발

□ **연구방법 및 내용**

○ **운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발**

- 1단계

- 1) 운행중인 경유차의 후처리장치(DPF, SCR)의 정상작동을 감시관리 할 수 있는 비파괴방식 장치 개발
- 2) 자동차 배출가스 데이터 실시간 online 취득 및 빅데이터 처리기술개발 (1단계는 OBD 정보이용)
- 3) 자동차 배출가스 실시간 감시용 통합 센서(PM, NOX, NH3, CO2, CO, THC) 기술 개발

- 2단계

- 1) 자동차 배출가스 데이터 실시간 online 취득 및 빅데이터 처리기술개발 (2단계는 별도로 추가 센서 정보로 확장)
- 2) 자동차의 배출가스 빅데이터를 이용한 자동차 배출량 산출 기술개발
- 3) 자동차의 배출가스 빅데이터를 이용한 자동차 결함확인 및 정기/정밀검사 기술개발

○ 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석 기술개발

- 1단계

- 1) 도로변 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 측정 차량(MEL) 개발
- 2) 수도권 도로변 오염도지도 및 유해지도 작성
- 3) 자동차 sub-23nm 미세먼지 배출현황 분석

- 2단계

- 1) MEL을 이용하여 도로변 자동차 배출 나노미세먼지 측정과 인체유해성 분석기술개발
- 2) 수도권 도로변 오염도지도 및 유해지도를 기반으로 관리방안
- 3) 자동차 sub-23nm 미세먼지 배출저감 기술 개발

○ 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발

- 1단계

- 1) 선박용 경유엔진의 미세먼지 발생 현황 조사
- 2) 후처리장치 및 선박용 가스엔진(LPG, CNG) 요소기술 개발

- 2단계

- 1) DPF와 SCR 장치를 장착한 선박용 경유엔진 개발 및 시범운전
- 2) 선박용 가스엔진(LPG, CNG) 개발 및 시범운전

□ 실증방안

- 운행차의 배출가스 실시간 모니터링 및 빅데이터 이용 관리 기술개발
 - 비파괴방식 장치를 수시검사 및 정기검사에서 실증

- 자동차 배출가스 데이터 실시간 측정시스템으로 배출량 산출 및 결함확인검사와 정기 검사에 적용하여 실증

- 대도시 도로변의 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 현황(측정)과 인체유해성 분석 기술개발

- 도로변 자동차 배출 나노미세먼지(50nm) 측정 시스템과 도로변 오염도지도 및 유해 지도 작성으로 도로변 공기오염 관리정책 활용으로 실증

- 연근해선박(어선)의 미세먼지 및 질소산화물 저감용 신엔진개발

- 후처리장치 적용 선박용 엔진과 가스엔진(LPG, CNG)을 개발하여 어선에 적용 시범사업으로 실증

[6] 기대효과

- 모든 경유자동차에 표준부품으로 적용되는 후처리장치(DPF, SCR, LNT)가 정상 작동되어야 경유차로부터 배출되는 미세먼지를 방지할 수 있으며, 본 연구를 통하여 경유차 후처리장치의 정상작동을 감시, 관리하는 기술과 제도가 확립될 수 있다.
- 자동차로부터 배출되는 배출가스 수준을 실시간으로 모니터링 함으로서 자동차정기검사 제도를 효율적으로 운영할 수 있으며, 차량소유자의 검사비용 부담도 대폭 줄일 수 있다.
- 도로변의 나노미세먼지와 NO_x 등의 도로변 오염도를 측정하여 실태를 분석하고 이를 기반으로 하는 도로오염도 지도와 유해도 지도를 작성하여, 도로변의 대기오염 관리정책을 수립함으로서, PM_{2.5}에 비해서 인체 유해성이 훨씬 큰 자동차 배출 나노미세먼지(50nm)의 관리가 가능해진다.
- 경유선박(어선)에 DPF와 SCR 장치 등 후처리기술을 적용하거나, 천연가스와 LPG 가스엔진을 개발하여 운용함으로서 내륙에 미세먼지 영향이 큰 연근해 어선에 대해서 미세먼지 저감 대책이 효율적으로 이루어질 수 있다.

○ 연구 결과의 타 부처와의 연계 활용 방법 및 내용 제시

- 환경부 : 운행 경유차의 후처리장치 관리정책, 자동차 정기검사 및 종합검사 개선, 도로변 공기오염관리정책, 자동차 나노미세먼지 관리기준 및 대책 수립, 선박 미세먼지 관리대책 수립에 활용
- 국토부 : 자동차 정기검사 및 종합검사 개선
- 해양수산부 : 연근해 선박과 특히 어선의 미세먼지 저감 대책과 어선의 현대화 사업 추진

별첨 8. 고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구

과제명	고농도 미세먼지 발생의 건강영향평가 및 피해저감 방안 연구
분류(대, 중, 소)	국민생활 보호-건강영향평가-인체위해성 역학
키워드	○ (국문키워드) 미세먼지, 건강영향, 유해성, 위해성평가, 질병부담 ○ (영문키워드) PM, health impact, hazard, risk assessment, burden of disease

[1] 개요

고농도 미세먼지 성분 특성 조사 및 유해성 평가

- 시기별, 지역별 고농도 미세먼지 발생 시 성분 특성 조사
- 고농도 미세먼지의 독성 평가 (in vitro/in vivo)

고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출평가

- 지역별, 권역별 고농도 미세먼지 노출평가
- 시간활동 반영 다양한 인구그룹 별 (민감군/취약군 포함) 인체노출평가
- 인구 특성 별 고농도 미세먼지 노출저감 방안 마련

고농도 미세먼지-질환 역학 연구 및 위험인구 파악

- 고농도 미세먼지의-질환 연관성 분석
- 고농도 미세먼지의 건강영향 위험인구 도출

고농도 미세먼지 발생의 건강영향 최소화 방안 마련

[2] 연구 현황 및 필요성

□ 필요성

- 미세먼지의 건강영향에 대한 국민적 관심이 높고, 특히 고농도 발생 시 건강영향에 대한 우려가 높음
- 미세먼지의 건강영향은 역치가 없고 농도가 증가할수록 선형적으로 증가한다고 알려져 있으나 최근 고농도에서의 농도-반응 관계에 대해서는 논란이 있고 이에 대한 추가 규명이 필요함
- 환경유해인자의 건강영향은 지역별, 인구특성 별 차이가 있어 국내 현실에서의 고농도 미세먼지-질환 영향 간 특성 파악이 필요함
- 국내 고농도 미세먼지의 발생은 외부적인 영향과 기상 요인의 역할도 매우 커 단시일 내에 국내 노력만으로 고농도 사례를 줄이기 어려우므로 단기적으로는 피해 저감에 주력할 필요가 있음. 이를 위해서는 고농도 발생과 노출의 건강영향을 최소화하기 위한 방안이 우선 마련되어야 함
- 최근 미세먼지에 대한 역학연구, 노출평가, 독성 연구 등이 이루어지고 있으나 고농도 미세먼지의 건강영향 특성 및 위험인구 파악에 대한 연구는 이루어진 바가 없음

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

- (~2022년) 미세먼지 생체유해성 연구 사업(과기정통부): 미세먼지 노출 챔버 개발 및 동물실험
- (~2020년) 미세먼지 노출에 의한 상부호흡기질환 유발 악화 메커니즘, 안질환 발생 메커니즘 연구가 진행되고 있음
- (~2021년) 폐 CT 및 이미지를 활용한 미세먼지 포함 환경유해인자의 폐질환발생 메커니즘 연구가 진행될 예정임
- (~2021년) 미세먼지 포함 대기오염물질의 인체노출평가를 위한 모델링 이용 노출평가 고도화 기술과 수용체 중심 노출평가 시스템을 개발 혹은 개발 예정임

□ 기존 과제와의 차별성 및 시사점

- 고농도 발생시의 미세먼지 노출에 초점을 맞춘 기존 과제는 현재 없음. 저농도 대비 고농도 미세먼지의 유해성을 우선 평가할 필요가 있음
- 인구 특성, 지역 특성 등을 고려한 고농도 미세먼지 노출을 평가하고 이에 기반한 고농도 미세먼지 노출저감을 위한 체계적인 연구가 필요함

기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

[4] 추진 전략

핵심 목표

- 고농도 미세먼지 발생 사례의 유해성 평가, 인체노출평가, 역학 연구에 기반한 건강영향평가
- 고농도 미세먼지 발생에 의한 국민 건강영향 최소화 방안 마련

과제 추진형태 : 총괄

지원 기간 및 예산

- 기간 : 3년
- 예산 : 45억(1차년도: 15억)

[5] 세부 추진 방안

□ 현재 기술 수준 및 목표 설정

○ 고농도 미세먼지 성분 특성 파악 및 유해성 평가

- 현재의 미세먼지 독성 평가 및 메커니즘 연구는 시작단계로서 다양한 건강영향에 대한 접근 및 기술개발이 요구됨.
- 본 과제에서는 면역 독성과 호흡기/알레르기 질환 관련 독성 규명에 초점을 맞추고, 고농도 미세먼지의 성분(중금속, polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH) 등) 특성 규명과 유해성을 평가하는 것을 목표로 함.

○ 고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출평가

- 현재 고농도 미세먼지 발생 시의 실제 인체노출평가를 연구한 바는 없음. 다만 지금까지 개발된 시간활동 패턴 등을 활용한 대기오염 인체노출평가 방법을 고농도 사례에 적용할 수 있을 것임.
- 실제 고농도 미세먼지 인체노출을 평가하기 위해서는 실내에서의 노출평가도 필요한데, 실내 미세먼지 노출을 평가하기 위한 방법 중 대표적인 것은 Indoor/Outdoor ratio 기반 혹은 센서 기반 평가방법 등이나 아직까지 노출평가의 정확성에 한계가 있음.
- 실제 인체노출을 반영하면서도 이행 가능한 고농도 미세먼지 노출평가 방법이 마련되어야 함.

○ 고농도 미세먼지-질환 역학 연구 및 건강영향 최소화 방안 마련

- 지금까지 미세먼지 기인 초과사망 혹은 병원 내원율 증가 등을 규명하기 위한 역학연구 방법 등이 개발, 정립되었음.
- 기존의 연구 방법 등을 적용, 고농도 미세먼지의 건강영향 특성을 규명할 수 있을 것으로 판단됨.
- 본 과제에서는 노출-반응 함수를 고농도 미세먼지에 초점을 맞추어 규명하되 인구 특성, 지역 특성, 질환 특성을 반영한 연구 결과를 도출하고 이에 기반 국민 질병부담을 산정하는 것을 목표로 함.
- 또한 고농도 미세먼지의 국민 건강 피해 저감을 위한 구체적인 전략을 제시하는 것을 최종 목표로 함.

□ 연구방법 및 내용

○ 고농도 미세먼지 성분 특성 파악 및 유해성 평가

- 실제 고농도 미세먼지 발생 사례의 유형(시간, 공간 특성 반영)을 분류하고, 유형별 특성(화학적 조성, 물리적 특성 등)을 파악.
- 고농도 미세먼지의 독성(in vitro/in vivo) 평가.
- 심혈관질환, 호흡기질환, 알레르기질환 등에 대한 고농도 미세먼지-질환영향 임상연구(단 임상연구는 한 가지 이상 포함).

○ 고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출평가

- 다양한 인구그룹(지역별, 사회계층별, 연령별 등)에 대한 시간활동 반영 인체노출평가.
- 민감군/취약군 포함. 민감군의 경우 심혈관질환, 호흡기질환, 알레르기질환 등 한가지 이상 환자군 포함 실제 고농도 미세먼지 발생 사례 시 인체노출을 평가. 또한 고위험 노출군(취약군)에 대한 실제 인체노출평가*
- 민감군/취약군 고려 고농도 미세먼지 사례 시 노출저감 최소화 방안 제시

*고농도 사례 시 민감군/취약군의 도로 이동 중 노출, 실외 근로자(예, 건설현장 근로자, 톨게이트 수금원 등)의 실제 인체노출을 고려하여 평가할 것

○ 고농도 미세먼지-질환 역학 연구 및 건강영향 최소화 방안 마련

- 고농도 미세먼지 노출-질환 연관성 분석 및 노출 반응 함수의 파라미터 도출*
- 고농도 미세먼지 노출의 국민 질병부담(Burden of disease) 산정
- 고농도 미세먼지의 건강 위험인구 도출 및 취약성 분석
- 고농도 미세먼지의 건강영향을 최소화하기 위한 피해 저감 방안 제시

*국민건강보험공단 빅데이터 등을 활용하되, 심혈관질환, 호흡기질환, 알레르기질환 등을 포함

[6] 기대효과

- 고농도 미세먼지 발생 시 미세먼지 특성 파악 및 그로 인한 건강영향평가를 통해 근거 기반 국민 건강피해 최소화 전략 제시 가능
- 고농도 미세먼지 특성에 대한 과학적 기초자료 구축
- 미세먼지 피해에 대한 예측과 피해저감을 위한 정책 및 기술적 대응 방안 마련에 과학적

근거 제공

- 비용 효과적인 미세먼지 건강영향 최소화 방법 제시

별첨 9. 다중이용시설에서 인공지능을 이용한 미세먼지 농도 예측 및 최적제어 실증화 연구

과제명	다중이용시설에서 인공지능을 이용한 미세먼지 농도 예측 및 최적제어 실증화 연구
분류(대, 중, 소)	※ 분류 (국민생활보호, 미세먼지 노출저감 기술, 생활환경 실내공기질 관리)
키워드	○ (국문키워드) 다중이용시설, 노출, 인공지능, 미세먼지, 제어 ○ (영문키워드) public place, exposure, artificial intelligence, particulate matter, control

[1] 개요

미세먼지 노출에 의한 국민 건강 증진을 위한 방안 마련이 시급함

- 다중이용시설은 전 국민의 생활공간으로 자리매김하고 있으며, 특히 지하상가, 대형 쇼핑몰, 대심도 지하터널 등은 매일 생활하는 공간임
- 근래에 사회적 문제로 대두된 미세먼지 농도 증가는 다중이용시설 내부의 공기질에 영향을 미치는 중요한 요인이 될 수 있으나, 다양한 기술적 문제점으로 인하여 공기의 쾌적성 확보에 어려움을 겪고 있음
 - 미세먼지 집중배출지역은 대기오염 특별대책지역으로 설정하여 엄격하게 관리
 - 지하공간과 같은 다중이용시설, 학교, 어린이집 등을 대상으로 하는 시설들에 대한 공기의 쾌적성 확보에 대한 방안은 상대적으로 엄격하지 않음
 - 다중이용시설에 대한 미세먼지 저감 기술 확보, 측정과 예보 인프라 확보는 매우 시급함

[2] 연구 현황 및 필요성

- 공공·다중이용시설 관리주체의 실내 공기질 개선 의지가 높고, 저감 대책을 마련하고 있으나 구체적인 적용 방안 미비로 실행에 어려움이 있음
- 서울교통공사의 미세먼지 저감 대책의 투자 규모는 총 2조 1371억원(`18~`22)이며, Hot Spot 구간 관리, 미세먼지 특별관리역사 선정 및 중점관리, 공기청정기 시범 설치

등의 공기질 위험 요인관리 분야와, 빅데이터 분석을 통한 공기질 관리(환경데이터에 대한 인공지능 해석, 실내공기질에 대한 예측, 미세먼지 농도, 온도 예측기반 제어 기술) 등의 선제적/예방적 공기질 관리기법 도입 분야로 구성됨

- 공기질 위험 요인 관리와 선제적 공기질 관리를 위해 해외 사례 등을 조사하고 있으나, 검증된 미세먼지 저감 시스템의 적용 사례가 없어 도입에 어려움을 겪고 있어, 정부 차원의 실증사업 추진을 통해 저감 시스템의 실효성 검증 필요

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

- NTIS를 통해 ‘먼지’, ‘실내’, ‘지하’, ‘모니터링’, ‘예보’, ‘제거’ 등의 키워드로 검색한 결과, 약 40여개의 과제가 검색되었으며, 이 가운데 공공·다중이용시설 실내 미세먼지 저감 설비 실증 사업과 관련하여 유사과제 10개를 도출함.
 - 국토교통부 ‘미래도시철도기술개발사업 - 도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선 기술개발(2009.03~2014.03)’은 도시철도 터널에서 발생하는 미세먼지의 제거기술 개발 및 도시철도 차량으로의 유입 차단 및 차량 내부 공기질 개선 기술 개발을 통해 실증사업을 수행하기 위한 원격 모니터링 및 설비 제어 기술을 개발하였으며, 터널 내부 저감설비를 구축하고, 터널 내부의 저감설비 원격제어 운전을 수행함.
 - 국토교통부 ‘철도기술연구사업 - 도시철도 터널 Hot spot 구간 공기질 관리기술 개발(2014.09~2019.02)’에서는 도시철도 터널 공기질 Map 작성 및 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발, 전동차 부탑형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발 및 초미세먼지 제거차량 시스템 개발을 수행 중에 있음.
 - 국토교통부 ‘주거환경연구사업 - 생활문제 해결 및 미래대응 실내공기질 향상기술 개발(2014.09~2021.02)’에서는 공동주택을 대상으로 입주 전 오염물질 저감 방안, 냉난방 공조와 연계한 환기 설비 개발을 수행 중에 있음.
 - 환경부 ‘환경정책기반공공기술개발사업 - 실내외 초미세먼지 실시간 모니터링 진단기술 개발(2015.12~2017.09)’에서는 기기-서버간 무선 통신 기술을 이용한 원격 제어 모듈 개발 및 모듈 통합 시제품 제작 저압 다단 임팩터를 이용한 입자 분리 모듈 및 코로나 하전 장치를 적용한 입자 측정 모듈 개발을 개발함.
 - 환경부 ‘차세대에코이노베이션기술개발사업’ - 로봇을 이용한 지하환경 덕트 클리닝 및 통합관리시스템 개발(2011.05~2014.03)’에서는 지하역사 및 지하상가의 에너지 절감 및 환경관리를 위한 공간단위 공기질과 에너지 사용량을 진단/평가하는 시스템을 개발하고, 로봇을 이용한 덕트 클리닝 디바이스/프로세스를 개발하여 지하공간 내 통합 에너지/공기질 관리 시스템을 개발함.
 - 환경부 ‘환경산업선진화기술개발사업’ - ‘초음파를 이용한 실내환경 오염물질(박테리아,

바이러스, 초미세먼지 등) 저감장치 기술개발 (2014.04~2018.04)'에서는 초음파를 이용한 미세먼지 응집기술 개발, 입자 조대화 및 병원성 미생물 제거기술을 개발하고 있음.

- 환경부 '그린패트를 측정기술개발사업단' - 'X선 형광법을 이용한 대기 중 중금속 물질 연속분석 장치 개발(2014.12~2018.04)'에서는 대기 중 중금속 성분의 실시간 분석이 가능한 측정장비를 개발.
- 과학기술정보통신부 '공공복지안전기술개발사업' - '특수 대기 환경위해물질의 초고속, 고감도, 실시간 광학적 검출기술 개발(2010.08~2015.07)'에서는 대기 중에 존재하는 인체에 위해한 무기 및 유기가스분자들을 동시에 실시간 고감도로 분석할 수 있는 기술을 개발하였음.

- 환경부와 중소기업청 사업 중, 특정 분야에 대한 요소 기술 개발 과제는 차별성 및 연계 추진방안 분석 대상에서 제외함.
- 교육부 사업은 소규모(총 연구비 1억원 이내)로 진행되는 개인 기초연구 및 인력양성 사업으로 차별성 및 연계 추진방안 분석 대상에서 제외함.

기존 과제와의 차별성 및 시사점

- 다중이용시설 미세먼지의 인공지능 기반 예측을 위해서는 공기질 정보, 지하철 기초 환경 정보, 외부 공기질 정보, 도로교통 정보, 기상 정보 등의 핵심 데이터 ('다중이용시설 미세먼지 빅 데이터'라 명명) 확보가 필요함.
- 현재 데이터의 수집, 전송을 위한 데이터 네트워킹의 요소기술 개발은 활발히 진행 중에 있음.

- 기존에 개발된 미세먼지 모니터링 시스템의 경우 다중이용시설의 특성에 적합한 네트워크 기술 및 소형 미세먼지 센서 개발이 주류를 이루고 있음.
- 인공지능을 이용한 다중이용시설 미세먼지 예측 및 조기제어 기술은 모니터링 시스템에서 획득한 데이터와 외부 공기질 정보, 도로교통 정보 등 다양한 공공데이터를 활용하여 미세먼지의 농도를 예측하고, 다중이용시설 재실자에 대한 미세먼지 노출 정도를 파악할 수 있음.

기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 기존에 개발된 IoT 공기질 모니터링 기술을 활용하여 빅 데이터를 수집하고 향후 수행되는 과제에서는 데이터의 분석 및 이를 활용한 최적 공기질 제어기술 개발이 효과적으로 판단됨
- 소형 미세먼지 측정 센서, 광산란 방식의 미세먼지 측정 센서 등을 활용 가능함

[4] 추진 전략

핵심 목표

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">▶ 다중이용시설에서 재실자 및 이용자의 (초)미세먼지 노출저감▶ 인공지능을 이용한 미세먼지 농도 예측 및 공기질 최적화 |
|---|

- 빅 데이터 및 인공지능을 이용한 다중이용시설에 대한 실내 미세먼지 저감 기술을 실증 대상으로 하며, 이용자 수가 많은 지하상가, 대형 쇼핑 몰, 지하역사 등과 노인 및 환자가 주로 이용하는 요양시설, 병원 등이 해당됨

과제 추진형태 : 단위, 국제공동 연구

지원 기간 및 예산

- 기간 : 2019.4~2022.3
- 예산 : 총액 (100억원), 1차년도 (20억원)

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 현재는 저가의 미세먼지 측정 센서로 농도를 측정해서 환기 및 공기질 제어에 활용하는 수준임

연구목표

- 인공지능 기반 다중이용시설 미세먼지 농도 예측
 - 미세먼지 예측신뢰도 80% 이상
 - 미세먼지 농도 예측 : 2시간 이후

연구방법 및 내용

- 1-2차년도 (미세먼지 예측신뢰도 80% 이상)
 - 인공지능 기반 다중이용시설 미세먼지 농도 예측 기술
 - 빅 데이터 플랫폼 구축
 - 빅 데이터 분석기술 개발
 - 측정 센서 이상진단 및 보정 기술 개발
- 3차년도 (미세먼지 농도 예측 : 2시간 이후)
 - 인공지능 기반 다중이용시설 최적 공기질 제어기술 개발
 - AI 예측 알고리즘-공조설비 연계 기술 개발
 - 테스트 베드 구축 및 시험 평가

□ 실증방안

- 다중이용시설에서 IoT 미세먼지 모니터링 시스템을 설치 후 10분 간격으로 데이터를 수집하고, 수집된 빅 데이터를 이용해서 딥러닝 기법으로 학습을 통해 미세먼지 농도를 예측
- 예측된 미세먼지 농도 값을 이용해서 환기시스템을 가동하여 기술 적용 전과 후의 효과를 비교하여 미세먼지 저감 효과를 평가함

[6] 기대효과

- 공공·다중이용시설 저감 설비 시장, 미세먼지 케어 서비스, 실시간 측정 정보 제공 서비스 등의 신산업 창출
 - 실내공기질 관리기준의 강화가 예상되며, 강화된 관리 기준을 충족하기 위해 지하상가, 역사, 공공건물, 학교 등 공공·다중이용시설 내부 공간의 미세먼지를 포함한 실내공기질 실시간 모니터링 및 저감 설비 시장이 확대될 것으로 예상됨
 - 환기 및 미세먼지 저감 설비의 운영은 에너지 효율과 직접적으로 관련된 사항으로, 미세먼지 측정 자료를 바탕으로 특정 공간에 대한 미세먼지 제어 기술에 대한 수요가 증가할 것으로 예상됨
- 미세먼지 노출저감 시스템 제공
 - 현재 대부분의 사람들이 가정, 사무실 등 실내 공간에서 생활하는 시간이 실외 활동 시간보다 많아짐에 따라, 실내 공간에서의 미세먼지 노출저감 기술 적용이 요구되고 있으며, 개인 주택에 비해 거주 밀도가 높고 유동 인구가 많은 다중이용시설에 대한 미세먼지 저감 기술 적용을 통해 이용자의 미세먼지 노출저감 설비 제공이 가능함

별첨 10. 동북아 기후 및 대기오염 민간전문 연구협력체

과제명	동북아 기후 및 대기오염 민간전문 연구협력체
분류(대, 중, 소)	제도 및 소통체계 개선, 제도개선, 실효성 있는 국제협력 현상규명 및 예측, 원인영향도 규명, 생성 및 변화규명/ 영향도(기여도)
키워드	○ (국문키워드) 국제협력, 대기환경, 영향도 ○ (영문키워드) international collaboration, atmospheric environment, source attribution

[1] 개요

본 연구에서는 정부차원의 국제 협력이 아닌 민간 국제기구 차원의 동아시아 대기환경 협력 플랫폼을 마련하여 국민적 관심이 높은 미세먼지 등을 포함한 다양한 대기환경 이슈의 신속하고 과학적이고 신뢰성 있는 국제공동노력의 성과물을 마련할 수 있도록 한다. 이를 통해 신속하고 공신력 있는 외부 영향도를 제시하고 동아시아 환경협력의 주도적 역할을 수행 할 수 있을 것으로 기대한다.

이를 위해 여러 나라의 과학자들이 학술적 흥미를 가질 수 있는 연구 주제와 대상 지역을 선정하여 구체적인 수행 계획을 수립하고자 한다.

기존 대기 오염 기여도 평가의 한계

- 제한적 수준의 정부간 합의 기반
 - 정부간 합의의 특성상 장기간 소요
 - 주로 과거 사례위주로 시의성 결여
 - 부정확한 국가별 과거 배출원과 배출활동도 사용으로 신뢰도 부족

- 민간 차원의 국제적 전문협력 부족
 - 장기적인 민간 전문 연구 협력 플랫폼 부재
 - 동아시아 국가의 주도적인 국제협력 부족

○ 대기환경문제의 단편적 접근

- 장기적이고 종합적인 민간 전문 연구 협력 부족
- 미세먼지 등의 이슈를 대기환경, 기후, 생태, 정책, 소통 등을 포함한 종합 분석 부족

□ 동아시아 대기환경연구 플랫폼의 역할

○ 동아시아국가 민간 전문가 주도의 국제 협력프로그램

- 대기오염 및 기후변화 연구의 주도적 국제 역할 수행
- 과학적이며 신속한 대기환경문제의 공동 분석 및 접근
- 동아시아 국가의 자발적인 국제협력 지향
- 대기오염, 기후, 생태, 대민 소통 등을 포함한 종합적, 지역적 대기환경 문제 해법 제시

○ 대기오염, 기후 영향 및 기여도 연구 결과의 공신력 확보

- IGAC, iLEAPS, Future Earth 등 국제협력 프로그램에서 인증 추진
- 공신력 있는 외부영향 및 기여도 제시 가능
- 종합적인 동아시아환경 협력 및 소통의 모델

[2] 연구 현황 및 필요성

미세먼지 등 대기오염, 기후 변화를 비롯한 대기환경 변화의 원인과 대책을 수립하는데 있어서 가장 시급한 부분이 원인과 영향을 정확히 파악하고 필요한 저감, 회피 방법과 이에 따른 노력의 필요성을 포함하여 적절한 정책과 대국민적 소통을 원활히 수행하는 일이다. 하지만 아직도 원인과 영향에 대한 과학적 근거가 부족하며 특히 국외 지역의 미세먼지 등 오염 기여도에 대한 과학적 평가는 아주 부족한 수준이다. 국외 지역의 오염기여도와 영향 평가는 일반적으로 수용국가와 발원국가간의 평가에서 서로 차이가 나거나 일방적으로 한 국가의 결과가 무시되는 일이 다반사이다. 이를 근원적으로 해결하기 위해서는 특정국가간의 선입관이나 편향된 시각을 배제할 수 있는 과학적이고 객관적인 연구에 집중하고 서로 교류할 수 있는 여건을 만드는 것이 가장 중요하다. 유럽 EMEP의 CLRTRAP, 북미의 NADAP, NARSTO 등 선진국에서 20년 이상 성공적으로 기능을 한 장기적인 지역내 국제공동연구 사례를 보더라도 순수한 학술적 국제공동연구가 국가간의 역할과 의무를 확인하는데 필수적인 역할을 한 것을 알 수 있다. 하지만 에너지 사용과 그에 따른 대기 오염, 기후변화 등 환경문제의 가장 심각한 당사자이며 책임자인 동아시아의 경우 아직은 이와 같은 효율적인 국제공동연구의 기반이 마련되어 있지 않다. 유럽과 미국의 정부 주도 국제공동연구를 모델로 동아시아에서 한국 주도의 LTP와 일본 주도의 EANET을 오래전 출범시켰으나 정부주도 협의체의 한계로 연구결과의 시의성과 내용이 국민들 눈높이에 매우 부족한 실정이며 이들 연구 결과의 활용도가 크지 못한 것이 사실이

다.

이를 위해 1 단계(2019-2021) 기간 중 동북아시아의 민간 전문가들이 주축이 된 대기환경연구 플랫폼을 마련하고는 것을 제안하고, 2 단계 (2022- 2025)에서 이 기반을 활용하여 동아시아 대기환경의 다양한 이슈들 (미세먼지, 오존, 에너지, 기후변화, 기상 특성, 수용 생태계 등)의 원인, 기여도, 환경 노출 영향을 과학적, 객관적으로 평가하고 국제적인 신뢰성을 확보하면서 이들 정보의 적절한 소통을 구현하고자 한다.

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

○ 한중 대기환경연구센터

- 2015년부터 중국 CRAES에 한중 공동설립 및 운영 중.
- 2020년 이후에는 동북아 6개국과 EU가 참가하는 센터로 확장 계획.
- 정부기관 협력 사업으로 연구의 내용과 결과 협의에 많은 제약

○ 민간 국제협력 사업

- 2017년 수행된 한미공동연구인 KORUS-AQ가 민간 주도의 국제공동연구의 본격적인 시작.
- 미세먼지 국가전략 프로젝트 내에서 동북아시아 미세먼지 이동 규명을 위한 국제공동 관측 연구 현재 진행 중.

□ 기존 과제와의 차별성 및 시사점

□ 본 전략과제의 위치

본 동아시아 민간전문 연구협력체는 한, 북한, 중, 일, 러시아, 몽골 등 동아시아 대기환경 전문가 참여 연구 플랫폼으로 IGAC, iLEAPS, Future Earth 등 국제협력 프로그램에서 인증 추진하여 공신력 있는 분석 및 해법을 제시하여 동아시아환경 협력 및 소통의 기반이 되도록 함.

□ 기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 정부 주도의 프로그램과 센터 활동이 과거 대기오염의 기여도와 영향평각에 상당 부분 기여함.
- 그러나 시급성을 요하는 환경변화에 즉각적인 대응과 지원이 부족하고 합리적이고 객관적 사실의 표현이 부족함.
- 이들 기존 연구의 결과물을 기반으로 정부 주도의 프로그램과 센터 활동과 중복되지

않는 연구 내용과 접근 방법을 새롭게 추가하여 기존 국제공동연구의 한계를 극복할 계획.

- 특히 본 센터가 지향하는 자발적인 참여를 바탕으로 센터운영, 활동 결과 해석의 국제인증을 추진함.

[4] 추진 전략

핵심 목표

- ▶ 국제적으로 공신력 있는 대기환경 외부 기여도 및 영향 분석
- ▶ 동아시아 환경 협력 (한, 북한, 중, 일, 몽골)의 주도적 역할 수행

□ 본 센터는 순수 민간 전문가 주도의 동아시아 국제협력프로그램으로, 동아시아 및 해외 민간 전문가들의 자발적인 국제협력을 바탕으로 우선순위가 높은 대기오염 및 기후변화 연구를 발굴하고 수행하여 지역적 대기환경 문제의 공통의 해법을 제시하고자 함

○ 동아시아대기과학센터 설립 추진

- 동아시아국가를 중심으로 자발적인 연구 플랫폼 기반 조성
- 북한을 포함한 동아시아 국가의 대기환경/과학 공동연구 플랫폼 지향

○ 국제공동 연구주제 기획 및 선정

- 기존 국제공동 연구 SWAT분석
- 미세먼지와 오존 생성의 주요 경로 파악 및 지역별 미세먼지 생성 영향도 정량화
- 대기환경, 에너지, 기후, 생태 등을 포함한 포괄적이며 체계적 연구 우선 지원

○ 국제협력 전문가 참여 및 지원

- 과학적, 객관적 분석의 공통된 이해를 바탕으로 연구협력 공동체 구축
- 장기적인 연구 지원과 결과 도출 지원

○ 국제공동연구 사업으로의 인증

- iLEAPS 또는 IGAC의 인증(endorsement)를 추진
- Future Earth의 인증프로그램으로 추진

○ 전지구적 또는 지역 국제연구와 연계

- IGAC, iLeaps 등에서 장기진행 중인 전지구적 또는 지역연구와 연계추진
- LTP, EANET, GAW 등과 연계 및 지원

○ 전문가 및 대민 소통 마련

- 신진 전문가 지원 및 육성
- 과학적 분석 결과의 소통 지원

○ 기존 부처의 중장기 대기환경연구 로드맵과의 연계

- 환경부, 과기정통부의 장기 대기환경, 기후 연구의 중장기 로드맵의 지원과 연계
- 환경부 MAPS-Seoul 및 KORUS-AQ 후속 사업 지원 및 연계

○ 새로운 여건의 대기환경 연구에서 선도적 역할 수행

- GEMS 환경위성의 활용 등 새로운 모니터링, 모델기법을 활용한 연구의 발굴 및 지원
- 새로운 모니터링 및 추적 기법의 확산 적용

과제 추진형태 : 총괄 및 국제 공동연구

지원 기간 및 예산

○ 예산 : 총 예산

구 분	합 계	1 단계			2 단계			
		2019년 (1차년도)	2020년 (2차년도)	2021년 (3차년도)	2022년 (1차년도)	2023년 (2차년도)	2024년 (3차년도)	2025년 (4차년도)
연구비(억원)	155	15	25	30	25	30	15	15

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 정부차원의 대기환경 국제공동연구의 한계점 극복
- 현재 기존의 정부간 국제협력 사업과 미세먼지 전략 프로젝트의 기여도 평가는 미세먼지에만 집중
- 연구 활동에 대한 국제적 인증을 통해 공신력 있는 기여도와 외부 영향 산출 목표

항목	현재 기술 수준	본 연구 목표 수준
국제협력 당사자	정부간 합의체로 신뢰도는 높으나 결과 산출이 매우 어려움	민간 전문가 협력 연구로 신뢰도와 결과 산출의 자유도가 매우 높음
국제협력센터	한중대기연구센터로 한중에 한정	한중일 북한 포함 동아시아 전체 및 해외 협력 가능
참여 연구진	정부연구원으로 자원이 제한됨	민간 전문가 자원이 풍부
연구 대상	미세먼지에 한정	대기환경, 기후, 생태 등 포괄적이고 체계적 연구 가능
신뢰도	국제적 인증이 없음	연구 활동 및 결과에 대한 국제인증으로 신뢰도 높음

□ 연구방법 및 내용

○ 1 단계: 2019-2021

동아시아대기과학센터 설립

- 1) 북한, 몽골을 포함한 동아시아 국가의 대기환경/과학 공동연구 플랫폼 지향
 - 참여 전문가들의 공동연구 플랫폼 기반 조성
 - 동아시아 국가의 자발적인 국제협력 지향
- 2) 국제협력 전문가 참여 및 지원
 - 과학적, 객관적 분석의 공통된 이해를 바탕으로 연구협력 공동체 구축
 - 장기적인 연구 지원과 결과 도출 지원

국제공동협력연구의 국제 인증화

- 1) iLEAPS 또는 IGAC의 인증 (endorsement)를 추진
 - IGAC, iLeaps 등에서 장기진행 중인 전지구적 또는 지역연구와 연계추진
 - LTP, EANET, GAW 등과 연계 및 지원
- 2) Future Earth의 인증프로그램으로 추진
 - Future Earth -Asia의 activity로 추진
 - Future Earth- Korea 의 정실 활동으로 추진

국제공동 연구주제 기획 및 추진

- 1) 기존 국제공동 연구 SWAT분석

- 2) 환경부, 과기정통부의 장기 대기환경, 기후 연구의 중장기 로드맵의 지원과 연계
- 3) 환경부 MAPS-Seoul 및 KORUS-AQ 후속 사업 지원 및 연계
- 4) 에너지 사용과 대기환경, 기후변화의 상관관계 파악 및 전망

국제공동 연구주체의 연구 역량강화

- 1) 공동 연구 선행단계로 각국의 QA/QC 방법 정립
- 2) 집중관측을 위한 multi-platform 구축 (2-3차년)
- 3) 집중관측을 통한 자료 호환성 검토 (2-3차년)

○ 2 단계: 2022-2025

동아시아 집중공동연구 추진

- 1) 주제별 집중 관측 및 비교 관측 수행 (2단계 1-3년)
 - 대기오염 (미세먼지, 오존)-기후-생태
 - 멀티플랫폼을 활용한 주제별 종합 집중관측 수행
- 2) 과학적이며 신속한 공동 분석 및 해석 (2단계 4년)
- 3) 지역내 국제공동 연구와 연계
- 4) 에너지 사용과 그에 따른 대기환경 및 기후변화 현황 파악 및 향후 예측

전문가 및 대민 소통 체계 확립

- 1) 과학적 분석 결과의 소통 지원
- 2) 신뢰도 높은 다국적 공통의 결과 도출
- 3) 대기환경, 기후, 생태 영향 정보의 종합적이고 체계적 전달

대기환경 첨단 연구의 선도적 수행

- 1) GEMS 환경위성 등 새로운 분석 기법을 활용
- 2) 새로운 모니터링 및 추적 기법의 확산 적용
- 3) 동아시아대기환경 연구의 핵심기능

□ 실증방안

- 연구센터 활동의 국제연구프로그램으로의 인증
- 연구 결과의 국제적 학술 인증을 통한 실증
- 결과 활용을 통한 대민 소통의 개선 실증

[6] 기대효과

- 한반도 대기질 개선과 관련된 과학적 의문사항에 대한 해결책 파악
 - 주도적 국제 협력 연구를 통한 국가과학 및 외교적 위상 정립
 - 외부 기여도 평가에 대한 정확도 향상으로 국민 건강위험 선제 대응
 - 과학적 근거를 바탕으로 한반도 및 수도권 대기질 개선을 위한 정책 및 전략 제시
 - 국외 유입 대기오염물질의 한반도 대기질 영향 정량화 및 기여도 산정
 - 대기질 개선을 위한 종합적 조사 방법 및 해석기법 마련
 - 에너지 사용과 대기환경/기후변화 변화 파악 및 예측
- 연구 결과의 타 부처와의 연계 활용 방법 및 내용 제시
- 산자부: 신뢰도 높은 고농도 미세먼지 산업 배출원에 대한 자료는 산업배출원의 저감 노력의 효율을 극대화.
 - 환경부: 미세먼지 예보 모델의 입력 자료 및 기여율 산정 정확도 개선을 통한 예보 모델 산출 결과의 신뢰도 향상에 기여.
 - 외교부: 국가 미세먼지, 기후변화 저감 정책 개선을 위한 기초자료이며, 미세먼지와 기후변화 원인물질의 원격 배출원에 대한 국가의 외교적 노력을 뒷받침하는 과학적 근거로 활용.

별첨 11. 미세먼지 문제 해결을 위한 정책 결정 및 소통 지원 시스템 개발

과제명	미세먼지 문제 해결을 위한 정책 결정 및 소통 지원 시스템 개발
분류(대, 중, 소)	국민생활보호, 정책 및 정보 서비스, 과학기술 연구 결과의 정책 연계
키워드	○ (국문키워드) ※ 미세먼지, 정책결정, 소통, 시스템 ○ (영문키워드) ※ PM2.5, policy making, communication, system

[1] 개요

□ 국민적 관심도가 높은 사회현안인 미세먼지 문제 해결을 위해서는 과학 기술 R&D외에 이에 근거한 정책 수립·이행과 사회적 소통을 위한 사회경제 측면을 고려한 융복합 기술 개발 필요

○ 미세먼지 문제는 에너지, 사회구조와 밀접하게 연관 되어 있어 과학적 원인규명 및 현상 진단 등을 위한 기술개발 R&D 외 사회경제 측면을 고려한 융복합적 접근이 중요

- 미세먼지와 미세먼지를 생성하는 전구물질은 다양한 산업과 인간의 활동에 의해 발생.
- 에너지 생산과 소비 활동이 미세먼지 발생에 직접적인 영향을 미치고 있음.

○ 미세먼지 저감이라는 정책목표를 달성하기 위해서는 대기의 미세먼지 농도와 인체 노출을 저감하기 위한 에너지 사용, 농업, 축산업 등의 여러 산업 활동과, 교통 및 도시계획 등 여러 분야의 정책이 동일한 목표를 달성하기 위해 연계 되어 일관성을 가져야 함

○ 미세먼지 고농도 현상이 특정 오염물질의 배출 유무 혹은 과다와의 일대일의 단순한 상관관계를 벗어나 여러 기상현상과 사회경제활동과 연관된 복잡한 문제임을 명확히 인식하고 접근해야 함

□ 과학기술 기반의 원인 및 현상 규명, 저감 기술 뿐 아니라 사회경제적 여건을 반영한 통합적 영향 관리를 위한 의사결정 지원 시스템 필요

○ 기존의 미세먼지 대책은 대기의 미세먼지 농도를 저감하는 것이었으나 현재는 인체위해성 저감 중심 관리로 패러다임 전환

- 농도 관리에서 영향 관리로 정책 목표를 변경하며 배출저감과 함께 노출저감을 통한 정책 수단 다양화 필요.

- 미세먼지 문제 해결은 한 가지 대책으로는 불가능하며 여러 부문의 대책 및 노력이 종합적으로 이루어져야 할 필요가 있음
- 다양한 부문의 대책 및 기술에 대한 다양한 정보 및 데이터를 종합해 우선순위 및 효과 평가를 위한 정책지원 시스템 개발 필요
 - 개별적 연구개발추진으로는 정책목표 달성에 한계.
 - 정책 및 기술의 시급성, 파급효과, 중요성 등을 통합적으로 일관성 있게 평가하는 시스템 개발 필요.
- 과학기술개발 결과의 정책 활용도를 제고함으로써 사회경제 여건을 고려해 근거 기반 정책 (evidence based policy)을 통한 정책의 우선순위 선정 가능

복잡한 초연결 사회에서 국민불안 해결을 위해서는 국민수요 및 사회적 평가를 고려한 소통방안 마련 필요

- 미세먼지 농도는 선진국에 비해서는 높지만 과거에 비해서는 개선되었음에도 불구하고 국민의 의식 수준 변화와, 사회 시스템의 대응 능력 부족 등으로 인해 미세먼지에 대한 국민 불안은 크게 증폭
- 수요자를 고려하지 않은 일방적인 정책 수립 및 시행이 아닌, 국민의 참여를 적극적으로 유도하고 국민의 수용성을 고려한 정책 수립과 시행이 필요
- 미세먼지 문제에 있어 모든 시민은 가해자인 동시에 피해자이므로 정책 수립과 이행과정에 있어 투명한 소통은 정책의 효율성 제고 가능

[2] 연구 현황 및 필요성

정부는 미세먼지 문제 해결을 위해 부처별, 부문별 다양한 정책과 R&D를 시행중이나 국민 체감 만족도는 낮은 편

- 국민 10명 중 7명은 미세먼지 감축을 위한 정부의 노력에 대해 부정적으로 평가
 - 미세먼지 문제가 심각하다고 인식하는 국민이 92%로 미세먼지 문제는 전국민적 관심사로 자리 잡았고, 일상생활에도 큰 영향을 주고 있음.
 - 행정안전부는 미세먼지를 ‘사회 재난’으로 인정하고, 국회는 관련 법안을 발의하고 있음.
- 사회적 복합 문제인 미세먼지 문제 해결을 위해서는 과학적 R&D 외에도 이에 근거한 정책 수립 이행과 사회적 소통 기술 개발을 위한 융합 기술 개발 필요
 - 근거기반의 정책(evidence based policy)과 연구개발 성과의 정책 전환(research to policy)의 연결 강화 필요.

정책 수립 및 이행 전과정에 걸친 배출 기여도, 비용효율성, 위해도 저감등을 고려한 의사결정 지원 시스템 필요

- 배출원인 (농도 및 배출 기여도)을 고려한 합리적 대책 마련 필요
 - 미세먼지의 배출시설과 생활오염원은 배출원의 70% 이상을 차지하고 있으나 정부의 대책은 70% 이상이 이동오염원 관리 대책에 집중.
- 사회적 합의에 근거한 장기적이고 체계적 대응 체제 필요
 - 오염원 관리로 단기적으로 해결 가능한 문제가 아닌 정부, 기업, 국민 차원의 다각적 참여 필요.
 - 단편적이고 즉흥적 대응이 아닌 장기적 체계적 대응을 위한 의사결정 지원 시스템 구축 필요.

그간 정책 및 정보서비스 부문은 상대적으로 연구 개발 과제 및 성과 미흡

- 그간 미세먼지 관련 기술개발은 주로 저감 기술, 현상 진단, 원인 규명 등 상향식 측면의 개별 기술개발 형태로 진행됨.
- 궁극적 목표인 국민 위해성 저감이라는 정책 목표 달성을 위한 개별 기술의 기여 및 단계적 부문별 기술개발 목표 달성을 위한 세부 계획 수립 미흡.

- 미세먼지 건강 위해성 평가 → 미세먼지 원인의 과학적 이해 → 효과적 정책과 저감 방안 → R&D 및 정책의 효용성 평가와 개선 방향을 포함하는 전과정 분석 필요.
- 사회적, 과학적 새로운 요구와 전과정 분석을 반영한 유연한 R&D 로드맵 보완 필요.

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 기존 R&D 현황

- 그간 미세먼지 국가 R&D sms 주로 과학적 현상 규명 및 배출저감에 집중되어 왔으며 과학기술에 근거한 정책 마련이나 정책 효과 극대화 방안, 우선순위 선정, 사회적 수용성 제고를 위한 연구는 제한적
 - 전체 연구비 중 현상규명 및 예측 분야 30%, 배출저감 분야 43%, 국민생활보호분야 27%
 - 배출저감 분야의 R&D가 가장 큰 규모.
 - 과학적 관리기반 구축 및 대국민 홍보는 정량적인 대책의 평가와는 연관성이 떨어지지만 정량화 대책의 실효성을 향상시키는 방안으로 고려되고 있음.

- 정책의 우선순위는 부처의 입장을 반영해 선정되어 왔으며 국가 차원의 미세먼지 해결을 위한 일관성 있는 정책 의사결정에 대한 합의 부재
 - 각 부처별 정책에 맞춘 R&D 우선순위에 따라 진행.
 - 각 부처별 시급성, 중요도, 파급효과를 우선한 R&D
 - 각 부처별 각 부처의 미세먼지 R&D 로드맵 및 정책의 유연한 조정 필요.
 - 국가 차원의 미세먼지 문제 해결을 위한 단계적 체계적인 계획수립을 위한 의사결정 도구 개발 미흡

기존 과제와의 차별성 및 시사점

- 기존 정책 및 정보서비스 과제는 위에서 분석한 바와 같이 2016년 총 2.97억으로 매우 부족
- 환경부에서 정보 관리 시스템 R&D는 계속 진행 중이나 정책적 활용도 미흡
- 본 연구과제는 그간 산발적/개별적으로 진행된 부처별 정책 및 기술에 대한 통합적 평가를 통해 우선순위를 선정하고 관련 정책의 수용성을 높이기 위한 것임

<기존 R&D와의 차별성 분석>

본 R&D 사업	기존부처 R&D	차별성

기존 R&D 성과 연계 및 활용방안

- 기존 수립 이행된 대책의 평가 결과 및 성과 등을 연계 가능
- 정책 목표에 따라 공백 기술 및 우수 기술의 파악 가능

[4] 추진 전략

핵심 목표

- ▶ 정책 목표 달성을 위해 사회경제 여건, 배출량, 배출저감 정책·기술의 효과 및 비용 등의 복잡하고 다각적 정보를 통합적으로 고려한 정책결정 지원 시스템 개발
- ▶ 미세먼지 정책의 전과정에 걸친 국민 수용성 제고를 위한 소통 체계 개발

과제 추진형태 :

지원 기간 및 예산

- 기간 : 2019-2022
- 예산 : 30억

[5] 세부 추진 방안

현재 기술 수준 및 목표 설정

- 통합적인 미세먼지 대책의 의사결정 시스템 관련 기술은 산발적으로 요소별로 존재
- 본 연구개발 기술의 목표는 통해 국가 및 지역 단위의 최적의 정책 설계가 가능한 의사결정 지원 도구 개발

연구방법 및 내용

- 미세먼지 정책·기술의 의사결정 지원 시스템 개발
 - 사회경제 여건 변화 분석 기술
 - 배출량 인벤토리
 - 정책/기술 DB
 - 상세 시공간 모델링
 - 건강영향 분석
 - 사회경제적 영향 분석(관광, 농업 등)

- 온실가스 저감 등 공편익 분석 기술
- 정책/기술 별 비용편익 분석 기술
- 정책목표 달성을 위한 최적 정책조합 발굴 시스템 구축 기술

○ 미세먼지 정책·기술의 모니터링 및 평가 방법론 개발

- 미세먼지 정책·기술의 성과 평가 지표 및 방법론 개발
- 미세먼지 정책·기술의 효과 모니터링 시스템 개발

○ 미세먼지 위험관리 단계별 쌍방향 의사소통 시스템 개발

- 미세먼지 유해위험요인에 대한 정보 의사소통
- 미세먼지 유해위험요인 노출 정보에 대한 의사소통
- 미세먼지 위험성 평가 방법 절차 및 결과 정보에 대한 의사소통
- 미세먼지 위험 대응 방법별 장단점 등에 대한 정보 의사소통
- 미세먼지 위험 대응 사업에 대한 모니터링 정보 의사소통
- 미세먼지 위험 대응 사업 결과의 평가 및 사후 개선 방안에 대한 정보 의사소통

□ 실증방안

[6] 기대효과

- 국가 및 지역 차원의 정책목표 달성을 위한 의사결정 도구로 활용 가능
- 비용 최소화, 건강영향 최소화, 농도 최소화, 노출 최소화, 편익 최대화 등 다중의 정책 목표 달성을 위한 최적 정책 조합 결정 지원
- 정책 결정 전 단계에 걸친 정량적이고 투명한 의사소통으로 정책 수용성 제고

주 의

1. 이 보고서는 한국연구재단에서 위탁받아 수행한 연구보고서입니다.
2. 본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의 개인적 견해이며 한국연구재단의 공식견해가 아님을 알려드립니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.