

미세먼지 대응 기술개발 전략 연구

연구기관 : 한국과학기술연구원

미 래 창 조 과 학 부

안 내 문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의
개인적 견해이며 미래창조과학부의 공식견해가
아님을 알려드립니다.

미래창조과학부 장관 최 양 희

제 출 문

미 래 창 조 과 학 부 장 관 귀하

본 보고서를 “미세먼지 대응 기술개발 전략 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 12. 31.

목 차

1. 연구의 필요성.....	1
2. 연구 목표.....	3
3. 미세먼지 대응 중점 R&D 추진(안) 제안.....	3
3.1 추진 전략.....	3
3.2 추진 체계.....	3
3.3 미세먼지 대응 세부사업별 추진(안).....	5
3.3.1 [제1세부사업] 미세먼지 발생·유입 규명.....	5
3.3.2 [제2세부사업] 신속하고 정확한 측정·예보 체계.....	29
3.3.3 [제3세부사업] 비용 효과적인 집진·저감 시스템.....	58
3.3.4 [제4세부사업] 국민생활 보호·대응 기술.....	93
3.3.5 미세먼지 대응 전략과제별 상호연계.....	138
3.3.6 선진형 미세먼지 관리(안).....	139
3.3.7 미세먼지 대응 기술개발 추진일정(안).....	141
부록 1. 초미세먼지 문제 해결을 위한 과학적 이해와 정책.....	143
부록 2. (초)미세먼지의 노출평가 방법.....	164
부록 3. 실내 미세먼지의 인체노출 저감을 위한 연구방향.....	173

1. 연구의 필요성

□ 한국의 미세먼지 현실 : 대기오염 후진국 오명

- CNG 버스 도입, 경유차 저공해화 사업 등 친환경 정책에 힘입어 서울시의 미세먼지(PM₁₀) 농도는 꾸준히 낮아져서 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 떨어짐
- 한국의 초미세먼지 농도는 91개국 중 50위, 서울은 1,615개 주요 도시 중 1,094위(WHO, 2014)
 - 서울시 미세먼지 농도는 WHO 기준(연평균 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 물론 선진국 주요 도시의 약 2배 수준으로 높음
- 특히, 2013년부터 미세먼지 및 초미세먼지(PM_{2.5}) 주의보 발령 건수가 증가 추세
 - ※ 서울시 미세먼지 주의보 발령 일수 : `12년 0회 → `13년 2회 → `14년 4회 → `15년 5회
- OECD에서는 한국이 미세먼지 대책을 수립·추진하지 않을 경우, 2060년에는 한해 인구 100만명당 1000명 이상이 조기사망할 수 있다고 경고(OECD 보고서, 2016. 6. 9)
- 2013년부터 미세먼지 농도가 증가하는 원인이 불분명하며, 우리나라 고농도 미세먼지 오염의 원인이 명확하게 규명되지 않아 한중일 외교적 협상력 약화

□ 박근혜 대통령, 미세먼지 문제 해결을 위한 특단의 대책 촉구

- “국민 안전과 건강 위협하는 미세먼지는 국가적 현안으로 특단의 대책 필요” (국무회의, 2016. 5. 10)
 - 미세먼지로 뿌연 도시를 볼 때나 국민께서 마스크를 쓰고 외출하는 모습을 볼 때면 가슴이 답답해지는 느낌
 - 미세먼지는 매일매일 우리가 겪어야 하는 심각한 문제임 : 건강도 지키고 신산업도 일으킬 필요가 있음
 - 관계부처에서 미세먼지 특별 관리대책을 논의하고 있지만 국민이 체감하기에는 아직 미흡
 - 과학적인 조사활동을 계속 확대해 나가고 미세먼지 감축을 위한 종합 마스터 플랜 등 대책도 조속히 마련

□ 미세먼지 해결을 위하여 부처합동 ‘미세먼지 관리 특별대책’ 과의 연계성을 고려하여
연구개발 및 R&D 추진기본 방향(안) 제안 필요

○ 미세먼지 배출, 생성 등에 대한 명확한 과학적 근거에 대한 논란으로 최근 배출원
관리 정책 등 미세먼지 대책에 대한 불신 초래

- (초)미세먼지 오염에서 2차 생성*이 매우 중요한데, 최근 고농도 (초)미세먼지 오염
현상의 빈번한 발생은 1차 배출량 추정에 기반한 배출원 관리의 한계**를 보여줌

* 대기 중에서 기체상 물질이 화학반응을 통해 미세먼지(고체) 생성

** 1차 배출량의 보다 정확한 산정 방법론 마련 및 실제 측정 자료 제공 확대 필요

○ 이번 ‘특별대책’에 포함된 다음 세부 대책의 실효성과 관련하여 미세먼지 배출,
생성, 오염원 기여도 등에 대한 명확한 과학적 근거 보강 필요

- 오염 기여도와 비용효과를 고려하여 국내 주요 배출원(수송, 발전·산업,
생활주변)에 대해 대폭적인 미세먼지 감축을 추진

- (수송부문) 경유차·건설기계 관리 강화, 친환경차 보급의 획기적인 확대,
대기오염이 극심한 경우 부제 실시 등 자동차 운행제한 추진

- (발전부문) 노후 석탄발전소 10기의 친환경적 처리, 신규 석탄발전소에 대해
영홍화력 수준의 배출기준 적용, 기존 발전소의 대대적 성능개선(retrofit)

- (산업부문) 수도권 대기오염총량제 대상 사업장 확대, 배출총량 할당기준을
단계적으로 강화, 수도권외 지역은 국내외 실태조사를 거쳐 미세먼지 다량배출
사업장의 배출허용기준 강화

- (생활부문) 도로먼지 청소차 보급, 건설공사장 자발적 협약 체결 및 현장
관리점검(방진막, 물 뿌리기, 세륜 등) 강화, 폐기물 불법소각 근절, 전국 생물성연소
실태조사, 생활주변 미세먼지 저감을 위한 대국민 캠페인 전개

○ 다음과 같은 미래부의 세부 이행계획과 관련한 R&D 방향 수립의 근거 자료 필요

- (과제목표) 미세먼지 문제를 근본적으로 탐구하고 과학적 해결책 마련을 목표

- (주요내용) 미세먼지 발생·유입, 측정·예보, 집진·저감 및 국민생활 보호·대응 등
4개 부문 과학적 솔루션 강구 및 산업화 지원

2. 연구 목표

- 미세먼지 관련 과학기술로 해결해야 할 범위를 설정하고 R&D 추진기본 방향(안) 제안
- 부처합동 ‘미세먼지 관리 특별대책’과의 연계성을 고려하여 연구개발 필요 세부 분야 및 사업추진 방식 제안
- 개발기술의 정책적·산업적 활용 방안 및 파급효과 분석

3. 미세먼지 대응 중점 R&D 추진(안) 제안

3.1 추진 전략

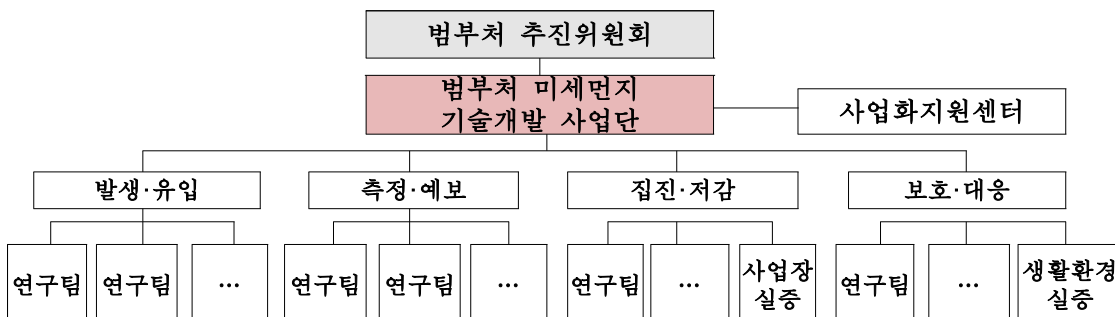
- 국가 R&D 역량을 집중하여 발생·유입, 집진·저감, 측정·예보, 보호·대응 등 4대 분야의 근본적·과학적 솔루션 마련

< 미세먼지 관리 패러다임 전환 >

구분	기존	과학기술 기반 관리체계
접근 방식	정책·규제 우선 (기술은 현안 해결 중심)	과학기술적 사실에 기반한 정책 (과학이 근본적 문제해결에 기여)
관리 방법	1차 배출원 저감 중심 (배출 총량 중심)	2차 생성까지 종합 고려 (실제 위해성 중심)
기술 제공	기술은 정책 구현의 수단	산업계 애로 해소 및 신산업 창출 지원

3.2 추진 체계

- 미래·환경·복지부 등 관계부처 합동으로 (가칭) ‘범부처 미세먼지대응 기술개발 사업단’을 구성·운영
 - 사업단장에게는 세부과제 기획, 선정, 평가, 성과관리 등 R&D 전 주기에 대한 권한 및 책임 부여
 - 사업단 내에 총괄지원센터를 운영, 정책·제도 개선, 산업화 및 글로벌 진출 등 지원
 - Top-Down형 과제 외에 일정 비율(예 : 20%)을 혁신형 연구과제*로 자율적으로 구성하여 수행할 수 있도록 허용



- 지속적인 사업관리와 공동협력이 가능하도록 범부처를 아우르는 운영위원회를 구성하고, 미세먼지 총괄사업단 내 ‘사업화지원센터’를 구성하여 범부처 추진위원회 및 사업단 운영지원, 사업화 지원 역할
- 범부처 추진위원회 : 본 사업의 운영·관리를 위한 최상위 의사결정기구로 사업방향, 부처간 협력, 이견 조정을 위한 Control-Tower 기능을 수행
 - 운영위원회 : 참여부처 담당자(공무원), 부처별 전문관리기관 담당자, 협력사업의 코디네이터 및 관련부처 추천 민간 전문가로 구성하여 다부처 사업(협력, 공유)의 추진계획 수립 및 운영 실무
 - 기술자문위원회 : 각 부처의 미세먼지기술 관련 전문 인력 pool을 활용하여 구성하고 사업 선정 및 평가 시 기술자문 역할

< 사업운영 주체별 역할 및 기능>

주체	역할 및 기능
범부처 추진위원회	• 연간 사업계획 심의 • 사업 추진 경과 및 성과 공유 방안 승인 • 차년도 사업(고유, 협력사업) 추진계획 검토
기술자문위원회	• 사업 운영, 성과 관리 과정에서 필요한 기술적 자문 • 사업 수행과정의 컨설팅, 마일스톤 성취 가능성 점검
운영위원회	• 범부처 (고유, 협력)사업 추진 종합계획 마련 • 정기·수시 회의를 통한 실질적인 사업 운영·관리 - 사업의 내용과 예산계획 등에 대한 사전 심의 - 부처간 이견조정 및 역할 분담 • 공유/협력 사업 평가 등 - 부처간 협력사업 추진방향 및 연계·협력방안 제시 - 부처별 공유 및 협력사업의 성과 연계 및 공유

3.3 미세먼지 대응 세부사업별 추진(안)

3.3.1 [제1세부사업] 미세먼지 발생·유입 규명

□ 중점 목표

과학기술 기반 미세먼지 대기농도 저감 대책을 위한 발생 메커니즘 규명과 국내 배출원별 기여도, 외부 유입량 산정

- 동북아시아의 미세먼지 생성 및 변환 메커니즘 규명
- (초)미세먼지에 대한 권역별 주요 배출원(차량, 화력발전소 등)의 1, 2차 기여도와 외부 유입량 산정
- 고농도 스모그 원인과 주요 제어 요소 규명

□ 전략과제 및 도출근거

현재 기술수준 및 문제점	과제를 통한 해결방안	전략과제
- 생성과 변환을 직접 조사하기보다 지표 수용체에서 미세먼지 성분 혹은 입경별 농도를 측정 후 시공간 변화로부터 대기 과정을 추정하여 실제 현상 이해에 한계가 있음 - 6m³ 이하 소규모 스모그 챔버에서 인공광원을 이용하여 2차 생성을 조사함에 따라 실제 기작을 모사하는데 한계가 있음	- 대형 배출원 또는 자연적 배출의 영향이 지배적인 곳에서 모바일 측정을 병행하여, 1차 배출 혹은 전구물질에 의한 미세먼지 생성 및 변환 과정을 직접 관측 - 100m³ 이상 대형 스모그 챔버에서 벽면의 영향을 최소화한 가운데 태양광을 이용하여 실제에 가까운 반응 기작을 연구	[전략과제 1] 미세먼지 생성 기작 규명
- 현장 측정과 대기질 모델 등 발생·유입에 대한 정보를 알 수 있는 연구들이 단편적으로 진행됨에 따라 1차 배출, 외부 유입, 2차 생성에 관한 의미있는 종합적 성과 도출에는 한계 - 배출원 구성비의 정보가 미흡하고 모델 이용체계가 갖추어지지 않아 수용모델 결과의 정책 활용이 제한됨	- 대기질 모델 및 실시간 관측 결과를 이용하여 1차 배출, 외부 유입, 2차 생성에 관한 정보를 포괄적으로 파악하고, 전국 단위 권역별 수용모델 이용체계를 갖추어 최신의 배출원 정보를 정책에 반영 - 동아시아를 대상으로 supersite network를 구축하고, 항공 측정을 본격 도입함으로써 동아시아 지역규모 미세먼지 오염 개선의 전환점을 마련	[전략과제 2] 미세먼지 오염원 규명 및 기여도 추정

3.3.1.1 전략과제1 : 미세먼지 생성기작 규명

[1] 개요

- 대기 중 미세먼지의 원인에 따라 효과적인 저감 대책을 수립할 수 있도록 생성 및 변환 과정을 추적하고 메커니즘을 규명
 - 대기 중 미세먼지는 오염원에서 직접 배출되기도 하지만 많은 양이 기체상 전구 물질로부터 대기 중 화학반응에 의하여 생성
 - 배출되거나 생성된 미세먼지는 대기 중에 머무르는 동안 수분을 흡수하고, 기체상 물질과 반응하며, 기체상, 입자상 물질이 응결 혹은 응집되며 조성과 크기가 변함
- 생성 및 변환 메커니즘 규명을 위하여, 집중 현장 조사를 통해 대기 중 현실을 관찰하고, 스모그 챔버를 이용하여 다양한 조건에서 진행 과정을 추적
 - 집중 현장 조사에서는 차량, 화력발전소 등 대형 오염원과 생물학적 배출 등 배출의 영향이 지배적인 지역과 장거리 이동 영향이 중요한 지역에서 오염물질을 측정하며, 상시 측정을 병행하여 권역별로 대기질 변화와 주요 인자의 영향 변화를 모니터링
 - 스모그 챔버 실험은 2차 생성, 1, 2차 미세먼지 변환, 액상 및 야간 화학반응 등으로 구분하여 집중 현장 조사 과정에서 확인된 대기환경 조건에서 반응 조건을 조절하며 생성 및 변환 과정을 추적
- 생성 및 변환 메커니즘은 모수화(parameterization)하여 정량화함으로써 모듈 형태로 대기질 모델과 결합시켜 오염원별 기여도 산정과 고농도 스모그 원인 규명 등에 활용
 - 중국의 대규모 인위적 배출과 다량의 광물 먼지, 계절별로 광범위한 산불과 농작물 연소가 배경을 이룬 한국형 대기환경 조건에서 미세먼지의 구체적 생성 및 변환 과정을 모수화

⇒ 집중 현장 조사에서 미세먼지의 생성 및 변환을 확인하고 스모그 챔버 실험에서 구체적 과정을 추적하여 모수화

※ 과학적 정보 제공과 정책 수립의 기초 확립

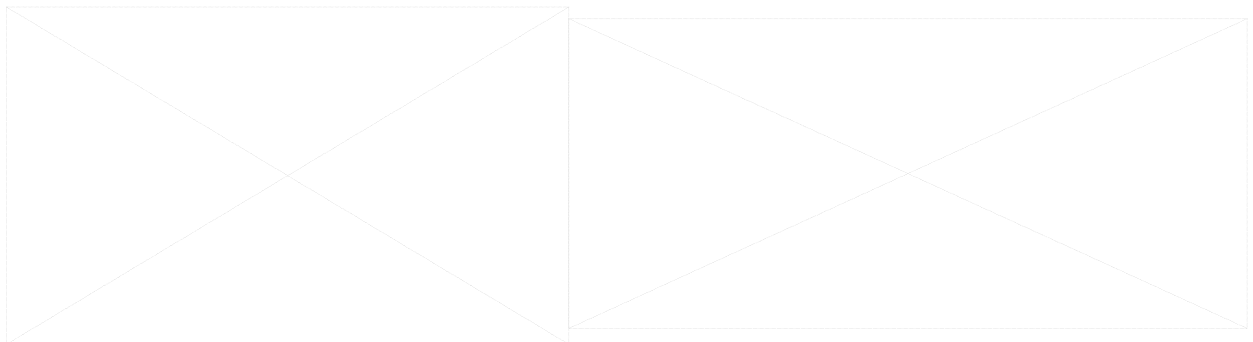
[2] 현황 및 필요성

- 일본, 한국, 중국으로 서진하며 진행된 압축 성장은 거대 국가 중국에 이르러 역사상 유례가 없는 인위적 오염물질 배출 증가를 기록
 - 2000년 이후 중국의 NO_x 배출 증가는 위성 자료를 통하여 확인될 때까지 진위가 논란이 될 만큼 급격



< 2000년대 중국의 NO_x 배출량 현황과 전망. 수직선은 편차 >

- 중위도 편서풍 지대에 위치한 우리나라는 풍상 측에, 아프리카 북서부 사하라 사막부터 내몽골, 만주의 황사 발원지까지 먼지벨트(dust belt)가 이어지고, 먼지 벨트의 남북으로는 산불 등 바이오매스 연소가 활발하여 자연적 여건도 불리



< 위성으로 관찰한 먼지 벨트와 산불의 모습(Prospero et al., 2002; Giglio et al., 2006). 위도가 높은 중국 서쪽과 북쪽의 먼지 발생지역은 잘 나타나지 않음 >

- 인위적, 자연적 여건이 크게 다름에도 불구하고 우리나라에서는 북미를 대상으로 개발된 CMAQ과 CAMx 등의 대기질 모델을 이용
 - 미국은 1980년대 남서부 LA 지역에서는 차량으로부터 NO_x 배출, 북동부 지역에서는 중서부 화력발전소에서 배출된 SO_x 의 장거리 이동에 의한 2차 생성 무기입자를 대상으로 모델 개발을 시작. 1990년대 중반 이후 생물학적 배출의 영향이 큰 남동부 지역을 대상으로 2차 생성 유기입자에 관한 연구가 진행

- 무기입자 2차 생성은 메커니즘이 잘 알려져 있음에도 불구하고 황산염의 과소평가와 질산염의 과대평가가 동아시아와 함께 북미에서도 관찰. 유기입자에 대한 연구는 매우 미흡하여 과소평가 폭이 크고, 이들 주요 성분을 제외한 나머지 성분의 편차는 더욱 큰데, 성분과 별도로 총 질량 농도 예측의 정확도를 높이고자 노력하는 과정에서 나타난 현상으로 추정

< 스모그 챔버를 이용한 2차 유기입자 생성 연구(임용빈 등, 2016) >



- 2000년대 미세먼지 오염의 전지구적 영향이 주목을 받으며 대기질 모델에 포함된 입자 모듈을 보편화하기 위하여 생물학적 배출의 영향이 큰 아마존, 들불(wild fire)의 영향이 광범위한 아프리카, 비산먼지 발생이 많은 사하라 지역에 이어 최근에는 극지방과 대륙권 상부 등 인위적 오염의 영향이 적은 지역에 대하여서도 미세먼지의 생성 및 변환을 조사. 그러나 동북아시아에 대한 관심은 아직 상대적으로 충분치 않음
- 우리나라에서는 미세먼지의 생성기작 규명에 관한 연구가 거의 이루어지지 않음. 가장 큰 이유는 많은 연구가 당장의 정책적 필요에 의해 연구용역 형태로 진행되면서 기초 과학에 관심을 갖기 어려웠기 때문

- 중국은 우리나라보다 대기환경 연구기반이 열악하고 관심이 적었던 1990년대에도 북경대 등 대학 실험실에서 대기화학 반응을 실험. 기초과학의 토대 위에서 2008년 북경 올림픽을 앞두고 지원이 확대되면서 최근 5년의 국가별 논문 발표는 미국에 이어 2위를 기록하고, 기관별 논문 발표에서도 중국국립과학원(CAS)이 수위를 다텔

국가별	기관별

< 최근 5년간 생성기적 규명 분야 논문 발표(2011-15) >

- 우리나라는 1980년대 서울 올림픽을 앞두고 청정연료 보급과 오염원 이전 등의 정책을 앞세워 단기간에 1차 오염을 해결하고, 2000년대에는 수도권 특별법 등으로 선진 대기환경 관리 체계를 도입. 그러나 기초과학이 뒷받침되지 않은 채 정책이 시행되고, 정책이 시행된 후에는 정책의 외형적 성과만을 위하여 용역 형태로 연구가 지원됨에 따라 수많은 연구가 진행되었음에도 연구결과가 축적되지 못함

[3] R&D 현황 및 시사점

- (R&D 현황) 전략과제 1의 세부과제는 집중현장 조사와 스모그 챔버 실험으로 구분되며, 집중현장 조사는 상시측정을 포함
 - 2015년 관련 R&D는 기상청 3개 과제(4억원), 환경부 4개 과제(7.4억원) 등 7개 과제(11.4억원). 지표 측정소에서 배경 대기를 측정하거나 선박을 이용하여 해양 경계층 내 오염특성을 조사한 과제 둘을 제외하면, 항공기를 이용하여 관측하거나 항공관측 자료를 활용하여 장거리 유입을 조사(4개 과제, 5.9억원)
 - 2016년 시작된 2개 과제 등 환경부 지원 3개 과제는 KORUS-AQ의 일환으로 황해 주변 석유화학단지과 대규모 석탄화력발전소 배출과 수도권 주변 자연 배출 VOCs, 중국기원 오염물질의 영향 등을 입체적으로 측정

< 생성기작 및 유입기제 규명 관련 과제 현황 >



- (R&D 역사) 지금까지 국내 연구는 대부분 현황 파악이 목적이며 2005년 수도권 특별법 이후는 연구용역 형태로 진행
 - 1990년대 후반부터 2000년대 전반까지 연구소 혹은 대학이 중심이 되어 (연간 몇 억원 규모의 당시로서는) 대규모 연구가 진행되었으나, 인력과 예산이 충분치 않아 세계 일류 수준의 결과를 도출하지 못하였고, 국제 협약이나 환경 정책으로 이어지지 못함
 - ※ 배경 농도 조사를 위한 지표 측정, “동북아 대기오염 장거리 이동과 환경보전 협력방안에 관한 조사” (주관연구기관 KIST, 연구기간 1995-1999), “미량 독성 유해물질의 장거리이동 특성 분석과 영향평가” (KIST, 2001-2004); 선박 측정, “해양-대기 조사 연구” (KIST, 1998-2000); 대도시 대기질 측정, “미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립” (한국대기환경학회, 2002-2006)
 - 1990년대 후반 준비 과정을 거쳐 2000년부터 본격 시행된 “동북아 장거리이동 대기오염(LTP, Long-range Transboundary Pollutants)” 사업은 한·중·일 3국이 협력한 사업이고, 지표 측정과 항공 측정, 모델링이 종합되었으나 연구보다 3국 협력의 의미가 강함
 - ※ 3국의 공식 합의가 강조됨에 따라 지표 측정의 QA/QC 통일이나, 모델링의 모델과 배출자료 결정에도 많은 시간이 소요
 - ※ 한반도를 중심으로 한 항공측정은 다른 과제에서는 수행하기 어렵고, 합의가 필요 없는 우리만의 측정이지만 예산 부족으로 작은 항공기에서 기체만을 측정

- (기존 R&D와의 연계) 이번 전략과제의 집중현장 조사는 KORUS-AQ의 연장선상에서 시행. 상시측정은 권역별 집중측정소를 중심으로 진행하며, 스모그 챔버는 기존 시설을 최대한 활용
 - KORUS-AQ에서는 백령도, 서울, 태화산 등 3개 핵심지점과 항공기, 선박 등에서 기체상 전구물질과 산화제, 중간·최종 생성물질을 측정. 이번 전략과제의 집중 측정에서는 래디컬 등 중간생성물은 측정하지 못하지만 시공간 영역이 확대됨
 - ※ 시간적으로 KORUS-AQ가 5월 광화학 반응의 영향을 주로 조사한데 비하여 봄철 비산먼지, 여름철 태풍과 강한 일사, 가을철 바이오매스 연소, 겨울철 저온과 난방 연료 사용 등의 영향을 조사
 - ※ 공간적으로 KORUS-AQ가 수도권 중심인데 비하여 전국을 대상으로 진행
 - ※ 중간생성물은 스모그 챔버 실험을 병행함으로써 확인
 - 상시측정에서는 지금까지 집중측정소를 지원하기 위하여 수행되었던 연구용역을 흡수하여 확대
 - ※ 2016년에는 KORUS-AQ를 위하여 연구과제들이 재편되었으나, 2015년까지도 “권역별 대기오염 특성 심화연구”, “권역별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 특성 파악 및 생성과정 연구”, “동북아시아 유기미세입자 생성 및 장거리 이동 연구” 등 용역을 통하여 집중측정소 첨단 장비의 활용성을 높이고자 노력
 - ※ 충분한 예산이 지원되지 못하여 첨단 장비의 활용성이 크게 확대되지 못함. 이번 전략과제를 통하여 하드웨어에 걸 맞는 소프트웨어 지원체계를 갖추으로써 동아시아 supersite network의 기틀을 마련
 - 현재 이용이 가능한 스모그 챔버는 모두 소형의 실내 챔버로 2000년대 초 건립된 KIST 챔버와 최근 가동을 시작한 경북대 챔버가 있음
 - ※ “스모그 챔버를 이용한 스모그 생성 메커니즘 규명” (KIST, 2000-2005); “에어로졸상 화학반응에 의한 입자상 유기물 생성: 반응기구, 속도상수, 생성 계수” (경북대, 2009-2012)
- (동 전략과제의 positioning) 집중관측과 모델 연구, 스모그 챔버 실험 등 개별적으로 진행되던 연구를 종합하고 국내 연구역량을 극대화함으로써 기초과학으로 생성기작 규명 연구의 기틀을 다지고 외부 유입에 관한 핵심 정보를 획득하여 정책효과 분석과 예보를 위한 모델링을 지원

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 집중 현장 조사와 스모그 챔버 실험을 통하여 한국형 대기환경 조건에서 미세먼지 생성 및 변환 메커니즘을 규명
- ◆ 생성 및 변환 메커니즘을 모수화하여 정책효과 분석과 예보를 위한 모델의 입자 모듈 개발을 지원

- 집중 현장 조사는 스모그 챔버 실험에 현장 정보를 제공함과 동시에 유입기제 규명을 위하여 중국으로부터 장거리 유입의 영향을 입체 관측. 아울러 상시 측정을 병행함으로써 집중 측정 지원의 1차적 목적과 함께 차량 등 지표면 배출이 중요한 오염원의 2차 생성에 필요한 정보를 수집
- 집중 현장 조사는 KORUS-AQ의 연장선상에서 진행되기 때문에 1단계에서는 KORUS-AQ로부터 생성 및 유입기제 규명에 필요한 정보 추출이 중요하며, 화력 발전소 등 대형오염원과 차량 배출, 중국으로부터 장거리 이동 영향 등 현안에 대한 1차 정보를 제공함과 동시에 스모그 챔버 실험, 수용모델, 대기질 모델에 기초 자료를 제공



< 현장 측정은 챔버 실험과 수용, 대기질 모델에 기초 자료 제공 >

- KORUS-AQ는 항공 측정을 중심으로 미국 NASA, 일본 국립환경연구소, 중국과 학원 등 해외 연구팀이 참여. 이번 전략과제를 통하여 항공 측정을 정례화하고, 집중측정소를 활성화하여 중국, 일본, 대만, 홍콩 등과 함께 supersite network를 구성함으로써 지역규모 초미세먼지 오염에 대한 국제 공동 대응의 틀을 마련
- 스모그 챔버 실험은 지금까지 연구가 주로 진행된 북미, 유럽과 다른 우리나라 혹은 동아시아 대기현실에서 생성 및 변환 메커니즘을 조사. (초)미세먼지 오염을 기초과학 측면에서 접근하기 위한 시도인 만큼 단기간의 성과를 지향하기보다 기초적이면서도 임팩트가 큰 연구부터 시작하여 구체화

- 1단계에서는 주요 전구체별 지표물질을 개발. 북미, 유럽과 주요 전구체가 다르고 추후 연구가 지표물질을 중심으로 진행되며, 차세대 수용모델 기술개발의 일환으로 2차 생성 전구물질의 기여도 추정에도 활용될 수 있기 때문. 모든 스모그 챔버 실험은 집중 측정 결과와 더불어 입자모듈 개발에 이용될 수 있도록 모수화



< 단계별 추진 일정 >

[5] 세부추진 방안

□ 미세먼지 발생 및 유입기제 규명을 위한 집중 현장 조사

- 항공관측 시스템 구축과 미세먼지 발생 및 유입의 3차원 집중 관측
 - 초미세먼지 전구물질과 산화제, 에어로졸 성분 관측을 위한 항공측정 시스템 구축
 - ※ 지금까지 국내에서는 항공기가 작아 입자와 전구물질을 함께 측정하지 못함. 시공간 변화가 큰 3차원 측정에서 별도로 측정한 입자와 전구물질을 1:1로 대응시키기는 거의 불가능
 - ※ 항공기를 2배로 확충할 경우, 기체상의 PTR-ToF-MS, 입자상의 HR-ToF-AMS, 입자의 수농도, 주요 기체상 물질의 농도를 동시에 측정. 현재 KORUS-AQ에 비하여 래디컬 등 중간 생성물만이 제외됨
 - 화력발전소, 정유시설, 화학시설 등 영향이 광범위한 대규모 배출과 중국으로부터 장거리 유입의 영향을 입체 관측
 - ※ 항공기를 이용하여 대형 오염원의 1차 배출, 2차 생성과 유입/배출/생성된 입자의 이동/확산과 물리·화학적 변환을 집중 관측
 - ※ 대규모 배출은 계절에 따라 거의 변화가 없지만 주변 환경은 차이가 크므로, 상시 측정과 연계하여 계절별 고농도 발생 때 대규모 배출과 장거리 유입의 영향을 특별히 유의하여 조사



< 2015년 봄
KORUS-AQ
pre-campaign
기간 황해 상공의
입자 질량 농도
항공 관측 >

- 권역별 지표 전략지점에서 미세먼지 발생 및 유입의 상시 측정
 - 전략지점 장비 관리 및 인력 지원을 통한 협업 시스템 구축
 - ※ 권역별 집중측정소와 태화산 측정소 등의 첨단 기기를 효과적으로 활용할 수 있도록 학·연·관 협력체를 구성하여 협업
 - 차량 배출과 생물학적 배출, 바이오매스 연소 등 지표면에서 변화가 중요한 초미세먼지 배출과 2차 생성 관측
 - ※ PTR-ToF-MS, HR-ToF-AMS, CIMS 등 첨단 기기를 이용하여 기체상, 입자상 화학조성과 중간생성물의 고해상도 시간 변화와 입경 변화, 기상요소 등을 종합적으로 측정
 - 장기간 상시/정밀 관측에 의한 초미세먼지 생성과 성장의 주요 인자 발굴과 고농도 스모그 진행 과정 추적
 - ※ 집중관측 때에는 항공 관측을 지원하고 태화산에서는 측정탑을 이용하여 연직 분포를 측정
 - ※ 상시측정에서는 지표 부근의 변화를 주로 관측하지만 집중관측이 아니라도 필요에 따라 라이다 자료를 분석하고 존데를 이용하는 등 연직 방향의 변화를 조사하여 3차원 변화를 종합 분석



< 북경에서의 입자 생성과 성장(Yue et al., 2010): 황산염의 역할이 중요하며 황산염의 농도가 낮을 때는 유기성분이 중요 >

□ 스모그 챔버를 이용한 초미세먼지 생성 메커니즘 규명

○ 한국형 초미세먼지 생성 구현을 위한 대규모 실외 챔버 구축

- 다양한 연구 수요를 충족할 수 있도록 유연한 챔버 시스템을 갖추

※ 대규모 챔버는 벽면의 효과를 최소화한 가운데 장기간의 입자 변화를 관찰할 수 있음. 단시간 혹은 고농도 실험 위주의 소규모 챔버의 한계를 극복할 수 있을 뿐 아니라 장거리 유입이 중요한 우리나라에서 특히 유용

※ 실내 챔버는 광도와 온도를 일정하게 유지하는 등 다양한 조건을 실험할 수 있고 동일 조건의 반복 실험도 가능하나 규모 확대는 한계가 있음. 실외 챔버는 태양광을 이용하는 등 실제 대기에 근접한 조건에서 실험이 가능하지만 광도와 기온을 임의로 변화시킬 수 없고 재현 실험도 어려움

※ 대규모 실외 챔버도 비교 실험을 위하여 듀얼 챔버를 고려할 수 있고, 가리개를 설치하면 암흑을 재현하는 등 일사를 조절할 수 있음

- 구체적 단위 과정의 반복 실험은 전문분야에 따라 실내 챔버를 이용

※ 균질, 비균질 반응, 액상 반응 등 전문분야별로 특화된 실험은 소형 실내 챔버를 활용



< 독일 Jülich의 SAPHIR 챔버(270 m³). 가리개를 설치하여 암흑을 재현하는 등 일사 강도를 조절 >

○ 초미세먼지 생성기작 규명과 스모그 생성 핵심인자 도출

- 주요 전구체별 지표물질 개발과 2차 생성 메커니즘 및 수율 조사

※ 기존 연구조건과 구분되는 한국형 대기조건과 주요 전구체 확인. 한국형 대기조건에서 2차 생성 메커니즘 규명과 수율 조사

- 비균질 반응과 액상 반응에 의한 2차 생성과 야간 반응 메커니즘 규명

※ 황사 등 광물먼지와 연소 배출 입자 표면에서의 비균질 반응과 구름, 안개 등에서의 액상 반응에 의한 2차 생성 메커니즘 규명과 수율 조사

※ NO₃ 중심의 야간 반응 메커니즘 연구

- 생성 입자의 성장과 노화에 따른 유기, 무기 입자의 물리·화학적 특성 변화 추적

※ 습도가 높은 조건에서 흡습성 입자의 성장과 장거리 이동으로 대기 중 체류 시간이 길 때 multigeneration 혹은 multiday 노화에 따른 물리·화학적 특성 변화 추적

- 생성 및 변환 과정의 많은 미지(unknown) 물질을 확인하기 위한 분석기술 개발

※ 중간생성물을 확인하여 다양한 반응 경로를 파악. 하지만 수천, 수만 이상의 많은 물질을 모두 확인할 수 없으므로, 휘발성에 기초한 반응경로 조사 등 새로운 접근 방법의 활용을 적극 검토

- 입자 모듈 개발을 위한 생성 및 변환 메커니즘의 모수화

※ 현장 측정과 스모그 실험 결과를 토대로 기존 입자모듈의 취약성 분석

※ 개별 메커니즘의 취합과 multigeneration 노화, 액상 반응과 야간 반응 등을 개선한 입자 모듈 개발 지원



< 개별 물질을 확인하는 대신 휘발성 정보를 이용한 반응경로 추적(Donahue et al. (2012)) >

[6] 기대 효과

- 현장 측정을 통하여 화력발전소 배출, 중국으로부터 장거리 유입의 영향, 고농도 스모그 진행 등 현안에 대한 상세한 가시적 정보를 제공함으로써 국민과 정책당국의 알권리를 충족시키고 과학적 접근에 대한 신뢰를 향상시킴
- 한국형 대기환경조건의 생성 및 전환 메커니즘 정보를 이용하여 입자 모듈을 개발하고 대기과정을 분석함으로써 정책효과 분석과 예보를 위한 대기질 모델의 정확도를 높이고, 기초 과학 기반 대기환경 연구와 정책 지원의 토대를 마련
- 현장 측정과 스모그 챔버 실험을 통하여 획득한 대기환경 현실 정보를 오염원의 기여도 분석과 외부 유입량 산정을 위한 모델링에 활용함으로써 미세먼지 대응정책의 실효성을 증진시키고 과학기술 기반 정책 수립 체계를 확립
- 항공측정의 정례화와 동아시아 supersite network 등으로 지역규모 초미세먼지 오염에 대한 국제 공동 대응의 틀을 마련

3.3.1.2 전략과제2: 미세먼지 오염원 규명 및 기여도 추정

[1] 개요

- 대기 중 미세먼지 농도 저감에 필요한 대책을 수립하기 위하여 오염원을 규명하고 기여도를 추정
 - 미세먼지는 오염원으로부터 1차 배출되기도 하지만 기체상 전구물질로부터 대기 중 화학반응에 의하여 2차적으로 생성되며, 중위도 편서풍 지역에 위치한 우리나라는 중국 등 아시아 대륙으로부터 유입도 많음
 - 미세먼지 대기 농도를 저감하기 위해서는 오염원의 배출을 줄여야 함. 그러나 1차 배출 저감도 차량과 화력발전소 등 오염원에 따라 비용과 효과가 다르고, 2차 생성 전구물질의 배출 저감은 효과가 간접적이며, 국경을 넘는 장거리 외부 유입은 국내 배출 저감의 효과를 제한
- 과학기술 기반 배출저감 대책과 오염원 관리를 위하여 수용모델과 대기질 모델 이용체계를 구축
 - 대기질 모델은 고농도 스모그 원인 분석, 주요 오염원의 기여도와 외부 유입량의 산정 등 미세먼지 대책에 실질적으로 필요한 모든 정보를 제공. 그러나 모델 뿐 아니라 배출자료, 기상 등 입력자료가 정확하여야 하므로 이에 대한 대책이 필요
 - 권역별로 수용모델을 이용하여 주요 오염원의 기여도를 조사함으로써 측정 시점의 주요 인자 영향과 배출자료의 정확도를 점검. 전통적 의미의 수용모델은 1차 오염원의 기여도 산정이 목적이거나 2차 생성, 장거리 이동의 영향 평가 등 차세대 수용모델 기술 개발을 시도
- 6.3 특별대책이 시행 중이므로 현재의 가용 자원을 이용하여 대기농도 목표 달성에 필요한 주요 오염원 배출 저감량 산정 등 대책에 필요한 정보를 제공하는 한편, 기존 기술의 문제점을 정밀 분석하여 차세대 기술을 개발함으로써 과학기술기반 미세먼지 대책 수립 체계 구축

⇒ 수용모델과 대기질 모델을 이용하여 고농도 스모그 원인을 분석하고 해외 유입량을 산정하며 경유차와 화력발전소 등 주요 오염원 배출의 영향을 정량화

※ 과학기술기반 미세먼지 대책 수립 체계 구축

[2] 현황 및 필요성

- 대기 중 농도를 낮추기 위한 배출 저감 효과는 1차 오염물질에서 가장 직접적임. 우리나라도 1980년대 석탄 등 고체연료 사용 제한과 저황유 사용 확대, 도시가스 보급 등 연료정책으로 SO₂, CO 등 1차 오염물질을 효과적으로 낮춤
- 1992년 WHO/UNEP 보고서에서는 서울의 대기오염을 멕시코시티에 이어 세계 2위로 평가하였으나, 1992년 당시 서울의 SO₂, CO 등 1차 오염물질은 이미 크게 감소 중이었음. 이와 같은 정책의 효과는 1997년에야 학회지에 보고되었으며 정책이 연구를 주도하는 형태가 지속됨



< 1991-1993 기간 서울의 대기질 변화(김영성, 1997) >

- 1990년대 오존 등 2차 오염물질의 농도가 높아지고 황사를 비롯한 오염물질의 장거리 이동이 이슈가 됨. 중국이 경제 개발을 시작하며 인위적 오염물질 배출이 증가된 시기이기도 함. 환경부에서는 선진 대기환경 관리의 틀을 마련하고자 2005년 “수도권대기환경개선에 관한 특별법”을 시행하고 10년간 총 4조원의 예산이 투입되는 1차 대기환경관리 기본계획을 수립
- 대기농도 목표를 설정하고 대기질 모델을 이용하여 BAU (business as usual) 대비 배출량 저감 목표를 산출. 그러나 대기질 모델링은 현재 수준의 농도를 재현하는 데에만 이용되고, 목표 농도 달성을 위한 배출량 저감 목표는 권역내 배출량과 평균 농도 사이에 선형 관계를 가정하는 롤백(rollback)에 의하여 산출
- 6.3 특별 대책에서도 언급된 경유차 배출 저감 등 대책의 틀이 갖추어졌으며, 충남 화력발전소 배출의 영향 등도 검토하였으나 기본계획에는 포함되지 않음
- 대기농도 목표가 배출량 저감 목표로 대체되고, 배출량 저감 목표 달성을 위하여 대책을 수립하고 추진함에 따라 대책은 대기농도와 직접적으로 연관되지 않음
- 기본계획 시행 초기, 차량으로부터 직접 배출되는 미세먼지가 외부로부터 유입되는 양에 비하여 비중이 작다는 수용모델 결과가 언론에 보도되어 큰 반향을 일으킴

- 1차 배출만을 대상으로 한 배출목록의 배출자료를 대기농도 측정결과로부터 얻은 수용모델 결과와 비교한 결과였지만, 미세먼지 대책을 위하여서는 배출 외에도 장거리 이동, 2차 생성 등 다양한 요인을 고려하여야 함을 우리사회에 일깨워 주었고, 학계에도 측정자료의 대표성 등 많은 과제를 남김
- 외부로부터 장거리 유입, 2차 생성 등이 복잡하게 연관된 미세먼지의 대기농도를 저감하기 위해서는 대기질 모델을 이용하여 대책의 효과를 미리 예측하고 점검하여야 함
- 외부 유입의 영향을 점검하여 배출의 최대 효과를 산정하고 개별 대책의 효과를 살펴야 함. 차량과 화력발전소는 배출의 높이가 다르고 오염물질의 조성이 다르므로 저감의 효과도 다름. 2차 생성은 반응의 비선형성 때문에 NO_x 배출을 줄일 경우 2차 생성이 증가할 수 있고(NO_x disbenefit), 국지적이라도 암모니아가 충분치 않을 때는 SO_2 배출을 줄여 황산염이 줄면 유리된 암모니움 둘에 각각 질산염이 결합되어 질량이 증가(황산암모늄 1몰은 132 g, 질산암모늄 2몰은 160 g)
- 2006년 언론 보도 이후 수용모델 이용에 관심이 많았으나 측정 자료가 충분하지 않아 정책에의 활용이 제한됨. 대기질 모델은 대책에 필요한 종합 정보를 얻을 수 있는 중요한 수단임에도 불구하고 1차 기본계획에 이어 2차 기본계획 수립에서도 제한적으로만 이용



< NO_x 와 VOC 배출에 따른 입자상 물질의 계절별 농도 변화(Lee et al., 2006). 어느 계절이나 정도의 차이가 있을 뿐 NO_x 배출 감소 초기 입자상 물질의 농도가 증가 >

[3] R&D 현황 및 시사점

- (R&D 현황) 전략과제 2의 R&D는 오염원 규명 및 기여도 추정을 위한 것으로 방법적으로는 수용모델과 대기질 모델 이용을 포함
 - 2015년 관련 R&D는 기상청 1개 과제(1.7억원), 환경부 5개 과제(11.5억원) 등 6개 과제(13.2억원). 2개 과제가 기여도 산정 혹은 분석을 추구(과제 ②, ④; 3.4억원)하였고, 2개 과제가 대기질 모델을 이용하여 오염 현상을 규명(①, ⑤; 5.7억원)
 - 4개 과제는 측정망 자료 이용(③), 장거리 이동 대응전략 마련(⑥, ⑦), 누락 배출원 발굴(⑧)을 다룸

< 오염원 규명 및 기여도 추정 관련 과제 현황 >



- (R&D 역사) 수도권 특별법과 더불어 국내에서도 대기 정책을 뒷받침하기 위한 모델 이용이 계속됨
 - 수도권 특별법 이전에도 수용모델은 오염원 규명을 위하여, 대기질 모델은 오염현상 이해를 위하여 이용
 - ※ 1990년대 입자상 물질을 위한 모델은 주로 수용모델 형태. 대기질 모델은 입자 모듈이 완전하지 않아 대부분 기체상 물질을 대상으로 함
 - 수도권 특별법 초기에는 대기질 모델 이용을 적극 시도. 하지만 PM₁₀의 경우, 비산먼지의 비중이 크에도 불구하고 정확한 정보를 얻기 어려울 뿐 아니라 대책이 쉽지 않고, 장거리 이동 등의 영향이 크게 부각되면서 모델 이용에 소극적인 반면 기반 조성을 위하여 단위 기술개발을 추진

- ※ 1차 기본계획 수립, “수도권 지역 배출총량관리제 추진방안” (KEI, 2004), 대기질 모델과 선형 롤백에 의하여 배출량 저감 목표 설정; 1차 기본계획 개선, 보완 연구, “수도권 대기환경관리 기본계획 개선·보완 대책 마련을 위한 연구” (한국대기환경학회, 2009), 수용모델을 이용하여 오염원 기여도를 조사하고 대기질 모델을 이용하여 대기농도 목표 달성 여부 점검; 2차 기본계획 수립, “제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립” (KEI, 2013)
 - ※ 1차 기본계획 지원, “미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립” (한국대기환경학회, 2002-2006), 수용모델을 이용하여 오염원 기여도를 산정하고 대기질 모델을 이용하여 배출량 저감 효과 조사; 서울시 시행계획 지원, “서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 연구” (서울시정개발연구원, 2007-2010), 수용모델을 이용하여 오염원 기여도를 산정, 대기질 모델을 이용하여 외부 유입의 영향과 오염원 기여도를 조사하고 수용모델 결과와 비교, “초미세먼지 배출원 인벤토리 구축 및 상세 모니터링 연구” (서울연구원, 2015-2016)
 - ※ 국립환경과학원에서는 2000년대 후반부터 연구 용역으로 동아시아지역 배출자료 준비, 정책 지원과 예보를 위한 대기질 모델링 체계 구축, 수용모델 이용, 재분석 자료 생산 등을 추진
- (기존 R&D와의 연계) 국립환경과학원에서 오염원 규명과 기여도 산정을 위하여 지속적으로 노력한 만큼 그동안 연구결과를 적극적으로 활용
- 수용모델에서는 집중측정소 자료를 이용한 권역별 접근과 표준화 작업 결과 활용
 - ※ 권역별 접근, “한반도 권역별 대기오염 특성 연구” (2015-), 당초 “한반도 권역별 기류유입 특성 및 오염물질별 국내외 기여도 분석”에서 과제명이 변경된 것으로 추정; 수용모델 표준화, “미세먼지의 국내외 기여율 산정 및 수용모델 적용 가이드라인 마련” (2015-)
 - ※ 당초 과제들이 권역별 자료를 이용한 오염특성 분석과 수용모델 표준화 등을 지향한데 비하여 권역별 기여도 산정을 직접 추구하고, 2단계에서는 차세대 기술개발 추진
 - 대기질 모델에서는 동아시아 배출자료 준비와 함께 정책 지원, 재분석 자료생산 연구 결과들을 승계
 - ※ 배출자료 준비, “동북아 장거리이동 대기오염물질 모델링 최적화를 위한 배출목록 구축 및 검증” (2008-2009), “기후 및 대기환경 통합 모델링을 위한 아시아 모델링 배출목록 구축” (2011-2013); 정책 지원 대기질 모델링, “대기질 모델링 정확도 향상을 위한 최적화 방안 마련 연구” (2013); 재분석 자료생산, “대기질 재분석 자료 생산을 위한 재현 모델링 기법 연구” (2015-)
 - ※ 국내 배출자료는 예보모델 개발을 위한 전략과제 4의 CAPSS 개선 결과 활용. 측정결과 등을 융합한 재분석 자료를 이용하여 외부 유입 오염물질의 영향을

정밀 분석하고 고농도 스모그 원인을 규명

- (동 전략과제의 positioning) 현안 문제 대응과 정책을 위한 모델 이용, 가용자원의 통합 활용과 수요자를 고려한 정보 제공의 프로토타입(prototype)을 마련하고, 차세대 기술개발을 추진함으로써 기술을 업그레이드
 - 국내에서 수용모델과 대기질 모델 이용이 제한된 가장 큰 이유는 각각 측정자료의 대표성이 담보되지 않고 배출자료에 대한 신뢰가 충분치 않았기 때문. 그러나 지역과 시기를 막론하고 측정자료는 언제나 충분치 않고 세계에서 배출자료가 가장 잘 갖추어졌다는 LA 지역도 완전하지 않음. 뿐만 아니라 수용모델 기술과 대기질 모델 개발도 언제나 진행 중임
 - 측정자료가 일부 미흡하였으나 그동안 하드웨어가 확충되었고 전략과제 1에서 양질의 측정자료가 생산됨에 따라 모델 이용체계 구축을 위한 최적의 환경이 조성됨. 스모그 챔버 실험과 분석기술 개발 등 기초과학이 뒷받침되며 차세대 기술개발도 동력을 얻음

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 권역별 맞춤형 미세먼지 오염 대응체계 구축과 첨단 분석기술과 연계한 차세대 수용모델 기술개발
- ◆ 대기현실을 융합한 대기질 분석시스템에 의한 정책 지원과 비용효과적 미세먼지 대응 기반 조성

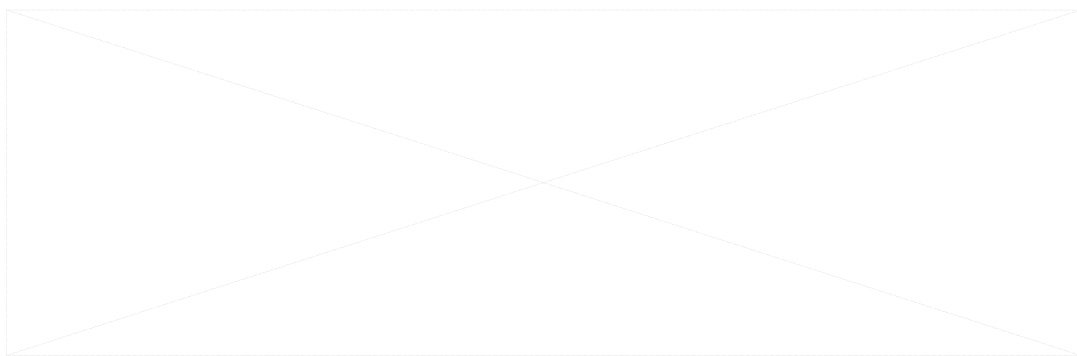
- 권역별 전략지점의 측정망 자료를 이용하여 표준화된 방법으로 주요 오염원의 기여도를 산정. HR-ToF-AMS 등 첨단 분석기술과 연계한 차세대 수용모델 기술개발을 시도하는 한편 오염원 프로파일 라이브러리를 마련하여 수용모델 이용체계 구축
 - 권역별 기여도 산정은 정책 지원을 위한 것이므로 정확한 결과가 1차적으로 중요. 측정 및 분석 기술이 확립된 필터 자료를 이용하거나 연속측정 자료의 경우 필터 자료와 비교하여 검증된 자료를 이용
 - 차세대 기술개발은 유기성분 이용과 최신 분석기술 연계 등을 시도. 유기성분은 환경부 측정망에서 본격적으로 측정하지 않아 이번 연구에서 별도로 측정하며, HR-ToF-AMS 등 분석은 1차적으로 집중측정소 자료 이용. 수용모델이 전통적으로 1차 배출을 대상으로 하지만 2차 생성과 장거리 이동 기여도 산정의 가능성을 타진
 - 오염원 프로파일은 배출 측정이 원칙. 하지만 비용과 노력이 많이 소요될 뿐 아니라 측정의 대표성 확보도 쉽지 않음. 기존의 프로파일을 충분히 검토하고,

오염원 프로파일을 함께 줄 수 있는 최근의 수용모델도 적극 활용

- 2차 생성과 장거리 유입의 비중이 클 때 대기질 모델은 종합적으로 대기질을 분석하여 정책에 필요한 정보를 줄 수 있는 가장 중요한 수단임. 정보가 얼마나 현실에 근접하는가가 문제이며, 이번 연구에서는 현장 측정과 함께 수용모델과 챔버 실험이 대기질 모델을 지원
 - 정책 활용이 용이하도록 국내 오염원은 CAPSS 분류체계를 이용하여 오염원의 기여도를 조사하고, 위성 및 항공관측 자료 등을 결합한 재분석(reanalysis) 자료 시스템을 구축하여 국외 유입량을 산정하고 국외 유입 오염물질이 권역별 대기농도에 미치는 영향을 정밀 분석
 - 1단계에서는 기존의 대기질 모델과 배출량 자료를 이용하고, 2단계 이후는 전략 과제 4의 한국형 대기질 모델과 역모델링을 통해 개선 및 검증된 CAPSS와 중국 등 아시아 대륙의 배출자료 이용



< 현장측정과 수용모델, 챔버 실험을 종합하여 대기질 모델로부터
대기질 분석과 정책에 필요한 정보를 획득 >



< 단계별 추진 일정 >

[5] 세부추진 방안

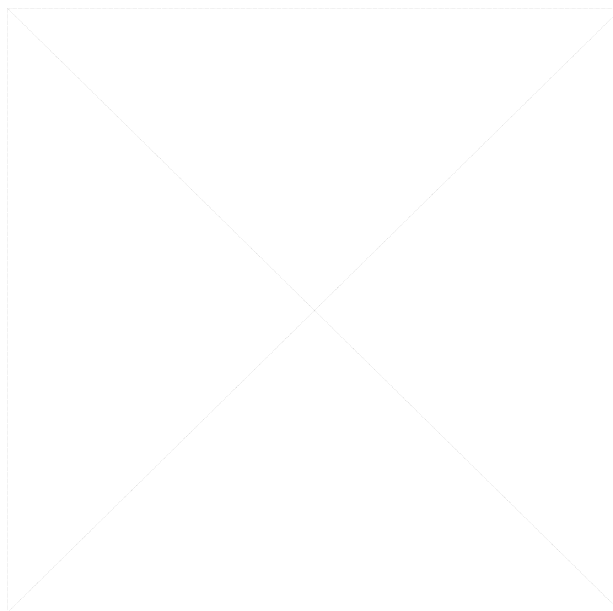
- 권역별 오염원 기여도 산정 체계 구축
 - 권역별 주요 오염원 기여도 산정과 정책 지원 시스템 구축

- 신뢰성 있는 측정망 자료 확보와 1, 2차 오염물질에 대한 오염원 파악 및 기여도 산정
 - ※ 측정망 측정소의 필터와 연속측정 자료 점검. 전구물질의 경우 VOCs 오염원을 함께 조사하고 광화학 생성에 관한 전반적 정보를 얻을 수 있다는 점에서 광화학 대기오염물질 측정망 자료 이용도 검토
 - ※ 입자는 가능하면 안정적인 필터 자료를 이용하지만 시간대별 변화 등 다양한 정보를 얻고자 할 때는 집중측정소 연속측정 자료를 필터자료와 비교, 검증하여 이용
- 비산먼지, 생물성 연소, 선박 배출 등 비전통적 오염원의 기여도 점검
 - ※ CAPSS의 오염원(배출원 대분류) 배출량 비율을 오염원 기여도와 비교함으로써 배출자료의 타당성을 점검. 오염원 배출을 집계하는 CAPSS와 수용체 측정 자료를 토대로 한 수용모델 결과를 직접 비교하기 어렵지만, 두 결과의 비율이 크게 다를 때는 CAPSS 자료를 점검
 - ※ CAPSS에서 집계하지 않는 비전통적 오염원의 비중이 클 경우 별도의 대책이 필요
- 기존 자료와 수용모델 결과 비교 분석 및 배출 측정을 통한 오염원 프로파일 라이브러리 구축
 - ※ 미국 EPA, SCAQMD, DRI 등에서 제공하는 프로파일과 문헌에 보고된 프로파일, 수용모델로부터 얻은 오염원 프로파일의 비교, 분석
 - ※ 고기구이, 화목 사용, 농작물 소각 등 보편적이지 않은 오염원은 배출을 측정하여 프로파일을 작성하고 지표물질을 조사



< 생물성 연소 프로파일을 위한 배출 측정 >

- 유기성분 분석 및 최신 분석기술과 연계한 차세대 수용모델 기술 개발
 - 지표물질을 이용한 연소오염원 상세 분석 및 2차 생성 전구물질의 기여도 추정
 - ※ 유기성분을 분석하여 경유차, 휘발유차, 생물성 연소, 화목 사용 등 연소 오염원을 상세 구분
 - ※ 연소오염원 분석은 배출 측정 결과를, 2차 생성 전구물질의 기여도는 스모그 챔버 실험 결과를 참고
 - HR-ToF-AMS 분석결과 등을 이용한 연소오염원 구분 및 2차 생성, 장거리 이동 등 기여도 분석
 - ※ HR-ToF-AMS의 화학조성을 이용한 연소오염원 구분 및 2차 생성, 장거리 이동 등 기여도 분석
 - ※ HR-ToF-AMS는 고해상도 시간 변화를 측정할 수 있고, 2차 생성, 장거리 이동에 따른 노화를 정성적으로 구분할 수 있으나, 구체적 물질을 확인하기 위해서는 TAG (thermal desorption aerosol GC/MS-FID) 등 별도의 기기가 필요



< 시간대별 오염원
기여도(Williams et
al., 2010). TAG로
지표물질을 확인한
후 HR-ToF-AMS
분석결과를 이용하여
시간대별 오염원
구분 >

□ 대기질 종합분석과 미세먼지 대책 지원을 위한 대기질 모델링

- 국외 유입량과 1, 2차 오염원 기여도 산정 및 고농도 스모그 원인 규명
 - CAPSS 분류체계에 따른 1, 2차 오염원과 화력발전소 등 대형 오염원의 기여도 산정
 - ※ 정책 활용을 위하여 CAPSS 분류체계에 따라 1차 배출과 2차 생성 전구물질 오염원의 기여도 산정

- ※ 화력발전소 등 대형 오염원의 기여도 산정에는 GRPM (general reactive plume model) 형태의 라그랑지안 모델을 함께 이용하여 정확도를 높임
- 위성과 지표 및 항공 관측 자료를 융합한 대기질 재분석(reanalysis) 자료를 이용한 국외 유입량 산정과 국외 유입 오염물질의 영향 분석
- ※ 대기현실을 가장 정확하게 재현하기 위하여 정지 및 극궤도 인공위성, 지표 관측, 항공 관측 등 사용 가능한 모든 (초)미세먼지 및 전구체 관련 농도 자료를 융합
- 재분석 자료와 민감도 분석 시스템을 이용한 고농도 사례 원인 분석과 저감 인자 발굴
- ※ 재분석 자료와 CMAQ의 HDDM (high-order decoupled direct method) 등을 이용하여 대표적 고농도 스모그 사례의 원인을 분석하고 저감 인자를 발굴하여 대책을 지원



< 재분석 자료를 이용한 대기질 분석, 대책 수립, 영향 평가 >

- 특별대책 초미세먼지 대기농도 목표 달성을 위한 제어인자 발굴과 저감량 산정
 - 오염원별 배출 저감에 따른 대기농도 변화의 민감도 조사와 제어인자 발굴
 - ※ 구체적 배출저감 대책은 비용 대비 대기농도 저감, 관리가능 여부, 위해성 등 다양한 인자를 고려하여야 함. 보편적으로 대형 점오염원이 관리가 용이한데 비하여 비산먼지, 생물성 연소, 생물학적 배출 등 비전통적 오염원은 관리가 어려움. 반면, 정확한 정보를 얻기 어렵고 위해성은 아직 명확하지 않은 부분이 많음
 - ※ 이번 연구에서는 배출저감에 따른 대기농도 저감의 민감도를 분석하고 관리

가능 여부 등을 고려하여 주요 제어인자를 발굴

- 제어인자에 따른 저감량 산정과 효과 검증

※ 제어인자에 따라 배출원별 저감량을 산정하고 지역별, 시기별 대기농도 변화를 조사하여 목표농도 달성 여부를 점검



< 대기농도 목표 달성을 위하여서는 과학적 정보와 함께 사회, 경제, 정치, 기술적 측면을 고려하여 배출저감 대책을 수립(NARSTO, 2004) >

[6] 기대 효과

- 첨단 분석기술과 연계한 차세대 수용모델 이용기술을 확보하고 우리나라 고유의 오염원 프로파일 라이브러리를 토대로 수용모델 이용을 표준화함으로써 고급 과학기술에 기초한 권역별 맞춤형 미세먼지 오염 대응체계 구축
- 대기현실을 융합한 대기질 분석 시스템을 이용하여 고농도 스모그 원인을 규명하고 국외 유입량과 화력발전소, 차량 등 주요 오염원의 영향을 종합적으로 파악함으로써 통합적 관점에서 미세먼지 대책을 수립하기 위한 기반 조성
- 차세대 수용모델 기술개발과 오염원 프로파일 라이브러리 구축, 스모그 챔버 실험 결과를 반영한 입자모델 개발과 배출자료의 개선 및 검증 등 기술개발과 현안 문제 해결 및 정책 지원을 병행함으로써 정책 지원 기술개발의 상시화
- 차세대 수용모델 기술과 한국형 대기질 모델 등 고유 개발 첨단기술에 의한 지역규모 동아시아 초미세먼지 오염 대응과 후발 개발도상국 지원

3.3.2 [제2세부사업] 신속하고 정확한 측정·예보 체계

□ 중점 목표

(초)미세먼지의 실시간 3차원 입체 감시 기술 및 한국형 미세먼지 예측 모델 개발

□ 전략과제 및 도출근거

현황 및 문제점	과제를 통한 해결방안	전략과제
미세먼지/전구물질의 초소형·초경량 측정기술 및 입체관측·분석시스템 부재 - 대형/고가의 외국 장비를 이용하여 넓은 범위에 대한 미세먼지 질량과 일부 성분만 측정 - 현재 국내 미세먼지 관측망은 대도시를 주로 하는 육상 현지관측 체계로 구축되어 있어 해상, 상층고도 등 관측 공백이 많음	초소형·초경량 측정기술 개발 및 한반도 입체관측시스템/분석체계 구축을 통해 미세먼지 입체감시 및 예보모델 정확도 향상을 위한 정보 제공 - 광학 및 원격탐사장비 확충에 의해 연직 정보 산출 및 국내외 환경 위성 자료 활용 미세먼지 탐지 영역 확대 - 현업 예보 활용/피드백을 위한 3차원 입체관측정보 플랫폼 구축 및 OSSE 기법 도입을 통한 관측-모델 통합 분석 체계 구축 - 초경량/초소형 미세먼지 및 전구물질 실시간 물리·화학적 정량 분석 장치 개발	[전략과제 3] 초미세먼지 입체감시 기술 개발
현 단기예보는 미국에서 개발된 CMAQ 모델을 이용하여 예보 현업(2일 예보)에 활용, 고농도 미세먼지 예보 정확도는 60% 수준이며, 중기(7일) 및 장기(계절) 예측 시스템 부재 - 단기예보는 '25년까지 80% 수준 정확도 향상 목표를 가지고 환경부 '대기질통합예보센터'에서 지속적인 연구개발을 수행하고 있음 - 중장기 예보의 경우, 국민적 수요는 많으나 기상모델-배출량-대기화학모델의 불확실성으로 인해 현재 기술수준으로는 불가능	한국형 독자 미세먼지 예보 모델 개발 및 인공지능/빅데이터 활용 기술을 통해 미세먼지의 단기예보 예측성 향상 및 중장기예보 도입 - 한반도/아시아 지역의 대기화학적 특성에 최적화된 미세먼지 모의 모듈 개발을 통해 한국형 독자 미세먼지 모델 구축 - 확보된 빅데이터(D/B)와 인공지능 기법을 활용하여 주간·계절 예보 기술 확보	[전략과제 4] 한국형 미세먼지 예보 모델 개발

3.3.2.1 전략과제3: 초미세먼지 입체감시기술 개발

[1] 개요

- 現 미세먼지 관측은 전국 500여개 관측소에서 지표에 고정된 형태로 이루어지고 있어 해상이나 상층 고도 등 관측 공백이 매우 커 발생·유입 현황 진단 및 예측 활용에 한계를 지니고 있음.
 - 대도시 위주, 미세먼지 농도 중심의 지상측정소 자료만으로는 정확한 예보를 위한 미세먼지 (준)실시간 이동 정보가 부족하고, 한국형 미세먼지 모델 개발에서 필요로 하는 자료동화 및 입력·검증 자료를 확보하기 위해서는 기존의 미세먼지 농도 지상 측정망에 추가하여 지상 광학/원격탐사와 환경위성 및 센서탐재 이동형 측정수단 등을 포괄하는 실시간 3차원 입체관측망 구축이 필요함. 3차원 미세먼지 실시간 관측 정보는 고농도 미세먼지 예보 정확도 향상의 중요한 인자임.
 - 신속하고 정확한 미세먼지 예보를 위해 실시간 3차원 입체관측자료와 미세먼지 예보모델 연계 체계 구축이 필요
 - ※ 입체 관측체계 구축 결과물들은 미세먼지 예보모델 개발을 위한 입력 자료 및 모델 검증 그리고 자료동화 자료로 활용 가능함.
- 대형·고가의 외국 장비를 이용하여 광범위한 지역의 미세먼지 질량과 일부 성분만 측정하고 있음.
 - 미세먼지/전구물질을 실시간으로 관측 가능한 초소형 측정 기술 및 시스템 개발을 통해 개인 휴대 또는 차량/드론/무인항공기 탑재 등을 통해 다량의 센서로부터 실시간 자료 수집 및 빅데이터 기술과의 융합을 통한 미세먼지 및 유해 전구물질의 거시적·미시적 정보 생산 필요

[2] 현황 및 필요성

- (실시간 3차원 입체감시기술) 신속 정확한 미세먼지 현황 파악 및 예보를 위해서는 대도시 위주의 육상 지표 미세먼지 농도 측정 자료만으로는 한계가 있으므로, 이를 극복할 수 있는 미세먼지 실시간 입체감시 체계 구축이 절대적으로 필요
 - 특히, 한반도 상공 및 주변 해상(예, 서해) 등에 대한 관측 공백이 커 미세먼지 이동 정보의 실시간 파악이 어려운 실정이며, 500 여개의 지상관측소 미세먼지 농도 관측 자료만으로 예보 모델 개선 및 예보 정확도 향상에 기여할 수 없음.

- 지상기반의 광학/원격탐사장비를 활용한 실시간 미세먼지 연직 정보 산출 및 우주기반의 환경위성자료를 통한 미세먼지 실시간 탐지영역(중국/서해/한반도)을 확대함으로써 현 육상 관측소 중심의 관측 한계 극복 및 초소형 정밀 센서 기술을 활용한 생활환경에서의 미세먼지 측정을 통해 대국민 입체 감시 정보의 실시간 제공이 필요함.
- 현업 예보 활용 및 피드백을 위한 3차원 입체관측정보 통합 플랫폼 구축 및 관측-모델 분석 체계(자료동화 체계 포함) 개발이 한국형 미세먼지 예보모델 개발과 병행되어야 함
- (초소형 실시간 측정 기술) 현재 지상현지측정 기술 및 관측망은 보유하고 있으며, 무인기, 드론, 벌룬, 차량 등과 같은 최신 관측 플랫폼도 갖추어져 있으나, 이에 적합한 초소형 정밀 센서를 활용한 관측시스템의 부재로 다양화되어 가는 최신 미세먼지 관측 플랫폼 활용에 제한이 있음.
- 이를 위해 초미세먼지 화학조성 및 전구물질의 실시간 정밀 측정 기술 및 초소형 미세먼지 측정 시스템을 개발하고, 이동성이 우수한 차량, 드론 등에 부착하여 측정 자료를 실시간 획득할 수 있는 체계를 구축함으로써 기존 고정된 측정망의 한계 극복 필요

< 국내 미세먼지 관측 현황 및 한계 >

◇ (미세먼지 지상 관측망) 환경부의 국내 미세먼지 농도 관측망(AIR KOREA)은 도시대기, 도로변대기, 국가배경대기 및 교외대기로 구분, 500여 지점에서 운영 중이나, 대부분 대도시 위주로 되어 있어 미세먼지의 발생과 유입 및 수송 과정의 실시간 진단에 한계가 있음.

○ 기상청에서는 황사 감시를 위하여 전국 약 28개 지점에서 PM₁₀ 농도를 측정 중이나, 황사가 주로 발생하는 봄철에만 제한적으로 관측 결과를 제공하고 있어, 상시 활용이 어려움.

⇒ 환경부(AIR KOREA)와 기상청 황사 관측망의 통합 및 연중 상시운영 방안 마련 필요

○ 현재의 미세먼지 지상 관측망 자료는 미세먼지 예보 모델의 입력 및 검증, 그리고 자료동화 자료로 활용되지 못하고 있음.

◇ (지상 원격관측) 국내 약 8 지점에서 라이다(LIDAR)를 통해

미세먼지 연직 정보를, 스카이라디오미터(Skyradiometer)와 AERONET 태양광도계로 대기 기주 미세먼지 특성을 관측하고 있으나, 연구 수준에서 시범 운영 및 활용되고 있으며 안정적 상시 운영이 이루어지고 있지 않음.

⇒ 지상 광학/원격장비의 실시간 관측 자료 수집 체계 구축을 통해 고농도 미세먼지 발생 시 현황 진단에 활용하고, 자료동화기법 적용을 위한 입력 자료로 활용함으로써 예보 모델 예측성 향상에 기여할 수 있는 방안 마련 필요

◇ (초소형 정밀 센서를 이용한 모니터링) 지표 고정 관측소에 추가하여 측정 정확도가 높은 초소형 센서를 이용한 생활환경에서의 실시간 모니터링 또는 개인 휴대나 이동수단(차량, 드론, 무인항공기 등) 탑재를 통한 지표 및 입체관측망의 공백을 메꿀 수 있는 미세먼지 실시간 자료 수집 및 정보 제공이 필요함.

◇ (국외) 지상 광학, 라이다, 선박, 위성 등 각 체계별 측정 기술의 발전에 기초하여, 빅데이터 기반으로 이를 통합하고 공간적 제한성을 극복하는 자료동화체계 구축을 통해 미세먼지 예보 모델의 예측성 개선에 주력

- 지상관측망, 라이다, 위성 자료에 기초한 자료동화기법 적용을 통한 미세먼지 예보 연구는 주로 과거 사례들에 대해 분석이 국내에서 연구 수준에서 다수 수행되어 오고 있으나, 실시간 적용할 수 있는 현업 자료동화체계 구축이 필요함.
- 일본의 경우, 학계/연구기관과의 협력을 통하여 국립환경연구원(NIES)은 일본뿐만 아니라 동북아시아 약 20여개 지점에 라이다(<http://www-lidar.nies.go.jp/>)와 스카이라디오미터(http://www-lidar.nies.go.jp/skynet_tmp/) 관측망을 각각 구축하여, 황사 및 미세먼지의 실시간 현황 파악에 활용하고 있음. 또한, 현업 적용 가능한 자료동화기법 개발을 통해 황사와 미세먼지 모델 예측 정확도 향상에 주력하고 있음.

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 초미세먼지 실시간 입체적 감시기술('15년)

○ 연구비 : 총 318.5억원(환경부 309.8억원, 기상청 7.7억원, 미래부 1.0억원)

○ 과제수 : 22여개(환경부 16개, 기상청 5개, 미래부 1개)

※ 과제 주요 내용

- 환경부(16개) : 미세먼지 성분분석 및 측정 장치(초소형 정밀 센서 포함) 개발 관련 과제
- 기상청(5개) : 지상기반 센서 요소기술 개발 관련 과제
- 미래부(1개) : 황사발원지 발생 기초연구 과제

□ 본 전략과제와의 차별성 및 시사점

- 3개 부처 추진 과제는 기존 지상 및 위성기반 측정 자료의 정확도 개선에 초점을 두고 있으며, 미세먼지 현업 예보나 모델에의 활용성을 높이기 위한 기초연구는 초보단계임
- 환경위성개발사업은 우주에서의 관측시스템 확보사업으로 이를 타 관측장비와 종합적으로 활용하여 서비스하기 위한 기술개발이 시작되어야 함
- 실시간 감시 및 예보 활용을 위해서는 지상, 해상, 상층에서의 관측공백이 제거된 입체적 관측 자료가 상시 실시간으로 확보되어야 함
- 실시간 입체관측자료(예, 에어로졸 광학적 두께의 시공간분포, 미세먼지 소산계수 및 농도의 연직 분포 등)의 현업 예보 및 모델에의 활용/피드백을 위해서는 입체관측정보 플랫폼과 관측-모델 통합 분석 체계가 구축되어야 함
- 실시간 고해상도 미세먼지 및 전구물질 관련 기술은 개발되고 있으나, 이를 종합적이며, 체계적으로 활용하기 위한 초소형 시스템 개발은 이루어지지 않고 있음

⇒ 본 전략과제에서는 기존 R&D와의 중복은 완전배제하고 한계는 극복하기 위한 세부과제(실시간 3차원 입체관측 자료 생산·분석·활용 통합시스템 구축, 초소형 미세먼지 측정 시스템 개발)로 구성함

□ 본 전략과제의 위치(Positioning)

- 기존 R&D의 경우, 요소기술 개발(관측정확도 향상, 실시간 요소 관측 및 분석 기술 개발 등)에 집중하고 있으며, 소수과제(지상 및 위성 원격탐사장비의 결합)에서 융합 활용 기술개발이 시작됨
- 본 전략과제의 경우, 실시간 측정기술 개발 및 정밀 입체관측망 구축을 목표로 하므로, 기존 요소기술사업의 성과를 최대한 활용하고 부족한 기술을 개발하여 미세먼지 예보모델 개발과의 연계 체계를 구축하는 종합적인 체계사업임

□ 기존 R&D 성과 연계 및 활용 방안

- 관측정확도 향상, 측정요소 다양화 및 분석시간 단축 기술 등은 실시간 상시 고해상도 관측시스템의 요소기술로 활용될 수 있음
- 원격탐사 장비를 이용한 입체자료 생산 기술은 이종 센서간의 결합을 통한 3차원 입체관측자료 생산의 기초기술로 활용할 수 있음

< 초미세먼지 실시간 입체적 감시기술 관련 과제 현황 >

※ (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)





< 참고: 기존 R&D와 차별성 분석 >

본 R&D 사업	기존 부처 R&D 사업	차별성
실시간 입체측정 통합시스템 구축 - PANDORA, Skyradiometer 등 광학장비, 원격탐사장비(Lidar, Ceilometer) 확충/활용한 실시간 연직정보 산출 - 국내·외 환경위성자료를 통한 미세먼지 실시간 탐지영역(중국/서해/한반도) 확대 - 이들 관측 자료를 예보에 직접 활용/피드백을 위해 3차원 입체관측정보 플랫폼 구축	(환경부) 지상측정망 확충, 대기집중측정소(미세먼지 성분 분석 등) 운영, 정지궤도 환경위성 사업 (기상청) 라이다 활용 에어로졸 감시, 지상 에어로졸 화학성분 분석 <평가> 국가대기환경기준 달성 평가 및 지상농도 대국민 공개 등의 활용을 위한 지상측정망 확충, 산발적인 원격자료 측정에 한정	[기존 측정망의 시·공간적 한계 극복] <본 사업> 예보정확도 개선 관점에서 필수적인 연직정보, 지상측정망이 구축되지 않은 지역(중국, 서해상, 격오지 등) 자료 등 확보를 위해 3차원 입체측정망과 분석시스템 구축

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 실시간 3차원 입체관측 자료 생산·분석·활용 통합시스템 구축을 통한 미세먼지 입체분포 정보 실시간 제공 및 고농도 미세먼지 사례 시 현황 진단 및 예보에 기여
- ◆ 초소형 미세먼지 측정 시스템 개발을 통해 기존 고정측정망의 한계를 극복한 미세먼지 관측 정보 실시간 제공

- 기존의 국가 대기환경관측망(Airkorea)과 기상청 황사 관측망, 광학관측 및 라이다 관측망, 환경위성 산출자료 등을 포괄하는 실시간 3차원 입체감시체계 개발을 통해 현 육상 지표관측소의 관측망 공백을 극복하고, 중국/한반도/서해안 감시 자료의 대국민 실시간 서비스에 직접 활용 및 모델 예측 향상에 기여
 - 타 전략과제(미세먼지 생성 및 오염원, 집중관측 캠페인 자료 등)와 최대한 연계 하여 한반도 미세먼지의 발생 및 유입 과정에 대한 감시 지원
 - 과거 수행된 집중캠페인 관측 결과(2001년 ACE-Asia, 2005년 ABC-EAREX, 2008년 CAPMEX 등) 및 '16년 수행된 한·미 공동 특별관측(KORUS-AQ) 자료를 활용하여 3차원 입체관측정보 플랫폼 구축(원형)
 - 확보된 실시간 입체관측 자료의 활용성을 극대화하기 위한 관측-모델 기반의 분석 기법(OSSE; Observation System Simulation Experiment) 구축
 - 본 사업을 통해 개발된 자료동화체계를 국립환경과학원 미세먼지 현업 예보 모델에 적용하여 결과를 검증, 지속적으로 개선 및 보완
- 기존 센서의 개선·활용을 통한 초소형·초경량 측정 시스템 개발, 드론, 이동 차량 등에 탑재 관측을 수행함으로써, 입체관측 자료 생산에 기여함. 또한, 국민생활공간에서의 모니터링을 통해 대국민 정보 서비스 제공



< 실시간 입체감시 체계 구축 방안 >

[5] 세부추진 방안

□ 실시간 3차원 입체관측 자료 생산·분석·활용 통합시스템 구축

○ 현재수준 및 목표설정

- (현재) 과학적 분석 및 정밀예보 등의 기반이 되는 미세먼지 실시간 입체적 측정 체계가 미흡

※ 대도시 위주의 500여 육상 지표 고정 관측망이 구축되어 있으나, 해상 및 상층 고도 등 관측 공백이 많음. 지상광학, 라이다, 선박, 항공기, 위성 등 각 체계별 미세먼지 측정기술은 꾸준히 발전하여 왔으나, 실시간 입체적 현황 진단 및 미세먼지 예보 모델 개선에 필요한 입체관측-분석 시스템 부재로 예보에의 활용도가 매우 낮음.

- (목표) 기존 지상 미세먼지 농도 관측망 한계를 극복하기 위해 3차원 입체관측 자료 생산·분석·활용 통합시스템 구축을 통한 실시간 대국민 서비스 및 예보 모델 개선 활용 목표

- ※ 광학 및 원격탐사장비 확충 연직 정보 산출 및 국내외 환경위성 자료 활용
미세먼지 탐지 영역(중국/서해/한반도) 확대
- ※ 플랫폼별 실시간 입체관측 정보(예시)

플랫폼	주요 자료
기존 지상 관측망 (환경부, 기상청)	미세먼지 질량농도, 화학조성, 크기별 수농도, 기체상 대기오염 물질 농도 등
지상 원격관측	에어로졸(미세먼지) 광학적 두께, 미세먼지 크기 정보, 소산계수 프로파일, 연직 질량농도 분포 등
우주기반 환경위성	에어로졸(미세먼지) 광학적 두께(공간분포), 미세먼지 크기 정보, 기체상 대기오염물질 농도 등
항공 관측 (부정기)	(고농도 사례) 미세먼지 농도 및 화학조성의 연직 및 공간분포, 미세먼지 전구물질 농도 분포

- ※ 현업 예보 활용/피드백을 위한 3차원 입체관측정보 플랫폼 구축 및 OSSE
(Observation System Simulation Experiment) 자료동화체계 기술 개발을
통한 관측-모델 통합 분석 체계 구축

○ 연구방법 및 내용

- 실시간 3차원 입체 관측체계 개발: 국가 지상관측망(환경부, 기상청) + 지상
광학·원격탐사 관측망 + 환경위성 + 항공(부정기 관측) 등의 자료 통합 시스템
 - ※ 원활한 자료 수집을 통한 자료 통합 시스템 구축을 위해서는 국가기관/연구소
(예, 국립환경과학원, 기상청 등)가 주체가 되고, 학계는 장기간의 안정적
운영을 위한 과학적 정보를 제공하는 협업 체계 마련
 - ※ 광학 및 원격탐사장비 확충을 통한 연직 정보 산출 및 국내외 환경위성 자료 활용
미세먼지 탐지 영역 확대 및 현업 예보 활용/피드백을 위한 3차원 입체관측정보
통합 플랫폼 구축을 통한 미세먼지 예보 및 모의의 기본 데이터 제공
- 확보된 실시간 입체관측 자료에 기초한 관측-모델 기반의 분석기법(OSSE;
Observation System Simulation Experiment) 체계 구축
 - ※ OSSE 실험을 통한 한반도 주변 미세먼지 특성 입체관측자료 체계 개발 및 해석
 - ※ OSSE 활용 관측자료 검·보정, 성능평가를 통해 3차원 입체 자료동화 체계 완성
 - ※ 입체관측자료가 미세먼지 예보모델에 기여하는 정도를 분석할 수 있는 관측-모델
시뮬레이션 기법을 구축, 관측-모델 두 분야의 정확도 향상에 쌍방향으로 활용



< 실시간 3차원 입체감시 및 관측-모델 분석 체계 구축 >

○ 실증방안

- (최종결과) 개발된 실시간 3차원 입체관측자료 생산·분석·활용 통합시스템은 현업서비스 기관인 국립환경과학원에 제공되어 대국민 서비스 및 미세먼지 실태 파악, 대기질 수치예보 모델에의 입력, 모델검증 및 자료동화에 활용될 수 있는 목표를 가지도록 만들어 실질적 활용여부에 의한 실증이 가능함

※ 본 과제의 최종 목표는 입체감시결과의 실시간 대국민 정보 제공 및 한국형 미세먼지 모델에 적용함으로써 과제의 성패를 명확히 확인할 수 있음

- (개발과정) 체계 구축 대상 관측 자료(국가 지상 관측망, 지상 광학·원격탐사 관측망, 환경위성 등)의 실시간 자료 통합 수집 및 표출 체계 구축, 그리고 현황 파악, 현업예보 및 예보 모델 활용 기반 구축 여부를 통해 평가할 수 있음

□ 초소형 미세먼지 측정 시스템 개발

○ 현재수준 및 목표설정

- (현재) 기존의 지상현지측정 기술 및 관측망은 보유하고 있고, 무인기, 드론, 벌룬, 차량 등의 최신 관측 플랫폼도 갖추어져 있으나 이에 적합한 초소형·초경량 정밀 센서 및 센서 결합을 통한 미세먼지 및 전구물질 실시간 관측 시스템 개발 부재로 다양화되어 가는 최신 관측 플랫폼 활용이 어려움

※ 초소형, 초경량, 보급형 미세먼지 및 전구물질의 실시간 측정기기는 개인 휴대 또는 차량·드론·무인항공기 등 다량의 센서 시스템으로부터 실시간으로 수집 가능하며, 빅데이터 기술과의 융합을 통하여 분석/가공, 미세먼지 및 유해 전구물질에 관한 다양한 거시적/미시적 예측 정보를 얻을 수 있음

- (목표) 초미세먼지 화학조성 및 전구물질의 실시간 정밀 측정기술 및 초소형 초경량 측정 장치 및 분석 시스템 개발을 통해 다양한 플랫폼(이동차량, 드론 등)에서의 활용을 통한 미세먼지 정보 실시간 확보

○ 연구방법 및 내용

- 초미세먼지 구성성분 및 전구물질 실시간 측정 및 분석을 위한 초소형·초경량 측정 센서 및 시스템 개발
 - ※ 확보된 고난이도 MEMS 기반 요소기술(구조체 형성 기술, 기능체 센서 구현 기술 및 흡착/농축 소재)을 활용한 초소형·초경량 미세먼지용 PM(Particulate Matter)형 MEMS 장치 개발
 - ※ 가스 이온화 장치, 중적외선 흡수광학계 개발을 통한 1차 및 2차 전구물질 실시간 정밀 측정시스템 개발
- 드론(무인항공기) 및 차량 탑재용 미세먼지·전구물질 실시간 측정 가능한 초소형·초경량 측정 장치 및 분석 시스템 개발



< 초소형·초경량 미세먼지 측정 시스템 개발 모식도 >

○ 실증방안

- (최종결과) - 드론(무인항공기) 및 차량에 탑재하여 초미세먼지 구성성분 및 1차·2차 전구물질 실시간 정밀 측정 가능한 시스템 및 데이터 분석 시스템 개발

※ 본 과제 의 최종 목표는 초소형·초경량 미세먼지 관측 센서/시스템 개발을 통해 기존 관측망(지상, 위성) 자료를 추가·보완할 수 있는 관측 결과를 제공하므로, 과제의 성패를 명확히 확인할 수 있음

- (개발과정) 이동이 용이한 플랫폼(드론, 차량, 무인항공기 등)에 장착, 운영 가능한 미세먼지 및 전구물질 초소형·초경량 측정 시스템 개발 및 기존 관측망과의 비교 검증을 통한 자료질 확보 여부 평가

[6] 기대 효과

- 현재 지표 부근에 제한된 미세먼지 실시간 정보에 추가하여, 지상-항공기-선박-위성의 융·복합 활용을 통한 한반도 전역뿐만 아니라 중국 및 서해 등 주변 지역의 미세먼지 입체분포 정보 확보 및 실시간 정보 대국민 제공
- 미세먼지의 장거리 이동 실시간 입체 감시를 통한 고농도 미세먼지 사례 시 현황 진단 및 실시간 예보(now-casting) 그리고 예측에 기여
- 초소형 미세먼지 및 전구물질 측정기를 이용한 농도의 실시간 입체적 정보 파악 기술 확보

3.3.2.2 전략과제4: 한국형 미세먼지 예보 모델 개발

[1] 개요

“정확한 미세먼지 예보, 이것부터라도 우선 시작, 100%가 아니더라도 최대한 노력해서 국민들께 제공해야” (‘16.4.26, 대통령 언론사 편집·보도국장 오찬)

- 현 미세먼지 단기예보는 미국에서 개발된 CMAQ 모델을 이용하여 예보 현업(2일 예보)에 활용, 고농도 미세먼지 예보 정확도는 60% 수준에 그침
 - 한반도/아시아 대기화학적 특성에 최적화된 미세먼지 모의 모듈 개발을 통해 한국형 독자 미세먼지 모델을 구축할 필요
 - ※ 현재 우리나라는 미국에서 개발된 CMAQ 예보 모델을 사용하고 있으나 한반도/아시아의 지리적·기상적·대기화학적 특성 등이 반영되지 않음
- 중기(7일) 및 장기(계절) 예측 시스템의 경우, 국민적 수요는 많으나 기상모델-배출량-대기화학모델의 불확실성으로 인해 현재 기술수준으로는 불가능
 - 중·장기 모델 개발을 위한 빅데이터를 구축하고, 인공지능 기술을 결합하여 주간·계절 예보 기술을 확보하여 궁극적으로는 대국민 서비스에 활용
 - ※ 기존의 모델기반 예측은 정해진 기상·대기질 반응 알고리즘에 의존하였으나, 인공지능(딥러닝)은 다양한 비정형 데이터 기반의 예측 ↔ 측정 및 보정 사이클을 통해 내부 알고리즘을 점진적으로 개선하여 정확도 제고 가능

⇒ 정밀·신속한 단기예보 및 일주일 단위 중장기예보 체제 구축

※ 고농도 단기예보 정확도 : 62%('15)→75%('20), 장기예측 구현 : 2일('16)→7일('23)



[2] 현황 및 필요성

□ (한국형 예보모델) 고(高)농도 미세먼지(“나쁨” 또는 “매우 나쁨”) 예보정확도가 낮아
(’15년 62%) 국민적 불신 증가, 정확도 개선을 위한 과학적 기반 필요

○ 특히, 現 대기질 모델(CMAQ, 미국 EPA 개발)은 국내 특성(중국 영향, 기상여건 등)
반영이 미미해 예보관 판단이전 모델 정확도만으로는 40% 수준

○ 고농도 예보정확도를 근본적(眞性)으로 제고하기 위해 국내 대기화학조성, 지형 특
성을 반영한 “한국형 수치예보모델 개발”이 해법

※ 미국은 고농도 정확도 67%, 영국은 80% 이상*의 정확도를 보유한 모델만
사용((프랑스) CHIMEME, (독일) EURAP, (네덜란드) LOTUS 등 자체모델
보유)

< 국내·외 미세먼지 예보 모델 현황 및 한계 >

◇ (국내) 선진국에 비해 예보모델 결과(모델 성능)의 정확도가 상대적으로 낮아 전체 예보 정확도 하락의 가장 큰 요인으로 작용

○ 예보는 예보모델의 결과와 예보관의 판단(전문성)에 따라 등급을 결정, 예보문을 작성하여 다양한 매체를 통해 전달

* 예보절차 : 기상·대기자료 분석→예보모델 결과→예보관 판단→예보등급 결정

- 예보모델 결과만으로 예보한 경우 '15년 고농도 예보정확도는 現62%→ 44%로 하락, 예보모델 성능은 최종 예보정확도에 70% 영향

< 2015년 예보정확도 영향요인 분석 결과 >

(단위 : %)

구 분		예보정확도		예보모델 결과		예보관 판단
PM ₁₀	전체	88	=	63	+	25
	고농도	62		44		18
PM _{2.5}	전체	87		71		16
	고농도	69		43		26

⇒ 단기간에 예보관의 전문성을 높이는데 한계가 있어 예보모델 결과의 정확도를 높여 전체 예보정확도를 향상시키는 것이 필요

◇ (선진국) 예보는 예보모델의 결과를 별도의 예보관 판단과정 없이 관련 홈페이지 등을 통해 공개, 모델의 정확도가 곧 예보정확도

* 절차(미국) : 예보모델 시행→EPA 홈페이지 제공→지자체 활용→각종 미디어 송신

○ 미국 고농도 예보정확도는 67%(전체 93%, '13년), 영국은 80% 이상의 정확도를 보유한 모델만 사용토록 규정

* 농도 실측치와 모델예측 결과의 오차범위가 ±20% 정확도를 가진 모델

⇒ 선진국들은 예보정확도를 제고하기 위해 자국의 특성에 맞는 특화된 예보모델의 개발과 성능 개선에 주력

□ (중장기 예보체제) 미세먼지 예보 서비스의 예보 선행시간을 現 2일 → 7일 이상으로 확장하는 등의 중장기 예보에 대한 미디어 및 국민적 수요 증가

○ 대기순환, 화학변환 등의 비선형성(non-linearity)은 예보 기간이 늘어남에 따라 기하급수적으로 증가하여 중장기 예보정확도에 결정적 장애물로 역할

※ 비선형성: 원인과 효과 사이에 비례관계가 성립할 때 '선형', 비례관계가 없을 경우를 '비선형'이라 하며, 대기흐름, 화학과정 등과 같이 매우 복잡한 시스템에 대한 미래 예측은 비선형성을 고려하지 않으면 원인-결과의 되먹임이 많아질수록 정확도가 낮아짐

- 기존의 대기질 수치모델만으로는 중장기 예보의 한계를 극복하기 어려워 IT 기반의 가용할 수 있는 최대한의 빅데이터 활용을 통한 입력자료 개선, 인공지능 기법으로 결과 보정 등의 통계적 기법 활용이 절대적으로 필요

※ 인공지능 기법: 인지 컴퓨팅 기법이 예보에 주로 활용되며, 생물의 뉴런(neuron) 구조를 모방하여 현존자료의 학습과 추론 알고리즘을 통해 진화하는 컴퓨팅 기술

- 이를 위해 대기질·기상 등 지상, 상층, 원격 관측 자료의 빅데이터 분석, 국내외 수 백여 대기측정소별 보정 알고리즘 적용, 수치모형과 통계모형의 예측 결과 혼합(model blending) 기술 개발이 선행되어야 함

※ 중국 환경보호부는 인공지능 민간업체와 인지컴퓨팅 기법 개발 등의 협업을 통해 중국 북동 지역에 대해 3일 동안은 시간별 예측치, 4~7일간은 일별 예측치를 제공하고 있음

- (미세먼지 배출량) 국가 대기오염 배출량 자료는 미세먼지 단기, 중장기 예측 정확도에 결정적 영향을 미쳐 산정 방법의 고도화 등 불확실성 줄이는 연구 필요

- 국가 대기오염 배출량 산정은 지속적인 개선 노력에도 불구하고 방대한 활동도 자료/통계 확보가 선행되어야 하는 한계로 미산정 배출원이 여전히 존재

※ 이동오염원의 경우는 배출량 산정 시 차량 등록지와 운행지의 불일치 문제로 지역별 배출량 할당 부정확, 소규모 사업장의 경우에는 점 오염원이지만 활동도 자료를 확보하기 어려워 먼오염원으로 가정하여 산정함으로써 불확실성이 증폭됨

- 최근 폭발적으로 증가하고 있는 IT 기반 경제 활동 자료(예, 이동오염원의 경우, 네비게이션, 교통안전 D/B 등)를 활용, 다양한 배출원의 활동도 자료 보완 가능

< 자동차 배출량 산정 시 CCTV 등 IT 자료 활용, 주행거리 산정 개선 사례 >

조사 기간	조사 지역	규모 구분	주행거리 산정 결과 (단위 : 대 · km/일)		산정방법간 결과 비교 (B/A)
			차량등록지 기반 (현행방법, A)	실측교통량 기반 (개선방법, B)	
2012	○○시	인구 50만 이하	384,940	1,578,991	4.1
2013	☆☆시	인구 50~100만	8,346,923	4,226,192	0.5

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 미세먼지 예보 모델 관련 기존 R&D 현황('15년)

- 연구비 : 총 36.7억원(환경부 21.0억원, 기상청 12.9억원, 미래부 2.8억원)
- 과제수 : 10여개(환경부 7개, 기상청 1개, 미래부 2개)
 - ※ 과제 주요 내용
 - 환경부(7개) : 단기예보(2일 이내) 정확도 향상 및 예보시스템 개선 과제
 - 기상청(1개) : 황사·연무 예보 기술 개발 관련 과제
 - 미래부(2개) : 미국모델 활용 대기질(미세먼지, 초미세먼지) 모델 불확도 감소 과제

□ 본 전략과제와의 차별성 및 시사점

- 3개 부처 추진 과제는 미국모델을 활용하여 기존 예보시스템을 개선하는데 초점을 두고 있으며, 단기예보(2일)의 정확도를 높이는데 중점
- 현재 활용되는 미국에서 개발된 모델(CMAQ, CAMx, WRF-Chem) 등은 국내 대기 화학조성, 지형 특성을 반영하기 어려운 한계가 있어 한국형 독자모델 필요
- 중·장기 예보를 위해서는 현재의 수치예보기법(물리화학적 모델예측 방법론)으로는 불가능하여 빅데이터 기반 통계예보 기법, 인공지능 등의 새로운 예측 방법론 개발 필요
- 예보모델의 필수 입력자료인 국가배출량 통계 개선을 위한 R&D는 상대적으로 소홀

⇒ 본 전략과제에서는 기존 R&D와 중복은 완전배제하고, 한계는 극복하기 위한 세부 과제(한국 대기조성/지형특성 반영, 중·장기 예보 국민 수요 반영, 상대적으로 소홀한 배출량 개선)로 구성함

⇒ 참고로, 2017년 시작 예정으로 환경부에서 추진하였던 “한국형 대기질 수치모형 개발” 연구 과제는 본 전략과제에 통합하여 추진하는 것으로, 본 전략과제가 해당 내용을 포함하고 있음

□ 본 전략과제의 위치(Positioning)

- 기존 R&D의 경우, 현안 해결(단기 미세먼지 예보시스템 및 정확도 개선)에 집중하여 현재 시스템을 활용하여 보완/개선 성과를 도출함으로써 당면한 국민들의 예보 수요(내일, 모레 2일 예보)를 해결

- 본 전략과제의 경우, 미래 수요(낮은 예보정확도의 근본적 대책으로 한국형 모델 개발, 배출량 개선 그리고 장기에보에 대한 국민적 요구)를 해결함으로써 기존 R&D와 수평적 균형(Parallel and balance)을 유지

□ 기존 R&D 성과 연계 및 활용 방안

- 단기 예측 정확도 향상을 위한 연구로서 자료동화, 환경위성 활용, 재분석 기법, 초미세먼지 예측기법, 예보관 의사결정 기법 등은 중·장기 예보 기법 개발의 기본 요소기술로 활용 가능
- ※ 예보시스템 개선 연구결과는 단기, 중·장기 예보와 상관없이 적용 가능

< 참고: 기존 R&D와 차별성 분석 >

본 R&D 사업	기존 부처 R&D 사업	차별성
국가 대기오염물질 배출량 개선 - 현재 불확실성이 큰 소규모 사업장(4, 5종) - 빅데이터 활용 이동오염원 등의 활동도 자료 발굴/개선 - 배출원별 배출량 산정 프로그램 모듈화	(환경부) 국가대기오염물질 배출량 산정 <평가> 매년 국가대기오염물질 배출량 산정을 위해 단년도 성과 도출을 위한 기본적인 연구에 한정	[기존 사업에서 수행하기 어려운 도전적인 중/장기 과제 선정] <본 사업> 30,000개소의 소규모 사업장, 빅 데이터 및 IT 기술을 활용한 배출량 개선
한국형 미세먼지 예보모델 개발 - 한반도/아시아에 특화된 대기화학 메커니즘 개발 - 특별 집중관측 및 입체 관측자료 기반 예보 요소 기술 고도화 - 배출량-기상장-자료동화-대기화학모델이 통합된 한국형 미세먼지 예보모델 개발	(환경부) 미세먼지 현업 예보 정확도 개선 (기상청) 황사·연무 예보기술 연구 <평가> 미국의 대기화학 환경에 기반한 CMAQ 모델에 기반하여 단기 현업 예보 정확도 개선을 위한 연구에 집중	[기존 연구가 전무한 한반도/아시아의 대기화학적 특성에 적합한 미세먼지 예보모델 개발에 집중] <본 사업> 원인규명 과제 결과(최신 문헌, 집중관측 캠페인 자료 등)의 최대한 활용, 한반도/아시아에 특화된 대기화학 메커니즘을 구축
중장기 미세먼지 예보기법 개발 - 중·장기 예측을 위한 관측/예측 자료 활용 통계예보 모형 구축 및 빅데이터 구축 - Deep Learning, 빅데이터 활용 AI 예보 시스템 구축 및 검증 - 현업화를 통한 대국민 서비스 시행	(환경부) 인지컴퓨팅 활용 예보결과 보정 기술 개발 <평가> 미국 CMAQ 모델과 IBM 인지컴퓨팅 기법을 도입하여 단기 예보 고농도 정확도 개선에 집중, 중·장기 예보는 연구 주제가 아님	[기존 중기(7일) 및 장기(계절) 예측 시스템 부재를 해결] <본 사업> 인공지능/빅데이터 활용 기술을 통해 중장기 예보를 도입하고 현업화까지 연결

< 한국형 미세먼지 예보 모델 개선 관련 과제 현황 >



[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 한국형 독자 미세먼지 예보모델을 구축하여 고농도 단기예보 정확도 향상
 - ◆ 빅데이터 활용, 인공지능 기법 도입으로 일주일 단위 중장기예보 체제 구축
 - ◆ 국가 대기오염 배출량 자료의 산정 방법의 고도화 등 불확실성 개선
- ※ 고농도 단기예보 정확도 : 62%('15)→75%('20), 장기예측 구현 : 2일('16)→7일('23)

- ☐ 타 전략과제 산출물(스모그 챔버, 집중관측 캠페인 자료 등)의 최대한 활용, 한반도/아시아의 특화된 한국형 독자 미세먼지 예보 모델 개발
 - '16년 수행된 한·미 공동 특별관측(KORUS-AQ) 자료 분석에서 도출되는 이론/실험 기반 대기화학 메커니즘 도출 결과를 활용
 - 현재 진행 중인 기상분야 수치예보 모델 개발의 결과와 연계하여 통상 한국형 모델 개발에 소요되는 7-8년의 개발 기간을 4-5년으로 대폭 단축
- ☐ 개발된 중·장기 미세먼지 예측 시스템은 주간, 월간 예보의 대국민 서비스에 직접 활용
 - 개발된 한국형 미세먼지 예보 모델 및 중·장기 미세먼지 예보 시스템과 본 사업을 통해 개선된 국가 대기오염 배출량은 국립환경과학원 대기질 예보센터의 현업예보에 적용하여 결과를 검증, 지속적인 개선/보완

< 타 과제 활용, 한국형 모델 개발, 중·장기 예보 구축, 배출량 개선 및 대국민서비스 >

[5] 세부추진 방안

□ 한국형 독자 미세먼지 예보모델 개발

○ 현재수준 및 목표설정

- (현재) 한정된 자료와 한국의 특성이 반영되지 않은 외국에서 개발된 모델에 의존함에 따라 예보정확도가 낮음(고농도 60%)

※ 우리나라의 대기질 예보 모델은 미국의 대기화학 환경에 기반한 CMAQ 모델에 기반하여 현업 예보를 수행함에 따라 국내 기상 및 화학종 특성의 반영이 미흡하고, 기존 모형의 수정/보완의 어려움에 따라 고농도 미세먼지 예측의 정확도가 낮음

- (목표) '20년까지 단기예보 정확도 개선을 위해 한국형 독자 미세먼지 예보모델을 개발하여 고농도 단기예보 정확도를 현재 62% 수준에서 75% 향상 목표

○ 연구방법 및 내용

- 3개 모듈 개발 : 입력자료 처리 모듈, 대기화학 모델링 모듈, 분석 후처리 모듈

※ 3개 모듈 개발 내용

- 배출량, 기상장 입력 처리 IO 모듈 : 모델 격자체계, mapping, file formatting 등
- 대기화학 모델링 모듈 : 최신 문헌에서 발표된 신규/변형된 화학반응 알고리즘 활용, 한반도/아시아에 특화된 대기화학 메커니즘, 자료동화 체계
- 분석 후처리 모듈 : 3차원 입체 관측자료 기반 역모델링, 앙상블 기법, 모델 프로세스 분석 기법 등
- 배출량-기상장-자료동화-대기화학모듈-후처리 분석 기법이 통합된 일체형 모델 개발



○ 실증방안

- (최종결과) 개발된 한국형 모델은 미세먼지 예보 현업기관인 국립환경과학원에 이관하여 현업예보에 적용, 시범운영을 통해서 검증, 지속적인 개선/보완

※ 본 과제와 최종 목표가 국립환경과학원의 대기질통합예보센터의 대국민 서비스 (현업화)에 적용함으로써 과제의 성패를 명확히 확인할 수 있음

- (개발과정) 개발 대상 모듈(입력자료 처리 모듈, 대기화학 모델링 모듈, 분석 및 후처리 모듈) 각각의 성능에 대해 기존 모형의 유사모듈과 비교 평가 및 각종 실증/실험 결과의 일치 여부 평가

< 참고 : 유럽 각국의 독자 모델 보유 현황 >

- 미국과 유럽은 대기질 분석과 대기질 예보에 국가별 독자모형을 개발하여 활용하고 있음

Model Names	Institute	Resolution	Data Assimilation	
			Method	Obs. Data
CHIMERE	INERIS, CNRS (France)	10 km	Kriging and Optimal Interpolation at ground level	Only AIRBASE
EMEP	Norwegian Met. Institute (Norway)	0.25°	No Assimilation	
EURAD-IM	FRIUUK (Germany)	15 km	4D VAR	AIRBASE, Air-borne (MOSAIC), NO ₂ (OMI, GOME-2, SCIAMACHY), CO (MOPITT), PM10 (SYNAER)
LOTOS-EUROS	KNMI, TNO (Netherlands)	0.25°(lon)x 0.125°(lat)	Ensemble Kalman Filter	AIRBASE for O ₃ and PM10, OMI for NO ₂
MATCH	SMHI (Sweden)	0.2°	3D VAR with transfer into spectral space	AIRBASE (The Use of OMI, AIRS, MODIS is being tested.)
MOCAGE	METEO-FR, CERFACs (France)	0.2°	3D VAR	AIRBASE, NO ₂ (OMI) and CO (IASI, MOPITT)
SILAM	FMI (Finland)	0.2°		AIRBASE

□ 빅데이터/인공지능을 활용한 미세먼지 장기예보 시스템 개발

○ 현재수준 및 목표설정

- (현재) 중·장기 미세먼지 예보의 경우, 국민들의 요구는 많으나, 예보기간이 길어 질수록 예보정확도가 현저히 낮아져 현재 수치모델 기법으로는 불가능(현재 예보 한계 : 2일)

※ 현재의 수치예보기법(물리화학적 모델예측 방법론) 외에, 빅데이터 기반 통계, 인공지능 등의 새로운 예측 방법론 개발에는 기초적인 연구 외에는 거의 개발 노력이 부재

- (목표) 중·장기 미세먼지 예측 시스템을 빅데이터, 인공지능 기법을 활용하여 개발, 중기(7일) 및 장기(계절) 예보 시스템 개발 시도 및 대국민 서비스 실시

※ 국립환경과학원에서 2020년까지 기반 요소기술을 자체사업으로 개발할 예정임. 과제의 성과물을 활용할 수 있도록 개발기간(2020~2023)을 조정

○ 연구방법 및 내용

- Big data 수집 분석 및 인공지능 활용을 위한 입력 platform 구축
- 중·장기 예측을 위한 다양한 방식의 통계모형(multiple model) 구축
- Deep Learning 모델 개발 및 최적화
- Big data-based AI 예보 시스템(super model) 구축 및 검증
- 중·장기 예보를 위한 예보관 맞춤형 시스템 및 예보 판정 시스템 구축



○ 실증방안

- (최종결과) 중·장기 예측 시스템은 현업화(대국민 서비스)를 최종 목표로 예보의 현업부서(환경부 대기질통합예보센터)와 지속적인 소통을 통해 개발의 성과가 가시적으로 나타나도록 관리
- (실증사례) 중국 환경보호부의 경우 IT 민간기업과 같이 ‘Green Horizon Project’를 통해 인공지능(AI) 기반의 대기질 예측 모형 개발 및 운영 중에 있으며, 국립환경과학원은 자체사업으로 2020년까지 기반 요소기술을 개발할 예정으로 간접적인 실증/검증이 가능

< 참고 : 중국 환경보호부 & IBM 'Green Horizon Project' >

○ Cognitive Analytics for Air Quality Forecasting



○ Forecasting Details

	Nowcast	Short-term	Mid-term	Long-term
Temporal scale	12-24h	24-72h	3-7d	7-15d
Temporal resolution	hourly	hourly	Daily mean	Daily mean
Spatial resolution	<1km	1-5km	5-10km	>25km
Models	CFD/ARPS/Stat	CAMx/CMAQ/WRF	CMAQ/Stat	WRF/ECWMF/Stat
Model State Variables	PM2.5, PM10, SO2, NO2, O3, CO	PM2.5, PM10, SO2, NO2, O3, CO	PM2.5, PM10, SO2, NO2, O3, CO	AQI

□ 국가 대기오염물질 배출량(CAPSS) 불확실성 개선

○ 현재수준 및 목표설정

- (현재) 2000년 시스템 구축 이후 지속적으로 산정방법을 보완하고 있으나, 누락된 배출원의 확인과 노후 배출계수의 개선 등의 신속한 개선이 요구됨(현재 정확도 : 47%)

※ 현재 CAPSS 시스템은 구축 후 10년 이상 경과함에 따라 변화된 환경(누락 배출량, IT 기반 big data 미반영 등)에 따라 시스템 수정·보완 필요

- (목표) 2020년까지 배출량 정확도를 80% 수준 이상으로 향상

※ DARS (Data Attribute Rating System/US EPA) 기준 국가 배출량 정확도 현황 및 목표



○ 연구방법 및 내용

- 불확실성이 큰 이동오염원, 소규모 사업장 등 배출계수, 활동도 자료 발굴/개선
 - ※ ① 이동오염원의 배출량 개선을 위해 네비게이션, 교통안전 D/B 등을 최대한 활용하여 차량 등록지와 운행지의 불일치 문제를 해결, ② 그간 점오염원이지만 활동도 자료를 확보하기 어려워 면오염원으로 가정하여 산정함으로써 불확실성이 큰 소규모 사업장의 배출량 산정 기법 개선
- 배출량 시스템의 신속한 개선/보정을 위한 산정 프로그램 모듈화
 - ※ 현재 CAPSS 시스템은 각 프로세스의 모듈화 미비로 전체 과정을 일괄 처리함으로써 신속성, 효율성이 크게 저하됨, 점·이동·면오염원으로 배출자료 산출 모듈을 구분 처리 필요
- 방대한 활동도 자료/통계 확보가 선행되어야 하는 한계로 미산정된 배출원을 적극적으로 발굴하여 국가 대기오염 배출량 정확도 개선

○ 실증방안

- (정도관리) 배출자료의 작성·검증·평가·모델링 관리 기법 표준화, 자료구축 단계부터 검증·평가 등 단계별 평가 기법 마련 및 피드백을 통한 보완
- (현업적용) 본 과제를 통해 개선된 배출자료는 현업 대기질 예보에 시범 적용하여 배출량 개선이 예보 정확도에 미치는 기여도 평가 실시

[6] 기대 효과

- 현재 60%대로 낮은 예보정확도의 근본적 대책인 한국형 모델 개발, 배출량 불확실성 개선을 통해 '20년까지 75%까지 예보정확도 향상
- 현재는 불가능한 중·장기예보를 빅데이터 활용, 인공지능 기법을 활용하여 예보체계를 구축함으로써 '23년까지 대국민 주간/계절 예보 서비스 제공

3.3.3 [제3세부사업] 비용 효과적인 집진·저감 시스템

□ 중점 목표

국내 주요 배출원별 1차 배출 초미세먼지와 2차 생성먼지의 전구물질을 현재 배출량* 대비 50% 이상 저감시킬 수 있는 고효율 저비용 저감기술 개발

□ 전략과제 및 도출근거

현황 및 문제점	과제를 통한 해결방안	전략과제
- 대기환경보전법에 따라 PM_{2.5}가 아닌 총배출먼지(TSP) 관리 (석탄발전 '15년 신규 10 mg/m³ 이하) - 1차 배출 미세먼지 중심 관리 - 발전소에 적용하고 있는 기존 집진장치의 2차 생성 PM_{2.5} 저감 기능은 5% 이내 - 기존 습식탈황 설비 SO_x 저감효율 95% 이하, 배출농도 50 ppm 수준 - 기존 SCR 설비 NO_x 배출농도 50 ppm 수준, 탈질촉매 내구성/효율 및 유지관리비용 개선 필요 - 중소제조시설은 TSP 관리기준이 '15년 신규 20 mg/m³로 발전소에 비해 2배 높고, 발전소와 같은 고비용 기술(1백만원/(m³/min)) 적용 불가	- 고성능 저비용 집진기술 실증화 및 고효율 여과재 개발을 통한 PM_{2.5} 배출 저감 (PM_{2.5} 배출 1.0 mg/m³ 이하) - 전구물질(NO_x, SO_x) 저감기술 개발을 통한 2차 생성 초미세먼지 50% 이상 저감 - 기존 집진설비 및 습식탈황 설비 성능개선 기술 개발을 통한 응축성 입자 등 1차 배출 및 SO_x 배출농도 20 ppm 이하 달성 - 고효율 고내구성 탈질 촉매 및 질소순환형 NO_x 저감/자원화 기술개발을 통한 NO_x 배출농도 15 ppm 이하 달성 - 기존 고비용 기술 대비 1/2 비용 (0.5백만원/(m³/min))의 중소배출시설용 초저가 저감기술 개발 필요	[전략과제5] 배출원별 1·2차 미세먼지 저감
- 도로비산먼지 대책으로 수집대 수준의 진공흡입차 및 환경미화목적의 청소차/살수차를 운행하나 효과 미미 - 지하철도 및 터널의 비산먼지 규제없이 간헐적인 살수청소만 시행 - 건설사업장에서는 다양한 원인에 의해 미세먼지가 발생되며, 작업자 및 인근주민의 건강이 위협받고 있음	- 무동력 집진기 장착 차량 수천대 확대를 통한 도로 비산먼지 30% 저감 - 지하철도 적용 저에너지 먼지저감 기술 개발을 통한 지하철도/터널 비산먼지 30% 저감 - 건설현장 사업별/공종별 미세먼지 저감 핵심기술 개발을 통해 건설현장 미세먼지 30% 절감	[전략과제6] 비산먼지 발생 저감 기술

3.3.3.1 전략과제5: 배출원별 1·2차 미세먼지 저감

[1] 개요

- 인체유해성이 높은 초미세먼지(PM_{2.5})에 의한 국민 피해를 줄이기 위해서는 초미세먼지를 배출하는 발생원에서의 획기적인 저감 방안이 필요함
 - 초미세먼지는 건강취약계층의 사망률 증가량 기준으로 미세먼지보다 2~3배 더 인체유해성이 높음(국립환경과학원, 2009)
 - ※ 초미세먼지는 폐포, 혈관까지 침투하기 때문에 호흡기 질환, 심장 질환, 혈관 질환 등을 유발시킬 수 있어 2013년 WHO 국제암연구소(IARC)에서는 1군 발암물질로 지정
- 초미세먼지는 배출원으로부터 입자상물질로 직접 배출되는 1차 배출먼지와 화석연료의 연소공정에서 배출되는 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx), 유기용제 사용 시 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs), 축산분뇨에서 발생하는 암모니아 등이 대기 중에서 화학반응을 통해 만드는 2차 생성먼지로 구분됨
 - 본 사업에서는 연구개발의 실효성을 높이기 위해 1차 배출 초미세먼지와 2차 생성먼지의 유발물질 중 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx) 저감기술 개발 및 실증화 연구에 사업역량을 집중하고자 함
 - ※ VOCs 저감사업은 환경부/산업부에서 별도 추진 중에 있으며, 암모니아는 배출량의 80% 이상이 축산 분야에서 배출되어 현실적으로 저감기술을 적용하기 어려움
- 에너지산업, 제조업연소 등 사업장(44.2%) 및 이동오염원(27.2%)이 국내 전체 대기오염물질 배출량의 대부분(71.5%)을 차지하고 있으며, 이동오염원 분야가 별도의 사업으로 추진되고 있음을 고려하여 본 사업에서는 발전, 제철, 시멘트 분야를 포함한 대·중소 사업장에 적용할 수 있는 오염물질 저감기술 개발을 핵심 목표로 함
 - ※ 도로이동오염원 및 건설/농기계 비도로오염원의 경우 환경부 친환경자동차기술개발사업단에서 주도하여 연구개발을 수행하고 있으며, 친환경차 보급확대, 경유차 배기가스 관리강화, 경유버스 단계적 대체, 수도권 노후경유차 운행제한 도입 및 노후경유차 폐차 유도 등의 정책적 해결수단 필요
 - ※ 비도로오염원의 주요 배출원인 선박의 경우, 해양수산부의 해양안전 및 해양교통시설기술개발사업 등에서 지속적으로 연구수행 중
- 사업장 배출 초미세먼지 및 SOx, NOx 저감기술에 집중하여 짧은 기간 내 사업장에서 보급 확산될 수 있는 실효성 높은 저감기술 솔루션을 제공하고자 함

⇒ 대·중소 사업장의 1차 배출 초미세먼지(PM_{2.5}) 및 2차 생성 유발물질(NO_x, SO_x)을 비용 효과적으로 저감 가능한 기술 개발 및 현장 실증 추진

※ 석탄화력발전소 기술 실증목표 : '19 → 2MW, '23 → 50MW

· 저감성능 목표 : 초미세먼지 3 → 0.5mg/m³, NO_x 50 → 5ppm, SO_x 50 → 5ppm

[2] 현황 및 필요성

□ (주요 배출원 및 기술개발 방향) 국내 미세먼지 배출량의 약 70%는 제철, 시멘트 분야 등 대형사업장으로부터 배출되며, SO_x 배출량의 62%와 NO_x 배출량의 20%가 발전, 제철, 제강, 시멘트, 석유산업 등 대형 사업장으로부터 배출되기 때문에 이에 대한 우선 저감대책 필요

○ 대형사업장의 SO_x, NO_x 배출허용기준은 건설년도에 따라 2-3배 차이가 있어, 기준을 만족하는 노후설비의 배출량은 신규설비 대비 2-5배 높게 나타남

※ 화력발전소의 경우 SO_x, NO_x 기준은 '15년 이후 모두 50 ppm으로 관리되고 있으나, '96년도 이전 설치시설의 경우엔 배출기준이 각각 100, 140 ppm으로 매우 허술하게 관리 중(영흥 3,4호기의 경우 각각 25, 15 ppm으로 보다 엄격히 관리)

※ 1998년도 건설된 삼천포 5,6호기의 2015년도 먼지, 황산화물 및 질소산화물 배출농도가 각각 10.1 mg/m³, 84.5 ppm, 79.2 ppm을 나타내어 영흥 3,4호기의 기준치 대비 먼지는 2.1배, 황산화물은 3.4배, 질소산화물은 5.3배 초과하여 배출

○ 따라서 초미세먼지의 효과적 저감을 위해서는 대형사업장을 우선 적용 대상으로 PM_{2.5} 저감기술과 SO_x, NO_x 저감기술의 개발이 필요함

○ 또한, 국내외 시장환경을 감안하였을 때, 고비용 고효율 저감기술은 시장진입과 확대가 어려운 상황이므로, 성능개선 대비 비용지출이 최소화될 수 있는 저비용 기술의 개발이 필요함

□ (초미세먼지 집진기술) 국내 대형사업장에 적용 중인 집진기술은 전기집진기와 여과 집진기가 주류를 이루고 있으며, 이러한 집진기의 효율은 99.9% 이상의 높은 수치를 보이고 있으나 먼지배출농도를 살펴보면 전기집진기는 약 10 mg/m³, 여과 집진기는 5 mg/m³으로 상당히 높아 추가적인 효율개선이 필요함

○ 석탄화력발전소에는 대부분 전기집진기를 적용하기 때문에 초미세먼지의 집진효율이 상대적으로 낮아 기존 전기집진기에 추가하여 초미세먼지 집진효율을 향상시킬 수 있는 Retrofit 기술개발이 필요함

※ 초미세먼지 크기 영역대인 축적모드(0.1-1 μm)의 범위에서는 전계하전과 확산

하전의 혼합 지역에 존재하여 입자 하전율이 낮기 때문에 이 영역대에서 전기 집진기의 제거효율이 급격히 저하됨

- 제철산업 및 시멘트 산업 분야에는 전기집진기와 여과집진기가 주로 적용되고 있으며, 여과집진기의 경우 전기집진기에 비해 낮은 시설비, 안정적인 운전, 높은 집진효율을 보이거나 대용량 설비로의 확장성 문제를 극복할 필요가 있음
- 1차 직접배출 초미세먼지 제거를 위한 저감설비의 성능향상을 위해서는 기존 전기집진기의 리트로핏(Retrofit) 기술개발 및 백필터의 대형화 적용기술 확보가 필요
- (2차 생성 유발물질) 석탄화력발전소로부터 배출된 후 대기 중에서 초미세먼지를 생성시키는데 기여하고 있는 황산화물 및 질소산화물의 경우 선택적촉매환원법(SCR)이나 습식 배연탈황장치(FGD)가 사용되고 있으나, 피독에 의한 촉매활성 저하, FGD 용수 소모량 증가, 열교환기(GGH) 막힘 현상 등 운전상의 문제점 야기
- 2차 생성 유발물질 제거를 위한 탈황설비 및 탈질설비의 저감 효율을 높이기 위해서는 고활성 반응제·촉매 및 시스템 개발 필요
 - ※ 특히, 배출량 측정 시에는 측정되지 않으나 배출 직후 냉각되면서 미세먼지가 되는 응축성 미세먼지(초미세먼지 배출의 상당량 차지)는 규제 및 관리, 기술 개발의 사각지대
 - ※ 제철소(5.25)·화력발전소(6.2) 현장방문, 기업간담회(6.28) 시 기업들은 초미세먼지(PM_{2.5}) 집진기술은 기술적 난이도가 높아 정부 중심의 비용 효율적 기술 개발 및 확산 희망
- (탈황 기술) 국내 석탄 및 중유 발전설비 60 여기를 대상으로 설치된 배연탈황공정은 대부분 석회석을 알칼리제로 사용하고 강제산화 과정이 도입되어 부산물로 석고를 생산하는 습식 석회석-석고 공정임
- 대부분 탈황공정의 효율은 90~97.4%를 기준으로 하고 있으나, 근래에 건설된 몇몇 발전설비를 제외한 대다수의 탈황공정들이 90% 정도의 탈황효율을 기준으로 설계되었으며 공정설계 시 거의 여유를 두지 않았고 흡수탑의 증대나 교체를 위한 공간적인 여유도 넉넉하지 않아 향후 배출허용기준 강화에 대응하기 위한 효율 개선을 위한 작업에 어려움이 있음
- 2016년 현재 배출허용기준에 따르면 2015년 이후 설치되는 석탄화력발전소의 경우 대부분의 설비가 50 ppm (O₂ 6% 기준)이 적용되므로, 현재의 FGD 성능을 감안할 때 저유황탄을 사용해야만 충족시킬 수 있는 수준임

- 영흥화력발전소 3,4호기(2008년 준공)는 지자체와의 협의에 따라 배출허용기준이 20 ppm으로 설정되어 FGD 설계 효율은 96.5%, 영흥화력발전소 5,6호기(2014년 준공)는 배출허용기준이 12 ppm으로 더욱 강화됨에 따라 FGD 설계 효율이 97.4%에 이르고 있음
- 석탄화력발전소에서 SO₂ 배출농도를 10 ppm 수준으로 설정하기 위해서는 탈황 효율 99% 정도를 확보해야 하며, 이를 위한 대응 방안으로는 다음 사항들을 고려할 수 있음
 - 저유황탄 활용 확대를 통해 FGD 흡수탑의 부담 경감
 - 기존 FGD의 경우 설비 개조에 의한 탈황효율 극대화
 - FGD의 고효율화, FGD 배출 수분 회수기술, SO₃ 저감을 위한 Wet ESP 결합 등을 통한 시스템 하이브리드화 기술
- (탈질 기술) 석탄화력발전소에서 배가스 중 질소산화물을 제어하기 위해 사용되는 가장 상용화된 기술은 선택적촉매환원법(SCR)을 이용하여 질소산화물을 질소와 수분으로 전환하는 방법임
 - 기존의 SCR 촉매는 요구되는 질소산화물 제거효율을 확보하기 위해 많은 양의 촉매를 사용하여 소요공간이 크고 비용도 높음. 따라서 SCR 촉매의 고효율화 연구가 필요하며, 다양한 지지체에 적용 가능한 코팅기술을 개발하여 압출형 촉매를 코팅촉매로 대체할 필요가 있으며, 더불어 SCR 촉매의 질소산화물 전환 성능을 극대화하고, 내구성을 개선하기 위한 반응시스템 최적화가 필요함
 - 발전소, 소각로, 연소로 등의 배출가스에는 연료 내 다양한 성분에 의해 촉매에 피독 현상을 일으킬 수 있는 물질(SO₂, Phosphorus, Alkali, 중금속 등)들이 배출되고 있는 실정이므로, 피독문제를 해결할 수 있는 내구성이 향상된 촉매 개발이 필요함
 - ※ SO₂에 의한 촉매의 활성저하는 SO₂가 촉매와 반응하여 SO₃로 산화되고 SO₄²⁻의 형태로 흡착되는 촉매독으로 활성점이 피독되어 활성이 저하되거나, 촉매 표면에 SO₃가 NH₃와 결합하여 ammonium sulfate (AS) 및 ammonium bi-sulfate (ABS)가 생성되어 촉매 표면을 덮는 fouling/masking에 의한 활성저하가 발생함
 - ※ Phosphorus의 경우도 석탄을 연료로 사용하는 고정오염원에서 K, Na 등의 알칼리계 금속과 함께 발전소 후단 설비들의 plugging, masking, chemical poisoning을 일으킴
 - 현재 사용되는 탈질촉매 기술에서 지지체에 코팅된 촉매는 운전조건에서 높은 열에 장시간 노출될 경우 촉매의 열적 안정성, 코팅강도, 분산도 등이 문제점으로 나타나고 있어, 지지체의 열적, 기계적 안정성 등의 물리적인 특성과 구조체 자체의 열적, 전기전도성 영향평가 및 다양한 코팅방법을 통해 지지체 표면의 코팅성 증진 및 분산도를 증진시키는 코팅기술이 필요함

- 또한, SCR 촉매의 내구성 개선과 더불어 노후화 촉매의 재생 기법 개발 및 재사용 전략 도출을 통하여 실 공정 활용률을 개선해야 함
- (중소 사업장) 오염물질 배출량(10% 이하)은 많지 않으나 주거지역에 근접하여 오염 체감도가 크고 영세사업장이 많아 보급형 저감수단 개발 및 적용이 필요
 - 중소사업장은 재정여건이 열악한 영세사업장*이 많아 방지시설 미가동 및 훼손방치, 변경신고 미이행 등 방지시설의 설치 및 운영이 매우 미흡
 - * 영세사업장은 대부분 물/흡수제를 분사시켜 오염물질을 제거하는 스크러버 (scrubber) 사용
 - 중소형 연소시설을 보유한 사업체들은 영세하기 때문에 배출되는 1차 배출 미세먼지와 2차 생성 미세먼지의 전구물질을 모두 제거할 수 있는 대기오염방지시스템들을 구축하는데 비용적인 측면이나 부지적인 측면에서 어려움이 있음
 - 따라서 1차 배출 미세먼지와 2차 생성 미세먼지의 전구물질을 제거하는데 고가의 여과집진기, SCR, FGD를 대신할 수 있는 초저가의 대기오염방지시스템 개발이 필요함

[3] R&D 현황 및 시사점

- 1차 배출먼지에 대한 집진기술 연구개발사업은 환경부를 중심으로 산업부, 미래부, 중기청 등에서 최근까지 꾸준히 지원되어 왔음
 - 2000년대 이전에는 기반 원천기술 확보를 위해 대학/연구기관에서 수행하였으나, 최근에는 중소형 집진설비에 대한 수요 증가로 기업체에서 주도적으로 상용화 개발을 추진하여 기술적 자립도가 높은 상황임
- 2차 생성먼지의 유발물질 저감기술인 탈황 및 탈질기술은 2000년 이전까지는 환경부, 산업부 등의 지원으로 진행되었으나, 이후 고성능 탈황, 탈질기술에 대한 수요가 감소하여 2000년대 들어서 최근까지 10여년 이상 기술개발에 대한 지원이 거의 이루어지지 않음
 - 고성능 및 고내구성 탈황, 탈질기술에 대한 기술 개발은 일부 대학/연구기관에서 자체적으로 수행하였으나 상용화 기반의 R&D 지원이 매우 부족한 상황임
- 기술 자립도가 우수한 집진기술을 포함하여 고성능 및 고내구성 탈황, 탈질 기술이 아직 대형사업장에서 현장 실증까지 확대되지 못하고 있어 기업체 중심의 상용화 개발 및 시장 진출에 어려움을 겪고 있음

□ 백필터 집진기술 연구는 미국, 독일, 일본이 앞서 있으며, 연구개발은 백필터소재, 집진기, 필터재생기술의 세 가지 영역에서 진행되어 왔음

○ 2000년대 이전에는 대학/연구기관에서도 수행되었으나, 최근에는 기업체에서 주도하여 연구개발이 진행됨

※ 충격기류방식 백필터는 주로 길이 5 m 이하의 집진기에 대해 부품개선, 시스템 개선 연구가 진행되었으나, 최근 독일, 오스트리아, 일본 등의 업체에서 10 m 백필터를 적용한 대용량 집진기에 대한 사례가 소개됨

※ 국외 업체 및 연구기관에서 먼지배출농도 개선을 목적으로 한 집진기 개발 사례는 찾아보기 어렵고, 현재 수준에서 백필터를 통과하여 배출되는 먼지농도는 최고 3 mg/m³ 수준임

※ 한국에너지기술연구원에서는 2010년 백필터 재생장치의 핵심기술인 인젝터(이중슬릿형)를 특허출원하였으며, 2012년 제품개발에 성공하고 시장에 진출함

※ 한국에너지기술연구원에서는 환경부 연구사업으로 2014년부터 10-15 m 길이의 필터백이 적용 가능하고 먼지배출농도를 기존 대비 1/5 수준 이하로 저감한 저비용 집진장치 개발 연구가 Pilot 규모에서 수행되어 완료를 앞두고 있음

□ 1차 배출 초미세먼지의 처리 향상을 위해 기존 백필터의 표면에 멤브레인 소재를 결합한 하이브리드 필터소재 적용 연구가 활발하게 진행 중

※ 미국의 GE Energy사는 약 0.5 μm 크기의 마이크로 기공을 가진 멤브레인을 20-30 μm 크기의 섬유상 필터에 코팅하여 미세입자가 멤브레인 표면에 적재되고 쉽게 세정되어 통기성이 우수하고 내부 마모가 적은 Preveil ePTFE 멤브레인 필터를 개발함

※ 미국의 Gore사도 Gore 멤브레인이 결합된 섬유필터를 개발하여 장기 운전에도 공기 투과성이 훨씬 우수하고, 0.1-0.3 μm의 미세입자에 대해서도 95% 수준의 우수한 집진성능을 갖는 Gore 멤브레인 미디어를 개발함

□ 1차 배출 초미세먼지의 처리 성능 향상을 위해 전기집진기와 여과집진기, 정전응집기와 전기집진기 등의 하이브리드 집진기술이 지속적으로 연구되었으나, 기술의 보급 확산을 위해서는 비용절감을 위한 추가적인 연구개발 필요

※ 미국 EPRI (Electric Power Research Institute of America)의 Compact

Hybrid Particulate Collector (COHPAC), North Dakota 대학과 Energy and Environmental Research Center of America의 Advanced Hybrid Particulate Collector (AHPC), GE Energy사의 Electrostatically Enhanced Fabric Filtration (ESFF), Allied Environmental Technologies사의 Multi Stage Collector (MSC) 등의 전기집진+여과집진 하이브리드 기술이 개발됨

※ 미국 Indigo사에서는 2 μm 크기에서 5배, 0.1 μm 급 크기에서는 10배 정도 향상시킬 수 있고, 활성탄 주입이나 연소 공정에서 LOI를 이용하여 수은 집진효율을 4배 이상 향상시킬 수 있도록 전기집진기 전단에서의 양극 하전 장치와 혼합장치로 이루어진 리트로핏 개념의 입자 성장장치를 개발함

※ 한국에너지기술연구원에서는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업을 통해 전기집진기술과 여과집진기술을 일체형으로 조합하여 미세먼지의 제거효율이 우수하고 여과포 교체비용을 절감시킬 수 있는 하이브리드 정전여과 미세 분진 저감기술(HI-FILTER)을 개발하여 (주)제이텍에 기술이전하여 상용화함

□ 1차 배출 초미세먼지와 함께 응축성 입자나 수은이 이슈화되면서 이를 동시 처리할 수 있는 습식전기집진기술 개발 등의 리트로핏 연구도 활발하게 진행 중

○ 습식 집진판 표면의 건점(dry spot) 생성 현상인 채널링 현상을 극복하고 부식을 억제하는 연구가 미국을 중심으로 지속적으로 진행되어 왔음

※ 미국 Ohio 대학에서는 멤브레인 기반의 습식 전기집진기를 개발하여 Southern Environmental Inc사에서 Stevenson 지역의 Smurfit Stone Container Corporation's Plant에서 최초로 상용화에 성공시킴

※ 미국의 EPRI (Electric Power Research Institute)에서는 건식 전기집진기의 마지막 단을 습식으로 리트로핏하여 초미세먼지, 황산미스트, SO_2 및 수은 등의 다성분 오염물질을 제어할 수 있는 건·습식 하이브리드 전기집진기 기술을 개발함

○ 최근 한국, 대만 등을 중심으로 집진판 표면에서만 물이 흐르도록 하는 수막형 전기집진기 연구도 활발하게 진행 중

※ 대만 Chiao-Tung 대학에서는 다공성 금속 집진판이나 유리 집진판 표면에 TiO_2 나노입자를 코팅함으로써 집진판 표면을 친수성으로 유도하여 집진판에 전체적으로 수막을 균일하게 형성시키는 습식 전기집진기를 개발

- ※ 한국기계연구원에서는 전력연구원과 산업부 과제로 0.7 MW급 이산화탄소 포집용 순산소 연소 발전 시스템 개발 연구를 진행하였고, CO₂ 포집을 위한 오염물질 제어 방안으로 기존의 건식 전기집진기와 친수성 수막형 습식 전기집진기를 직렬로 구성한 전기집진시스템을 구성하여 고농도 CO₂ 분위기에서 먼지배출농도 1.6 mg/m³ 수준을 확보함

□ 탈황 기술은 전 세계적으로 습식 배연탈황(FGD) 기술이 지배적이고 90% 수준의 탈황효율을 보이고, 대부분 상업화가 이루어진 상태이나 2차 생성 미세먼지 대응 성능 개선을 위한 시스템 최적화 필요

- ※ 미국 내 설치된 SO_x 처리 기술은 90% 이상이 습식 공정이고, 이중 Wet Lime/Limestone 공정이 80% 이상을 차지하고 있으며 건식공정은 전체의 10% 정도를 나타냄

- ※ 주요 선도 업체로서는 GE, ABB, B&W사가 있으며, GE, ABB사는 습식 석회석-석고 방식인 향류식 spray tower 공정을 사용하고, B&W사는 향류식 spray tower에 기-액 접촉효율과 가스분포 향상을 위한 sieve tray를 설치한 방법을 사용함

- ※ 일본의 Mitsubishi 중공업에서는 grid packed 타입이 적용되고, Chiyoda 사에서는 jet bubbling 반응 방식이 일부 적용되고 있음

- ※ 독일은 Searberg Holter Umwelttechnik사에서 1974년 40 MW급 실증 플랜트를 Weiher 발전소에 설치하여 운전한 이래 산업용 보일러까지 적용 범위를 확대하고 있음

- ※ 국내 화력발전소의 경우도 대부분 습식 FGD가 적용되고 있고, 현대중공업, 두산중공업, KC코트렐 등의 국내 기업들이 설치하고 있으나 대부분 미국 B&W, Marsulex, 일본의 MHI, Chiyoda, 독일의 Steinmuller, Bischoff 등의 선진사로부터 기술제휴를 통해 개발함

- ※ 전력연구원에서 1992년부터 환경부 G7 선도기술개발사업으로 200 MW급 독자공정(한국형)의 습식탈황설비를 개발하여 영동 1,2호기, 서천 1,2호기, 평택 1호기에 적용함

□ 국내외 발전소 탈질설비의 대부분은 V₂O₅/TiO₂ 기반 촉매를 이용한 SCR (선택적 촉매환원) 기술이 적용되고 있음. 국내외적으로 SCR 촉매에 대한 연구는 조촉매 첨가 및 다양한 제조방법에 따른 효율증진에 대한 연구, 촉매의 피독물질, 열노화에 의한 성능저하 원인에 대한 연구, 그리고 내구성 증진을 위한 다양한 촉매연구가 수행되어 왔음

- 배가스에 포함된 SO_2 에 대한 촉매 내구성 연구는 많이 진행되고 있으며, 대다수의 경우 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 촉매를 대상으로 촉매의 특성에 따른 SO_2 의 영향 및 활성저하를 연구하였으나, 앞서 언급하였던 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3\text{-TiO}_2$ 촉매보다 우수한 결과를 보이는 고성능 촉매에 대한 연구는 미미하여 이에 대한 연구가 필요함
- 연료의 성분에 따라 발생할 수 있는 피독물질인 alkali 물질 및 phosphorus에 대한 연구는 이러한 피독물질에 의한 촉매의 활성저하 원인 규명에 대한 연구가 주를 이루고 있어, alkali 및 phosphorus 물질의 피독문제를 극복할 수 있는 내구성 증진에 대한 연구는 미미한 실정임
- (중소업체 적용 초저가 시스템) 중소형 연소시설의 집진, 탈황 및 탈질 시스템의 기술개발은 저 NO_x 버너, 선택적비촉매환원법, 반건식 탈황기술, 습식 스크러버 등에 중점을 두어 왔으나, 설치비, 유지비 및 설치공간 등의 비용경제적인 관점의 기술개발은 미흡한 상황임
- 한국기계연구원에서는 나노필스 코로나 방전기에서 첨가제(암모니아, 프로필렌) 사용에 따른 SO_2 와 NO 의 제거효과를 연구함. 암모니아는 황산암모늄 생성을 촉진시키고 프로필렌은 NO 를 NO_2 로 산화시키는 원리가 적용되는데, NO 제거율은 80% 이상, SO_2 제거율은 95% 이상이었음

< 배출원별 1·2차 미세먼지 저감 관련 과제 현황 >



시사점

- ☞ (기존 보유기술의 활용 및 조기실증화) 대형사업장에 적용할 수 있는 집진, 탈황, 탈질 일부 기반기술은 기보유 중이나 1차 초미세먼지 및 2차 생성 유발물질 대응 실증기반의 연구가 부족하므로 실증의 시급성 고려 집중 투자 필요
 - ※ 연구소를 중심으로 확보된 고효율 여과백 제조기술, Long bag 집진기술, 습식 전기집진기술 등 1차 초미세먼지 대응 기반기술 활용 대형사업장 실증 필요
 - ※ 기업체를 중심으로 확보된 탈질 촉매, 탈황 반응제 등 2차 생성 유발물질 대응 소재기술의 실증 적용기술 확보 필요
- ☞ (기존 설비의 Retrofit 기술) 대형사업장의 경우 기존 집진, 탈황, 탈질 설비를 기보유 중이므로, 이를 최대한 활용하여 1차 배출 초미세먼지 및 2차 생성 유발물질을 저감하는 Retrofit 기술개발로 진행 필요
- ☞ (고효율/고내구성 탈질촉매 개발) 2차 생성 유발물질의 안정적인 처리 성능 유지를 위해서 피독물질에 대한 내구성이 우수한 고효율 탈질 촉매 개발 필요
- ☞ (원천기술 확보를 통한 산업적 파급효과 극대화) 실증기술 개발연구 이외에도 전기화학적 질소산화물 포집/자원화, 초발수/초발유 저가형 필터 소재 개발 등 파급력이 우수한 원천기술 확보 동시 추진 필요
- ☞ (시스템 최적화) 1차 배출 초미세먼지 및 2차 생성 유발물질의 효율적인 저감을 위해서는 개별 기술 수준이 아닌 집진, 탈황, 탈질 설비의 통합적인 운전 최적화를 통한 저감 방안 마련 필요
- ☞ (초저가 One-Module 시스템 적용) 중소형 사업장에서 배출되는 오염물질의 양이 상당하나 비용효과적으로 대응 가능한 기반기술이 부족하므로, 1차 배출 초미세먼지와 2차 생성 유발물질을 동시에 저감하는 초저가 원모듈 기술개발로 진행 필요

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

◆ 사업장 배출량 1차 초미세먼지(PM_{2.5}), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 1/2 저감 기술개발 및 확산

※ 석탄화력발전소 배출 PM_{2.5}, SO_x, NO_x 배출농도 저감목표

PM_{2.5} : 3.0 mg/m³ → 0.5 mg/m³, SO_x/NO_x : 50 ppm → 5 ppm

- 국내 핵심 배출원으로부터 원천적으로 1차 배출 미세먼지와 2차 생성 유발물질(NO_x, SO_x)을 동시에 차단하여 대기환경에 미치는 영향을 최소화하고자 함.
 - 단기간 내 미세먼지 저감효과를 달성하기 위하여 long bag 필터 기술 등 기존 연구를 통해 개발되어 경제성과 성능이 검증된 기술 중 TRL 5, 6단계 기술의 조기 실증화 추진
 - 기술실증화를 위해 고농도 오염물질 배출 석탄화력발전소 1기를 대상으로 선정하여 본 연구를 통해 개발된 1차 배출 미세먼지 저감장치, 2차 생성 미세먼지 유발물질 처리 장치를 적용함으로써 기술검증 및 적용실적 확보를 통해 국내외 시장진출 기반 구축
 - 영세한 제조산업 시설에 대한 현실적 대응을 위한 보급형 저가 설비 개발 및 실증화 추진을 통해 7년 이후 청정 대기환경 조성 기반 구축
- (1차 배출 초미세먼지) 기존 전기집진기 대신 미세먼지(PM₁₀)뿐만 아니라 초미세먼지(PM_{2.5})까지 집진이 가능한 여과집진장치 적용
 - 설치 면적이 적고 집진과 탈진(집진된 먼지 수거)이 용이한 고효율 long bag 필터 개발 및 이를 적용한 여과집진장치 개발 및 실증
 - ※ 여과 소재는 한국생산기술연구원에서 중규모(소각로) 사업화 완료, long bag 필터는 한국에너지기술연구원에서 소규모(6천m³/h, KC코트렐 안성공장) 실증 중이며 집진 시스템은 KC 코트렐 등 설비전문회사에서 설치 필요
- (2차 생성 초미세먼지) 가스 상태로 배출되나 추후 공기 중 화학반응을 통해 초미세먼지를 생성하는 황산화물, 질소산화물 저감설비 성능 업그레이드
 - 기존 습식 탈황설비의 기액반응 성능개선을 위한 고효율 반응시스템 개발, 탈질 효율을 높이기 위한 고효율 고내구성 탈질촉매 개발 및 적용

※ 습식탈황은 두산중공업, KC코트렐 등, 탈질촉매는 (주)나노, 리드제넥스 등에서 사업화 가능하나 대규모 적용을 위한 성능 업그레이드(고효율 및 고내구성) 필요

○ 응축성 미세먼지를 위한 응축성장 집진기술* 개발 및 적용

* 미세먼지화 현상을 앞당겨 배출 전에 포집·제거

□ (사업장 실증) 대형사업장(화력발전소, 제철소 등)은 대표적인 사업장을 선정하여 기업과 공동 개발·실증 후 여타 사업장으로 확산

※ Long Bag Filter 기술은 '19까지 제철, 시멘트 분야에 200,000 CMH 규모로 조기실증 완료하여 국내외 보급확산 예정

※ 1차 먼지집진, 탈황, 탈질 기술은 '19까지 석탄화력발전소에 2 MW 규모 실증, '23까지 50 MW 규모로 실증 완료하여 국내 발전사에서 계획 중인 환경설비개선사업에 일부 기술이 적용될 수 있도록 기술완성도 확보 예정

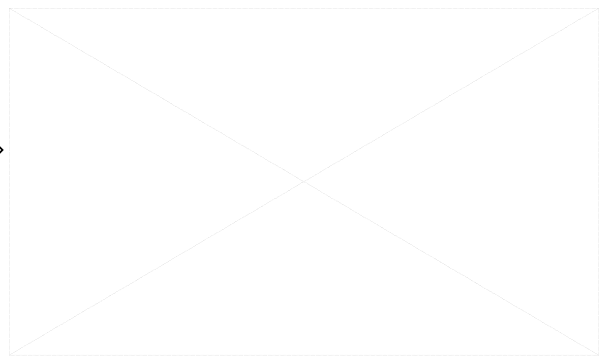
○ 개발기술은 설계 변경 없이 현재 시설에 덧붙이거나(add-on), 업그레이드하는 형태로 적용될 수 있도록 하여 비용 부담 및 설비 증설로 인한 중단기간 최소화 가능

□ 중소사업장(제지산업, 유리용해로 등의 소규모 제조업체)은 단순한 구조로 1차 배출 및 2차 생성 미세먼지를 동시에 처리할 수 있는 원 모듈(One-Module) 시스템 원천기술 개발

【 저감기술 적용 前 】



【 저감기술 적용 後 】



[5] 세부추진 방안

□ 대형사업장 적용 고성능 저비용 Long Bag Filter 집진기술 실증화

○ 핵심내용

- 길이 10 m 이상의 필터백을 적용하여 사업장의 공간부족 문제에 대응할 수 있으며, 시설비용을 절감하면서도 먼지배출을 획기적으로 저감할 수 있는 필터 복합재생방식 여과집진장치 실증화
- 저비용 고효율 Long Bag Filter 집진기술 200,000 CMH 실규모 실증

○ 성능목표 및 수준

- 길이 10 m 이상 필터백을 적용 가능한 여과집진장치 상용화
- 필터 복합재생기술 적용을 통한 $PM_{2.5}$ 배출농도 0.5 mg/m^3 이하 달성
- Long Bag Filter 시설비용 기존 3 m 백필터 대비 20% 절감
- 3년 이내 실증 완료를 통한 국내외 시장 진출기반 구축 및 기술사업화

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- '17년도 60,000 CMH 규모 복합재생 Long Bag Filter 집진장치 실증화
 - ※ 제철, 시멘트 산업체를 대상으로 처리가스 규모 60,000 CMH 복합재생 Long Bag Filter 집진장치 적용 및 장시간 운전을 통한 성능검증/기술완성도 향상
- '18-'19년도 200,000 CMH 규모 복합재생 Long Bag Filter 집진장치 실증화
 - ※ 2차 실증사업으로 발전용량 50 MW 규모에 해당되는 200,000 CMH 집진장치 설계, 제작, 적용 및 장시간 운전을 통한 성능검증 및 사업화 기반 구축
- '19년도 500/1000 MW 규모 발전소 적용 Long Bag Filter 엔지니어링 기술 확보 및 기술사업화
 - ※ 국내외 시장진출을 위한 대용량 Long Bag Filter 상용 엔지니어링 기술 확보
 - ※ 실증설비 실증결과를 토대로 국내외 시장진출/확대를 통한 매출 창출



<3 m 백필터 대비 10 m Long Bag Filter 설치면적 비교>

□ 2차 생성입자 처리용 고효율 습식세정형 전기집진기술 개발

○ 핵심내용

- 탈황설비 후단에서 배출되는 (초)미세먼지와 응축성 입자를 동시에 고효율로 처리하기 위한 응축변환 유도형 습식세정 전기집진 기술 개발
- 2 MW 및 50 MW 실증을 통한 상용기술 확보

○ 성능목표 및 수준

- 초미세먼지 배출농도 0.5 mg/m^3 이하
- 응축성 입자 처리효율 95% 이상
- SO_2 배출농도 저감 : $10 \text{ ppm} \rightarrow 5 \text{ ppm}$
 - ※ 현재 응축성 입자는 배출규제에 포함되어 있지 않아 처리기술 적용 사업장 없음

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- 2차 생성 입자 대응 응축변환 유도 습식세정-전기집진 핵심기술개발('17~'19)
 - ※ SO_3 변환 및 응축성장 유도의 정전 습식세정 전처리 장치 개발
 - ※ 응축변환 최적 전원공급모드 운전기술 개발
 - ※ 응축성장 유도 및 산성가스 추가처리용 습식세정 운전기술 개발
 - ※ 초저배출형 정전 초미세먼지 전기집진 구조 개발
 - ※ 2차 생성 응축성 입자 변환 및 제거 고효율화 기술 개발
 - ※ 석탄화력발전소 2 MW 실증을 통한 응축변환, 초미세먼지 및 응축성 입자 저감 특성 분석
- 50 MW 이상급 습식세정 전기집진기술 개발 및 실증화('20~'23)
 - ※ 현장 특성에 맞는 수평형 또는 수직형 실증안 마련
 - ※ 수평형 또는 수직형 습식세정 전기집진기 scale-up 설계 및 제작
 - ※ 석탄화력발전소 50 MW 습식세정 전기집진기술 현장 설치 및 운전
 - ※ 장치 안정성 평가 및 내구성 보완
 - ※ 500-1000 MW급 습식세정 전기집진 시스템 최종 설계 기술 확보



< 응축변환 유도형 습식세정 전기집진기 개념도 >

□ 기존 집진장치 성능개선을 위한 Retrofit용 저비용 삽입형 집진장치 개발

○ 핵심내용

- 사업장 미세먼지 배출저감 조기달성을 위한 Retrofit용 삽입형 집진장치 개발
- 기존 집진기 성능개선용 저비용 고효율 PM_{2.5} 제어기술 개발
- 점유공간 최소화 및 낮은 설치비용과 높은 PM_{2.5} 제거효율 동시 달성
- 발전소 미세먼지 배출저감의 조기달성과 기술 실증을 통한 사업화 추진

○ 성능목표 및 수준

- PM_{2.5} 제거효율 90% 이상(단독효율 기준), 압력손실 30 mmAq 이하
- 기존 집진장치 대비 점유공간 20% 이하, 시설비용 30% 이하
 - ※ 미국 EPRI, EPA에서는 기존 전기집진기 성능개선을 위해 전기집진기 후단에 백필터를 추가 설치하는 기술을 개발하였으나, 높은 시설비/운전비용으로 인해 시장확대 실패

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- ('20~'21) Electro-Aerodynamics 원리 적용 10 MW급 삽입형 집진장치 개발
 - ※ 초미세먼지 제거성능 목표 및 저압력손실 구현을 위한 최적 설계기술 확보
 - ※ 기존 집진장치에 장착 가능한 Compact 집진기 개발
 - ※ 석탄화력발전소 적용 10 MW 규모 실증을 통한 scale-up 기술 개발 및 운전 안정성 확보기술 개발
- ('22~'23) 석탄화력발전소 적용 125 MW 규모 삽입형 집진기 실증화
 - ※ 500 MW급 기존 전기집진기 1 Cell (125 MW) 규모의 삽입형 집진기 실증화
 - ※ 500 MW 이상급 삽입형 집진기 설계 및 엔지니어링 기술 확보

- ※ 노후 석탄화력발전소 대상 기술 실증화를 통한 장시간 시운전 DB
- ※ 실증화 개발을 통한 상용기술 확보, 사업화 및 시장진출/확대 기반 구축



< 기존 집진기 Retrofit용 저비용 흡입형 집진장치 개념도 >

□ 황산화물 저감 향상을 위한 고성능 탈황장치 개발

○ 핵심내용

- 화력발전소 등 연소공정에서 배출되는 황산화물의 배출량을 기존 대비 1/5 수준으로 저감할 수 있는 습식 탈황 성능개선 기술 개발
- 기존 습식탈황설비(FGD)의 성능개선기술 개발

○ 성능목표 및 수준

- 기존 FGD 성능개선을 통한 황산화물 배출농도 저감
- SO₂ 배출농도 50 ppm → 10 ppm 저감
- ※ FGD 성능개선을 통해 기존 SO₂ 배출농도를 10 ppm 이하로 저감한 후, FGD 후단에 응축성 입자 제거용 습식전기집진기술 추가 적용을 통해 최종적으로 SO₂ 배출농도를 5 ppm 이하로 저감함

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- FGD 시스템의 고효율화 개조기술 개발('17~'19)
 - ※ FGD 시스템의 성능 및 문제점 진단기술 개발
 - ※ 액상 알칼리 특성 제어, 버퍼 첨가제 제어 등의 슬러리 반응성 향상기술 개발
 - ※ 액기비 향상, 액체 분사 구조 향상, 새로운 absorber 적용, 가스 유동 개선 등의 mechanical 디자인 향상기술 개발
 - ※ 2차 스프레이 적용, 배기가스 제어, 염 주입, 산화공기 주입 등 FGD 성능향상

기술 개발

- ※ 미스트 처리장치의 고효율 대체기술 개발
 - ※ 2 MW급 FGD 고효율화 개조기술 실증화 연구
 - ※ 반응제 최적화를 통한 경제성 확보기술 개발
- 50 MW급 습식 FGD 탈황 고효율화 실증화('20~'23)
- ※ 습식 FGD의 기계적, 화학적 성능 향상 scale-up 적용 기술 개발
 - ※ 대용량 적용 기액접촉 반응성 향상 및 첨가제 혼합효과 증진 기술 개발
 - ※ 장치 안정성 평가 및 내구성 보완



< 습식 탈황장치(FGD) 고효율화 개선시스템 개발 개념도 >

□ 고효율 고내구성 탈질촉매 및 SCR 시스템 최적화 기술 개발

○ 핵심내용

- 2차 생성 미세먼지 유발물질인 질소산화물 배출저감 선택적촉매환원법(SCR) 핵심소재(고성능 고내구성 탈질촉매) 및 시스템 개발
- 촉매의 표면 구조적 특성과 반응특성 제어를 통한 고효율화 기술개발
- 연료 내 피독물질(SO_2 , alkali metal, 중금속, P 등) 및 thermal exposure에 의한 촉매 활성저하 해소 및 내구성 증진 연구
- SCR 시스템 및 운전 최적화를 통한 촉매 성능 개선 및 촉매 수명 증진

○ 성능목표 및 수준

- 고성능 SCR 촉매 NO_x 제거효율(적용온도 300°C)
: 기존 90% (SV : 5,000/hr) → 개발목표 95% (SV : 10,000/hr)
- SCR 촉매 내구성
: 기존 13,000 hr → 개발목표 18,000 hr

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- 고성능 고내구성 SCR 촉매 및 최적화 시스템 석탄화력발전소 실증방안
 - ※ ('17~'19) 석탄화력발전소 연소배가스 적용 2 MW 실증
 - ※ ('20~'23) 석탄화력발전소 연소배가스 적용 50 MW 실증
- 촉매의 표면 구조적 특성과 반응특성 제어를 통한 고효율화
 - ※ 촉매 표면 구조적 특성에 따른 SCR 반응활성 연구
 - ※ 촉매의 NH_3 및 NO_x 의 흡착 특성과 SCR 반응활성의 상관관계 연구
 - ※ 촉매 표면의 산소이동 특성에 따른 SCR 반응활성 연구
- 연료내 피독물질(SO_2 , alkali metal, P 등)에 대한 촉매의 deactivation 및 내구성 증진
 - ※ 다양한 연료 내 피독물질에 의한 촉매의 deactivation 원인 규명
 - ※ 조촉매 첨가 및 촉매의 구조적 특성 제어를 통하여 내피독성 증진 연구
- 장시간 thermal exposure에 의한 촉매의 열노화 현상과 SCR 반응의 상관성 연구 및 내구성 증진기술 개발
 - ※ Thermal exposure가 촉매에 미치는 영향과 그에 따른 SCR 반응활성 변화에 대한 연구
 - ※ 조촉매 첨가 및 촉매의 구조적 특성제어를 통한 촉매의 열적내구성 증진 연구
- 다양한 substrate를 이용한 고효율 촉매코팅기술 개발
 - ※ 코팅방법에 따른 substrate 표면의 촉매 코팅강도 및 분산도 연구
 - ※ 다양한 substrate 표면의 코팅성 및 최적 코팅량 연구
- Fast SCR 유도 기술 및 운전 최적화 기술 개발
 - ※ 환원제 내 Fast 유도 성분(질산화물 등) 도입 기술 개발
 - ※ 저에너지형 NO_2 발생장치 개발 및 SCR 반응기 복합화
 - ※ NO_x 저감률 극대화 및 NH_3 slip 방지를 위한 운전 전략 수립
 - ※ 미반응 미세먼지 유발원 제거기술 및 재생모드/기법 개발



< 고성능 고내구성 SCR 촉매 및 최적 시스템 개발 >

□ 질소 순환형 NO_x 선택적 포집 및 자원화 기술 개발

○ 핵심내용

- 연소시설 배출 NO_x 저감 신개념 NO_x 포집 및 자원화 원천기술 개발
- 배기가스 내 질소산화물의 저감을 위한 습식저감장치 및 산화/환원 전기화학장치 개발과 부가가치물 생산에 대한 원천기술 확보 및 실제 배기가스를 이용한 실증 및 기술 신뢰도 확보

○ 성능목표 및 수준

- NO_x 습식저감기술, 산화/환원, 자원화 원천기술 개발
- 습식기술 적용 NO_x 제거효율 98%
 - ※ 기존 SCR 기술에 의한 NO_x 제거효율 90%
 - ※ 기존 SCR 기술 적용온도는 300°C 이상이나 본 기술은 90°C 이하
- 포집된 NO_x로부터 질산, 암모니아 전환/생산
: 12,000 ton/yr (500 MW 발전소 기준)

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- 질소순환형 NO_x 선택적 포집 기술 개발
 - ※ 산소분위기에서 NO_x 선택적 제거 가능 흡수액 및 공정 원천기술 개발
- NO_x 자원화 기술 원천기술 및 scale-up 기술개발
 - ※ 전기화학 반응이용 포집된 NO_x로부터 질산, 암모니아 생산 원천기술 개발
 - ※ 대용량 저비용 NO_x 전환용 전극/전해질 최적화 및 scale-up 기술 개발
- NO_x 저감/전환설비 실증화 개발

- ※ NOx 저감 및 자원화 현장적용 장치 개발 및 성능검증
- ※ 중소배출시설 및 대형사업장 적용 실증화
- ※ NOx의 질산, 암모니아 생산기술 실증화



< 질소 순환형 NOx 선택적 포집 및 자원화 기술 모식도 >

□ 초저가 오염물질 무배출 시스템 개발

○ 핵심내용

- 1차 배출 및 2차 생성 미세먼지를 동시에 처리할 수 있는 단순한 구조의 원 모듈(One-Module) 시스템 원천기술 개발 및 실증화

○ 성능목표 및 수준

- 2차 생성 미세먼지 유발물질인 SOx, NOx를 입자화하여 1차 배출 먼지와 동시 저감하는 시스템 및 고성능필터 개발
- 1차 배출 미세먼지 제거효율 : 99.9% 이상
- SO₂의 황산염 전환율 : 99% 이상
- NO_x의 질산염 전환율 : 90% 이상

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- 산화법(산화제 또는 촉매)을 이용한 NOx 및 SO₂의 입자화 기술 개발
 - ※ 배기가스의 성상(SO₂ 농도, NOx 농도, 먼지 농도, 산화제 주입량, 온도, 습도 등)이 핵생성 및 입자성장에 미치는 영향 연구
 - ※ 화학양론적 접근법을 통하여 가스를 입자화시키기 위한 적정 산화제 주입량 (또는 촉매량) 결정
- 고점도 2차 생성 미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 산업용 여과체 개발
 - ※ 1~2 μm의 섬유경을 갖는 초발수/초발유 섬유 방사기술 개발
 - ※ 초발수/초발유 기능을 가지는 여과체 개발
 - ※ 점착성 먼지제거용 여과체의 신뢰도 향상기술 개발

- 중소형 연소시설에서 배출되는 가스상 및 입자상 오염물질 제거용 여과집진시스템 개발
 - ※ 산성 오염물질에 내성을 가지는 집진기 소재 개발
 - ※ 초발수/초발유 기능을 가진 여과체를 장착한 여과집진시스템 개발
 - ※ 중소형 연소시설에서 초저가 오염물질 무배출시스템의 실증화 연구



<초발수/초발유 필터소재(좌) 및 중소사업장 적용 오염물질 무배출 시스템(우) 개념도>

< 대형사업장 저감기술 실증(충남 지역 화력발전소) 방안(안) >

□ 여건

- 산업부는 '30년까지 현재 운영 중인 화력발전소 53기에 대한 설비개선*과 함께, 추가 건설 예정인 20기에 강화된 배출기준을 적용할 계획('16.7.6 발표)
 - * ▲30년 이상의 노후화된 설비 10기에 대해 8기 폐지, 2기 연료전환을 실시, ▲20년 이상의 설비 8기의 환경설비를 전면교체, ▲20년 미만의 설비 35기는 저감설비를 우선 확충
- 이에 따라, 주요 발전사들은 '18년부터 '30년까지 순차적으로 환경설비의 전면 교체 계획 등을 준비 중
- 충남지역은 한국 석탄소비의 50% 정도를 차지하고 있으며, 발전설비(총 26.2 GW)의 47.2%에 해당하는 12.4 GW 규모가 충남에 소재
 - * ▲30년 이상된 노후 화력발전소 10기 중 4기(보령 1,2호기, 서천 1,2호기), ▲20년 이상 8기 중 6기(보령 3-6호기, 태안 1,2호기)가 충남지역에 위치
 - * 현대제철소, 현대오일뱅크, (주)LG화학 등의 다수의 대형사업장도 충남에 소재
- 충남지역 화력발전소가 수도권 초미세먼지의 최대 28%까지 기여하는 것으로 분석(국립환경과학원, 2015)되는 등 초미세먼지의 주요 배출지로 지목

□ 실증(안)

- 석탄화력발전소의 오염 이슈가 가장 많은 충남지역의 주요 화력발전소 1기를 선정하여 2 MW급부터 50 MW급까지 단계적으로 실증 추진
 - * ('17~'19) 핵심기술개발 및 2 MW 실증 → ('20~23) 50 MW 실증 및 사업화
- 오염물질이 다량 배출되는 노후 발전기를 대상으로 실증비용을 고려하여, 배기가스를 분기(by-pass)*하여 실증
 - * 실증장비 건설 후 단기간에 분기가 가능하므로 전력수급에 차질 최소화
- 현재 발전사들이 계획 중인 시설전면 교체(총 700~800억원 소요)보다 비용효율적(400억원 내외)이면서도 저감 효과 측면에서 우수한 기술을 확보·적용
 - ※ 충남도청 및 발전사에서 적극적인 참여의사를 보이고 있음(매칭 참여, 공동연구 및 실증 등)

[6] 기대 효과

- 발전, 제철, 시멘트 등의 대형사업장 및 영세 중소사업장으로부터 배출되는 초미세먼지 및 SOx, NOx의 미세먼지 원인물질을 원천적으로 저감할 수 있는 기술수단을 제공함으로써 2023년까지 2016년 대비 미세먼지 배출을 1/2 수준으로 저감

- 개발 기술의 실증화를 통해 석탄화력발전소의 미세먼지 발생에 대한 국민 우려를 불식시키는 대국민 홍보 효과용으로 적극 활용
- 국내 사업장 실증 경험을 바탕으로 중국, 인도, 몽골 등 미세먼지가 사회문제로 되고 있는 아시아 국가의 환경시장 진출 가능
- 실규모 실증연구를 통해 개발기술의 상용화 및 사업화 촉진을 통한 고용창출
- 국제 환경규제 충족으로 국가주력산업의 제품 수출 시 무역 제약사항 해결 및 국내 기업으로 핵심기술 이전을 통한 국익 창출
- 대·중소 사업장 초미세먼지 문제를 비용 효율적으로 해결할 수 있는 기술개발 및 확산을 통해 산업 부문의 미세먼지를 효과적으로 저감
- 대용량 발생원의 미세먼지 및 2차 전구물질 대응 원천/실증 기술 확보
- 굴뚝으로 배출되는 미세먼지농도를 획기적으로 저감하여 국내 집진기술을 세계 최고 수준으로 격상

3.3.3.2 전략과제6: 비산먼지 발생 저감 기술

[1] 개요

- (비산먼지 기여도) 2012년 대기오염물질 배출량 연보에 따르면, 수도권(서울, 인천, 경기도)에서 배출되는 먼지 중 비산먼지의 기여율은 총 부유분진의 88%, 미세먼지(PM₁₀)의 71%, 그리고 초미세먼지(PM_{2.5})의 32% 수준으로 매우 높음
 - ※ 서울시의 경우, 전체 미세먼지의 40% 이상을 도로 비산먼지가 차지함
- (비산먼지 특징) 비산먼지는 다양한 원인에 의해 발생하는데 주로 차량의 운행에 의한 도로비산먼지, 건설현장에서의 비산먼지, 분체형태 물질의 하역 및 야적 시 발생하는 비산먼지 등으로 구분됨
 - 도로 비산먼지는 차량 배출 매연, 도로면의 마모입자, 그리고 차량의 타이어와 브레이크 마모입자, 주변에서 유입된 흙먼지가 뒤섞인 상태로 존재하며, 도로에 쌓여 있던 먼지가 달리는 차량에 의해 다시 대기 중으로 확산되는 행태가 반복됨
 - 건설현장에서의 비산먼지는 건물해체, 발파, 터파기 공사, 대형건설장비 사용, 시멘트/콘크리트 작업 등 다양한 공정에서 발생하며 바람에 의해 주변으로 빠르게 확산됨
 - 이와 같이 비산먼지는 상시적으로 발생하기 때문에 발생원에서 직접적이고 실질적인 저감 노력없이 해결하기 어렵고, 특히 도심에서 발생하는 도로비산먼지 및 건설현장 먼지 문제를 해결하지 않고는 도시의 대기질 개선은 요원할 수밖에 없음
 - 일반차량 및 지하철 운행에 따른 도로비산먼지는 매일 천만명 이상의 이용객이 생활환경에서 근접 노출되고 비산먼지 성분의 위해성이 높기 때문에 보다 적극적인 저감대책을 시급하게 마련해야 함
- (비산먼지 저감 방안) 비산먼지를 포함한 대기오염물질은 대기 중으로 확산되기 이전에 발생원에서 저감하는 것이 가장 효율적임. 본 사업에서는 지상도로, 지하철도/터널, 건설현장에서 발생하는 비산먼지를 발생원으로부터 저감할 수 있는 기술개발을 통해 기존 대비 30% 이상 저감하고자 함

⇒ 일반인 노출빈도 및 위해성이 높은 비산먼지를 발생원에 근접하여 저감

※ 비산먼지 저감기술 목표 : '23년까지 도로, 지하철, 건설현장 비산먼지 각각 30% 저감

[2] 현황 및 필요성

□ 기존 도로 미세먼지 대책의 한계

- 정부와 지자체는 대기질 개선을 위한 다양한 정책을 시행하고 있으나, 도로 비산먼지 대책으로는 청소차 및 살수차를 이용하여 도로를 청소하는 것이 전부임. 서울시의 경우 2015년 기준 노면청소차 143대, 분진청소차 35대, 살수차 212대를 운영하고 있으나 도로 미세먼지 문제의 해결 대책으로는 턱없이 부족한 상황임
- 노면청소차는 도로변에 쌓인 쓰레기를 흡입처리하는 도시환경개선을 목적으로 사용되고 있어 쓰레기 흡입 시 노면에 쌓인 먼지들이 함께 흡입된 후 그대로 대기 중으로 배출되기 때문에 오히려 대기질을 악화시키는 요인이 되고 있음
- 최근 노면청소차의 일부에서는 물분사 방식 등을 적용하여 미세먼지를 제거하고자 하나 제거효율이 매우 낮고, 특히 미세먼지 관리가 더욱 필요한 겨울철에는 동파방지를 위해 이것마저도 사용을 못하고 있어 노면청소차가 오히려 대기질을 악화시키고 있는 실정임
- 분진청소차의 경우, 청소차 적재함에 필터를 설치하여 상시 운행함으로써 도로 미세먼지를 흡입하여 제거하도록 되어 있으나, 서울시에 겨우 35대만 운영되고 있고 앞으로 대폭 확대를 기대하기 어려운 상황임

□ 도로 비산먼지의 직접적 저감을 통한 대기질 개선 대책과 기술개발 시급함

- 도로 비산먼지 직접 제거를 위한 유일한 수단인 청소차가 향후 몇 년 내에 수 천대 수준으로 전격적으로 확대될 가능성은 없기 때문에 새로운 접근방식과 이를 구현할 기술적 수단이 시급히 필요함

□ 지하철도/터널 비산먼지 관리 현황 및 대책

- 국내 지하철 비산먼지 관리는 살수차 운영에 따른 철도 비산먼지 제거, 집진용 철도 차량 운행에 따른 먼지저감 방식이 적용되고 있으나, 운행회수가 매우 부족하여 실제 저감효과는 미미한 실정임
- 일반 지하철 운행차량에 철도비산먼지 저감/방지시스템을 적용하여 수 백대의 철도 차량이 비산먼지 저감차량으로서 기능을 담당할 수 있는 대책 필요

□ 국내외 건설현장 비산먼지 관리현황

- 외국의 경우 미세먼지를 측정하기 위한 다양한 센서가 개발되고 있으며, 건설현장에 적용하여 현장발생 미세먼지 및 대기오염물질의 모니터링에 활용하고 있음
- 배출억제기술로는 여과집진기, 전기집진기가 주를 이루며, IoT 및 AI 등을 이용한 미세먼지 예측 및 저감 등의 최신 기술개발은 아직 초기단계인 것으로 파악됨
- 국내는 현재 미세먼지의 측정, 배출원 분석 및 특성, 예·경보시스템, 인체영향 등의 기술에 대한 기초연구 위주로 수행 중이나, 도시의 미세먼지에 대한 근본적 대책을 마련할 수 있는 원천 및 핵심기술 확보 필요
- 국내 건설현장 비산먼지 저감기술로는 살수에 의한 저감방식이 주류를 이루고 있으며, 국소배기에 의한 저감기술도 일부 진행되고 있으나, 실질적인 저감효과를 기대하기

위해서는 사업별/공정별 대책과 함께 보다 체계적인 저감시스템 구축이 필요함

[3] R&D 현황 및 시사점

- 비산먼지 연구는 발생원별 비산먼지 발생현황, 배출량 산정과 관련된 연구가 환경부의 지원으로 이루어져 왔으나, 일반인에 대한 노출빈도가 높은 도로재비산 먼지를 실질적으로 저감할 수 있는 기술개발 연구는 매우 미흡한 실정임
 - ※ 비산먼지 배출자료 개선기술 개발, 2014년, 환경정책기반공공기술개발사업, 환경부
 - ※ 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산 먼지 실시간 측정방법 개발, 2008년, 국립환경과학원
- 자동차 타이어 마모에 의한 먼지발생 저감을 위한 저마모 친환경 타이어 개발 연구가 현재 환경부 친환경자동차기술개발사업으로 추진되고 있음
 - ※ 비산먼지 배출자료 개선기술 개발, 2014년, 환경정책기반공공기술개발사업, 환경부
- 한국철도기술연구원에서는 지하철 터널 내 비산먼지 측정 분석을 통해 터널 내 오염 Hot-Spot 구역에 대한 실태파악과 터널 비산먼지의 물리화학적 특성분석이 완료되어 이를 활용한 터널 저감기술 개발의 기반이 구축되어 있음
 - ※ 도시철도 터널 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발, 2014-2018, 국토부
- 한국과학기술연구원에서는 지하철 터널 비산먼지의 관성, 자성 특성을 이용한 집진 기술을 기반으로 전동차 부착형 집진장치를 개발하고 있음
 - ※ 전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발, 2014-2018, 국토부
- 서울메트로와 한국철도기술연구원에서는 지하철 터널 분진흡입차량 개발 연구를 수행하여 핵심기술 개발이 진행되고 있으며, '18년 목표로 상용화를 추진하고 있으나 청소차량 운행 가능시간(지하철 비운행시간)에만 제한적으로 사용함에 따라 전반적 비산먼지 저감에는 미흡
 - ※ 초미세먼지 제거차량 시스템 개발, 2014-2018, 국토부
- 한국건설기술연구원은 건설현장 비산먼지 측정을 위한 센서기술을 연구개발을 통해 보유하고 있으며, 건설 사업별/공정별/건설장비별 특성과 연관된 다양한 연구를 다년간 수행하면서 여러 특성별 미세먼지 발생원인 및 저감기술을 보유하고 있음

< 비산먼지 발생 저감 기술 관련 과제 현황 >



시사점

- ☞ 도로재비산먼지는 일반인에 대한 노출관점에서 중요성이 매우 높으나, 지자체의 도로청소행정외에는 저감기술개발에 대한 연구지원이 이루어지지 않아, 도심 공기질의 실질적인 개선 및 건강한 생활환경 조성을 위해서는 이에 대한 연구지원이 필요함
- ☞ 도로비산먼지 저감기술의 현실화를 위해서는 무동력 공기흡입기술, 공기저항 최소화 기술, 초미세먼지 집진기술, 기상조건 및 노면조건에 관계없는 운전안정성 확보기술, 차량 장착에 필요한 무게 최소화 및 내구성 확보기술, 포집된 먼지배출관리 등 사용자 편의성 향상기술 등 기술적 난이도가 매우 높은 기술 분야로 기술개발의 성공을 위해서는 미세먼지 저감 분야의 폭넓은 연구개발 및 기술상용화 경험이 요구됨
- ☞ 도로비산먼지 저감을 위한 국내 연구역량은 충분히 갖추어졌으나, 현재까지는 도로비산먼지에 대한 상대적인 연구개발 지원이 이루어지지 않음. 현재 지하철 및 도로터널에서의 비산먼지 저감연구가 진행되고 있어 해당 연구결과를 활용하여 연구성과를 극대화할 수 있는 추가적인 연구개발이 필요함
- ☞ 지상 도로에서의 비산먼지 저감 및 건설현장 비산먼지 제어 분야의 연구개발이 부족했던 만큼 이 분야에 대한 보다 적극적인 연구개발 지원이 필요한 상황임

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 도로 비산먼지, 지하철도/터널 비산먼지, 건설현장 비산먼지 30% 저감
- ※ '20-21년 핵심기술개발, 시제품 제작 및 성능평가
 - ※ '22-23년 적용 차량/철도 확대 등 실증연구를 통한 상용화
 - : 실증연구에서 저감기술 적용 전후 비산먼지 저감효과 30% 이상 달성

- (도로 비산먼지 저감) 도로 비산먼지를 직접적으로 제거하기 위해 본 연구사업에서 제안하는 방안은 도로에서 미세먼지를 발생시키는 자동차 자체를 미세먼지 집진기로 사용하는 것임
- 즉, 차량에 집진기를 설치하여 발생원에 최대한 근접한 상태에서 미세먼지를 처리하여 먼지제거 효과를 높이고자 하며, 집진기가 장착된 차량의 수를 대폭 확대함으로써 도시 미세먼지 저감의 실효성을 확보하고자 함

- 본 제안 연구에서는 우선적으로 대중교통수단과 도로청소차량에 시범 적용하는 것을 연구목표로 추진하고자 하나, 궁극적으로는 시민의 자발적인 참여를 유도하여 수도권 수십~수백만대의 차량에 집진기 장착운행을 목표로 함
- 도로 비산먼지 저감방안으로 시내버스와 같은 대형차량에 별도의 송풍기가 없이 무동력으로 구동 가능한 미세먼지 저감장치를 장착하고, 운행대수를 수천대 수준으로 대폭 확대하여 도심 미세먼지를 실질적으로 저감하고자 함
 - ※ 서울시의 경우 도로먼지저감 목적으로 2015년 기준 분진흡입차 35대를 운영 중이나 도로 미세먼지 문제를 해결하기에는 매우 부족함
- 무동력 집진장치의 장착을 통한 연비상승을 최소화하기 위해 공기저항을 최소화할 수 있는 저압력손실 집진기의 구조설계, 차량진행속도에 따른 차량풍 10~20 m/s 조건에서 저압력손실, 고효율 집진성능, 기상조건에 관계없이 안정적 운전 가능한 전천후 무동력 집진기술 개발
- 사용자 편의성 증대를 위해 유지관리가 용이한 차량장착 무동력 집진장치 개발
- 무동력 집진장치를 시내버스 수십대에 장착하여 시범적용 Living Lab을 통해 성능검증 및 기술완성도를 향상하고 최종적으로 개발장치의 기술사업화 기반 구축
- (지하철도/터널) 지하철 터널 내 차량운행으로 인해 발생하는 마모입자(브레이크, 휠-레일, 판토틀라프 마모 발생)의 효율적 저감방안은 마모입자 발생 시 저감하는 것이며, 이를 위해 운행차량에 장착하여 개별 소스를 저감하는 방향으로 기술개발 전략을 수립함. 단, 다만 유지보수 비용 최소화 기술개발이 요구됨
- 지하철 터널 구간의 특성(차량운행 횟수, 분기기 설치유무, 터널구조, 환기특성 등)에 따라 구간별로 다양한 오염특성이 나타나므로, 이를 바탕으로 터널 발생먼지 농도가 가장 높은 특정 노선을 선정하여 테스트베드를 구축하고자 함
- (건설현장) 도시 건설현장에서 발생하는 비산먼지 저감을 위한 사업별/공종별 저에너지 핵심기술 개발 및 시설물 생애주기 미세먼지 저감체계 마련을 통해 실질적인 저감효과 달성
- 현장실증을 통한 현장적용 신뢰성 확보 및 기술사업화를 추진하며, 기술개발에만 집중하는 것이 아닌 개발된 기술의 적용성을 높이기 위해 실제 건설현장에 적용하여 실증수행
- 개발 기술에 대한 지재권 확보 및 비즈니스 모델 도출을 통한 국내외 건설현장 비산먼지 저감시장 개척

[5] 세부추진 방안

□ 도로 비산먼지 저감을 위한 차량장착용 무동력 전천후 집진기술 개발

○ 핵심내용

- 도로 비산먼지 발생원인 도로 위에서 제거할 수 있도록 집진기를 장착한 수천~수만대의 차량을 활용하여 실질적으로 도로 비산먼지를 저감하고자 함
- 핵심 개발기술은 차량에 장착될 무동력 집진장치임
- 무동력 집진장치는 차량운행속도에 의한 차량풍이 집진기를 통과할 때 미세먼지를 제거하는 장치로서 집진성능외에 낮은 공기저항, 기상조건에 관계없이 작동하는 전천후 특성, 차량운행조건에 대한 내구성 등이 요구됨

○ 성능 목표 및 수준

- 차량장착 무동력 집진장치의 $PM_{2.5}$ 제거효율 50% 이상
- 차량장착 무동력 집진장치의 공기저항 30 mmH₂O 이하
- 무동력 집진장치 장착으로 인한 차량의 연비감소 5% 이하
 - ※ 집진기가 장착된 대규모 차량을 이용한 도로 비산먼지 제거방안은 국내외적으로 처음으로 시도되는 기술로서 현재 비교 가능한 대상 없음

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- 무동력, 전천후 집진장치 핵심기술 개발('20-'21)
- 실험실 규모 집진장치 제작 및 성능평가('20-'21)
- CFD를 이용한 집진장치 공기저항 최소화 설계('20-'21)
- 집진장치 무게 최소화 및 내구성 확보를 위한 재질 및 구조설계('20-'21)
- 시내버스 대상 무동력 집진장치의 시제품 개발 및 실차적용('22-'23)
- 실차적용 확대 및 Living Lab을 통한 상용화 기반구축('22-'23)
- 서울시 등 지자체 협조체계 확보를 통한 실차적용('22-'23)
- 실차 장기간 적용을 통한 성능평가 이후 기업체 기술이전 추진



< 무동력 집진장치 장착 차량 확대를 통한 도심 미세먼지 저감 개념도 >

□ 지하철도/터널 저에너지 미세먼지 저감기술

○ 핵심내용

- 매일 수백만명의 일반인이 이용하는 지하철 및 터널에서 열차운행에 의해 발생하는 비산먼지를 효과적으로 저감할 수 있는 미세먼지 저감기술 개발
- 철도차량을 활용한 저에너지형 미세먼지 저감기술 개발

○ 성능 목표 및 수준

- 지하철/터널 저에너지 초미세먼지 저감성능 목표
: 지하철/터널 비산먼지 30% 저감
: 저비용, 유지보수 용이한 초미세먼지 제거효율 90% 이상 저감장치 개발

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- ('20-'21) 지하철 및 터널 발생 먼지특성을 고려한 저에너지 $PM_{2.5}$ 저감 시스템 개발
 - ※ 저에너지 $PM_{2.5}$ 저감장치 적용 전동차 운행 시 유동특성 해석
 - ※ 철도차량 적용 $PM_{2.5}$ 저감장치 시제품 개발 및 실차적용을 통한 성능검증
- ('22-'23) 저감장치 적용 전동차 실증화 확대
 - ※ 1개 이상 지하철 노선 및 100량 이상 전동차 적용을 통한 기술실증화



< 지하철도/터널 저에너지 미세먼지 저감장치 적용 개념도 >

□ 건설현장 비산먼지 저감기술

○ 핵심내용

- 건설현장 내 미세먼지 대응 사업별/공종별 미세먼지 저감 핵심기술 개발 및 공사현장 생애주기 미세먼지 대응체계를 구축하여 건설현장 미세먼지 30% 저감

○ 성능 목표 및 수준

- 건설현장 미세먼지 저감시스템 구축 전후 주변 비산먼지 농도 비교 평가
- 건설현장 비산먼지 저감목표 : 기존 대비 30% 저감

○ 세부 연구내용 및 연구방법

- ('20-'21) 사업별/공종별 미세먼지 발생원인 규명 및 저감 핵심기술 개발
 - ※ 기초공사, 도로/터널/교량공사, 건축물공사 등 사업별 특성에 따른 저감기술개발
 - ※ 공종별 투입자재 및 공법에 따른 미세먼지량 측정 및 차단·저감기술 개발
 - ※ 건설장비별 미세먼지 발생원인 및 저감방안 연구 수행
 - ※ 건설현장의 생애주기 단계의 미세먼지 배출계수 평가기술 개발
- ('22-'23) 건설현장 비산먼지 실증화 및 사업화 기반구축
 - ※ 고정형 저감장치 : Air capture, 흡착제/광촉매 이용 건설현장 펜스
 - ※ 이동형 저감장치 : 석조공, 콘크리트 절삭/그라인딩, 모르타르 믹싱, 발파 작업 등에 적용
 - ※ 수도권 건설현장 수 곳을 선정하여 개발된 저감기술 실증화를 통한 사업화 기반 구축



< 건설현장 비산먼지 저감기술 적용 개념도 >

[6] 기대 효과

- 서울시의 경우 비산먼지가 대기 중 미세먼지 농도에서 차지하는 비율이 매우 높고 천만명 수준의 일반인들이 매일 노출되는 생활환경이라는 점에서 도로 비산먼지의 중요성이 매우 높음. 따라서 도로 비산먼지 저감을 위한 차량용 무동력 집진장치가 성공적으로 개발되어 수천대 수준의 차량으로 확대될 경우 도심 미세먼지 문제 해결에 실질적으로 기여할 수 있을 것으로 예상됨
- 지하철도/터널 미세먼지도 시민생활에 직접적인 영향을 주기 때문에 기술개발을 통해 지하철도 미세먼지 저감기술이 적용될 경우 미세먼지로 인한 국민 피해를 줄이는데 기여할 것으로 예상됨
- 건설 관련 발생 미세먼지 저감 핵심기술 개발을 통해 미세먼지 농도를 30% 이상 저감하고, 고령화 시대에 대비하여 건강복지를 향상하여 쾌적한 국민 삶의 질 제 공
- 전 세계적으로 심각한 문제를 초래하는 미세먼지의 저감을 위한 핵심 기술을 선 제적으로 개발하여 미래기술 선도 및 해외시장 선점 가능
 - 미세먼지 저감을 통해 국민건강 증진에 따른 의료비 지출 감소와 노동생산성 증가, 농작물 수확 증대 등으로 국내총생산(GDP)의 증가가 예상됨
- 초지능(IoT 및 AI)기반 미세먼지 저감 핵심기술 개발을 통해 건설 관련 다양한 미세먼지 발생원을 제거하거나 저감함으로써 작업자 및 국민 안전에 기여하여 사회적 안전망을 구축하는 효과

3.3.4 [제4세부사업] 국민생활 보호·대응 기술

□ 중점 목표

국민 생활환경에서 노출되는 미세먼지 노출을 50% 이상 저감하고, 실외, 실내 미세먼지의 구성성분 및 배출원별 건강영향 평가에 기반한 개인 맞춤형 통합정보 제공을 통해 실질적 국민생활 보호에 기여함

□ 전략과제 및 도출근거

현황 및 문제점	과제를 통한 해결방안	전략과제
- 노출피해 저감 측면의 생활환경(주택, 교통수단, 상업시설 등) 내 미세먼지 대응 방안 미흡 → 법적 기준치 수준 미흡 및 비관리 대상, 관련 적용기술 개발 및 기술수준 미흡 - 기존 공기정화장치의 유지관리 대응기술 미흡 → 다양한 기능 또는 필요 이상의 성능으로 공기정화장치의 고가화 및 필터 등 소모품의 유지관리 비용 증가 - 미세먼지 저감효율을 높이기 위하여 가전(공기청정기, 에어컨, 진공청소기)용 정화장치에 HEPA필터, 정전필터를 사용하고 있지만, HEPA필터는 유리섬유로 구성되어 있고, 정전필터는 성능저하의 문제가 있음 - 대중교통차량 실내공기질 관리 미흡 - 미세먼지 권고기준 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (버스) 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (지하철) - 주택 내 효율적 미세먼지 관리방안 부재 - 어린이집, 노인시설 등 건강취약집단의 실효성 있는 관리방안 미흡 - 프리필터 수준으로 관리 미흡	- 생활환경 내 미세먼지에 대한 이용자의 실질적 노출저감 방안 도출 → 오염원 저감이 아닌 노출저감 측면에서 국민 노출 수준을 낮추는 기술적 해결방안 도출 - 기존 공기정화장치 대비 가격 50% 미만의 보급형 정화장치 개발 → 미세먼지 저감 성능만을 확보하고 필터의 세척 및 원활한 재사용과 낮은 유지관리비 차원의 기술 개발 - 취약계층(어린이, 노약자, 환자)의 생활공간에서 활용하기 위한 가전제품에는 HEPA급 필터 성능의 기능성 신소재 나노필터 개발이 요구됨 - 대중교통 위치기반 대기오염 공공 데이터를 활용한 지능형 실내공기질 관리기술 적용을 통한 차량 내 대기 수준 이하 (초)미세먼지 농도 달성 - 어린이집, 노인요양시설, 주택 내 후드, 공기청정기, 창문, 환기시설 등의 통합적 관리를 통한 실내 미세먼지 관리	[전략과제7] 생활환경 미세먼지 노출 저감기술 개발 및 실증
- 기존 미세먼지 건강영향평가는 전체농도(total mass) 위주로 수행하고 미세먼지 구성성분 및 배출원에 따른 건강영향 평가 및 기전 이해 부족 - 실내 미세먼지 노출로 인한 건강영향 평가 부족. 실내 미세먼지 영향평가 기술은 세계 수준 대비 70% 수준 - 미세먼지 특화 독성 평가 기술 부재 - 미세먼지 화학적 구성성분의 사공간적 분포 측정 및 평가 부족. 세계 기술 수준 대비 50% 수준 - 미세먼지 오염원별 개인노출평가 부족. 세계 기술 수준 대비 50% 수준 - 노출평가 바탕 개인노출 예측모델 부재. 세계 기술 수준 대비 50% 수준	- 미세먼지 구성성분 및 배출원 건강영향에 대해 노출독성역학 통합적 분석을 통한 인체위해성 및 기전 평가 - 코호트 이용 실내 미세먼지 노출 측정 및 건강영향 평가 수행. 실내 미세먼지 영향평가 기술은 세계수준의 95% 도달 - 미세먼지 위해성 분석을 위한 미세먼지 초고속 독성평가 기술 개발 - 미세먼지 모니터링/분석을 통한 국내외 미세먼지 화학적 구성성분의 사공간적 평가 기술 및 DB 구축. 세계수준의 95% 도달 - 미세먼지 오염원별 개인노출평가 시스템 구축. 세계수준의 95% 수준 도달 - 한국형 '(초)미세먼지 개인노출 모델' 개발. 세계수준의 95% 도달	[전략과제8] 미세먼지 건강영향 평가

현황 및 문제점	과제를 통한 해결방안
- 현재까지 미세먼지 관련하여 국민에게는 공간별(실외, 실내 등) 생산된 측정결과 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 위주로 제공되어 국민들이 실질적으로 체감할 수 있는 정보가 주어지지 못함. - 다양한 부문별로 생산된 초미세먼지 정보들을 무분별하게 이용자들에게 제공함으로써 미세먼지에 대한 국민들의 오해와 혼란을 야기하고 있음. IoT 접목 미세먼지 관리기술 세계수준 대비 50% 수준 - 이해당사자 그룹별로 초미세먼지 유해성 정보에 대한 이해수준의 불일치가 있음. 미세먼지 정보 환경내비 기술 세계수준 대비 50% 수준	- 미세먼지 관련 정보 통합 관리 시스템을 구축하여 부문별 생산된 측정결과와 유해성 정보, 배출원 정보, 기여도 정보, 저감장치에 대한 정보를 통합하여 관리함으로써 국민 실생활 체감형 미세먼지 정보를 제공하는 시스템을 구축함(예: 동네별 미세먼지 오염위해도 정보 실시간 제공 등). - 미세먼지 관련 정보이용자(일반인/기업인)의 고유 목적에 부합하는 미세먼지 정보를 제공하는 IoT 접목 스마트 미세먼지 정보관리 시스템을 구축함. 미세먼지 관리기술 세계수준 대비 90% 도달 - Risk communication 기능을 강화한 미세먼지 관련 정보 통합관리 시스템 구축을 통해 개인 주변의 미세먼지 오염도 및 위해도를 실시간으로 알려주는 환경내비를 실현함으로써 이해수준 불일치를 해결하고, 미세먼지 정보 환경내비 기술 세계수준 95% 도달

전략과제
[전략과제9] 개인 맞춤형 초미세먼지 정보 서비스 플랫폼 구축

3.3.4.1 전략과제7: 생활환경 미세먼지 노출저감기술 개발 및 실증

[1] 개요

- 다양한 실제 생활환경(주택, 대중교통, 지하공간, 상업시설 등)에서 노출될 수 있는 미세먼지 노출을 50% 이상 저감하고, 이에 대응하기 위한 생활밀착형 미세먼지 노출 저감기술의 개발 및 실증

※ 취약계층 대상 실내 미세먼지 저감 필요

- 주택 미세먼지 관리기술 개발로 미세먼지 노출을 50% 이상 저감
 - 주택 내 가전기기에 보급형 고분자 HEPA급 필터의 편리한 사용 추진
 - 실내 가전기기의 통합적인 관리 제어에 의한 효율적인 주택 미세먼지 저감 필요

※ 미세먼지 유지기준 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준

- 생활환경에서 초미세먼지 노출을 50% 이상 저감하기 위한 기능성 고분자 나노섬유필터 및 고효율 보급형 착용형 정화장치 개발 및 상용화
- 생물성 연소공정에서 발생하는 미세먼지 제어에 의해 미세먼지 오염원의 관리
 - 생물성 연소과정에서 발생하는 유증기, 유기 초미세먼지, 수용성 악취 제거를 위한 필터/무필터 정화 기술 확보 및 시스템 구축과 실증

※ 장수명 필터 및 무필터 기반의 연소 작업환경 배출 미세먼지와 악취 동시 저감 기술

- 버스, 지하철 등 대중교통차량 실내 미세먼지를 저감함으로써 쾌적한 대중교통 환경을 조성하여 국민 생활환경 개선에 기여함
 - 대중교통차량에 적합한 필터, 공기조화 기술의 개발 및 적용

※ 미세먼지 권고기준 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (버스) $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (지하철)

- 지하 생활공간에 유입되거나 자체 발생되는 미세먼지의 효율적인 저감으로 미세먼지 프리존(PFZ)을 구축할 수 있게 함
 - 지하공간 미세먼지 저감에 적합한 공조환기설비의 설계 기술 및 필터링 기술의 최적화가 필요함

[2] 현황 및 필요성

□ 현황

- 미래창조과학부 실내공기청정융합연구단(2009-2014)에서는 마이크로 및 나노 구조를 갖는 하이브리드 타입 공기청정 필터제조 원천기술을 개발한 바 있으며, 이로부터 고효율 공기정화 성능 및 저차압 필터성능을 확보하였으나, 보급형 공기정화장치 개발을 위한 상용화 연구는 미흡
- 동 사업단에서 주택 내 벽지 등에서 실내오염물질을 제거할 수 있는 기능성 실내건축 내장재 원천 기술을 확보하였으나, 실제 적용처에 대한 적용 및 실증 기술 미흡
- 건물내 공조시스템의 경우, 에너지 저감형 능동 환기기술개발은 많이 이루어져 있지만, 지하공간과 같이 다수의 출입구를 갖고 있는 반개방형 공간에 대한 실내외 미세먼지 농도를 고려한 환기/공조기술 개발은 미흡
- 지하철 차량 내 미세먼지(PM₁₀)와 이산화탄소 동시 저감 기술의 경우 국가연구개발 사업으로 개발되어 상용화에 성공하였으나, 초미세먼지 저감효율이 낮고 실내외 공기질 상태와 관계없이 운전자의 판단으로 가동되는 한계점이 있음
- 지하역사 공조환기설비에 대한 부분적 개보수 기술개발이 진행되고 있으며 이를 통해 승강장 급배기량 불균형 문제 해소 및 외부 공공 데이터를 활용한 환기 제어 알고리즘 핵심기술을 확보하였으나, 실내공간 초미세먼지 정화기술 개발은 미흡
- 초미세먼지 고농도 배출 환경인 생물성연소에서의 집진기술에 대한 국가연구개발사업으로 원천요소기술이 일부 확보되었으나, 요리 시 배출되는 고점도 초미세먼지와 수용성 악취 등 가스상 오염물의 동시처리, 유기 대응 필터 및 전기 집진/하이브리드 등의 다목적 시스템의 설계/제작/배치의 통합적인 최적화 기술

은 부재

- 노출피해 저감측면의 생활환경(주택, 교통수단, 상업시설 등) 내 미세먼지 대응 방안 미흡, 법적 기준치 수준 미흡 및 비관리 대상 관련 적용기술 개발 및 기술수준 미흡
- 다양한 기능 또는 필요 이상의 성능으로 공기정화장치의 고가화 및 필터 등 소모품의 유지관리 비용 증가
- 미세먼지 저감효율을 높이기 위하여 가전(공기청정기, 에어컨, 진공청소기)용 정화장치에 HEPA필터, 정전필터를 사용하고 있지만, HEPA필터는 유리섬유로 구성되어 있고, 정전필터는 성능저하의 문제가 있음

□ 필요성

- 미세먼지 오염 개선을 통한 국민의료부담 경감 및 국민 삶의 질 향상
- 미세먼지 문제 위기를 기회로 삼아 국민 건강을 지키는 기술 개발을 통해 청정 공기 신산업 시장을 창출할 필요가 있음
- 실내 가전 공기정화 시장의 경우, 적용기술의 성능보다는 가격경쟁력이 핵심 요소이기 때문에 연구개발된 기술의 시장진입 및 확대를 위해서는 고성능 저비용 동시 달성 가능한 기술개발이 필요함
- 실외뿐만 아니라 실내에서 발생하는 초미세먼지의 제거를 위하여 창틀 사이에 개폐 및 탈부착이 가능한 새로운 자연환기 방법이 필요함
- 자연환기를 통한 무전력 투명 창호형 필터 개발을 위하여 필터 효율 개선 및 마이크로 구조 형성의 새로운 공정 개발이 필요함
- 기존에 사용하는 여과식 필터 소재는 초미세먼지를 효율적으로 포집하기 어려우며 압력손실을 충분히 고려해야 하기 때문에 기계식 환풍을 위한 에너지 소모량이 매우 크고 사용함에 따라 증가되는 문제점이 큼. 따라서 전기하전 방식을 이용하여 조리 시 발생하는 초미세먼지를 고효율로 포집하는 전극 소재 및 효율적 송풍 시스템의 개발을 통해 미세먼지 피해를 최소화하면서 환기를 통한 에너지 과잉 소비를 최소화시킬 필요가 있음
- 생물성 연소 시 특유의 고점도 초미세먼지와 악취 등의 기상 오염물이 고농도로 발생되므로 이의 동시처리, 고점성으로 인한 포집 후 처리, 소형화를 위한 하전/

전기집진과 발유/장수명 나노필터 등의 생물성 연소에 특화된 핵심 요소기술과 설치 최적화 시스템 기술 등이 필요함

[3] R&D 현황 및 시사점

□ 유관 대기환경 분야 R&D 현황

- 2015년 생활환경 미세먼지 대응 관련 대기환경 분야 R&D 연구비는 총 53.0 억원(환경부 19.0억원, 미래부 8.9억원, 국토부 25.1억원)이며, 2015년 진행 과제(신규, 계속)는 15개(미래부 5개, 환경부 5개)임
- 생활환경의 미세먼지를 해결하기 위한 과제는 주택, 건물공간 내를 타깃으로 하여 기술들이 개발되고 있으며, 대중교통, 지하공간, 실내 상업시설에 대한 대응기술 개발과 시스템적인 접근은 아직 이루어지지 않고 있음. 또한, 필터나 마스크 등의 생활환경 저감기술 개발이 산발적으로 진행되고 있음

< 생활환경 미세먼지 노출저감 기술 관련 과제 현황 >



□ 진보성과 차별성

- 현재 우리나라의 공기청정기 사용면적으로 환기 1회/hr 조건에서 주어진 공간의 먼지를 10분에 1/2로 저감시키는 능력을 나타내고 있으나, 이는 30 m³의 시험챔버에서 결정된 것으로 실제 현장에서의 사용 용량으로 적정한지에 대한 사례가 거의 없고, 건강취약집단의 경우 환기와 연계된 보다 높은 수준의 적용방법이 요구되므로, 기존의 단순한 공기청정기 유무에 따른 특정 공간의 농도 저감 특성 연구보다 진보성이 우수함
- 하루 천만명 이상의 일반 국민이 이용하는 대중교통차량의 경우, 운전자의 판단으로 차량 공조 및 환기설비를 가동하는 것은 안전운행에 방해되는 요소임. 이에 외부오염상태를 차량위치에 따라 수신받는 대기오염 공공데이터, 교통정보 등을 종합적으로 판단하고 이에 따라 차량의 환기 또는 정화를 자동으로 가동하는 진보적 기술임
- 지하공간 미세먼지 프리존(PFZ)은 지하공간이 항상 미세먼지에 오염되어 있다는 국민들의 고정관념을 타파할 수 있는 실증사업으로 지하 기류분포 특성과 열차풍 등을 활용한 자연환기설비 구축과 기존 공조설비의 초미세먼지 대응 기능 추가를 통해 최소의 유지관리비로 지속가능한 미세먼지 프리존 구축이라는 차별성을 가짐
- 주방 연소공정 배출 미세먼지는 대표적인 공기청정기 가혹 운전조건(유증기 배출, PM_{2.5}, PM_{1.0}, PM_{0.5} 고농도 배출)에 해당되며, 주부 및 실내 체류자의 건강보건 증진을 위해 적용 가능한 초미세먼지/수용성 악취 동시 정화기술을 소자 설계 및 제조에서 시스템 설계 및 제작, 배치 최적화까지 통합 원천기술개발을 세계 최초로 시도함
- 생물성 연소배출 기상/고상 오염원 동시저감 기술은 세계 최초로 시도하는 단계임. 유관 국가연구개발사업으로 유일하게 ‘무필터 초미세먼지 정화기술’이 3년(총연구비 6억원)으로 현재 진행 중이며, 응축성장 및 관성충돌을 이용한 미세먼지 제거 기술을 일부 확보하였음. 그러나 일반적인 미세먼지 제거를 목적으로 하여 생물성 연소 특유의 고점도 초미세먼지와 악취 등 동시 저감과 후처리, 장치 소형화를 위한 옵션 기술, 실제 적용을 위한 덕트 배치 최적화 시스템 기술 등의 통합 원천기술개발로 이어질 경우 기술의 연속성과 시너지를 극대화할 수 있음

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 다양한 실제 생활환경(주택, 대중교통, 지하공간, 상업시설(고기구이, 어린이집 등)에서 노출될 수 있는 미세먼지 노출을 50% 이상 저감하고, 이에 대응하기 위한 생활밀착형 미세먼지 노출 저감기술의 개발 및 실증
- ※ (1단계) 주택, 고기구이 주방의 공기질 개선을 위한 원천기술 개발 → (2단계) 다양한 실내환경 전용의 상용화 기술 개발 → (3단계) 다양한 실내환경에 적용하여 공기질 개선에 활용하고 실증함



< 국민생활보호를 위한 생활환경 미세먼지 노출저감 기술 개발 및 실증 >

- 취약계층 대상 현행 노출저감기술 평가 및 필요 저감 기술·수준 도출
 - 초미세먼지 취약계층인 영유아, 노인 등을 대상으로 현재의 실내 공기정화기 기술인 공기청정기, 환기 및 주방 후드 등에 대한 노출저감 특성을 평가함
 - 취약계층의 실내활동을 고려하여 공기청정, 환기 및 주방 후드 등 적정 운전 조건을 산정함
 - 이를 통해 취약계층 대상 실내 미세먼지 저감기술(공기청정기/창호용 저가형 필터 등) 개발의 정량적 목표를 설정함
 - 취약계층 대상 실내환기 및 공기청정기 운영/유지/관리의 체계적인 지침을 마련함
- 공기정화 가전(진공청소기/에어컨/공기정화기)용 HEPA급 기능성 고분자 나노 섬유필터 및 보급형 정화장치 개발

- 주택 내 안전한 거주를 위한 초미세먼지 저감/기술 수준 도출
- 실내 생활환경에서 초미세먼지 노출을 50% 이상 저감하기 위한 고효율 보급형 필터 및 정화장치 개발
- HEPA 필터급(제거효율 99.97%, 차압 12.5-25.4 mmH₂O) 기능성 고분자 나노섬유필터 실증
- 고효율 보급형 착용형 초미세먼지 정화장치 개발
 - 생활환경에서 초미세먼지 노출을 50% 이상 저감하기 위한 기능성 고분자 나노섬유 필터 및 고효율 보급형 착용형 정화장치 개발 및 상용화
- 주방후드 결합형 초미세먼지 집진시스템 개발
 - 재사용 가능한 주방용 미세먼지 제거 필터와 주방후드 결합형 초미세먼지 집진시스템 개발
- 실내공간 초미세먼지 관리를 위한 창호형 초미세먼지 정화장치 개발
 - 무전력의 자연환기 시스템을 통한 실내공기 정화를 위해 미세먼지 제거효율이 94% 이상인 투명 창호형 초미세먼지 정화장치 개발
- 생물성 연소 실내 공기질 개선 기술 개발
 - 생물성 연소를 이용하는 상업시설(직화구이 등)에서 고농도로 배출되는 고점착성 유기 초미세먼지와 기상의 악취와 유증기에 대한 대응기술을 다양화하고 실증 성능 개선을 위한 통합시스템 기술을 확보함
 - 장수명형 필터식/하전기반의 무필터식 기상-고상 동시저감 원천기술과 공기연령을 고려한 정화장치-부속장치-배치 통합 최적화 수행
- 지하철/버스별 저감 시스템 개발
 - 대중교통차량(버스, 지하철)에 대한 지능형 실내공기질 관리시스템을 장착하고 실기 현장에서 실증 평가를 수행함
- 공공장소 미세입자 프리존(PFZ) 실증
 - 지하공간 미세먼지 프리존(PFZ) 실증 구축을 통해 평상 시 ‘국민체감형 청정공간’ 제공, 외기오염 시 ‘취약계층(민감군) 대피공간(shelter)’ 기능을 수행함
- 주택의 미세먼지 관리기술 개발
 - 주택 내 초미세먼지 저감제어 통합관리 실증 및 필터 표준화
- 차량/지하공간 청정환기기술 개발
 - 대중교통수단 이용 시 노출시간이 많은 차량과 지하역사에 대해 환기 및 공기정화 제어기술을 개발하여 대중교통 이용객의 실제 미세먼지 노출량을 저감시킴
 - 차량 및 지하공간의 설치공간의 제약과 유지관리의 어려움을 극복할 수 있는 콤팩트

형 및 저유지비용의 초미세먼지 정화기술을 개발함

□ 오염정보기반 지능형 관리시스템 개발

- 통신 위치정보를 활용하여 대기오염정보(공공데이터) 활용 외기오염 정보를 파악하여 외기 유입·차단 여부를 결정함
- 실내외 오염정보를 이용하여 신선한 외부공기를 도입하고 오염된 공기유입은 차단하며 내부 오염물질을 정화시키는 지능형 청정 공조환기설비를 개발함

[5] 세부추진 방안

□ 고효율 보급형 착용형 초미세먼지 정화장치 개발

- 개요
 - 초미세먼지 발생장소와 직접 접하는 국민(헬멧형 실외용, 연기 발생지역, 초미세먼지 작업자)을 위해 초미세먼지를 고효율로 제거하고, 호흡하기 편하며 착용 시 불편함이 없는 착용형 저차압 고분자 나노섬유필터 정화장치 개발
- 목표
 - 생활환경에서 초미세먼지 노출을 50% 이상 저감하기 위한 고효율 보급형 착용형 정화장치 개발 및 상용화
 - 고효율, 저차압, 기능성 고분자 나노섬유필터 개발 및 상용화
 - 헬멧형, 방연용, VOC 차단용 착용형 정화장치 실증
 - 맞춤형 기능성 고분자 나노섬유 제조장비 개발
- 연구내용
 - 고효율, 저차압 기능성 고분자 나노섬유필터 원천기술개발
 - 천수/소수 구조의 고분자의 특성 차이에 의한 기능소재 필터 연구
 - 다공성 나노섬유를 갖는 고분자 필터 개발
 - 헬멧형 초미세먼지 정화장치 개발 및 상용화
 - 고효율, 저차압 고분자 나노섬유필터의 모듈화 설계 및 제조용 금형 설계
 - 방연용 착용형 정화장치 개발 및 상용화
 - 난연성을 갖는 연기 차단 하이브리드 필터 소재 연구
 - VOC 차단 착용형 정화장치 개발 및 상용화
 - VOC를 효과적으로 흡착/분해하는 나노기공 나노탄소섬유 생산 연구
 - 맞춤형 기능성 고분자 나노섬유 제조장비 개발

- 고효율, 저차압 필터용 대용량 기능성 고분자 나노섬유 제조장비 연구 및 대량생산 실증
- 기능성 초미세먼지 필터 친환경 제조를 위한 무용매 용융 방식 생산장비 개발
- 기능성과 생산성을 동시에 갖는 고분자 나노섬유 생산장비 개발

□ 주택 미세먼지 관리기술 개발

- 건강취약집단의 미세먼지 노출저감을 위한 공기정화 가전 최적 적용기술 개발
- 실내 가전용 저차압 기능성 나노섬유필터 및 보급형 정화장치 개발
- 요리 배출 고점도 초미세먼지 제어기술 개발
- 실내/외 미세먼지 농도 센서 기능을 적용한 가정용 스마트 환기시스템 개발
- 초미세먼지 감지기반 저에너지 소비형 건강공기 관리 시스템 개발 및 보급



□ 실내 가전용 저차압 기능성 나노섬유필터 및 보급형 정화장치 개발

○ 개요

- 저차압 고효율 저가 보급형 필터로 실내 가전용 필터의 교체 비용 저감 및 실내 미세먼지 2차 오염 방지, 세척 가능한 프리필터와 하이브리드 HEPA급 필터 조합, 재사용 가능한 장수명 필터로 경제적 부담 저감 및 초미세먼지 프리 실내환경을 조성함

○ 목표

- 실내 생활환경에서 초미세먼지 노출을 50% 이상 저감하기 위한 고효율 보급형 필터 및 정화장치 개발
- 보급형 저차압 고효율 나노섬유 소재 및 필터 개발 및 상용화
- 기능성 장수명 나노섬유 필터 개발 및 상용화
- HEPA 필터급(제거효율 99.97%, 차압 12.5-25.4 mmH₂O) 고분자 나노섬유 필터 실증
- 저가 고효율 고분자 나노섬유 생산장비 상용화

○ 연구내용

- 주택 내 초미세먼지 저감/기술 수준 조사 및 필요 수준 도출
- 공기정화 가전용(에어컨, 공기청정기, 진공청소기, 가습기) 및 착용형 기능성 고분자 나노섬유 필터 및 정화장치 개발
- 저차압-저가형 섬유 필터 개발
- 세척 가능한 프리필터와 하이브리드 HEPA 기술 조합으로 필터 교체주기 연장 기술
- 창호형 무전력 투명 미세먼지 집진필터 및 정화장치 개발
- 기존 공기정화장치 대비 가격 50% 미만의 보급형 정화장치 개발 → 미세먼지 저감 성능을 확보하고 필터의 세척 및 원활한 재사용과 낮은 유지관리비 차원의 기술 개발
- 세척 가능한 주방후드 결합형 초미세먼지 집진시스템 개발
- 저차압 고효율 고분자 나노섬유필터 원천기술개발
- 나노섬유의 나노구조에 의한 공기의 미끄러짐 효율 향상 연구
- 나노 섬유 기능 제어 연구
- 기능성 장수명 고분자 나노섬유필터 개발
- 기계적 특성이 우수한 소재의 나노섬유 필터화에 의한 장수명 필터 연구
- 기계적 특성이 좋은 고분자 합성 기술 개발
- HEPA 필터급 기능성 고분자 나노섬유필터의 개발
- 가전에 적합 초미세먼지 필터 구조화 및 기능성 다공성 나노섬유 필터
- 저가 보급형 HEPA급 고분자 필터 상용화 기술 개발

- 세척 가능한 프리필터와 하이브리드 HEPA급 필터 조합으로 필터 교체주기 연장 기술 개발
- 가전용 보급형 고분자 나노섬유필터 상용화 및 실증
- 기능성 고분자 나노섬유필터를 활용한 초미세먼지 정화장치 실증
- 저가 고효율 나노섬유 생산장비 상용화

□ 실내공간 미세먼지 관리를 위한 창호형 초미세먼지 정화장치 개발

○ 개요

- 저가 창호용 미세먼지 저감 고분자 나노섬유필터를 보편화하여 무전력 자연환기 방식으로 실외 초미세먼지 유입을 효과적으로 차단하고, 실내 초미세먼지를 정화함으로써 노출량을 감소시켜 취약계층의 건강을 보호하고 삶의 질 증대

○ 목표

- 주택의 실내 미세먼지 제어 및 저감을 통해 국민들의 미세먼지 노출량 감소
- 무전력의 자연환기 시스템을 통한 실내공기 정화를 위해 미세먼지 제거효율이 94% 이상인 투명 창호형 초미세먼지 정화장치 개발
- 창호형 실내 미세먼지 자동 관리 정화장치 개발
- 실내/외 미세먼지 농도 센서 기능을 적용한 가정용 스마트 환기시스템 개발

○ 연구내용

- 고분자 나노섬유필터 포집효율 향상을 위한 원천기술 개발
- 고분자 주사슬 및 곁사슬에 dipole moment가 높은 분자를 도입하여 포집효율 향상
- 다양한 환경(열, 화학물질 및 자외선)에 대해 내구성이 높은 고분자 소재 개발
- 높은 기계적 강도를 갖는 다공성 고분자 나노섬유 소재 개발
- 창호형 실내 미세먼지 자동 관리 플랫폼 구축
- 실내외에 설치된 센서 IoT를 활용한 창호형 초미세먼지 정화장치 관리
- 초미세먼지 감지기반 저에너지 소비형 건강공기 관리 시스템 개발 및 보급

□ 주방후드 결합형 초미세먼지 집진시스템 개발

○ 개요

- 음식 조리과정에서 발생하는 주방 미세먼지를 효율적으로 제거할 수 있는

필터를 개발. 실내 주방에 직접 적용 가능한 미세먼지 집진 정화장치 개발. 실내 주방설비시스템 개발로 국가경제와 국민건강에 이바지함

○ 목표

- 재사용 가능한 주방용 미세먼지 제거 필터와 주방후드 결합형 초미세먼지 집진시스템 개발
- 주방 조리 시 발생하는 초미세먼지의 실내환경 누출 최소화($PM_{2.5}$ 에 대하여 $150 \mu g/m^3$ (PM_{10} 에 대한 환경부 권고기준 $150 \mu g/m^3$) 이하로 관리)
- 주방 조리 시 발생하는 초미세먼지의 실외 배출 최소화 및 집진

○ 연구내용

- 주방후드 결합형 미세먼지 제어용 무기 또는 유무기 하이브리드 주방용 필터 소재 개발
- 필터 소재용 난연성/불연성 고분자 물질 합성
- 무기물기반의 필터 소재 합성 및 표면특성 분석
- 자가대전 및 대전지속 효율이 높은 소재 개발
- 미세먼지 포집효율 극대화를 위한 필터 개발 및 상용화
- 표면 대전 극대화 및 대전이 잘 되는 표면 구조체/표면 개질 기술 개발
- 낮은 압력손실을 위한 필터 내부 구조체 개발
- 주방 주위 환경의 유체역학적 유동 관리 원천기술개발
- 조리기구 화기 근처 유동 제어 메커니즘 연구 및 적용
- 재사용이 가능한 소재 표면 개질 및 필터 개발 및 실증
- 물로 세척이 가능한 필터 코팅 소재 개발
- 불연소성 주방용 필터용 소재 개발
- 금속/금속산화물 물질 기반 소재 제작 기술 개발
- 불연소성 기능성 코팅액 양산 공정 기술 개발
- 초미세먼지 포집효율 극대화를 위한 나노섬유 기술 개발
- 공극 조절 및 표면 개질 제어 기술 개발
- 재사용이 가능한 금속산화물 필터 소재 개발
- 항균/탈취/항곰팡이성이며, 물로 세척이 가능한 필터 코팅 소재 개발
- 내식 필터 코팅제 개발
- 비휘발성/비독성 금속 기반 필터 소재 개발 및 인체 친화형 주방후드 시

시스템 확보

□ 생물성 연소공정 미세먼지 제어기술 개발

○ 개요

- 세척가능 기능성 발유필터, 무필터 제진, 하이브리드 시스템 설계 및 배치 최적화 기술로 생물성 연소공정 작업장 공기질 개선
- 저유지비, 고내구성 유무기 초미세먼지 및 수용성 가스상 악취 정화장치 보급으로 작업자의 환경 개선과 주변 민원 해결

○ 목표

- 생물성 연소공정에서 고농도로 배출되는 유무기 초미세먼지, 유증기, 수용성 악취의 경제적인 정화를 위한 핵심 요소기술 및 시스템 기술 개발과 실증
- 자동세정형 미세 유증기 정전포집기술(유증기 및 수용성 악취 포집효율 >90% 저감)
- 작업장 배출 고농도 초미세먼지의 정전식 무필터 정화기술(<300 nm & >10¹¹ #/m³, 포집효율 >90%)
- 세척 가능 고기능성 발유필터 및 수명연장기술(세척가능 횟수 10회 이상, 무필터 - 필터식/무필터식 정화장치 시스템 최적 설계 및 배치 효율 제고 기술 (정화율 50% 이상 향상))

○ 연구내용

- 생활오염원(직화구이 등) 미세먼지 제어용 설계-제작-설치 통합 최적화 기술
- 세척 가능한 유기저항성 고효율 필터 및 필터-무필터 하이브리드 기술 개발
- 자동세정형 미세 유증기 처리기술 개발
- 고온 다습 환경용 무필터 초미세먼지 정화기술 개발
- 고점도 미세 유증기 대응 자동세정형 정전 포집 핵심 요소 기술 개발 및 실증
- 고점도 유증기 대응 정전 하전부, 집진부, 고전압 발생기 및 자동세정 기술 개발
- 설계, 제작, scale up 등 엔지니어링 기술 적립
- 5,000 CMH 급 Pilot 시스템 영업장 설치 및 실증, 1달 이상 장기 내구성 검증
- 고농도 유무기 PM_{2.5} 대상 경제적 정화 기술 개발 및 실증
- 고온다습환경 무필터 정화기술 개발 및 실증: 5,000 CFM 급 저압손 냉각 모듈화, 기상 오염원 동시 저감, 고효율 하전기 설계 및 검증

- 세척 가능한 고기능성 발유 나노필터 제조 및 수명연장 기술 개발 및 실증: 고분자와 이종지지체+친수성 중합 및 미세구조 제어, 세척 및 흡진 성능 제고, 대면적화, 세척 후 재사용 검증, 무필터-필터 하이브리드를 통한 수명 연장
- 다목적 필터/무필터 정화장치 시스템 최적 설계 및 실증: 흡기구, 필터 및 무필터 내부 미세구조, 유로 최적 설계를 통한 시스템 엔지니어링 및 제작, 시스템 배치 최적화 및 운전조건 최적화, 작업장 설치 및 실증



□ 대중교통차량 실내 미세먼지 제어기술 개발

○ 개요

- 대다수 국민이 매일 이용하고 있는 대중교통차량의 실내공기에 부유하고 있는 유해 미세먼지로부터 국민건강을 보호할 수 있는 능동형 공기정화 통합관리기술 개발 및 실증

○ 목표

- 실내외 공기 오염도에 따라 차량 내부 공기의 최적 공조, 환기, 항균 및 미세먼지 제거의 능동형 자동제어 기술을 개발하여 유해 미세먼지로부터 탑승자의 노출을 저감
- 집진성능: >95% @PM_{1.0}, 항균성능: >99% @*S. epidermidis*

○ 연구내용

- 대중교통별 종류에 따른 실내공조 기류 특성 조사 및 미세먼지 발생량 특성 분석 (화학적분, 부유미생물, 농도, 오염원 정보 등)

- 대중교통별 환경에 따른 미세먼지 노출 저감을 위한 최적 실내 기류 제어 기술 개발 (국민의 대중교통 이용환경 특성 반영)
- 대중교통별 실내공기 내 미세먼지 농도에 따른 능동형 공기정화기술 개발(실내 미세먼지 및 감염성 미세먼지 모니터링 시스템과 연계)
- 대중교통차량 실내 적용을 고려한 미세먼지 농도 모니터링 기술 개발(표준기술 대비 오차: <20% @PM_{1.0})
- 대중교통차량 실내공기 내 감염성 미세먼지 감지기술 개발(TSP 1% 이상 시 감지)
- 차량위치(GPS) 기반의 대기오염정보(공공데이터) 활용 외기오염 실시간 평가 기술
- 외기오염과 실내오염에 기반한 차량 공조환기설비 지능형 제어기술
- 외기오염으로 환기 불가 시 차량 내 (초)미세먼지 정화기술
- 대중교통차량(버스, 지하철) 지능형 실내공기질 관리시스템 장착 및 실증



□ 지하공간 미세먼지 프리존(PFZ) 구축 및 실증화

○ 개요

- 미세먼지 안전 지하공간 구축·운영을 통한 국민적 불안감 해소
- 외부오염(황사, 초미세먼지 등) 발생 시 민감계층 보호(shelter)
- 대중교통 이용자 및 지하생활공간 상시체류자의 미세먼지 노출저감을 통한 국민생활

보호

- 미세먼지 해결기술 성과물의 테스트베드 제공 및 국민체감을 위한 쇼케이스(showcase) 역할 수행

○ 목표

- 미세먼지 오염으로부터 안전한 지하생활공간 구축 기술 실증
- (초)미세먼지 유지관리 목표: WHO 대기 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 일평균 기준(25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 연평균 기준(10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- 지하생활공간: 다중이용시설인 지하역사와 지하상가 등 불특정 다수가 이용하는 교통, 쇼핑, 문화 등 복합공간

○ 연구내용

- 지하공간 미세먼지 저감용 공조환기설비 개발: 기존 설비 개선 및 추가
- 지속가능 환기기술: 지하온열환경 특성, 기류변화(열차풍) 등을 활용한 지능형 환기
- 지하공간 내 주요 미세먼지 배출원(터널, 차량마모 등)의 실내 유입차단 기술
- 실내공기질의 실질적 체감향상을 위한 지하공간 빛 환경 관리기술
- 지하생활공간* 미세먼지 프리존 Test-Bed 구축 실증
 - * 지하생활 공간: 다중이용시설인 지하역사와 대형 지하상가 등 불특정 다수가 이용하는 교통, 쇼핑, 문화 등을 위해 구축된 복합 지하공간
- 지하생활공간 미세먼지 프리존 Test-Bed 구축 기반기술 도출
- 실내환경 TMS 빅데이터와 이용자 정보 데이터 기반 실내공기질 실태분석 및 예측기술
- 대기오염 공공정보와 주변 도로교통량 공공정보를 활용한 지하생활공간 최적 환기제어 알고리즘
- 지하생활공간 실내공기질-에너지 모니터링 시스템 구축 및 이용자 만족도 평가체계 구축
- Test-Bed 선정 및 구축·운영계획 수립
- 지하공간 (초)미세먼지 저감용 공조환기설비 개선 기술
- 지상 출입구와 열차풍 및 기계환기에 따른 공간 기류 특성 기반 도로오염 유입차단 기술 개발
- (초)미세먼지 저감을 위한 공기조화설비(AHU) 집진성능 개선

- 지하먼지 특성을 고려한 유지보수 최소화 먼지저감 기술 개발
- 자연환기와 열차풍을 활용한 스마트 환기기술(최소 유지비 기반) 개발
- 이용객 쾌적성 증대를 위한 지하환경 개선기술(미세먼지 오염저감과 병행되는 국민 체감도 향상 기술)
- 자연채광 도입 혹은 인공채광 최적화를 통한 지하 빛 환경 개선기술 개발
- 지하공간 악취유발 세균 및 곰팡이 처리 기술 개발
- 지하공간 이용객 동선 기반 녹지(휴게)공간 구축 관리 기술
- 미세먼지 해결기술 성과물 성능평가 Platform 제공 및 국민체감용 Showcase 제공
- 사업 성과물(보급형 정화장치, 환경내비 등) 성능평가 기반시설 구축



[6] 기대 효과

- 진공청소기, 에어컨필터 등의 가전기기의 초미세먼지 저감 설계에 활용
- 필터의 성능 향상뿐만 아니라 연구개발한 필터를 제조할 수 있는 장비의 개발을 통해 원천 기술을 확보할 수 있음
- 초미세먼지 정화필터 및 정화장치의 시장성 확대 및 수출 증가
- 하루 평상 시 천 만명 이상이 이용하는 대중교통차량 내 미세먼지 농도를 대기

수준 이하로 항상 유지함으로써 일반 국민의 생활체감기술로 활용가능하며 실질적 미세먼지 피해노출을 저감함

- 지하공간 내 미세먼지 농도를 최소의 유지보수 비용으로 대기수준 이하로 유지함으로써 쾌적한 지하공간을 제공하며, 외부오염 발생 시 민감군의 대피시설(shelter)로 활용하여 사회적 공공성 확보

→ 평상시 ‘국민체감형 청정공간’ 제공

→ 외기오염 시 ‘취약계층(민감군) 대피공간(shelter)’ 기능 수행

- 보급형 미세먼지 정화장치 기술개발을 통해 상대적으로 열악한 실내환경에 노출되는 취약계층에 대한 대응방안을 도출하고, 일반인의 경우에도 저렴한 유지관리 비용으로 미세먼지 노출량 감소에 기여
- 주택 내 조리 시 발생하는 미세먼지 오염관리 방안 및 시스템 제공과 직화구이 음식점 등에서 다량으로 발생하는 오염물질 저감기술 적용을 통해 생활노출형 미세먼지 저감 기여
- 직화구이 영업점의 미세먼지 배출량을 '20년 80%, '25년까지 90% 수준으로 저감

3.3.4.2 전략과제8: 미세먼지 건강영향 평가

[1] 개요

☐ 배경 및 중요성

- 세계보건기구에서는 2005년 실외 대기질에 대한 가이드라인(WHO air quality guidelines, 2005)을 제정하였고, 2010년 실내 대기질 가이드라인(WHO guidelines for indoor air quality, 2010)을 별도로 제정하여 실내공간 공기질 관리의 중요성을 강조
- 미국 환경청의 1995년 시간활동양상(time-activity pattern) 조사에 의하면, 미국인은 평균적으로 88%의 시간을 실내공간에서 보내며 이중 약 65%의 시간을 주거공간에서 생활하는 것으로 보고되었는데, 한국도 이와 유사한 생활패턴을 나타냄(양원호 등, 2009)

☐ 기존 연구현황 및 현 사업 필요성

- 지금까지의 연구는 대부분 생활패턴을 고려하지 않고 실외 대기 모니터링 자료로 개인별 노출을 추정하여 실제 미세먼지 노출과 차이가 클 것으로 추정되며, 최근 연구는 사람들의 생활공간별 오염도와 체류시간을 고려한 노출평가를 추진하려고 일부 시도하고 있음
- 2003년 세계 최초로 환경부 실내공기질관리법이 제정되어 다양한 실내공간의 오염도를 조사하여 인체위해성을 평가하고 있는데, 단순히 공간별 오염도를 제시하고 다양한 공간에 체류하는 개인별 노출량을 고려하지 않아 인체위해성 평가의 신뢰도가 낮은 상황임
- 고층아파트 위주의 주거환경 등 선진국과 생활환경이 크게 달라 기존 해외 연구 결과를 그대로 활용할 수 없으므로 개발된 선진적 방법론을 적용하여 한국적 상황에 적합한 환경보건학적 데이터 생산 필요

☐ 주요 추진 내용

- 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도를 고려하여 인구집단별 실제 미세먼지 노출량을 평가하여 DB를 구축하고, 환경정책에 활용할 수 있는 국가 환경 데이터 구축방안 제시
- 환경부에서 2016년부터 전국 13개 거점에서 5,000명 규모로 모집·추적하고 있는

코호트인 ‘어린이 환경보건 출생코호트(Ko-CHENS)’와 환경부 및 식약처에서 학령전기 및 학령기 환경노출로 인한 건강영향 평가를 위해 2012년부터 서울경기 지역에서 700명 규모로 모집하여 추적 중인 코호트인 ‘환경과 어린이 발달 코호트(EDC)’를 활용하여 역학조사를 실시하여 환경보건정책에 활용될 수 있도록 연계 연구

- 전국적 대표성을 띄는 장기노출 추적조사를 이용하여 인구사회학적 특성 및 생활패턴별 미세먼지 노출을 평가하고 민감계층(어린이, 임산부 등)과 취약계층(저소득층)의 실제 노출량을 평가하여 환경복지 차원에서 국가의 경제적 지원 근거 마련
- 주방에서 실내오염으로 인한 주부들의 건강영향에 대한 과학적 정보를 제공하여 국민의 불안 해소
- 추적조사 건강영향평가를 위한 미세먼지 독성평가 기술을 개발하고 현행 노출 저감기술 평가 및 필요 저감 기술 및 수준 도출
- 생활환경에서 실내외 미세먼지 인체건강영향에 대한 과학적 자료를 확보하여 미세먼지 관리를 위한 기준, 가이드라인의 환경보건학적 근거를 제공하고 국민들에게 정보 제공

□ 주요 기대성과

- 미세먼지 취약 인구집단 대상 노출/건강영향 평가/통합정보 관리가 가능한 코호트 테스트베드를 구축하고, 이를 통한 건강영향 평가 수행 및 활용
 - ※ 현장 미세먼지 유해성분 분석 기술/미세먼지 독성평가 기술
 - ※ 노출/저감 측면에서 실내환기 및 공기청정기 운영/유지/관리 체계적 지침
 - ※ 미세먼지 취약 인구집단 대응관련 통합정보 가이드라인 우선 제공
 - ※ 미세먼지 취약 인구집단의 미세먼지 노출 정도 정량화 제공

□ 성과 활용방안

- 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도 고려 인구집단별 실제 미세먼지 노출량을 평가하여 DB를 구축하고, 환경정책에 활용할 수 있는 국가 환경 데이터 구축 방안 제시

- 구축된 미세먼지 장기노출 코호트를 이용하여 미세먼지 저감기술 건강영향 평가
- 미세먼지 장기노출 추적조사 결과를 활용하여 실외/실내 미세먼지 인체위해성 종합평가
- 정책 활용을 위한 자료 정리 및 공개, 과학적 근거에 기반한 정책 및 제도 제안
- 구축된 미세먼지 측정 네트워크 및 유해성분 분석 시스템 활용, 인체위해성 통합평가(노출/역학/독성) 시스템 개발

[2] 현황 및 필요성

□ 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도를 고려한 건강영향 평가 부족

- 환경복지 구현 차원에서 국민의 건강 보호와 쾌적하고 안전한 대기환경 조성을 위한 접근 방법이 농도 저감 방식에서 위해성 저감 방식으로 패러다임이 변하고 있으며, 대기 중 미세먼지의 호흡을 통한 인체 영향은 수질이나 토양과 같은 다른 환경매체보다 치명적임

※ 특히, 저농도의 장기간 노출로 인한 만성피해 우려 물질이 많음

- 미세먼지의 인체위해성 분석은 환경부에서 구축하고 있는 대기오염 측정망의 질량농도를 사용하여 평가하고 있어 실내 미세먼지 위해성에 대한 평가 및 화학구성 성분에 따른 인체 위해성 분석은 거의 수행된 바 없는 실정임. 또한, 이러한 자료를 이용한 독성평가 전무

※ 대기오염 측정망을 이용하여 실외 미세먼지 건강영향을 분석한 예로 서울시 구별 대기오염 측정망을 통해 코호트 참여자의 대기오염 노출을 평가한 Kim et al. (2016)의 연구에서 연중 초미세먼지 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우 주요 우울증 발생 위험도는 44%(95% 신뢰구간 17-78%) 증가하는 것으로 평가된 바 있음

□ 기존 미세먼지 인체위해성 역학연구 한계 및 향후 사업에 대한 시사

- 기존 미세먼지 역학연구는 대기오염 측정망의 측정값을 이용하여 실외 미세먼지에 대한 평가 위주로 수행되었는데, 현대인은 실내에 머무는 시간이 훨씬 많으며 (양원호 등, 2009) 고층아파트 위주의 주거환경 등 국내 생활환경이 외국과 크게 달라 기존 해외 연구결과를 그대로 활용할 수 없음에도 국내 실내 미세먼지의 인체위해성에 대한 역학연구는 상대적으로 적어 향후 이에 대한 연구사업이 수행될 필요가 있음



< 초미세먼지 노출과 우울증 발생 위험도(Kim et al., 2016) >

- 기존 미세먼지 인체위해성 연구는 심혈관계 및 호흡기계 질환 연구 중심으로 수행되었으나, 최근 연구는 이외 신경계 및 대사계 질환 등 다양한 건강영향 가능성에 대한 증거 축적. 향후 이러한 질환 포함 다양한 건강영향 타겟으로 연구사업이 수행될 필요가 있음

※ 캐나다에서 최근 수행된 코호트 연구(Chen et al., 2013)에서 초미세먼지 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우 당뇨병이 새로 발생할 위험이 11%(95% 신뢰구간 2-21%) 증가하는 것으로 보고되었고, 미국에서 수행된 코호트 연구(Kioumourtzoglou et al., 2015)에서 초미세먼지 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우 치매로 인한 병원 방문 위험이 8%(95% 신뢰구간 5-11%), 알츠하이머병으로 인한 병원 방문 위험이 15%(95% 신뢰구간 11-19%), 파킨슨병으로 인한 병원 방문 위험이 8%(4-12%) 증가하는 것으로 보고됨

- 미세먼지 구성성분 및 배출원별 인체위해성에 대해 최근 단편적인 연구가 시작되고 있으나, 그 수가 매우 적고 체계적 연구도 진행되고 있지 못하여 향후 미세먼지 구성성분 및 배출원별 위해평가 연구가 수행될 필요가 있음
- 기존 연구는 대부분 인과관계추론에서 낮은 수준의 근거만을 제시할 수 있는 시계열 연구(time-series study), 사례-교차 연구(case-crossover study) 형태 위주로 수행되었고, 시간적 선후관계가 명확하며 미세먼지 장기노출에 의한 영향평가도 가능하여 높은 수준의 근거를 제시할 수 있는 코호트 연구(cohort

study)는 상대적으로 적어 향후 이에 대한 연구사업이 수행될 필요가 있음

- ※ 동북아시아 4개국의 11개 도시에서 수행된 시계열 연구에서 초미세먼지 농도 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가는 총사망 0.38%(95% 신뢰구간 0.21-0.55%), 심혈관계 원인으로 인한 사망 0.96%(95% 신뢰구간 0.46-1.46%), 호흡기계 원인으로 인한 사망 1.00%(95% 신뢰구간 0.23-1.33%) 증가와 관련되었으며, 미세먼지 농도 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가는 심혈관계 원인으로 인한 사망 0.69%(0.05-1.33%) 증가와 관련됨
- ※ 대기오염 단기노출과 서울지역 병원 외 심정지 발생 사이의 관련을 평가하기 위해 수행되었던 최근의 사례-교차 연구(Kang et al., 2016)에서 초미세먼지 농도 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가는 병원 외 심정지 발생수 1.30%(95% 신뢰구간 0.20-2.41%) 증가와 관련됨



< 미세먼지 노출로 인한 병원 외 심정지 퍼센트 증가(Kang et al., 2016) >

[3] R&D 현황 및 시사점

- 개인별 노출량을 고려한 체계적인 건강 위해성 평가 연구는 이제 시작하는 단계
 - ‘전략과제8. 미세먼지 건강영향평가’와 관련되어 현재 진행 중인 R&D 사업은 총 14개 과제에 예산은 연간 21.2억원 규모(‘16년 기준). 그러나 대부분 건강 기능성 소재 개발 내지 실외 대기오염 중심 연구에 투자되고 있음
 - 미래창조과학부 주관으로 수행된 ‘초미세먼지 인체위해성 연구 및 위해저감

방안' 사업(2014.05.01~2017.04.30)은 2.3억원 규모('16년 기준)로 수행되었으며 기존 역학자료원의 주소정보 기반 대기오염 측정망의 측정값 및 모델링 자료를 이용하여 실외 초미세먼지 노출 및 구성성분, 배출원에 대한 건강영향을 평가하였으나 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도를 고려한 건강영향 평가가 부족하여 이에 대한 추가적 평가가 필요함

※ 이 연구를 통해 실외 미세먼지 노출로 인한 심혈관계 및 알레르기 발생 위험뿐 아니라 구성성분별 건강영향 평가, 특정 식이 및 건강영향에 따른 인체위해성 저감 가능성에 대해 분석하여 보고된 바 있음

< 미세먼지 건강영향 평가 관련 과제 현황 >



- 보건복지부 주관으로 수행된 '대기오염에 대한 건강피해 연계성 연구' 사업(2014.07.08~2016.12.07)은 1억원 규모('16년 기준)로 수행되었으며, 대기오염 측정망 등의 자료를 이용하여 실외 주요 대기오염물질 노출정도에 따른 급성

및 만성 건강영향을 평가하고 건강피해 추정모델을 개발하여 취약 인구집단 피해를 최소화하는 것을 목적으로 수행되었으나 실외 대기오염물질에 대해서만 노출을 평가하여 향후 실내 대기오염을 고려하여 개인별 노출에 따른 건강 영향 평가 수행이 필요함

- 보건복지부 주관으로 수행된 ‘실내외 환경변화가 영유아 알레르기질환 발생에 미치는 영향의 전향적 연구’ 사업(2013년~2015년)은 1억원 규모(‘15년 기준)로 수행되었으며, 기존 코호트 기반 일부 대상자에서 출산 전 실내외 환경오염의 개인적 노출 수준과 영유아 알레르기질환과의 국내외 연관성 규명 연구를 리뷰, 가이드라인을 개발하고 사례연구를 수행한 바 있으나 알레르기질환에 포커싱하여 연구방법론을 확립하는 것을 목적으로 수행되어 향후 대규모 코호트 자료를 이용한 알레르기질환 외 다양한 환경성질환과의 연관성 분석을 수행할 필요가 있음
- 최근 국내외 연구들은 실내 미세먼지 노출이 여성 및 비흡연자에서 폐암을 포함한 다양한 건강위해와 관련이 있음을 보고하고 있으며, 이에 대한 평가는 공중보건학적으로 큰 관심을 끌고 있음
 - ※ 최근 중국에서 수행된 코호트 연구(Kim et al., 2015)에서 실내 석탄소비와 좋지 않은 환기시설은 비흡연 여성에서 폐암의 위험을 높일 수 있다고 분석되었고, 네팔에서 수행된 연구(Raspanti et al., 2016)에서 실내 대기오염은 비흡연자에서도 폐암의 위험을 높일 수 있음이 보고됨
- 종합하면, 현대인은 대부분의 시간을 실내에서 보내게 되며 개인별 노출을 종합적으로 평가하기 위해서는 실외뿐 아니라 실내 노출에 대한 정확한 평가가 필요하며 개개인 노출 위험도 평가를 위해서는 개인별 노출량에 따른 위해성 평가 연구가 중요함. 이러한 이슈는 국제 공중보건학적으로 주목받고 있을 뿐 아니라 기존 연구사업을 통해 국내 연구 성공 가능성 검증이 일부 되어 성과 산출 가능성이 높다고 할 수 있으나 현재 이에 대한 R&D는 진행되고 있지 않음
- 장기적으로 미세먼지로 인한 취약계층의 건강 보건을 위해서 미세먼지가 유발하는 위해성 기전과 개인별 위해성 평가가 수행되어야 하고, 이에 대한 자료 구축이 필요함

□ 기존 미세먼지 인체위해성 역학연구 현황 및 한계

- 미세먼지 구성성분 및 배출원별 인체위해성에 대해서는 최근 단편적 연구가 시작되고 있으나 그 수가 매우 적으며 체계적으로 정리되어 있지 않음
- 기존 미세먼지 역학연구는 대기오염측정망의 측정값을 이용하여 실외 미세먼지에 대한

평가 위주로 수행되었고, 현대인은 실내에 머무는 시간이 훨씬 더 많음에도 실내 미세먼지 인체위해성에 대한 연구는 상대적으로 적음

- 기존 미세먼지 역학연구는 대부분 인과관계 추론에서 낮은 수준의 근거만을 제시할 수 있는 시계열 연구(time-series study), 단면 연구(cross-sectional study) 형태로 수행되었고, 시간적 선후관계가 명확하며 미세먼지 장기노출에 의한 영향에 대한 평가도 가능하여 높은 수준의 근거를 제시할 수 있는 코호트 연구(cohort study)는 상대적으로 적음
- 국내에서도 실내 미세먼지 인체위해성 역학연구는 상대적으로 적으며, 대부분 근거의 수준이 낮은 단면 연구 등의 형태로 수행되었고 발생원에 대한 분석이 부족했음

시사점

☞ 기존 연구는 실외 미세먼지 노출에 따른 인체위해성 분석에 치중되어 있어 실내 미세먼지 인체위해성, 발생원에 대한 분석 강화 필요

※ 현대인은 대부분의 시간을 실내에서 보내며 개인별 노출을 종합적으로 평가하기 위해서는 실외뿐 아니라 실내 노출에 대한 정확한 평가 필요

※ 최근 국내외 연구들은 실내 미세먼지 노출로 인한 사회적 질병부담이 여성, 비흡연자, 영유아를 중심으로 매우 큼을 보고

※ 이러한 이유에서 실내 미세먼지는 국제 공중보건학적으로 주목을 받고 있을 뿐 아니라 기존 연구사업을 통해 국내 연구개발 성공 가능성 검증이 일부 되어있어 성과 산출 가능성이 높다고 할 수 있으나 이에 대한 R&D는 진행되고 있지 않음

☞ 향후 연구는 가급적 종적 분석 가능한 코호트 연구 설계 필요

※ 인과적 관련성에 대해 결론을 내릴 수 있도록 연구 구상 및 설계

[4] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도를 고려하여 실제 미세먼지 노출량 평가 DB를 구축하여 국가 환경 데이터 구축방안 제시
- ◆ 전국적 대표성을 띄는 장기노출 추적조사를 이용하여 민감계층 및 취약계층 실제 노출량을 평가하여 환경복지 차원에서 국가의 경제적 지원 근거 마련
- ◆ 생활환경에서 미세먼지 인체건강영향에 대한 과학적 자료를 확보하여 실내외 미세먼지 관리를 위한 기준, 가이드라인의 환경보건학적 근거를 제공하고 국민들에게 정보 제공

☐ 미세먼지 개인노출평가 모델 개발

- 한국인의 미세먼지 노출 관련 활동의 표준화를 통해서 미세먼지 노출을 정량화함. 이를 위해서 다양한 실내활동별 미세먼지 노출평가를 실시하고 다양한 실내 오염원의 유해화학성분 분포 특성을 파악함. 또한 한국인의 시간활동 자료를 구축함
- 노출 통합 DB를 구축하기 위하여 다양한 시·공간 및 인구집단별 실내 미세환경에서의 미세먼지 노출수준, 시간활동 조사자료, 유해화학성분 자료를 구축하고 이를 이용하여 관계형 DB화 기술을 개발함
- 지식기반형 개인노출 평가 프로그램 개발은 주로 3개 분야(한국인의 미세먼지 노출량에 미치는 영향 요인 파악, 대국민용 미세먼지의 노출 수준 파악 정보 제공, 대국민용 개인노출 최소화 정보 제공)에 초점을 맞추어 진행함

☐ 코호트 이용 실외/실내 미세먼지 인체위해성 분석

- 인과적 관련성에 대해 최종적인 결론을 내릴 수 있도록 코호트 이용 미세먼지 인체위해성 평가
- 코호트는 민감집단인 영유아 및 어머니를 대상으로 전국적으로 질병발생 관련성을 관찰하기 충분한 수준으로 모집하고, 노출 해상도를 높이기 위해 자세한 주소 정보를 구득하며, 실내 미세먼지 노출평가가 가능하도록 구축

- 노출정보 획득 시 바로 분석이 가능할 수 있도록 기구축 출생코호트 활용 및 확대를 고려하고 실외뿐 아니라 실내 노출과 미세먼지 구성성분에 따른 건강영향에 대해 평가

□ 초미세먼지 in vivo 안전성 및 독성 평가 기술

- 초미세먼지는 인체 내에 침착되는 위치에 따라 다양한 독성을 발현하기 때문에 흡입 경로에서 발생될 수 있는 다양한 장기의 독성과 기전을 연구
- 초미세먼지의 구성성분(30종 이상)에 대한 개별 안전성 연구를 수행하고, 이를 바탕으로 초미세먼지 복합물질의 안전성을 in vivo 실험동물모델로 예측하는 시스템 개발
- 복합물질이 주성분인 초미세먼지의 특성을 고려한 현장 적용이 가능하며, 신속한 독성 정보 제공이 가능한 세포 기반(미생물, 사람 세포) 독성 평가 기술 개발
- 구축된 미세먼지 측정 네트워크 및 유해성분 분석 시스템 활용, 인체위해성 통합평가(노출/역학/독성) 시스템을 개발함으로써 미세먼지 민감계층에 나타나는 미세먼지 취약성의 생물학적 위해성 기전의 체계적 규명



< 건강영향 평가 추진전략 >

[5] 세부추진 방안



< 단계별 세부추진 방안 >

☐ 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도를 고려한 실내외 미세먼지 노출량 평가

- 실내 미세먼지 관련 생활활동별 노출 특성 연구
 - 한국형 미세먼지 노출 관련 활동의 표준화를 통한 미세먼지 노출 정량화(시간 활동 조사지(time activity checklist) 이용). 거주지 내 대표 지점을 선정하여 실내 미세먼지 농도 24시간 연속 측정
 - 측정위치는 아이의 침실, 거실, 실내먼지의 대표적 발생원이 위치한 부엌에 설치하며, 측정기기는 주요 발생원 및 환기 창구에서 1 m 이상 떨어진 곳에 설치
 - 실내활동에 따른 미세먼지 노출평가 및 실내 오염원의 유해성분 특성을 파악하고, 한국인 시간활동과 연관된 미세환경에서 미세먼지 노출평가



<실내 미세먼지 측정장비의 모습>

- 실내외 미세먼지 통합 노출 DB 구축 및 국가 환경 데이터 구축방안 제시
 - 실내 미세환경에서의 미세먼지 노출수준, 시간활동조사 자료, 유해화학성분 자료를 이용한 DB 구축
 - 실외 미세먼지 측정은 연구 참여자 거주지 인근 측정소에서 측정되는 미세먼지 자료와 연구 참여자 거주지 인근에 직접 설치한 실외 미세먼지 측정장비 결과 활용
 - ※ 현재 지역별 미세먼지 농도는 도시대기 측정망, 도로변 대기 측정망, 국가 배경농도 측정망, 교외대기 측정망을 활용하여 국가 내 지역별 대기오염 자료를 실시간으로 모니터링/공개하고 있으며, 참여자 거주지 인근 실외 미세먼지에 대해서는 각 참여자 거주지 외부, 창문 바깥 1 m 위치에 설치하여 2주간 실외 미세먼지 농도 측정
 - 실내 미세먼지 관련 생활활동별 미세먼지 특성 파악
 - ※ 한국형 미세먼지 관련 활동 파악 및 해당 활동의 표준화를 통한 미세먼지의 노출 정량화
 - ※ 조리, 청소, 교통수단이용 등 주요 활동에 따른 미세먼지의 노출평가
 - 미세먼지 통합 노출 DB 구축 및 노출모델을 이용한 ‘한국형 미세먼지 개인노출 모델’을 개발하고 지식기반형 개인노출 평가 프로그램 개발
 - ※ 실내 미세환경에서의 미세먼지 노출 수준, 시간활동조사 자료, 화학성분 자료를 이용한 DB 구축
 - ※ 국민에게 노출되는 미세먼지 노출량에 미치는 영향 요인 파악, 대국민용 미세먼지의 노출 수준 파악 정보 제공, 대국민용 개인노출 최소화 정보 제공

□ 코호트 이용 실외/실내 미세먼지 인체위해성 분석

○ 코호트 이용 실내외 미세먼지 인체위해성 평가

- 전국적 대표성을 확보하기 위해 서울, 인천, 충청, 호남, 영남 지역에서 1단계(2017~2019) 동안 임신부 400명, 1세 영아 400명, 2세 영아 400명, 6~10세 소아 300명 등 총 1,500명(500명/년)에 대해 실내외 미세먼지 노출 및 건강지표 평가 수행체계 구축
- 모집의 수월성 및 추적 효율성을 위해 기구축 코호트 이용을 적극적으로 고려하며, 기구축 코호트로는 신생아 및 영유아기 미세먼지 노출의 건강영향 평가를 위해 2016년부터 전국 13개 거점에서 5,000명 규모로 모집·추적되고 있는 출생 코호트인 어린이 환경보건 출생코호트(Ko-CHENS)와 학령전기 및 학령기 노출의 건강영향 평가를 위해 2012년부터 서울경기 지역에서 700명 규모로 모집되어 신경행동학적 검사를 포함 다양한 건강지표에 대해 조사하고 있는 어린이 코호트인 EDC 코호트의 이용 가능
- 영유아 건강지표 측정에서는 가능한 기구축 코호트 추적체계를 이용하고, 어머니 건강영향 평가는 영유아 추적 시 독자적 조사 프로토콜에 따라 조사가 수행될 필요가 있음
- Time-activity 설문, 이동경로, 생체노출 지표(PAH, 중금속) 및 생활공간(가정 실내외) 미세먼지 측정정보를 종합적으로 고려하여 실외뿐 아니라 실내 대기오염을 고려한 개인별 미세먼지 노출을 평가하고 이에 따른 인체위해성 평가를 수행
- 1단계(2017~2019) 동안 시공간적 미세먼지 노출 및 성분을 파악하고 미세먼지와 생체노출지표 관련성 평가, 미세먼지와 만성호흡기질환 임상지표 사이 관련성 평가 등 수행
- 2단계(2020~2021) 동안 모집 대상자에 대한 1차 추적을 수행하며 실내 노출에 대해 반복 측정 수행, 만성호흡기질환 관련 지표(폐기능검사, 혈액검사) 측정, 미세먼지 건강영향 메커니즘 파악 및 인과성 강화를 위한 오믹스 경로분석, 타 사업을 통해 개발된 저감장치 및 1단계 분석에 따라 식별된 생활습관 교육에 따른 건강영향 분석
- 3단계(2022~2023) 동안 모집 대상자에 대한 2차 추적을 수행하며 실내 노출에 대한 반복 측정 수행, 유전자 및 오믹스 정보를 이용하여 정밀의학 모델 및 개인 맞춤형 건강보호 시스템 구축, 미세먼지 노출에 따른 개인별 맞춤형 위해성 정보 제공, 연구결과를 사회적 의제화하고 정책적 함의를 도출

○ 미세먼지 악화 관련 만성호흡기질환 환자 적용 바이오마커 및 제어물질 개발

- 연관성 분석을 통해 정상인 및 만성호흡기질환 보유자에서 미세먼지 노출 민감도를 높이는 바이오마커 발견
- 코호트를 observation arm과 intervention arm으로 나누어 타 전략과제를 통해 개발된 미세먼지 노출 저감장치 및 제어물질을 적용하여 실제 인구집단에서 중재의 효과를 평가함(2단계 및 3단계)
- 미세먼지에 따른 만성호흡기질환의 조기경보시스템 개발 및 개인 맞춤 예방 중재기술 개발
 - 유전자 등의 개인 수준 정보 및 개인별 노출, 생활습관 등 정밀하게 조사된 대규모 정보를 이용하여 정밀 맞춤의학 기반 기술을 개발하고, 이를 바탕으로 개인 맞춤 예방, 중재기술을 발전시키며 인구집단 수준에서 만성호흡기질환 조기경보시스템 개발
 - 건강보험공단 자료를 활용하여 미세먼지에 의한 호흡기질환 악화에 의한 병원 이용도 분석
- 실내외 미세먼지 관리를 위한 기준, 가이드라인 작성을 위한 환경보건학적 근거 제공
 - 영유아, 산모 등 민감계층 및 저소득층 등 취약계층 실제 노출량을 평가하여 환경복지 차원에서 국가의 경제적 지원 근거 마련
 - 생활환경에서 미세먼지 인체건강영향에 대한 과학적 자료의 확보를 통해 정책 수립을 위한 기준을 마련하고 관련 정보를 국민에게 제공

□ 노출-역학-독성 통합 위해평가 수행

- 1단계(2017~2019) 동안 미세먼지 위험군(영·유아, 임산부 등) 대상 위해성 기전 규명 및 평가를 위한 생물학적 지표 발굴
 - *in vitro* 및 *in vivo* 실험동물모델을 이용한 신생쥐 상피조직(호흡계, 표피계)의 차등적 반응기전 연구: 상피장벽기능 분석, 기관지 초미세먼지 제거율 분석, 대식세포 활성화도 분석, 유해산소 발생량 분석, 염증성 시토카인 프로파일링, 항균물질 발현량 분석 등
 - 신생쥐 면역계의 초미세먼지 취약성 기전 연구와 *in vivo* 모델을 이용하여 영·유아의 대표적 질환인 아토피 피부염, 천식 등 알레르기 질환에 미치는 초미세먼지의 독성기전 규명
 - 오믹스 기반 기관/장기별 상관성 생체지표 발굴 및 이를 이용한 *in vitro* 및 *in vivo* 모델에서의 유전체 수준의 위해성 평가 기술 개발
 - 미세먼지의 산화독성, 유전독성, 세포독성 분석용 모델 개발 및 분석
- 2단계(2020~2021) 동안 노출량 기반 미세먼지 위해성 평가 확립 및 수행

- 생체지표와 기전 규명 자료를 바탕으로 미세먼지 노출에 대한 건강 위해성 평가 시스템 구축
- 실제 환경 중 초미세먼지 시료와 미세먼지에 노출된 개인별 시료를 확보하여 건강 위해성 평가 수행 및 위해성 평가 시스템 검증
- 3단계(2022~2023) 동안 위해성 평가 플랫폼 검증 및 미세먼지 노출에 따른 질환 분석
- 코호트 내에서 노출량을 기준으로 한 건강 위해성 평가 및 이를 활용한 미세먼지 장단기 노출에 따른 건강 위해 정보 제공
- 미세먼지 노출에 따른 개인별 맞춤형 위해성 정보 제공

※ 생체지표를 기반으로 한 바이오칩, 위해성 정보를 쉽게 제공해 줄 수 있는 세포기반 독성 평가 플랫폼을 활용하여 분석 기반으로 개인별 맞춤형 건강 위해성 정보 제공

[6] 기대 효과

☐ 미세먼지 문제 해결 기여와 활용

- 한국인의 생활패턴과 실내공간별 오염도를 고려하여 실제 미세먼지 노출량 평가 DB 구축 및 국가 환경 데이터로 활용
- 미세먼지 노출 민감계층 및 취약계층의 실내외 미세먼지 노출량과 노출경로를 파악함으로써 정책적 지원 및 개입 방법과 근거 마련
- 실내외 미세먼지 인체건강영향에 대한 분석을 통해 미세먼지 관리를 위한 기준, 가이드라인의 근거를 마련하고 국민에게 관련 정보 제공
- 미세먼지 민감계층에 나타나는 미세먼지 취약성의 생물학적 위해성 기전을 체계적으로 규명함으로써 노출-역학-독성 통합적 분석을 통한 인체위해성 및 기전 평가, 미세먼지 통합관리 시스템 구축에 기여
- 독성제어를 위한 핵심기술개발의 기초자료 제시를 통해 초미세먼지 침투예방 또는 배출기능 향상을 위한 신약 표적물질 발굴과 알레르기 질환 예방 및 치료를 위한 신약개발의 기초자료 제시

☐ 본 사업의 진보성 및 차별성

- 현대인은 많은 시간을 실내에서 보내나 기존 연구는 실외 대기오염 모니터링 자료를 이용하여 개인별 노출수준에 대한 정확한 평가가 힘들었으나, 본 연구는 실내 노출 수준에 대한 실측과 생활활동 조사자료(실내외 체류, 이동수단, 노출 특성 등)를 통해 개인별 노출 수준에 대한 정확한 평가 가능

- 기존 연구는 인과 추론에서 근거의 수준이 낮은 생태학적 연구 및 사례-교차 연구 디자인으로 수행되었으나, 본 연구는 코호트를 구축, 근거의 수준이 높을 뿐 아니라 장기 노출의 건강영향 평가가 가능한 코호트 연구 디자인으로 수행하며 심혈관계 및 호흡기계 건강영향뿐 아니라 다양한 건강지표에 대한 영향 평가
- 노출-역학-독성 통합적 분석을 통해 미세먼지 민감계층에 나타나는 미세먼지 취약성의 생물학적 위해성 기전의 체계적 규명

3.3.4.3 전략과제9: 개인 맞춤형 초미세먼지 정보 서비스 플랫폼 구축

[1] 개요

가. 개념

- 개인별 맞춤형 초미세먼지 관련 정보 통합관리 시스템 구축
- 국민들의 미세먼지 대처능력을 향상시키는 것을 목적으로 함

나. 필요성

- 다양한 미세먼지 관련 정부 자료가 파편화 되어 있어서 통합할 필요가 있음.
- 현재까지 미세먼지 관련하여 국민에게는 부문별(실외, 실내 등) 생산된 측정결과 제공 위주로, 정부정책은 해외사례를 참고하여 저감정책 마련에 치중되어 있음.
- 미세먼지 관련 환경보건 통합 DB를 점검 및 분석하고 데이터의 표준화 및 오류데이터를 식별하고, 오류에 대해서는 적절한 수정 또는 정제를 시행할 필요가 있음.
- 미세먼지 성분별 유해성 분석 등 조사 사업 데이터를 정리/분석하여 표준화된 자료로 변환하여 DB 구축할 필요가 있음.
- 그간 다양한 부문별로 생산된 초미세먼지 정보들을 이용자 중심의 통합서비스가 가능한 서비스 플랫폼 구축이 필요함.
- 국민 건강보호를 최우선으로 하는 선진 대기질 관리를 위한 패러다임 전환에 적합한 서비스 플랫폼 구축이 필요함.
- 이해당사자 그룹별로 미세먼지 유해성 정보에 대한 이해수준의 불일치가 있음. 그래서 risk communication 기능 강화를 통한 이해수준 일치 필요성이 있음.

[2] 현황 및 시사점

가. 시장

- (세계) 현황 및 문제점
 - 미 캘리포니아의 경우, 대기질 측정자료를 활용하여 다양한 감측 프로그램 운영.

- 세계보건기구(WHO)에서는 위해분석(risk analysis)은 핵심적이고 언제나 수반되어야 하는 부분이라 역설함. 모든 이해당사자가 초기부터 참여할 수 있도록 해야 한다고 강조.
- 최근 선진국을 필두로 연구자료 수집과정부터 다양한 이해당사자(국민, 지역사회 주민 등)들과 리스크 커뮤니케이션을 시도하는 경우가 늘고 있음. 이는 정책 이해도를 높이고 과장된 위험인식을 낮추며, 위기 발생 시 위기를 극복하는데 도움이 되고 있는 것으로 나타남.
- 개인별 맞춤형 환경오염 서비스는 아직 구현되지 않았으니 환경오염, 특히 미세먼지의 경각심으로 그 수요가 높아질 것임.

○ (국내) 현황 및 문제점

- 실외 미세먼지는 전국 실시간 측정농도·예보·경보 현황을, 실내 다중이용시설의 실내 미세먼지 측정 결과 등을 별도로 제공
- 부문별(실외, 실내) 미세먼지 정보 분산 제공으로 해당 거주 지역 내 미세먼지 관련 통합서비스 부재
- 단순 측정 농도 제공만으로 인체위해성 또는 위험 회피 정보 부재
- 인체위해성이 높은 미세먼지로부터 지역 주민 건강 보호를 위한 실질적인 프로그램 부재
- 국립환경과학원 환경보건연구과에서는 환경보건조사에서 생산된 자료를 체계적으로 관리하고 활용하기 위해 ‘환경보건자료 통합관리시스템’을 개발 운영. 하지만 데이터의 표준화와 오류자료 업데이트 등 시스템의 보완과 개선이 요구. 환경보건 통합자료를 관련 분야의 연구자료로 활용하기 위해서는 안정적인 운영 및 관리가 필요.
- 5차에 걸친 사업을 통해 환경보건 자료를 통합하고 표준화하였으나, 신규데이터를 DB로 구축하는 과정에서 데이터의 표준화와 오류자료 업데이트 등 시스템의 보완과 개선이 요구.
- 기존 USN (Ubiquitous Sensor Network) 기술로 다양한 환경에서의 오염 측정 및 관리 연구가 진행되었으나 미세먼지 측정 관리에 적용한 사례가 없어 시장/산업 예측이 어려움.
- 측정 관리를 위한 네트워크 시스템보다는 측정기기 자체의 수요가 높음.
- 대기오염과 미세먼지로 인한 공기질 관리의 관심이 매우 높아지고 있기 때문에 측정기기 시장과 더불어 기기를 연동하고 기기로부터 얻어지는 데이터를 획득하기 위한 정보 관리 기술의 수요도 점차 높아질 것임.

- 위해성 평가기술이나 정보 관리 서비스 기술은 아직 해외에서도 본격적인 개발이 진행되지 않고 있기 때문에, 선도적 개발을 통해 관련 시장과 산업을 주도할 수 있음.

시사점

☞ 다양한 정보가 파편적으로 존재하나, 이를 통합할 수 있는 정보 플랫폼의 구축이나, 개인 맞춤형 노출지도를 얻기 위한 정확한 양질의 정보 획득은 아직 어려움.

나. 정책

○ (세계)

- 미국의 경우 EPA를 통해 미세먼지 관련 정보들을 제공하고 있음. 센서 네트워크 기반의 환경오염모니터링 시스템 구축에 앞장서고 있지만, 맞춤형 오염지도를 통한 관리는 하지 않고 있음.

○ (국내)

- 대기오염 유입과 실내 차량발생 먼지 등의 오염원을 효과적으로 관리할 수 있는 종합적 관리대책 부재
- 각 부처별, 기관별 미세먼지 관련 정보를 파편적으로 제공

시사점

☞ 정책적으로도 초미세먼지 관련 정보 통합 구축이나, 이에 따른 개인 맞춤형 정보 제공 등의 정책을 펼치는 나라는 없음.

다. 기술

○ (세계) 주요국, 기업들의 기술개발 동향, 최고기술 보유국들의 현 기술수준

- 소형 미세먼지 센서 모듈을 출시함(J. Air & Waste Manage. Assoc., 1973, 23, 1035)

- 가스상 오염물질과 소음 및 기상 센서까지 포함된 센서가 개발 중
- 휴대폰 내장을 위해 초소형 측정 디바이스를 개발하는 그룹이 존재.
- 미국에서는 센서 네트워크 기반의 환경오염 모니터링 시스템 구축에 가장 앞선 기술을 보유하고 있음(IBM 수질 모니터링 네트워크 프로젝트-REON).
- 대중교통 이용자의 도로오염 노출에 대한 이동경로상 노출수준 평가 연구가 진행되고 있으며, 이를 통해 이동수단 이용시 개인 노출수준을 활용한 정책연계 연구가 진행되고 있음.
- 미세먼지 심각성이 높아지는 개발도상국의 특화된 (초)미세먼지 통합정보 제공 및 인체 노출 위해성 지도의 필요가 대두될 것임.

○ (국내) 국내 정부 및 민간의 기술개발 동향, 기술수준, 투자 규모 등

- 유해성 분석 정보는 실시간으로 취득하지 못하고 있기 때문에 오염 위해도 정보가 획득되면 지역별 수준의 미세먼지 오염 위해도 정보 제공 가능.
- 휴대폰이나 내비게이션을 이용한 환경오염 정보를 도로별/인도별로 제공해주는 기술은 실현 가능하나 해당 정보의 획득 및 통합이 우선적으로 필요함.

시사점

- ☞ 현재 초미세먼지 정보 관련 통합 플랫폼 구축 및 개인 맞춤형 서비스 제공은 존재하지 않으므로, 이를 실현할 경우 선도적인 역할을 할 수 있음. 정확한 정보의 획득 및 기존 정보의 통합이 가장 중요한 key가 될 것임.

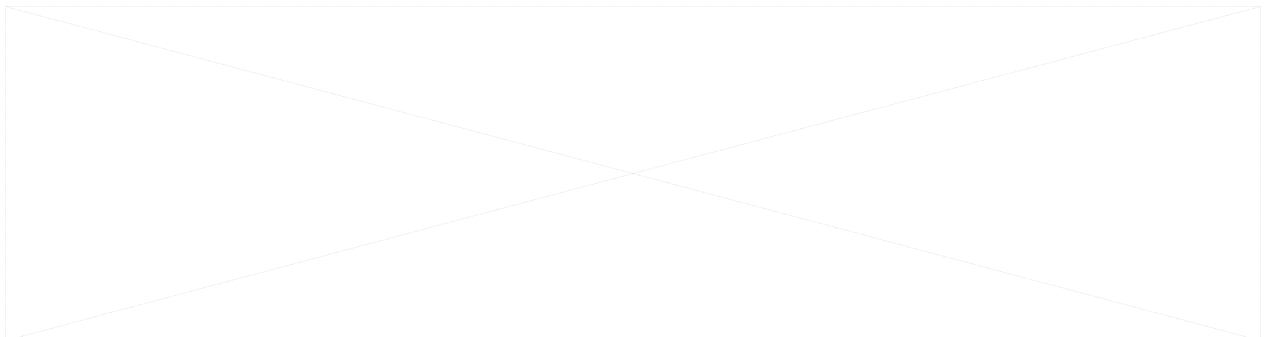
[3] 추진 전략

< 핵심목표 >

- ◆ 미세먼지 관련 정보 통합 관리 시스템을 구축하여 부문별 생산된 측정결과와 유해성 정보, 배출원 정보, 기여도 정보, 저감장치에 대한 정보를 통합하여 관리함으로써, 국민 실생활 체감형 미세먼지 정보를 제공하는 시스템을 구축함. 미세먼지 관리기술을 세계수준 대비 90% 수준 도달.

※ '16년 50% → '21년 80% → '23년 90%

- 미세먼지 관련 정보이용자(연구자, 연구참여자, 일반대중, 언론 선도층)의 고유 목적에 부합하는 미세먼지 정보를 제공하는 IoT 접목 스마트 미세먼지 정보관리 시스템을 구축함.
- 휴대용 기기를 적극 활용하여 정보 통합 관리 시스템을 사용자 편의성 및 risk communication의 용이성을 고려하여 설계함.
- 다양한 IoT 기기에서의 정보 시각화 지원, 정보 해석 및 활용 등을 통해 구축된 DB 활용 부가가치 창출을 지원함.
- 실증사업 병행 및 기업과의 연계
 - 기업에서 기 구축된 IoT와 접목하여 초미세먼지 관련 정보를 제공할 수 있는 제품개발 지원
 - 개인별 맞춤 오염지도 생성 및 개인노출 최소화 정보 지원
 - 환경내비 기술 구현 지원(예, 핸드폰 application 및 웨어러블 기기의 소프트웨어 구현)
- 단계별 추진 (3+2+2년 기준)
 - 1단계에서는 주로 측정정보 자료 구축 및 통합정보 DB화에 중점을 맞추고 진행, 또 환경내비의 기능과 형태를 결정
 - 2단계에서는 유해성, 배출원 기여도, 그리고 저감장치 정보의 통합 및 지도 구축 및 다양한 IoT 기기에서의 정보시각화 지원
 - 3단계에서는 정보통합 관리 시스템의 최적화 및 미세먼지 통합정보의 해석 및 활용자문 지원과 파트너십 구축. 환경내비 최종구현에 초점.



[4] 세부추진 방향

□ 초미세먼지 관련 정보 통합관리 시스템 구축

○ 현재 수준

- 현재까지 미세먼지 관련하여 국민에게는 공간별(실외, 실내 등) 생산된 측정결과 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 위주로 국민들이 실질적으로 체감할 수 있는 정보가 주어지지 못함. 세계 수준 대비 50% 수준

○ 목표 수준

- 파편화되어 있는 미세먼지 관련 정보를 통합하여 관리하는 시스템을 만들고 인체 유해성, 배출원 기여도, 저감장치 등의 정보도 함께 관리 및 지원하는 시스템을 구축함. 세계 수준 대비 90% 수준 도달

○ 세부 연구내용

- 전국 초미세먼지 측정정보 및 유해성 분석 정보의 통합관리 및 지도 구축
- 생성 원인, 배출원 정보 및 배출원별 기여도 정보의 통합관리 및 지도 구축
- 저감 및 정화 장치(주요 배출원용 및 가정용) 관련 정보의 통합관리
- 사용자 편의성 강화(Visualization, 통계 기능, 지능형 분석 기능)
- Risk communication 기능 강화(위험 시나리오, QnA, 설문조사 기능 등)
- 초미세먼지 환경보건포털 구축

※ 예를 들어, 동네별 미세먼지 오염 위해도 지도 구축을 통해 직장 및 가정 등 거주지역의 노출 오염도 및 건강 위해도 등을 GIS 기반의 공간분포 정보로 생산하고 효과적으로 제공하는 기술 개발



< 개인 맞춤형 초미세먼지 통합정보서비스 개요 >



< 사용자 편의성 강화한 Interface >

○ 최종 성과물

- 초미세먼지 관련 통합 정보 구축
- 동네별 미세먼지 위해도 지도 구축(거주지역의 노출 오염도 및 건강위해도 표현)

□ IoT 접목 스마트 통합 정보관리 시스템 구축

○ 현재 수준

- 다양한 부문별로 생산된 초미세먼지 정보들을 무분별하게 이용자들에게 제공함으로써 미세먼지에 대한 국민들의 오해와 혼란을 야기하고 있음. IoT 접목 미세먼지 관리기술 세계수준 대비 50% 수준

○ 목표 수준

- 미세먼지 관련 정보이용자(일반인/기업인)의 고유목적에 부합하는 미세먼지 정보를 제공하는 IoT 접목 스마트 미세먼지 정보관리 시스템을 구축함. 미세먼지 관리기술 세계수준 대비 90% 수준 도달

○ 세부 연구내용

- 휴대 가능한 단일 미세먼지 측정기 개발 또는 스마트폰과 연결 가능한 미세먼지 측정 모듈 개발 연구*
 - * 웨어러블 디바이스 적용 등 생활 밀접형 휴대 디바이스 기술 개발
 - * 미세먼지 민감군 시설 및 대중교통 부착용 센서
 - * 미세먼지와 더불어 단일 모듈 내 온도, 습도, VOC 등 복합센싱이 가능하도록 설계
 - DB 접근 API (Application Programming Interface) 제작을 통한 지원
 - 다양한 IoT 기기에서의 정보 시각화 지원(스마트폰, wearable 기기, 스마트 가전)
 - 다양한 운영주체가 보유하고 있는 미세먼지 오염도 정보를 IoT 기술을 활용하여 수요자의 요구에 맞도록 변환하여 서비스하는 시스템 구축
 - 미세먼지 통합 정보의 해석 및 활용 자문 지원
 - 기업, 개발자 대상 DB 활용 워크샵 개최 및 부가가치 창출 파트너십 구축
- ### ○ 최종 성과물
- 다양한 IoT 기기에서의 미세먼지 관련 정보 열람 가능
 - 다양한 사용자(기업, 개발자) 대상 워크샵 개최 및 파트너십 구축

□ 휴대기기 활용 ‘환경내비’ 실현기술

○ 현재 수준

- 이해당사자 그룹별로 초미세먼지 유해성 정보에 대한 이해수준의 불일치가 있음. 미세먼지 정보 환경내비 기술 세계수준 대비 50% 수준

○ 목표 수준

- risk communication 기능을 강화한 미세먼지 관련 정보 통합관리 시스템 구축을 통해 개인 주변의 미세먼지 오염도 및 위해도를 실시간 알려주는 환경내비를 실현함으로써 이해수준 불일치를 해결하고, 미세먼지 정보 환경내비 기술 세계수준 대비 95% 수준 도달
- 세부 연구내용
 - 환경내비 형태 및 기능 등의 스펙 결정
 - 환경내비 프로토타입 구현
 - 환경내비 베타테스트를 통한 동작 검증 및 개선점 발굴
 - 환경내비 기능 개선 및 최적화
- 최종 성과물
 - 위치별 환경내비 구동 가능
 - 이동경로별 초미세먼지 관련 정보 습득 및 노출 정도 미리 파악 가능

[5] 기대 효과

- 한국형 미세먼지 통합 정보 제공 및 시스템 구축
 - 파편화된 미세먼지 관련 정보의 통합 관리(농도, 유해성, 배출원, 저감장치 정보 등)
 - 정보의 시각화 및 사용성 증대
 - 정보 사용자 맞춤형 이해수준 불일치 해소
- 동네별 미세먼지 오염도/위해도 정보 제공
- 개인별 맞춤형 미세먼지 환경내비게이션
- 미세먼지 위해성으로 야기되는 사회적 비용 절감 기여
 - Risk communication 활성화
- 통합 정보 활용한 부가가치 창출
 - API 제공을 통한 데이터 활용 증대
 - 다양한 IoT 기기와의 연결을 통한 부가가치 창출
 - 인력 양성 및 일자리 창출
- 환경내비 기술을 통해 초미세먼지 노출량(dose) 및 위해도 정보를 실시간 제공함으로써 개인별 초미세먼지의 노출 정량화 가능 및 노출 최소화에 기여함.
- Risk communication 기능을 강화한 초미세먼지 관련 정보 통합관리 시스템 구축을 통해 개인 주변의 초미세먼지 오염도 및 위해도를 실시간 알려주는 환경내비를 실현함으로써 이해수준 불일치 해결에 기여함.

3.3.5 미세먼지 대응 전략과제별 상호연계

□ 전략과제별 유기적 연계로 국가 현안문제인 미세먼지 발생원인을 분석·저감하고, 미세먼지가 유발하는 국민건강 문제에 효과적으로 대응

- 계절별·권역별 집중·상세관측을 실시하여 미세먼지에 대한 정보서비스와 예보를 고도화하여 국민불안을 해소하고 예보정확도를 향상
- 스모그챔버 시스템 등으로 2차 생성원인을 규명하고 국내·해외/배출원별 기여도와 대기확산 모델을 체계화하여 과학적 사실에 기반한 대기환경정책과 연계한 배출저감 기술을 개발하여 공급
- 한국형 예보모델과 미세먼지의 인체에 대한 건강영향평가를 시행하여 환경보건정책과 통합된 안전한 건강생활 환경 제공



3.3.6 선진형 미세먼지 관리(안)

□ 기술발전에 부합하는 ‘스마트 미세먼지 규제시스템’ 구축

- 기술개발 속도와 발맞춰 미세먼지 배출원 관리는 강화하는 한편, 새로운 저감기술 개발 및 산업화 저해 규제는 개선

기본 방향

- ◇ (배출원 규제 강화) 크기와 관계없이 무게총량 기준(TSP)의 규제를, 미세먼지의 유해성, 기술 수준 및 사업장 부담 등을 종합적으로 고려한 크기 단위(PM₁₀, PM_{2.5} 등)의 규제로 전환
- ◇ (기술개발·산업화 규제개선) 신기술의 인·검증 절차 간소화(현재 6개월 소요), 국민 편의를 위한 공기청정기 필터 표준화(현재는 업체·브랜드별로 상이) 등 검토·추진

□ 미세먼지 대응 협업 생태계를 구축하기 위하여 정부 관계자로 ‘과학기술기반 미세먼지 대응 범부처 TF’ 운영

- (목적) 미세먼지 대응을 위한 국가연구개발사업을 통한 과학적 성과와 미세먼지 정책 및 제도 간 연계를 강화

- (구성) 미래부(기술), 환경부(정책·환경산업), 복지부(건강) 등 관계 부처 및 전문기관*

* 한국연구재단(미래부), 국립환경과학원·한국환경산업기술원·한국환경정책·평가연구원(환경부) 등

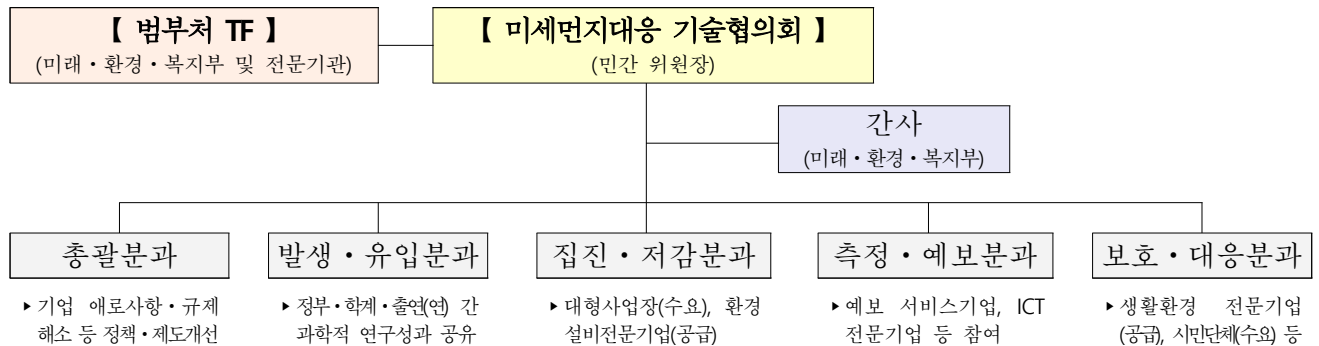
- (역할) 연구성과를 정책·제도개선에 피드백하고 부처별 R&D 진행상황 점검, 신규 R&D 투자 수요에 대한 공동 검토 및 기획 등

* 예시 : 초미세먼지 생성원인 중 특정 발생원의 중요성이 새롭게 밝혀질 경우 해당 발생원에 대한 규제방안, R&D 투자 및 부처간 역할 등 논의

□ 미세먼지 대응 협업 생태계를 구축하기 위하여 민관 공동으로 ‘미세먼지대응 기술협의회’ 구성·운영

- (목적) 정부 R&D 투자가 단순 기술개발뿐만 아니라 민간의 기술혁신 및 산업화까지 연계하여 실질적인 문제해결 및 신산업 창출을 촉진
- (구성) 위원장(민간) 아래에 미래부(과학기술)·환경부(환경정책·산업)·복지부(보건)를 공동간사로 하고, 전문가, 기업, 지자체, 시민단체 등 참여
- (활동) 정부 R&D 정보 제공 및 의견수렴, 현장의 기술수요 파악 및 공유, 기업 애로사항 및 정책·규제개선 방안 논의 등

< 과학기술기반 미세먼지 대응을 위한 협업 생태계(안) >



3.3.7 미세먼지 대응 기술개발 추진일정(안)

- 4개 세부사업 및 9개 전략과제별로 1단계부터 중점 추진할 분야와 2·3단계에 시작할 분야를 구분하고, 실증 사업의 경우는 실증 규모에 따라 단계적으로 추진할 수 있도록 함

과제명	연도						
	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
1 미세먼지 발생·유입 규명							
1. 미세먼지 생성기작 규명							
(1) 미세먼지 발생 및 유입기작 규명을 위한 집중 현장 조사	대형 오염원 배출과 장거리 이동 유입 영향 집중관측			발생·유입의 3차원 상시 관측		생성·변환 메커니즘 규명 및 대기화학 모델개선을 위한 모수화	
(2) 스모그 챔버를 이용한 초미세 먼지 생성 메커니즘 규명	주요 전구체별 지표물질 개발		기상/액상/비균질 반응에 의한 생성기작 규명				
2. 미세먼지 발생원인 및 정량적 기여도 규명							
(1) 권역별 미세먼지 오염원 산정 체계 구축	권역별 주요 오염원 기여도 산정		차세대 수용모델 기술 개발 및 오염원 프로파일 라이브러리 구축				미세먼지 대책지원을 위한 모델링 시스템 구축
(2) 대기질 모델링을 이용한 기여도 종합 분석 및 대책 지원	외부 유입, 2차생성량 산정 및 고농도 스모그 원인 규명			정책 지원을 위한 모델링 시스템 개발: 특별대책 목표 달성을 위한 제어인자 발굴 및 저감량 산정			
2 신속하고 정확한 측정·예보 체계							
3. 초미세먼지 입체감시 기술 개발							
(1) 실시간 3차원 입체관측 자료 생산·분석·활용 통합시스템 구축	3차원 입체관측자료 통합 수집 및 표준체계 구축			실시간 3차원 입체관측자료 통합시스템 구축		OSSE 활용 3차원 입체 자료동화 체계 완성	
(2) 초소형·초경량 미세먼지 측정 시스템 개발			초소형·초경량 측정센서·장치 개발	1차 및 2차 전구물질 실시간 정밀 측정시스템 개발		이동관측 플랫폼용 측정장치/분석시스템 개발·적용	
4. 한국형 미세먼지 예보 모델 개발							
(1) 한국형 독자 미세먼지 예보모델 개발	3대 핵심모델 개발 및 통합예보시스템 구축: 단기예보 정확도 75% 달성				한국형 독자 미세먼지 예보모델 현업 적용 및 개선/보완		
(2) 미세먼지 장기예보 시스템 개발			빅데이터 수집·분석	딥러닝 모델 개발 및 최적화		인공지능을 활용한 예보 시스템 구축: 7일 장기예보 실현	
(3) 국가 대기오염물질 배출량(CAPSS) 불확실성 개선	불확실성이 큰 배출량 영역 배출계수/활동도 자료 개선			배출량 시스템의 신속한 개선을 위한 프로그램 효율화			

과제명	연도						
	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
3 비용 효과적인 집진·저감 시스템							
5. 배출원별 1·2차 미세먼지 저감기술 개발·실증							
(1) 대형사업장 대상 직접배출 저감	Long Bag Filter 기술 실증			Retrofit용 장치 개발		Retrofit용 장치 실증	
(2) 대형사업장 대상 원인물질 저감	핵심기술 개발·2MW급 실증			SOx, NOx 제어기술 50MW급 실증			
(3) 중소사업장 전용 1, 2차 미세먼지 동시 저감	초저가 제어 핵심기술 개발			중소사업장 전용 여과집진시스템 개발			
6. 비산먼지 발생 저감 기술 개발·실증							
(1) 도로발생 비산먼지 저감				무동력 집진장치 핵심기술 개발		무동력 집진장치 실차 적용	
(2) 지하철도/터널 비산먼지 저감				자바니 저감시스템 개발		전동차 적용 기술 실증	
(3) 건설현장 비산먼지 저감				핵심기술 개발		실증화 사업화 기반 구축	
4 국민생활 보호·대응 기술							
7. 생활환경 미세먼지 노출저감 기술 개발·실증							
(1) 주택 실내환경 미세먼지 노출 저감 기술	원천기술 개발			상용화		실증화	
(2) 미세먼지 취약형 공공장소 노출 저감 기술	상업시설 미세먼지 저감 원천기술 개발			대중교통 실내·상업시설 저감기술 상용화		실증화	
(3) 초미세먼지 착용형 정화장치 개발				원천기술 개발·상용화		보급형 정화장치 실증화	
8. 미세먼지 건강영향 평가							
(1) 한국인의 생활패턴을 고려한 실내외 미세먼지 노출량 평가	생활공간 미세먼지 측정			미세먼지 노출 DB 구축		개인노출 모델 평가	
(2) 코호트를 이용한 인체위해성 역학 연구	코호트 추적시스템 구축			미세먼지 건강영향 추적		개인 맞춤형 건강영향 평가	
(3) 노출·역학·독성 통합 위해성 평가	미세먼지 위해성 기전 규명 및 지표 발굴			미세먼지 위해성 평가체계 구축		미세먼지 위해성 평가 플랫폼 검증	
9. 개인 맞춤형 미세먼지 정보 서비스 플랫폼 구축							
(1) 미세먼지 통합관리 서비스 시스템 구축	국내외 초미세먼지 통합 DB 구축			통합 정보 제공 플랫폼 제작		초미세먼지 통합관리 시스템 구축 및 개선	
(2) IoT 접목 스마트 통합 정보관리 시스템 구축	스마트폰 연동형 미세먼지 측정 모듈 개발			DB 접근 API 개발		IoT 접목 스마트 통합관리 시스템 구축	
(3) 휴대기기 활용 ‘환경내비’ 실현				환경내비 프로토타입 제작		환경내비 개선 및 최적화	

부록 1. 초미세먼지 문제 해결을 위한 과학적 이해와 정책

A1.1 서론

초미세먼지와 그로 인한 스모그로 인해 많은 국민들이 불안해하고 있다. 2013년에 예년에 비해 미세먼지와 초미세먼지 농도가 증가하면서, 초미세먼지 농도가 높을 것으로 예보된 날에는 운동이나 야외활동을 취소하고, 마스크를 온 가족이 착용하는 등 대비를 하는 가정이 늘고 있다. 초미세먼지는 우리의 호흡기, 순환기 등에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다.

5대 신문사의 미세먼지 관련 기사 건수가 2013년 4분기부터 예년에 비해 4.5배 정도로 폭발적으로 증가하였다. 그러나 언론에서는 미세먼지 문제에 있어 원인은 중국의 영향을 강조하며 대응은 개인적 대응을 강조하였고, 미세먼지 문제를 상업적으로 이용하려는 시도가 계속되어, 많은 국민들이 불안해하고 있다(김영욱 등, 2015a,b). 또한 전문가와 일반인은 미세먼지 위험에 대해 인식 차이가 큰 것으로 나타나, 일반 국민들에 대한 미세먼지 정보 제공이 그다지 효과적이지 않았음을 보여주고 있다(김영욱 등, 2016).

초미세먼지 관련하여, 이를 줄이기 위한 많은 정보들이 여러 곳에서 제공되고 있다. 경유 가격, 경유자동차가 배출하는 오염물질의 종류와 양, 석탄 화력발전소의 영향, 고기구이나 생선구이 문제, 외부로부터의 이동 등 많은 정보가 산발적으로, 그리고 단편적으로 제공되고 있다. 더구나 경유자동차에서 배출되는 오염물질의 양에 대한 정보에서 보듯이 어떤 정보가 보도되면, 그에 대한 반대의 논리를 담고 있는 정보가 보도되고 있다. 이들 정보는 하나하나 중요하기는 하지만, 국민들을 오히려 혼란에 빠뜨리고 있고, 국민들은 더 불안해하고 있다. 어떤 정보가 믿을만한 것인지, 그 정보가 맞는다면 나와 내 가족은 어떻게 행동해야 초미세먼지 영향을 덜 받을 수 있는지, 지금까지 정부에서는 이런 오염물질 배출을 줄이기 위해 아무 대책도 시행하지 않았던 것인지.

정부에서는 2013년 12월에 미세먼지 종합대책을 수립하여 시행하고 있다. 이 대책은 (1) 미세먼지 예보제 확대 및 경보제 실시, (2) 한중일 국제협력 강화, (3) 친환경자동차 보급 확대, 제작차 배출허용기준 단계적 강화, 교통수요 관리 강화, (4) 사업장 배출허용기준 강화, 대기오염물질 총량관리 강화, NOx 저배출 보일러 등 교체 지원, (5) 오염측정망 확충 등의 내용을 담고 있다. 종합대책은 미세먼지 오염 저감을 위한 다양한 정책방향을 종합적으로 포괄하여 제시하고 있지만, 사업장 관리 외에는 대체로 구체성이 떨어지는 지원 강화, 협력 강화 등을 주요 내용으로 하고 있어 실질적인 미세먼지 오염 저감에 도움이 될 수 있을지 의문이라는 평가이다. 또한 종합대책의 세부적인 내용은 비슷한 시기에 발표된 2차 수도권 대기환경관리 기본계획과 대동소이한 것으로 보인다(한국법제연구원, 2015).

수도권 대기환경관리 기본계획(기본계획)은 우리나라 인구의 절반 정도가 살고 있는 수도권의 대기오염을 저감하기 위해 수립, 시행된 계획이다. 지난 2005년부터 10년간 3조원 넘는 예산을 투입하여 수도권의 미세먼지와 이산화질소 농도를 줄이기 위한 정책(1차 기본계획)을 시행하여왔고, 2015년부터 10년간 4조5천억원 이 넘는 예산을 투입하여 2차 기본계획을 시행하여 미세먼지, 이산화질소와 함께 초미세먼지와 오존 농도를 줄이는 정책을 펴고 있다. 기본계획은 미세먼지 종합대책과 비슷하게 천연가스 버스 도입, 경유자동차의 제어장치 부착, 사업장 대기오염 물질 총량관리제(배출권 거래제 포함), 노후 차량 조기폐차, 도로 청소 등 다양한 대책이 있다(환경부, 2013).

그럼에도 불구하고 국민이 불안해한다면, 앞서서도 설명하였듯이 정부가 초미세먼지와 관련하여 국민과의 소통에서 성공적이지 않았다는 것을 뜻한다. 환경문제는 환경오염을 최소화하는 것도 중요하지만, 이와 함께 중요시되는 것은 국민의 불안을 최소화하는 것이다. 초미세먼지를 포함한 대기환경 문제는 국민이 걱정하고 개인적으로 대처할 수 있는 부분은 매우 작다. 이 문제는 정부가 종합적으로 문제를 파악하여 대책을 세우고 개선하여야 할 문제이다.

2016년 6월 정부에서는 국민의 불안을 해소하기 위해 범부처적으로 미세먼지 관리 특별대책을 발표하고, 이의 실효성을 확보하기 위해 국가전략프로젝트의 하나로 ‘과학기술기반 (초)미세먼지 솔루션 개발 사업’을 기획하고 있다(범부처 미세먼지 연구기획위원회, 2016). 이 글은 (1) 왜 초미세먼지가 문제가 되는지를 이해하기 위한 과학적인 배경을 설명하고, (2) 초미세먼지의 농도와 배출량 현황을 검토하여 우리의 이해가 부족한 부분을 파악하여, (3) 왜 과학적 이해가 초미세먼지 문제 해결에 필수적인지를 논의하고, (4) 과학적 이해와 초미세먼지 정책 및 국민 불안 해소 방안과의 연관성을 논의하였다.

A1.2. 초미세먼지의 과학적 배경

A1.2.1 초미세먼지의 생성

초미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM₁₀)는 각각 공기역학적 지름이 2.5 μ m, 10 μ m 이하의 먼지를 의미한다. 대기오염물질은 발생원에서 직접 배출되는 1차 대기오염물질과 대기에서 반응하여 생성되는 2차 대기오염물질로 구분된다. 초미세먼지는 1차 대기오염물질(표 A1.1)과 2차 대기오염물질(표 A1.2)로 구성되어 있으며, 특히 고농도 사례에서는 2차 대기오염물질의 비중이 매우 높다(김용표와 여민주, 2013)

표 A1.1. 배출에 의해 생기는 초미세먼지 성분과 중요한 배출원(1차 대기오염물질)

주요 배출원	초미세먼지 성분(1차 대기오염물질)
유기물(연료, 생체 등)의 불완전 연소	원소상탄소(EC, elemental carbon, 검댕이 대표적인 예임), 유기탄소(OC, organic carbon)
여러 유기물 배출원(나무 등)	유기탄소
토양, 바다 등 자연적 배출원	흙먼지, 바다먼지 등
고기구이 등 음식물 조리	원소상탄소, 유기탄소

표 A1.2. 대기에서 반응에 의해 생기는 초미세먼지 성분과 주요 반응(2차 대기오염물질)

초미세먼지를 생성하는 주요 반응과 반응물질(1차 대기오염물질)	초미세먼지 성분(2차 대기오염물질)
황산화물 + 산화제	황산염
질소산화물 + 산화제	질산염
질소산화물 + 휘발성유기화합물 + 산화제	유기탄소
암모니아(기체) + 산성 먼지(황산염, 질산염 먼지 등)	암모늄(먼지)

표 A1.2에 제시되었듯이 초미세먼지를 대기에서 생성하는 반응의 주요 반응물질(전구물질)은 황산화물, 질소산화물, 휘발성유기화합물, 암모니아이다. 이들 전구물질의 우리나라에서의 주요 배출원을 표 A1.3에 제시하였다. 따라서 대기의 초미세먼지 농도를 줄이기 위해서는 초미세먼지의 배출뿐만 아니라, 이를 생성하는 전구물질의 배출도 같이 줄여야 한다.

표 A1.3. 초미세먼지 생성에 관여하는 오염물질의 중요한 배출원(1차 대기오염물질)

오염물질	주요 배출원
황산화물(SO ₂)	석탄 등 황이 포함된 연료 연소
질소산화물(NO _x)	질소가 포함된 연료 연소, 공기의 질소가 연소과정의 고온에서 분해
암모니아(NH ₃)	가축 사육, 비료, 자동차 등
휘발성유기화합물(VOCs, volatile organic compounds)	용매 사용, 자동차 연료, 인쇄소, 고기구이 등 다양한 배출원

A1.2.2 초미세먼지 저감 정책

그렇다면 초미세먼지의 농도를 줄이는 것이 초미세먼지 대책의 최종목표인가를 검토해보자. 표 A1.4는 특정대기유해물질의 관리목표를 배출량, 대기농도, 위해도, 선언적으로 설정할 경우의 장단점을 평가한 것이다(국립환경과학원, 2013). 초미세먼지가 아닌 특정대기유해물질에 관한 것이지만, 초미세먼지의 위해도도 크기 때문에 참고가 될 수 있을 것이다. 미세먼지 종합대책이나, 1, 2차 기본계획은 대기농도 수준을 목표로 설정하고, 이를 달성하기 위한 배출량 저감방안을 수단으로 제시하고 있다. 그러나 초미세먼지의 경우 이를 구성하는 다양한 화학성분에 따라 유독성이 달라지고, 장소나 개인에 따라 노출 정도가 달라지므로, 초미세먼지의 대기농도가 저감되었다고 하여 위해도가 그에 비례하여 저감되는지는 확실하지 않다. 따라서 환경 정책, 특히 초미세먼지 관리 정책의 최종 목표는 초미세먼지가 사람에게 끼치는 영향(위해도)을 저감하는 것이 되어야 할 것이다.

표 A1.4. 특정대기유해물질 관리 목표별 장단점 비교(국립환경과학원, 2013).

목표	목표 명확성	정책 확실성	정책 방향성	관리 유연성	관리 편리성	관리 효율성	평가 객관성	총점
선언적	1	1	4	5	1	1	1	14
위해도	5	5	4	4	3	2	4	27
대기농도	4	4	3	3	4	3	3	24
배출량	3	3	2	3	5	4	2	21

그림 A1.1은 대기오염물질이 발생하여 영향을 미치는 과정을 모식화한 것이다. 초미세먼지의 위해도를 줄이기 위해 각 과정에서 다양한 대책을 사용할 수 있다. 예를 들어 배출허용기준을 강화하여 발생원에서 발생한 대기오염물질을 대폭 제거하여 배출량을 저감할 수 있고, 버스정류장이나 어린이집, 병원 등의 민감시설에 국소적인 초미세먼지 저감설비를 설치하여 초미세먼지 흡입량을 저감하여 노출량을 저감할 수도 있다. 또한 유독성이 큰 특정 화학성분의 배출과 노출을 중점적으로 저감하기 위한 대책을 수립할 수 있을 것이다.



그림 A1.1. 초미세먼지와 전구물질이 발생하여 사람에게 영향을 미치는 과정 모식도.

그러나 실제 상황은 그림 A1.1에 제시된 것보다 복잡하다. 그림 A1.2에 제시된 것처럼 다수의 발생원에서 초미세먼지와 전구물질들이 발생하고 있다. 이를 제어하여 배출량을 저감하기 위해서는 다양한 발생원에서 다양한 물질의 배출허용기준을 설정하고, 이를 제어하기 위한 제어장치를 설치하여 운영하여야 한다. 그러나 제어장치의 설치 및 운영에는 비용이 발생하며, 배출허용기준 수준에 따라 그 비용이 크게 차이가 날 수 있다. 전구물질의 배출허용기준을 설정하기 위해서는, 그 물질 자체의 유독성뿐만 아니라 초미세먼지의 생성에 얼마나 기여하는지에 대한 과학적인 이해가 필요하다. 뿐만 아니라 우리나라에서 대기에 있는 대기오염물질이 실제 사람의 활동공간이나 활동 방법에 따라 어떻게 사람에게 흡입되는지의 상관관계도 명확하게 밝혀야만, 배출량을 줄이기 위해 어떤 곳에 어떤 제어기술을 적용하면 되는지가 결정된다. 그러나 우리나라에서 대기농도와 배출량의 상관관계에 대한 이해는 거의 없는 실태이다(범부처 미세먼지 연구기획위원회, 2016). 다시 말하면, 적절한 장소에 적절한 제어 수준을 결정하고, 이를 달성하기 위한 기술을 선정하기 위해서는 발생에서 배출, 배출에서 대기농도, 대기농도에서 노출량, 노출량에서 영향을 파악하는 과학적 이해가 필요한 것이다.



그림 A1.2. 초미세먼지와 전구물질이 다양한 발생원에서 발생하여 사람에게 영향을 미치는 과정의 모식도.

A1.3. 초미세먼지 현황

A1.2에서 전구물질이 초미세먼지로 변환되는 과정이나, 사람이 초미세먼지에 노출되는 과정을 과학적으로 이해하지 않고는 초미세먼지를 효과적으로 저감하는 것이 힘들다는 것을 논의하였다. 그렇다면 지금까지 대기오염물질 관리는 어떻게 진행되었고, 초미세먼지를 포함한 대기오염물질의 농도는 그에 따라 어떻게 변화하였는지를 파악하는 것이 필요하다. 1960년대와 1970년대에는 대기관리 정책이 명확하지 않았다. 시민들의 경제 수준이 어느 정도 향상되자 1980년대부터 대기오염문제에 대한 관심이 높아지고, 대기오염물질의 배출을 줄이기 위해 연료 전환과 배출원 관리를 시작하였다. 연료 전환이란 싸지만 대기오염물질을 많이 배출하는 석탄이나 증유를 비싸지만 대기오염물질이 적게 나오는 LPG나 천연가스(도시가스), 등유로 전환하는 것이다. 1980년대 후반부터 1990년대 초반까지 각 가정에서 연탄 사용을 제한하고, 기름 보일러를 가스 보일러로 바꾸게 된 것이 바로 이 정책이다. 배출원 관리란 서울에 있던 생산시설을 다른 곳으로 이전하거나, 생산시설에서 배출할 수 있는 허용 농도를 줄이는 (배출허용기준 강화) 정책이다. 이 두 가지 정책으로 인해 1980년대 중반부터 서울의 1차 대기오염물질 농도는 2000년대 초까지는 획기적으로 줄어들었다(김용표와 여민주, 2013). 그러나 이들 정책들은 우리나라의 특성을 이해하고 입안, 시행되었다기보다는 선진국에서 성공한 정책들을 벤치마킹하여 시행한 것으로 보인다.

초미세먼지 화학성분을 파악하면, 1차 대기오염물질과 2차 대기오염물질의 구성을 이해하는데 도움이 되며, 초미세먼지의 저감 대책 방향(배출 관리와 전구물질 관리, 특정 대기오염물질의 중점 관리 등)을 정할 수 있다. 따라서 우선 우리나라의 초미세먼지

질량농도와 초미세먼지를 구성하는 주요 화학성분의 농도 추이를 파악하고, 배출량과의 관계를 검토하여 우리가 아직 이해하지 못하는 점들을 파악하는 것이 중요하다. 우리나라 초미세먼지 농도는 2000년대 들어 관측하기 시작하였으며, 초미세먼지의 화학조성은 자료가 많지 않다. 따라서 이 장에서는 가장 자료가 많은 서울의 관측 결과를 제시하였다.

A1.3.1 질량농도

그림 A1.3, A1.4에서 보듯이 초미세먼지 농도는 1980년대부터 1990년대 중반까지는 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘었으나, 1990년대 후반부터 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도를 유지하였고, 2000년대 후반부터는 2015년부터 시행된 연평균 대기환경기준 농도인 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 전후를 유지하고 있다. 미세먼지의 연평균 농도는 2003년부터 계속 감소하여, 2010년에는 연평균 대기환경기준 농도인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하였고, 2012년에는 1차 기본계획 목표인 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 가까운 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈다. 그러나 2013년에 초미세먼지와 미세먼지 농도가 증가하였다. 연구자들이 측정한 초미세먼지의 농도는 정부 자료 보다는 높은 값을 보이며, 이유는 명확하지 않다.



그림 A1.3. 서울의 초미세먼지와 미세먼지, 총부유분진(TSP) 농도 추이. (선으로 표시된 자료는 정부의 공식 자료이며, 심볼로 표시된 자료는 연구자들의 측정결과임. 채워진 심볼은 연평균 농도이며 칠하지 않은 심볼은 단기간(계절별이나 월별) 자료임. 다음의 화학성분 농도 추이 그림들도 같음).

미세먼지와 초미세먼지 농도가 2003-2012년 사이에 감소한 이유나, 2013-2015년 사이에 증가한 이유는 명확하지 않다. 환경부에서는 2012년까지의 감소 추세는 1차 기본계획에 따라 서울과 수도권의 대기오염물질 배출량을 저감한 것이 주원인이라고 설명하였으나(환경부, 2013), 2013년부터 증가한 것에 대해서는 외부영향이 있다는 것 외에는 명확한 설명을 하지 않고 있다. 그러나 2013년 이전에도 외부영향은 있었을 것으로 보이고, 더구나 2012년까지의 감소 추세가 기상조건에 의한 것이라는 분석 결과도 있으며(임득용 등, 2012), 1차 기본계획이 성공적이었는지에 대한 통계적 검토 결과 성공적이라는 근거를 찾지 못하였다는 논의도 있다(한혁 등, 2015). 2013년 이후 초미세먼지 농도가 증가한 것에 대한 과학적인 분석은 A1.4에 제시하였다.



그림 A1.4. 서울의 초미세먼지와 미세먼지 농도 추이.

초미세먼지가 태양빛을 산란하거나 흡수하여 발생하는 현상인 스모그는 그다지 개선되지 않았다. 그림 A1.5에서 보듯이 가시거리는 초미세먼지나 미세먼지 농도 추이와는 다르게 2003-2008년 사이에 증가하지 않았다. 2009년부터 2012년 사이에 가시거리가 증가하여 2008년 11.5 km에서 2012년 14.8 km로 증가하였으나, 2013년에 다시 먼지 농도와 같이 감소하였다. 가시거리 추이가 초미세먼지 농도 추이와 같은 경향을 보이지 않는 것은 초미세먼지의 화학조성과 대기 상대습도 등의 영향일 것으로 보이나(Baek et al., 1996), 이에 대해 아직 원인을 파악하지 못하고 있다.

A1.3.2 황산염 농도

기체상 황산화물의 농도는 2000년대 초부터 5-6 ppb로 거의 일정한 값을 보이고 있지만 초미세먼지의 황산염 농도는 1986년에 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘었다가, 1990년대 중반부터 $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도에서 큰 변화가 없다. 중국의 기체상 황산화물 배출량이 우리나라에 비해 월등하게 많고, 기체상 황산화물의 체류시간이 길기 때문에, 서울에서 관측한 황산염의 대부분은 중국에서 이동한 기체상 황산화물이 이동하는 동안 반응하여 생성된 것이라고 생각되어 왔다. 그러나 제주도 고산 측정소에서 관측한 초미세먼지의 황산염 농도는 중국의 황산화물 배출량과 같은 경향을 보이지만(Kim et al., 2011), 서울의 초미세먼지 황산염 농도는 그런 경향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 서울의 황산염 농도는 중국 같은 외부 영향도 있지만, 수도권이나 우리나라의 영향을 상당히 받는 것으로 판단된다. 그러나 서울에서 관측된 황산염 가운데 어느 정도가 우리나라 외부에서 유입된 것인지는 확실하지 않다. 이는 4장에서 설명하겠지만, 우리나라에서 사용하는 모델에서는 기체상 황산화물이 황산염으로 전환하는 과정을 잘 예측하지 못하고 있기 때문이다.



그림 A1.5. 서울의 가시거리 추이.



그림 A1.6. 서울 초미세먼지의 황산염 농도와 그 전구물질인 기체상 황산화물 농도 추이.

A1.3.3 질산염

질산염의 전구물질인 기체상 질소산화물은 대기에서의 체류시간이 황산염보다 짧고, 초미세먼지의 질산염도 황산염보다는 체류시간이 짧아서, 질산염 농도는 주로 국지적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그림 A1.7의 질산염 농도 추이는 명확하지는 않으나, 1990년대 후반에서 2000년대 초반 사이에 증가한 것으로 보인다. 최근 서울에서 발생한 고농도 초미세먼지 사례(스모그 사례)에서는 질산염의 농도가 급증하는 현상이 관측되기도 하여, 고농도 초미세먼지 사례에서의 국지적 영향에 대한 논의가 있다. 서울의 질소산화물 주요 배출원은 도로이동오염원(주로 자동차)이며, 서울의 질산염 농도 증가는 국지적인 화석연료 사용(자동차나 발전소, 각 가정의 가스보일러 등)의 증가가 큰 원인으로 보인다.



그림 A1.7. 서울 초미세먼지의 질산염 농도 추이.

질산염의 전구물질인 질소산화물은 연소과정에서 배출될 때에는 대부분 일산화질소(NO) 형태이나, 대기에서 빠르게 산화하여 이산화질소(NO_2)로 변화한다. 환경부는 1차 기본계획 평가에서 수도권 질소산화물 배출과 농도 저감이 그다지 성공적이지 않았다고 평가하였다(환경부, 2013). 그러나 그림 A1.8에서 보듯이, 서울의 이산화질소 농도는 그다지 감소하지 않았으나, 질소산화물 농도는 상당히 감소하였다. 따라서 이산화질소/질소산화물 비도 같이 증가하였다. 이 같은 추이가 관측된 이유에 대해서는 (1) 경유자동차의 제어장치 부착과 (2) 대기 산화 상태 변화 등의 여러 논의가 있으나, 아직 명확하게 밝혀지지 않았다(한상희와 김용표, 2015).



그림 A1.8. 서울의 질소산화물($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), 이산화질소(NO_2) 농도와 이산화질소/질소산화물 농도 비, 질소산화물 배출량 추이.

A1.3.4 원소상탄소

유기물의 불완전연소로 발생하는 원소상탄소의 농도는 자료가 있는 2000년대 초부터 농도가 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만으로 줄어들었다. 이는 1차 기본계획에서 연료 전환 및 경유자동차 대책(경유 엔진을 사용한 자동차를 천연가스나 액화석유가스(LPG) 자동차로 바꾸고, 경유자동차에 여러 제어장치를 부착하며, 노후 자동차의 조기 폐차 등의 정책)과 노천 소각 억제 등의 정책을 시행한 것이 큰 영향을 끼쳤을 것으로 보인다.



그림 A1.9. 서울 초미세먼지의 원소상탄소(EC) 농도 추이.

A1.3.5 유기탄소

유기탄소의 농도는 원소상탄소와는 달리, 1990년대부터 2000년대 중반까지는 뚜렷한 변화를 보이지 않았으나 2000년대 중반부터는 감소한 것으로 보인다. 유기탄소 성분은 직접 배출되기도 하고(1차 대기오염물질), 대기에서 화학반응에 의해 생성되기도 하여 (2차 대기오염물질), 그 성분을 분석하여야만 특성을 이해할 수 있을 것이다. 현재 서울의 유기탄소 성분 분석 연구결과가 많지 않으나, 자연적 기원, 인위적 기원의 1차 유기탄소 성분과 2차 유기탄소 성분이 다 같이 기여하고 있는 것으로 보인다(Choi et al., 2016).



그림 A1.10. 서울 초미세먼지의 유기탄소(OC) 농도 추이.

A1.4. 초미세먼지 생성 기작의 과학적 이해의 필요성

A1.4.1 과학적 이해의 어려움

A1.3의 서울의 초미세먼지 질량과 화학성분의 농도 추이 결과를 요약하면, (1) 초미세먼지 농도와 초미세먼지의 화학성분들은 적어도 지난 10여년 동안 줄어들었거나, 거의 증가하지 않았고, (2) 서울의 초미세먼지는 주로 2차 대기오염물질로 구성되어 있으나, (3) 2차 대기오염물질이 서울, 수도권에서 배출된 전구물질이 반응하여 생긴 것인지, 외부에서 들어온 것인지는 이 자료만으로는 알 수 없다는 것이다. 그림 A1.2에서 보였듯이, 초미세먼지를 줄이기 위해서는 어느 배출원에서 배출되는 어떤 오염물질이 우리나라의 초미세먼지 농도에 기여하는 정도를 정량화하여야 한다. 이에 더하여, 우리나라의 경우에는 외부에서 이동하는 초미세먼지와 전구물질이 매우 많은 것으로 보인다. 이는 초미세먼지 대기 체류시간이 미세먼지나 다른 대기오염물질에 비해 길어, 외부로부터의 영향이 상대적으로 클 수 있기 때문이다.

이러한 상황을 종합적으로 그림 A1.11에 표시하였다. 우리나라 대기의 초미세먼지 농도를 결정하는 각 과정은 배출, 외부 유입, 대기에서의 전구물질의 반응에 의한 생성, 외부 유출과 제거 과정이다. 이들 각 과정의 상대적인 중요도와 주요 대기오염물질을 이해하여야 우리나라 초미세먼지 농도를 예측하고, 특정 정책 수단이 얼마나 효과적인지를 국민이 신뢰할 수 있는 자료와 함께 예측할 수 있다.



그림 A1.11. 서울 대기의 초미세먼지 농도를 결정하는 과정 모식도.

예를 들어 2013년부터 초미세먼지 농도가 증가하기 위해서는 (1) 우리나라의 배출이 증가하였거나, (2) 중국이나 북한 등의 외부 영향이 증가하였거나, (3) 우리나라 대기에서의 초미세먼지 생성이 증가하였거나, (4) 기상 등의 여건 변화에 의해, 제거되거나

외부로 유출되는 양이 감소하였거나, (5) 앞의 네 조건이 복합적으로 작용하였어야만 한다. 국민들이 불안해하는 가장 큰 이유는, 정부에서 2013년의 초미세먼지 농도 증가에 대해 명확한 설명을 하지 못하고 있기 때문이다.

특히 초미세먼지는 미세먼지와는 달리 발생원에서 배출되는 것보다 대기에서 전구물질의 화학반응에 의해 생성되는 양이 훨씬 많아, 그 생성 기작을 이해하여야만 효과적인 저감 대책 수립이 가능하다. 또한 초미세먼지의 대기 생성반응에는 오존 등의 광화학 산화 물질이 같이 생성되어, 초미세먼지 생성 기작의 이해는 오존 등 다른 대기오염물질 저감에도 필수적이다. 마지막으로 초미세먼지는 대기오염물질이기도 하지만, 기후변화를 유발하는 단기체류기후변화물질로 그 생성, 변환, 제거 기작을 이해하는 것이 중요하다. 동아시아는 초미세먼지의 생성량이 가장 높은 지역으로 주목을 받고 있어, 우리의 과학적인 이해는 중국, 일본 등에서도 활용될 수 있을 것이다.

그러나 그림 A1.12에서 보듯이, 초미세먼지의 대기에서의 생성 반응은 반응물질과 반응경로가 다양하고, 비선형이며 이의 이해가 어렵다. 특히 대기에서 생성되는 2차 오염물질 가운데 휘발성유기화합물과 질소산화물의 반응에 의해 생성되는 2차 유기먼지의 생성은 기체 반응, 입자상 반응, 기체/입자 평형 등 복잡한 화학 현상이 관여되어 있어, 이의 이해가 어렵다. 반응 경로가 비선형인 경우에는, 서울에서 질소산화물의 배출만 저감할 경우에는, 질소산화물에 의해 억제되던 휘발성유기화합물의 산화반응이 촉진되어 초미세먼지와 오존 농도가 증가할 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2006; Jin et al., 2012).



그림 A1.12. 미세먼지와 오존 생성에 기여하는 대기 광화학반응의 모식도(Meng, 1997).

A1.4.2 국내 연구 동향

(1) 생성기작 규명

생성기작을 이해하기 위해서는 우리나라에서 일어나는 광화학반응의 주요 반응물과 반응 경로를 이해하여야 한다. 이를 이해하여야 초미세먼지 농도에 기여하는 주요 기여원의 기여도를 정량적으로 파악할 수 있을 것이다. 생성기작을 이해하는 데 필수적인 도구는 스모그 챔버와 집중 관측, 대기화학 기작 모델링 기술이다. 스모그 챔버는 대기 반응조건을 인위적으로 재현하여, 실제 대기에서의 반응을 실험실 조건에서 연구하는 연구 방법이다. 스모그 챔버를 활용한 연구를 통해 그 지역의 실제 대기 조건에서의 주요 반응물과 반응경로, 그리고 주요 생성물을 파악할 수 있다. 이와 함께, 실제 대기에서의 대기화학 현황을 파악하기 위해, 3차원 집중관측을 통해 그림 A1.11에 나와 있는 여러 과정의 기여도를 정량적으로 파악할 수 있다. 마지막으로 이런 실험과 관측 결과를 바탕으로, 우리가 이해하는 우리나라의 대기 화학반응 조건을 모델로 구현하여, 미래의 정책 시나리오의 타당성을 검증할 수 있다.

미국과 유럽에서는 스모그 챔버에서의 실험결과를 바탕으로 실제 대기에서의 관측결과를 검증하고 대기화학 기작 모델 파라미터들의 값을 개선하는 종합적인 연구를 수행하고 있다. 미국과 유럽의 스모그 챔버 관련 연구에서 주목할 것은 장치의 완성도보다는 전문인력의 지속적인 연구가 더 좋은 연구결과를 산출하고 있다는 것이다. 미국 캘리포니아대학 리버사이드 교정(UCR)의 스모그 챔버는 전세계 최고 수준으로 평가받고 있으나, 1970년대부터 지속적인 연구를 수행하고 있는 미국 CALTECH 스모그 챔버에서 더 우수한 결과가 나오고 있다는 평가이다. 이는 일본 국립환경연구소(NIES)나 중국의 중국환경과학연구소(CRAES)의 스모그 챔버가 규모나 시설로는 최고 수준이나 최근 결과가 거의 없는 것으로도 알 수 있다.

우리나라에서 스모그챔버 연구는 KIST에서 2000년대 초부터 10여년의 연구 경험이 있다. 집중관측은 2000년대 초와 2000년대 후반 각각 국립환경과학원과 서울시의 지원으로 수행되었고, 2015, 2016년에 국립환경과학원의 지원으로 집중관측 연구가 수행되었다. 2016년은 우리나라 여러 기관과 미국 NASA가 공동으로 연구를 수행하였다. 생성기작 모델링 분야는 개별 연구자의 연구 결과는 있으나, 종합적으로 연구되지는 않았다.

(2) 측정 및 분석

일반 대기오염물질 관측 기술은 관측 및 분석 장비는 세계적인 수준이나 가시적인 결과는 미국이나 유럽에 비해 미흡한 수준이다. 초미세먼지 무기이온, 원소상탄소, 유기탄소 농도 분석은 여러 기관에서 일상적으로 수행하고 있다.

극미량성분의 기체상 및 초미세먼지의 화학성분 분석 기술은 한국기초과학지원연구원과 한국표준과학연구원에서 세계 수준의 장비와 인력을 보유하고 있으나, 대기 분야의 지원이 미흡하여 다른 분야의 연구를 우선적으로 수행하고 있다. 그 외 국립환경과학원에서 세계적인 수준의 초미세먼지 관련 관측기기를 보유한 집중관측소를 6개소 운영하고 있으나, 아직

가시적인 결과는 많지 않다. 조선대나 목포대 등에서 외국의 기술을 도입하여 기존 정량/정성 분석이 이루어진 초미세먼지 유기성분에 대해 분석연구를 수행하고 있으나, 시작 단계이며 장기간의 지원이 필요한 분야여서 아직 가시적인 결과는 많지 않다(그림 A1.13 참조).



그림 A1.13. 서울 대기에서 채취한 초미세먼지에 존재하는 유기에어로졸 성분(각 점이 한 유기성분임)(이지이 등, 2009).

(3) 대기 모델링 기술

우리나라와 동북아시아의 대기 특성을 반영하지 못하는 미국 모델을 도입하여 미세먼지 및 초미세먼지 예보제에 활용하고, 현황 분석을 통한 정책 시나리오 분석에 활용하고 있으나, 신뢰성을 아직 확보하지 못하고 있다. 미국에서 개발된 모델로는 현재 우리나라나 중국에서 관측된 황산화물의 산화속도보다 매우 낮은 속도를 예측하고 있어, 동북아시아의 주요 반응 기작은 미국과는 다를 것으로 예상되나, 모델로는 이 차이를 구현할 수 없다. 이는 동북아시아 지역은 토양 성분의 농도가 높아 미국에서는 중요 반응경로가 아닌 토양입자 표면반응이 중요할 가능성이 크기 때문으로 예상되나, 아직 이를 모델에 반영하지 못하고 있다. 모델 개선 관련 연구는 배출량과 기상자료 등의 입력자료의 개선에 중점을 두고 연구를 진행하고 있다. 따라서 모델링 연구는 대중적인 현상 파악 및 해석하는 수준에 치우치고 있다.

미국은 자국의 대기환경에 최적화된 CMAQ 등의 모델을 개발하여 (1) 과학적인 생성기작 연구뿐만 아니라, (2) 현황 파악과 초미세먼지 예보와 (3) 정책 시나리오 분석에 활용하고 있다. 이를 위해 모델 자체 개발보다는 배출량 개선, 계산속도 향상 등 운용 효율 증가를 위한 연구를 진행하고 있다. 유럽은 지난 10여년간 자국 고유의 모델 개발 및 활용에 연구를 집중하고 있어, 독일이나 프랑스 등은 독자 모델을 개발하였다. 일본은 미국에서 개발된 CMAQ을 활용한 연구에 중점을 두고 있으며, 중국은 CMAQ을 활용하면서 자체 모델 개발 연구를 수행하고 있으나 아직 연구 수준은 높지 않은 것으로 보인다.

(4) 위해성 평가 기술

위해성 평가 기술은 (1) 초미세먼지에 의한 유독성 파악, (2) 초미세먼지 노출량 파악, (3) 초미세먼지에 의한 위해도 파악의 세 부분으로 나눌 수 있다. 초미세먼지의 화학성분별 유독성은 외국 자료를 적극적으로 활용할 수 있다. 그러나 특정 배출원에서 배출되는 초미세먼지나 대기에서 생성되는 초미세먼지의 화학성분, 특히 유기성분은 그 종류가 매우 많아 화학성분별 유독성을 완전히 파악하기 힘들다. 더구나 화학성분들의 복합적인 작용에 의한 유독성이 상승할 가능성도 있다. 따라서 주요 배출원에서 배출되었거나 우리나라에서 생성된 초미세먼지의 통합적인 유독성을 파악하는 연구가 필요하다. 이 분야 연구는 2000년대 초부터 산발적으로 진행되었으나 체계적인 결과는 아직 미흡하다.

초미세먼지가 실제 우리 국민의 활동에 따라 얼마나 흡입하는지를 평가하는 노출량 평가는 아직 자료가 많지 않다. 이는 장기간에 걸쳐 많은 사람들의 활동을 관측하며 연구를 수행하여야 하며, 이런 관측대상(cohort) 연구가 본격적으로 수행된 것은 최근이다.

초미세먼지가 실제 인체에 영향을 미치는 위해도를 평가하는 연구는 역학연구를 통해 어느 정도 진행되고 있으나, 노출량 평가 연구가 아직 시작 단계여서 과학적인 인과관계를 파악하지는 못하고 있다.

A1.5. 과학적 이해를 통한 초미세먼지 해결

우리나라의 대기환경 정책은 주로 연료 전환과 배출허용기준 강화를 통한 대기오염 물질 배출 저감 정책을 활용하였다. 이 정책은 1차 대기오염물질을 효과적으로 저감하였다. 그러나 초미세먼지는 발생원에서 배출되기도 하지만 대기에서 생성되는 비율이 높아, 대기화학반응의 주요 생성기작을 이해하지 못하면 효과적인 저감 정책을 수립하기 힘들다.

미국이나 유럽은 일찍부터 자국의 환경을 반영한 대기에서 생성되는 초미세먼지의 유기성분 생성 수율 및 자국 내 전구물질의 물질별 기여도를 파악하여 저감대책 수립에 활용하고 있다. 또한 집중관측소(super-site) 연구를 통하여 얻어진 관측 자료를 활용하여, 수용모델 등을 활용하여 주요 오염원을 파악하고, 오염원별 저감 정책을 수립하고 있다. 이런 과학적인 이해에 바탕을 둔 정책 수립 및 시행으로 미국은 악명이 높았던 로스엔젤레스 지역의 스모그도 많이 개선시켰다. 최근에는 (1) 국지적인 화학반응에 의한 유해 유기에어로졸 성분 분석 및 위해성 평가와 (2) 아시아로부터 장거리이동하는 초미세먼지와 오존의 생성, 이동 기작 규명에 중점을 두어 연구하고 있다. 유럽도 국지적인 유해성(주로 유기 에어로졸)과 전유럽지역의 초미세먼지와 오존 이동 및 영향에 대한 연구에 중점을 두고 과학적인 이해를 증진하는 연구를 수행하고 있다. 중국은 스모그 현상을 줄이기 위한 지역별 대기오염 특성 규명 및 배출원 저감에 중점적으로 연구를 진행하고 있으며, 정책적 면에서 우리나라의 2000년대 초와 비슷한 정책과 연구를 수행하고 있다.

외국 사례에서 보듯이, 초미세먼지 문제를 해결하려면 (1) 초미세먼지의 생성과 사람에게 대한 영향에 대한 과학적 이해 연구를 수행하여 불확실도를 줄이고, (2) 이를 바탕으로 초미세먼지와 그 전구물질을 효율적으로 저감하는 정책을 수립하여야 할 것이다. 그림 A1.14는 초미세먼지 문제를 해결하기 위한 정책 결정과정 모식도이다. (1) 초미세먼지의 농도가 높아져 스모그가 발생하고, 건강 영향에 대한 국민의 불안이 커지면, (2) 그로 인한 영향(위해도)을 평가하여야 한다. 이를 위해서는 대기에서의 초미세먼지의 농도와 조성을 측정하고, 초미세먼지에 의한 영향(주로 사람에게 대한 위해성)을 평가하여야 한다. 그 다음에는 (3) 초미세먼지 문제의 원인을 과학적으로 규명하여 (4) 초미세먼지에 의한 영향을 줄이기 위해 저감해야 할 대기오염물질의 종류와 저감 정도를 결정하여야 한다. 이 과정에는 외국 사례 조사/분석, 현황 파악을 위한 측정, 이를 이해하기 위한 생성기작 규명 연구, 규명한 기작을 바탕으로 한 모델을 활용한 미래 사례 분석이 필수적이다. 마지막으로 (5) 저감을 위한 시나리오를 제시하고, (6) 시나리오별 비용편익 분석 등의 방법을 통해 대책별 우선순위를 정한다. (7) 이 우선순위를 바탕으로 여러 정치적/사회적 협의를 통해 저감하여야 할 분야, 전구물질 저감 정도를 결정하여 그 정책을 시행한다. 이 과정에는 모델링 연구와 함께 사용 가능한 기술과 그 기술의 경제성 분석이 따라야 한다. (8) 물론 주기적으로 정책의 효과를 분석하고, 이를 바탕으로 정책을 수정, 보완하여 시행하여야 할 것이다.



그림 A1.14. 초미세먼지 문제(스모그)를 해결하기 위한 정책 결정과정 모식도.

A1.4에서 제시하였듯이, 우리는 초미세먼지 문제에서 생성기작, 위해성 평가, 모델링 분야에서 과학적 이해가 부족하여, 신뢰성 있는 초미세먼지 저감 정책 수립에 어려움이 있다. 위해성 평가 같은 분야는 우리나라 결과가 아직 많지 않아, 외국 결과를 주로 활용하고 있다. 이런 경우 오차와 함께 외국 결과를 우리나라에 적용 가능한지, 적용이 가능하더라도 외국 결과를 시용할 때 얼마나 우리 사례에 맞는 지 등의 불확실도 발생한다. 또, 우리는 아직 서울이나 우리나라에서 초미세먼지가 생성되는 대기에서의 화학반응에서 주요 반응물이나 반응 경로가 선진국에서 연구한 결과와 일치하는지, 다르다면 어떻게 다른지 잘 모르고 있다. 이러한 과학적 이해에 바탕을 둔 모델도, 현재 우리가 사용하는 모델들은 미국의 대기를 잘 예측하도록 개발된 모델들이므로, 우리나라 사례를 얼마나 잘 모사하는 지 잘 모르고 있다.

따라서 국민들이 신뢰할 수 있는 초미세먼지 저감 대책을 수립하기 위해서는 초미세먼지의 발생부터 사람에게 미치는 영향까지를 과학적으로 이해하는 것이 필수적이다.

참고문헌

- 감사원, 감사결과 처분요구서 -경유자동차 배출가스 저감사업 추진실태-, 2008.
- 감사원, 감사 보고서 - 수도권 대기환경 개선사업 추진실태 -, 2016.
- 국립환경과학원, 특정대기유해물질 관리정책 방향 설정 및 로드맵 수립, 연구보고서, 2013.
- 김영옥, 이현승, 장유진, 이혜진, 언론은 미세먼지 위험을 어떻게 구성하는가?: 미세먼지 위험 보도 프레임과 정보원 분석, 한국언론학보, 59(2), 121-154, 2015a.
- 김영옥, 이현승, 이혜진, 장유진, 미세먼지 위험에 대한 수용자의 인식과 의견 형성에 관한 연구 - 프로모션 기사 인식정도와 관여도에 따른 분석, 한국언론정보학보, 72, 52-90, 2015b.
- 김영옥, 이현승, 이혜진, 장유진, 미세먼지 위험에 대한 전문가와 일반인의 인식차이와 커뮤니케이션 단서 탐색 - 인간심리모델(Mental Models)을 중심으로 한 분석, 커뮤니케이션 이론, 12(1), 2016.
- 김용표, 여민주, 서울의 대기환경기준물질 농도 추이, 한국대기환경학회지, 29(4), 368-376, 2013.
- 범부처 미세먼지 연구기획위원회, 과학기술기반 미세먼지 대응 전략 공청회 발표 자료, 2016.
- 수도권대기환경청/한국환경공단, 수도권 사업장 대기오염물질 총량관리제 성과보고서(2008~2014년), 2015.
- 이지이, Lane, D. A., 허종배, 이승목, 김용표, Thermal

- desorption-comprehensive two dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry (TD-GC $\times$ GC-TOFMS)을 이용한 서울 대기 중 PM_{2.5} 유기성분 분석, 한국대기환경학회지, 25, 420-431, 2009.
- 임득용, 이태정, 김동술, 장기간 대기오염 및 기상측정 자료(2000~2009)를 이용한 PM₁₀과 NO₂의 강수세정 기여율과 바람분산 기여율의 정량적 추정연구, 한국대기환경학회지 28(3), 325-347, 2012.
- 전소현, 김용표, 중국의 스모그 저감정책에 대한 고찰, Particle and Aerosol Research, 11(3), 63-75, 2015.
- 한국법제연구원, 미세먼지오염 저감을 위한 대기관리법제 개선방안 연구, 연구보고 2015-03, 2015.
- 한상희, 김용표, 서울시 대기 중 초미세먼지(PM_{2.5}) 질량과 화학성분 농도의 장기 변동 추이, 한국대기환경학회지, 31(2), 143-156, 2015.
- 한혁, 정창훈, 금현섭, 김용표, 수도권 대기환경 개선 효과분석: PM₁₀ 변화를 중심으로. 한국대기환경학회 2015년 정기학술대회.
- 황은진, 이지이, 김용표, 시료주입부를 활용한 대기 유기에어로졸 분석법 (TD-GC-MS) 개발, 한국환경분석학회지, 17(1), 54-61, 2014.
- 환경부, 수도권 대기환경관리 기본계획, 2005.
- 환경부, 2차 수도권 대기환경관리 기본계획, 2013.
- Baik, N. J., Kim, Y. P., and Moon, K. C., "Visibility study in Seoul, 1993," Atmospheric Environment, 30:2319-2328, 1996.
- Choi, N. R., Lee, S. P., Lee, J. Y., Jung, C. H, and Kim, Y. P., "Speciation and source identification of organic compounds in PM₁₀ over Seoul, South Korea," Chemosphere, 144, 1589-1596, 2016.
- Jin, L., Lee, S.-H., Shin, H. J., and Kim, Y. P., "A study on the ozone control strategy using the OZIPR in the Seoul Metropolitan Area," Asian J. Atmospheric Environment, 6, 111-117, 2012.
- Kim, I. S., Lee, J. Y., and Kim, Y. P., "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, 2013.
- Kim, N. K., Kim, Y. P., and Kang, C. H., "Long-term trend of aerosol composition and direct radiative forcing due to aerosols over Gosan: TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} data between 1992 and 2008," Atmospheric Environment, 45, doi:[10.1016/j.atmosenv.2011.08.051](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.051), 6107-6115, 2011.
- Kim, N. K., Kim, Y. P., Morino, Y., Kurokawa, J.-I., and Ohara, T., "Verification of NO_x emission inventory over South Korea using sectoral

- activity data and satellite observation of NO₂ vertical column densities," *Atmospheric Environment*, 77, 496-508, 2013.
- Kanakidou, M., Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., Barnes, I., Dentener, F. J., Facchini, M. C., Van Dingenen, R., Ervens, B., Nenes, A., Nielsen, C. J., Swietlicki, E., Putaud, J. P., Balkanski, Y., Fuzzi, S., Horth, J., Moortgat, G. K., Winterhalter, R., Myhre, C. E. L., Tsigaridis, K., Vignati, E., Stephanou, E. G. and Wilson, J., "Organic aerosol and global climate modelling: A review," *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1053-1123, 2005.
- Kwon, S. H., Kim, Y. P., and Lee, J. Y., "Impact of dust storm on the organic composition in the ambient aerosol," *Aerosol and Air Quality Research*, 13(1), 97-106, 2013.
- Lee, S., Ghim, Y. S., Kim, Y. P., and Kim, J. Y., "Estimation of the seasonal variation of particulate nitrate and sensitivity to the emission changes in the greater Seoul area," *Atmospheric Environment*, 40, 3724-3736, 2006.
- Meng Z., Dabdub D. and Seinfeld J. H., "Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter," *Science*, 277, 116-119, 1997.
- Shin, H. J., Cho, K. M., Han, J. S., Kim, J. S., and Kim, Y. P., "The effects of precursor emission and background concentration changes on the surface ozone concentration over Korea," *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1), 93-103, 2012.
- Shin, H. J., Kim, J. C., Lee, S. J., and Kim, Y. P., "Evaluation of the optimum volatile organic compounds control strategy considering the formation of ozone and secondary organic aerosol in Seoul, Korea," *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 1468-1481, 2013.
- Shin, H. J., Roh, S. A., Kim, J. C., and Kim, Y. P., "Temporal variation of volatile organic compounds and their major emission sources in Seoul, Korea," *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 8717-8728, 2013.

부록 2. (초)미세먼지의 노출평가 방법

A2.1. 서론

최근 (초)미세먼지(particulate matter, PM) 농도의 증가로 인하여 인체에 미치는 영향은 사회적 관심이 되고 있다. 미세먼지에는 중금속, 염, 탄소류 등 다양한 화학적 성분이 포함되어 있으며, 또한 먼지의 크기, 형태, 표면적 등 물리적 상태도 사람 건강에 다양한 영향을 미치고 있다(장안수, 2014). 미세먼지의 노출은 결막염, 부비동염, 중이염, 기관지염, 천식 및 만성폐쇄성 질환, 폐렴, 협심증, 심근경색, 폐암 등 심각한 질병을 초래한다(Ristovski et al., 2012). 국내에서도 배현주(2014)의 연구에 의하면, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 초과 사망발생위험을 평가한 결과, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인하여 전체원인 및 심혈관계 초과 사망발생위험을 유의하게 높이고 있었다.

미세먼지의 건강영향을 고려할 때 개인 또는 인구집단의 노출평가가 요구된다(WHO, 2005). 그 동안 국내외에서는 대기 고정측정망 등의 미세먼지 농도가 지역의 모든 인구집단에 동일하게 노출되는 것으로 가정하고, 역학연구 등의 건강영향평가가 수행되어 왔다(Lall et al., 2004). 하지만 대부분의 사람들은 매일의 생활에서 국소적으로 생활공간(실내환경) 내에서 (초)미세먼지뿐만 아니라 모든 유해인자에 대해 다양한 농도 수준에 노출되며, 동일한 노출수준을 나타내지 않는다(Kotzias, 2005).

한편, 대부분의 사람들은 주택을 비롯한 사무실, 학교, 차량, 공공시설 등의 실내 환경에서 하루 중 88% 정도 생활하는 것으로 보고되고 있다(Yang et al., 2011). 이것은 사람이 호흡하는 공기의 대부분이 실내환경에서 이루어지며 실내공기질(indoor air quality, IAQ)이 인간의 건강과 밀접한 관련이 있다는 것을 의미한다. 또한, 쾌적한 실내환경의 조성은 인간의 삶의 질 향상에 필수적이다. 특히, 유아, 노인, 주부 등의 인구집단은 실내환경에 거주하는 시간이 다른 인구집단에 비해 상대적으로 많으므로 실내공기의 오염은 보건학적 측면에서 중요한 의미를 가진다(WHO, 2013).

이영규 등(2015)이 실시한 다중이용시설의 실내외 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도 평가에 의하면, 지하역사, 지하상가, 어린이집의 PM₁₀ 농도는 다중이용시설의 실내공기질 유지기준을 만족하였으나, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 실내외 농도비(I/O ratio)는 대부분 1을 초과하여 실내에 발생원이 존재한다는 것으로 보고하였다. 실내에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도비는 대략 0.6~0.7로 나타났으며, 이에 실내의 PM_{2.5} 관리가 중요한 것으로 보고하였다. 따라서 미세먼지 노출에 따른 건강영향 평가 시 개인 또는 인구집단의 노출평가가 정밀하게 수행되어야 한다.

본 고에서는 (초)미세먼지 노출에 따른 건강영향의 원인적 상관성을 고려할 때 노출평가 방법을 고찰하였다. 그 동안 국내외의 (초)미세먼지 노출평가는 대기 고정측정망의 농도값을 이용하여 지역주민의 사망률 및 상병률의 농도-반응 관계

(concentration-response function)의 적용이 대부분이었다. 하지만 (초)미세먼지의 노출은 다양한 요인에 영향을 받기 때문에 그 적용성을 고찰하여 실용 가능하며 신뢰성 있는 노출평가 방법이 필요한 실정이다.

A2.2. 본론

국내외 (초)미세먼지 노출 관련 논문 및 보고서를 고찰하였다. 국외 논문 및 보고서는 Science Direct, EBSCO Host, PubMed, Google 학술검색을 이용하였다. Key Words로 ‘particulate matter(미세먼지)’와 ‘exposure(노출)’를 입력하였다.

A2.2.1 노출평가

환경오염물질에 노출된 사람의 위해를 결정하는 것은 오염물질 발생원(source), 환경매체(media)에서 환경오염물질의 농도, 노출(exposure), 노출량(dose), 건강영향(outcome)의 5가지로 나타낼 수 있다(Furtaw, 2001). 노출(exposure)은 환경오염물질과 인간의 시각적 외부 경계(예: 입, 피부, 코 등)와 접촉하는 것으로 정의할 수 있다. 노출은 접촉되어 인체에 들어갈 수 있는 양이고, 노출량(dose)은 환경오염물질에 노출되어 신체 내에 유입되는 양으로, 노출경로는 호흡기(inhalation), 소화기(ingestion), 피부(dermal contact)이다. 노출의 주요 요인(factor)은 3가지(활동 요인, 생리학적 요인, 매체 중 농도 요인)로 구분할 수 있다. 활동 요인은 시간, 국소환경, 활동이며, 생리학적 요인은 호흡, 소화, 피부흡수, 농도 요인은 매체인 공기, 음용수, 음식, 토양이다.

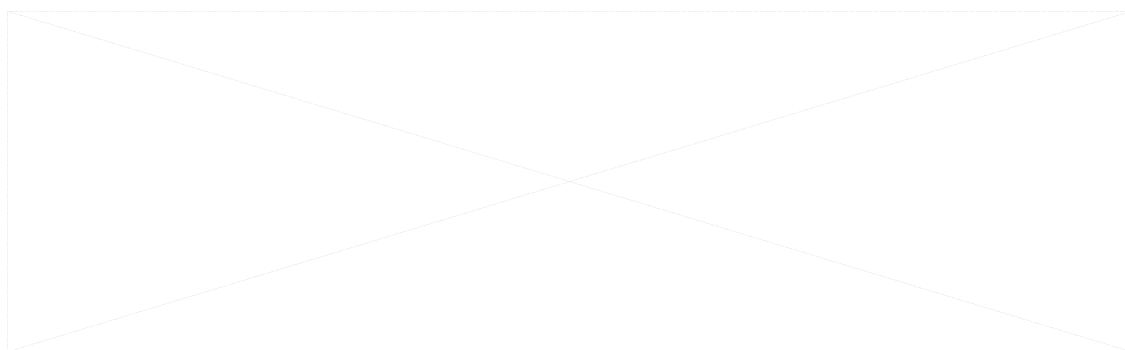


그림 A2.1. 환경유해인자의 발생원, 환경매체, 노출, 노출량 및 건강영향 단계

노출은 순간노출(instant exposure), 평균노출(average exposure), 통합노출(integrated exposure)로 구분할 수 있다. 순간노출은 단기간(1초, 1분 등) 동안의 노출로 접촉구역의 매체 부피당 노출인자의 양으로 나타낼 수 있다(예: mg 노출인자/m³ 공기). 평균노출은 일정시간(8시간, 24시간, 1개월 등) 동안 평균을 의미하며, 통합노출에서 일정시간으로 나누어 주면 된다(예: ppm). 통합노출은 순간노출

곡선의 적분으로 계산할 수 있다(예: ppm-hr). 예를 들면, 벤젠 1~2.5 ppm의 농도로 40년 동안 노출되었다면 통합노출은 40~90 ppm-years가 된다(Johnson et al., 2007).

$$\text{평균노출}(X, Y, Z) = \frac{\text{통합노출}[\int_{t_1}^{t_2} C(Z, Y, Z, t)dt]}{t_2 - t_1}$$

노출의 개념을 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다.

① 농도

오염물질 종류에 따라 공간적 및 시간적으로 농도(ppb, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 변할 수 있다.

② 노출

노출은 다음 식과 같이 일정 시간 동안 평균 노출농도의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 단위는 농도-시간단위(ppb-hr 또는 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-hr}$)로 표현된다.

$$E(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} C(t)dt$$

여기서, E: 노출, C(t): 시간에 따른 농도, $t_1 \sim t_2$: 노출기간이다. 노출기간은 1일, 1주일, 1년이 될 수 있다.

개인노출 측정은 호흡기 근처(breathing zone, 호흡기에서 약 30 cm 이내)에서 공기오염물질을 채취 분석한 값으로 표현할 수 있다.

③ 노출량

호흡량을 고려하면 유입 노출량(presented dose)과 흡수 노출량(absorbed dose)으로 구분할 수 있다. 유입 노출량은 공기오염물질의 호흡기 유입(intake 또는 uptake)량을 의미하며, 흡수 노출량은 폐, 피부 등을 포함한 실제 흡수된 양을 의미한다.

$$\text{유입 노출량 } D_p = \int_{t_1}^{t_2} B(t) \times C(t)dt$$

여기서, B는 호흡률(breathing rate)을 나타내며, 따라서 D_p 의 단위는 μg 으로 나타낼 수 있다. 노출량은 일반적으로 하루당 체중당 오염물질의 양($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$)으로 표현한다(Macintosh et al., 1995).

$$\text{흡수 노출량 } D_a = \int_{t_1}^{t_2} f \times B(t) \times C(t) dt$$

여기서, f 는 침착분률(deposited fraction) 또는 흡수분률(absorption fraction)이다. 따라서 호흡기를 통한 흡수노출량을 하루당 체중당 오염물질의 양으로 표현하면 다음과 같다.

$$D_a = \frac{E_{ij} \times I_{ij} \times A_l}{W_i}$$

여기서, D_a : 국소환경에서 개인 i 의 흡수 노출량($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$), E_{ij} : 국소환경 j 에서 개인 i 의 노출농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), I_{ij} : 국소환경 j 에서 개인 i 의 호흡률(m^3/day), A_l : 폐의 흡수분율(무단위), W_i : 개인 i 의 체중(kg).

A.2.2.2 노출평가 방법

노출평가(exposure assessment)는 유해인자의 수용체(인간)에 대한 실제 또는 잠재적 노출정도(노출빈도, 노출기간, 노출양상 등)를 평가하는 중요한 분석적 도구이기 때문에 건강 위해성평가와 역학연구에서 필수적이다. (초)미세먼지를 포함한 유해인자의 노출평가 방법은 직접(개인노출과 생체시료) 및 간접적(설문지와 환경측정 또는 모델링) 방법으로 수행될 수 있다(Moschandreas et al., 2002; Nieuwenhuijsen et al., 2006) (그림 A2.2). 노출평가 접근에서 중요한 점은 직접적 방법이 간접적 방법보다 우선시되며, 직접적 방법 중 생물학적 모니터링과 개인노출은 각각 장단점이 있기 때문에 상호 보완적이라는 것이다(Manini et al., 2007). 예를 들면, 개인노출과 생물학적 모니터링의 동시 측정은 노출경로를 명확히 하는데 도움을 줄 수 있으며, 개인노출 농도가 매우 낮다면 굳이 생물학적 모니터링을 할 필요가 없다고 할 수 있다. 즉, 개인노출과 생물학적 모니터링은 보완적으로 서로 적용될 수 있다(Maroni et al., 1999).



그림 A2.2. 노출평가 방법

직접적 방법 중 개인노출(personal monitoring)은 대상 (초)미세먼지를 포함한 공기오염물질이 흡수되는 사람 신체 부위에 측정기(sampler)를 부착하고, 그 부근에서 양이나 강도를 측정하여 노출되는 양이나 강도로 가정하는 것이다(Zhu et al., 2010). 예를 들면, 공기오염물질은 호흡기로 흡입되므로 호흡기 주변 30 cm 이내에 측정기를 착용하고 채취하면 된다. 개인노출의 한계점은 가스상 오염물질의 경우 호흡기에서만 측정하므로 다른 노출경로인 피부나 소화기의 흡수는 반영하지 못하며, 호흡기 주위에 있는 공기에서의 양이라고 할지라도 이들이 모두 호흡기로 흡수된다고 볼 수 없다. 반면 (초)미세먼지는 피부의 노출이 없는 것을 고려하면 노출평가가 가능하지만, 소용량 펌프(pump)를 착용하여 시료채취하는 것은 현실적으로 불가능한 형편이다. 최근 이런 단점을 보완한 소용량 직독식(MicroPEM)이 개발되기도 하였다(RTI, 그림 A2.3). 직접적 방법 중 생물학적 모니터링(biological monitoring)은 유해 환경오염물질에 노출된 사람의 생물학적 검체인 소변, 혈액, 변 등에서 유해인자의 내재용량(internal dose)을 측정하여 노출정도나 건강위험을 평가하는 것으로, 모든 노출경로(호흡기, 소화기, 피부)에 의한 통합적 노출을 제공한다. 약물 동력학(physiologically based pharmacokinetic, PBPK)은 생체에서 일어나는 약물(환경오염물질)의 이동현상, 즉 약물의 분포, 대사, 흡수, 배설에 관하여 속도론적으로 규명하는 것이다(Cocker, 2014). (초)미세먼지의 생물학적 모니터링은 (초)미세먼지의 성분 중 금속류를 혈액 또는 소변에서 측정함으로써 노출을 평가할 수 있다(Abril et al., 2014). 하지만 금속류는 음식류의 인체 유입에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 작업환경 등 고농도 (초)미세먼지의 노출평가는 가능하지만 일반환경의 노출을 평가하는 경우 오차 가능성이 있다.

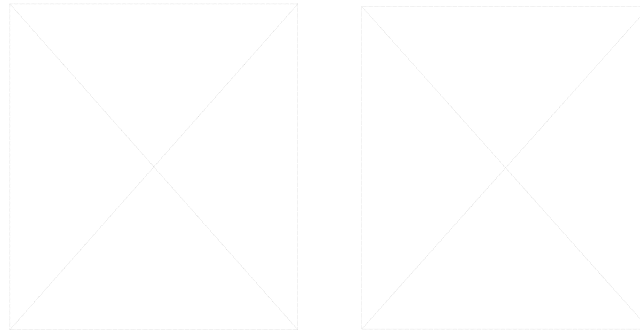


그림 A2.3. 소형 미세먼지 측정기(MircoPEM)

간접적 방법은 실내외 환경 모니터링 및 모델링 그리고 설문지를 이용한다(Kuo et al., 2010). 설문지를 이용한 노출평가는 비교적 많은 사람들을 대상으로 적용 및 비용 면에서 유리하지만, 간접흡연과 같이 냄새 등을 인식할 수 있는 경우 등에 적용할 수 있으며, 정확도와 정밀도에 한계가 있다(Nondahi et al., 2005). 실내외 생활환경의 (초)미세먼지 모니터링은 접근 가능한 측면이 있으며, 대기환경 모델링도 비교적 국내외에서 이용되고 있다(Zannetti et al., 2015). 실내외 환경 모니터링과 모델링은 적용성 및 유용성으로 연구자들에게 비교적 다수 보고되고 있지만, 노출되는 사람이 한곳에 머물러 있지 않고 계속 이동하고 있기 때문에 노출평가에 제한점이 있다.

그 동안 국내외에서 다양한 방법을 이용하여 공기오염물질의 농도를 예측 또는 평가하는 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그 동안 대기 고정측정망, 대기 확산 모델, 지리정보시스템(geographic information system, GIS), land use regression (LUR) 등을 이용하여 공기 중 오염물질의 농도를 예측하고, 사람들의 노출을 추정하였다. 하지만 사람들은 한곳에 계속 머물고 있는 것이 아니라 계속적으로 움직이기 때문에 시간활동 양상이 필수적으로 접목되어야 개인 또는 인구 집단의 노출을 예측할 수 있다. 미국 환경청에서도 공기오염물질의 노출을 추정하기 위한 방법으로 SHEDS (stochastic human exposure and dose simulation) 모델을 제시하고 있으며, 이 모델에서도 시간활동 양상은 중요하게 이용되고 있다(US EPA, 그림 A2.4). SHEDS 모델은 실내 및 실외 발생원에서 배출된 오염물질이 공기 중 농도를 실내와 실외로 구분하였고, 시간활동 양상을 접목하여 각 국소 환경의 노출을 종합하여 평가한다. 그리고 호흡량을 곱하여 노출량을 추정한다. 결론적으로 노출평가를 할 때 각 국소환경의 (초)미세먼지 농도값과 시간활동 양상의 중요성을 제시하고 있으며, 또한 사람이 실내환경에서 대략 90% 이상을 생활하는 것을 이용하는 것이다. 시간활동 양상의 중요성은 유해 공기오염물질의 노출(exposure)이 국소환경의 농도(concentration)와 사람의 재실시간(time)의 곱으로 나타낼 수 있기 때문이다(Moschandreas et al., 2002). 보건학적 측면에서 노출은 어떤 국소환경에 유해 공기오염물질이 존재하더라도 사람이 그 국소환경에 재실하

지 않는다면 노출은 없으며 따라서 위해(risk)도 없다고 할 수 있다. 따라서 유해 공기오염물질에 대한 노출평가에서 국소환경의 농도 측정뿐만 아니라 사람이 재실하는 시간을 반드시 함께 고려해야하기 때문에 개인 또는 인구집단의 시간활동 양상 평가는 노출평가에서 매우 중요한 요인이라고 할 수 있다.



그림 A2.4. 미국 환경청의 SHEDS 모델 개념도

A2.3. 결론

황사 등 (초)미세먼지 노출에 따른 급성 및 만성 조기사망 등의 건강영향은 국내외에서 초미의 관심사이다. 이것은 (초)미세먼지 노출의 평가가 중요함을 나타내는 것이다. 그 동안 국내외 연구에서는 대부분 대기 고정측정망의 (초)미세먼지 농도가 지역주민에 동일하게 노출되는 것으로 가정하고 건강영향 결과의 연관성을 분석하였다. 하지만 사람은 한곳에 머물러 있는 것이 아니라 지속적으로 이동하기 때문에 노출평가를 신뢰성있게 수행하기 어려웠다. 노출평가 방법은 다양하지만 현 시점에서 가장 현실적이며 적용 가능한 방법은 국소환경의 (초)미세먼지 농도와 시간활동 양상을 결합한 노출모델의 이용이라고 생각한다. 그리고 소용량 개인노출용 직독식 등의 개발은 실시간 개인노출을 측정할 수 있기 때문에 이용 가능할 수 있으며, 노출모델의 평가에도 응용 가능하다.

참고문헌

- 배현주. 서울시 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인한 사망영향. 한국환경보건학회지, 40(5), 346-354, 2014.
- 이영규, 이병준, 성민기, 서성철, 허정, 정다영, 김순신, 조민석, 김주완, 김재현, 조성민, 양원호. 다중이용시설의 실내외 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도 평가. 한국실내환경및냄새학회, 14(4), 235-243, 2015.
- 장안수. 미세먼지가 건강에 미치는 영향. J Korean Med Assoc, 57(9), 763-768, 2014.
- Abril G.A., Wannaz E.D., Mateos A.C., Pignata M.L. Biomonitoring of airborne particulate matter emitted from a cement plant and comparison with dispersion modelling results. Atmospheric Environment, 82, 154-163, 2014.
- Cocker J. A perspective on biological monitoring guidance values. Toxicology Letters, 231, 122-125, 2014.
- Furtaw E. An overview of human exposure modeling activities at the EPA's national exposure research laboratory. Toxicol Ind Health, 17, 302-314, 2001.
- Johnson E.S., Langard S., Lin Y. A critique of benzene exposure in the general population. Science of Total Environment, 374, 183-198, 2007.
- Kotzias D. Indoor air and human exposure assessment - needs and approaches. Experimental and Toxicology Pathology, 57, 5-7, 2005.
- Kuo H., Shen H. Indoor and outdoor PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in the air during a dust storm. Building and Environment, 45, 610-614, 2010.
- Lall R., Kendall, M., Ito K., Thurston G.D. Estimation of historical annual PM_{2.5} exposures for health effects assessment. Atmospheric Environment, 38, 5217-5226, 2004.
- Maroni M., Fait A, Colosio C. Risk assessment and management of occupational exposure to pesticides. Toxicology Letters, 107, 145-153, 1999.
- Moschandreas D.J., Saksena S. Modeling exposure to particulate matter. Chemosphere, 49, 1137-1150, 2002.
- Moschandreas D.J., Watson J., D'Abreton P., Scire J., Zhu T., Klein W., Saksena S. Chapter three: methodology of exposure modeling. Chemosphere, 49, 923-946, 2002.

- Nieuwenhuijsen M., Paustenbach D., Duarte-Davidson R. New developments in exposure assessment: the impact on the practice of health risk assessment and epidemiology studies. *Environment International*, 32, 996-1009, 2006.
- Nindahi D.M., Cruickshanks K.J., Schubert C.R. A questionnaire for assessing environmental tobacco smoke. *Environmental Research*, 97, 76-82, 2005.
- Ristovski Z.D., Miljevic B., Surawski N.C., Morawska L., Fong K.M., Goh F., Yang I.A. Respiratory health effects of diesel particulate matter. *Respirology*, 17, 201-212, 2012.
- RTI. <https://www.rti.org/>
- US EPA.
<https://www.epa.gov/chemical-research/stochastic-human-exposure-and-dose-simulation-sheds-estimate-human-exposure>.
- WHO. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2005.
- WHO. Health effects of particulate matter. 2013.
- Yang W., Lee K., Yoon C., Yu S., Park K., Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 21, 310-316, 2011.
- Zannetti P., Daly A.D., Freeman F.R. Dispersion modeling of particulate matter containing hexavalent chromium during high winds in southern Iraq. *J Air Waste Manag Assoc*, 65, 171-185, 2015.
- Zhu X., Ma F., Luan H., Wu D., Wang T. Evaluation and comparison of measurement methods for personal exposure to fine particles in Beijing, China. *Bull Environ Contam Toxicol*, 84, 29-33, 2010.

부록 3. 실내 미세먼지의 인체노출 저감을 위한 연구방향

A3.1. 서론

과거의 대기오염 문제는 국지적인 국내의 문제였지만, 현재는 중국발 황사, 중국발 스모그 등 국경을 넘나드는 복잡한 문제가 되었다. 중국발 스모그나 황사가 국내의 대기오염에 큰 영향을 미치면서, 대기 중 미세먼지(PM₁₀) 혹은 초미세먼지(PM_{2.5})의 위험에 대한 국민들의 인식이 점점 더 커지고 있다. 서울의 대기 미세먼지의 연평균 농도는 2007년 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2012년 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조금씩 감소하고 있지만, 아직 선진국에 비하면 높은 수준이고, 특히 세계보건기구(WTO)에서 건강한 공기의 농도로 제안하는 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하면 아직도 2배 이상이다. 특히, 건강에 더욱 영향을 미친다고 알려져 있는 초미세먼지(PM_{2.5})의 경우, 서울의 2012년 연평균 농도가 25.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이지만, 뉴욕의 13.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 런던의 15.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 파리의 16.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하면 거의 두 배가 된다. 결국, 국내의 대기 오염원을 관리하는 것만으로는 미세먼지의 인체 노출을 획기적으로 감소시키기 어려운 상황이기 때문에, 단기적인 해결 방안은 사람들이 대부분의 시간을 보내는 실내공간의 농도를 감소시켜 인체 노출을 최소화할 수 있도록 노력하는 것이다. 실내공기의 건강 영향은 여러 요인에 의해 영향을 받을 수 있지만, 오염물질에 대한 인체 노출량뿐만 아니라 노출빈도, 노출기간이 고려되어야 하고 노출대상인 사람의 체중, 호흡량 및 평균 수명 등이 영향을 미칠 수 있다는 것을 이해해야 한다. 결국, 오염물질의 인체 노출의 관점에서 실내공기질을 분석하고 방향을 설정하여야 한다.



그림 A3.1. 실내공간의 특성 - 오염원의 특성과 대기환경 및 공기조화장치의 상관관계

그림 A3.1과 같이 실내공기는 창문, 문이나 창문의 틈새 혹은 벽면의 침기 등에 의해 이루어지는 자연환기나 공조시스템이나 외기처리장치, 환기장치 등에 의해 제어되는 강제환기장치로 바깥 공기와 순환하고 있다. 자연환기가 이루어지는 과정에서 대기오염은 실내오염의 기저 농도 수준이 되기 때문에, 대기의 오염도가 높으면 실내의 오염도 또한 높아지게 된다. 그렇지만 대기의 미세먼지 농도가 높아지더라도 공조시스템이나 창문으로 유입되는 미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있다면, 유해 미세먼지의 인체 노출을 최소화할 수 있다. 즉, 공조시스템에 채용된 필터가 외기 도입이나 내기 순환 과정에서 유입된 미세먼지나 초미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있다면, 건물에 거주하는 재실자의 건강 영향을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 여러 가지 사회적 비용을 줄일 수 있다. 실내공기 중 먼지의 농도를 낮추어 얻을 수 있는 사회적 비용으로는 미세먼지 노출에 의한 조기 사망률 증가에 의한 기회비용, 천식이나 호흡기 질환 등 질병을 감소에 의한 의료비 절감, 노동력의 업무 생산성 저하 등으로 나타나는 비용 등이 있다. 또한, 건물 측면에서는 외기에서 도입된 먼지농도가 감소함에 따라 건물 내 청소주기가 감소되고, 내부 인테리어나 벽지 오염이 저감되는 등 부수적인 효과도 얻을 수 있다. 결국 간단하게는 공기청정기와 같이 실내의 오염물질을 빠른 시간에 제거하여, 사람들에게 대한 절대 노출을 줄이는 방법을 효과적으로 사용해야 하고, 동시에 대기오염물질이 실내로 유입되는 환기 경로에 잘 설계된 미세먼지 처리장치를 설치하고 효과적으로 운전하여 바깥 공기의

먼지 오염이 심한 날에도 실내 공기를 깨끗하고 건강하게 유지하는 방법이 강구되어야 한다. 환기 경로에 고효율 집진장치가 설치되면, 실내 이산화탄소나 유해가스 농축을 막아줄 수 있을 뿐 아니라 유입되는 공기 중 미세먼지를 효과적으로 걸러줄 수 있기 때문에 실내를 건강하고 깨끗한 공간으로 유지할 수 있다. 다른 측면으로는 HEPA 필터와 같은 고성능 필터가 환기 경로에 사용되면 유입되는 미세먼지나 초미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있지만, 추가적인 에너지 비용과 더 많은 유지 보수 비용을 감당해야 한다. 이와 같이, 건강과 사회적 비용 절감에 대한 충분한 인식이 필요하며, 소비자들이 공기청정기나 환기 내 청정시스템에 소요되는 장치의 비용을 충분히 감당할만한 가치가 있다고 생각해야 한다. 이를 위해서는 저감장치의 효과를 주장할 수 있는 신뢰성 있는 실증 데이터의 확보가 필요하다.

여기에서는 실내공간과 실내 입자상오염물질의 특성을 이해하여, 미세먼지 제거 장치의 성능이 아닌 미세먼지의 인체 노출을 줄이는 관점에서 당면 문제에 접근하였다. 주택과 아파트 등의 주거시설과 사무실, 공공시설을 구분하여 현재 적용되어 있는 기술과 문제점을 분석하였고, 실내 초미세먼지를 효과적으로 관리하기 위한 기술 개발의 방향과 필요한 연구 주제를 제안하였다.

A3.2. 실내 미세먼지의 특성과 인체 노출

실내공간에서 미세먼지의 농도를 줄이기 위해 공기청정기를 운전하거나 환기장치에 필터를 설치하거나 공조장치에 좀 더 성능이 높은 필터를 채용하고 있다. 그렇지만 미세먼지의 인체 노출을 줄이기 위한 목적이라면 사용되는 장치(기술 혹은 제품)의 단순한 성능이 중요한 것이 아니라, 기술이 적용되는 대상공간에 충분한 용량으로 미세먼지를 제거할 수 있는지가 중요하다. 실내는 한정된 부피의 공간이므로, 밀폐되어 있다면 간단한 청정장치(예를 들면, 공기청정기)를 사용하더라도, 공간 내의 미세먼지의 농도를 낮게 유지할 수 있어야 한다. 그렇지만 대부분의 실내공간은 밀폐되어 있지 않고, 누기나 침기 혹은 환기 등에 의해 외부 공기가 유입되고 빠져나가는 구조로 되어 있다. 즉, 자연환기하고 있는 실내공간의 경우, 실내 입자상 오염물질의 농도는 대기의 입자상 오염물질의 농도에 가깝거나 실내에 다른 입자상 오염물질의 발생원이 존재할 경우 대기에 비해 실내 농도가 더 높아질 수 있다. 반면 입자상 오염물질을 효과적으로 제어하기 위해, 누기나 침기 혹은 환기를 줄이는 방법을 사용할 수 있지만(이와 같은 방법은 건물 에너지 절감을 위한 대책으로 논의되기도 한다), 환기율이 감소하면 실내 이산화탄소나 휘발성유기화합물, 폼알데하이드 등의 가스상 물질의 농도가 증가하여 인체에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 결국, 창문을 닫고 공기청정기를 가동하는 것만으로는 건강한 실내환경을 유지하기 어렵다는 결론에 도달하고, 실내오염물질의 인체 노출을 줄려면 환기와 함께 미세먼지 제거기술이 효과적으로 적용되어야 한다. 결국 실내공기

를 청정하게 관리하기 위해서는 환기를 고려한 미세먼지 처리기술이 필요하다.

일반적으로 대기 미세먼지는 무게농도를 기준으로 이산형 크기분포를 갖는데, 1 μm 이상의 큰 입자는 보통 토양이나 해양입자 등 자연에서 비산된 입자상 물질이 대부분이고, 1 μm 이하의 입자는 주로 연소생성물에 의해 발생된다. 특히, 큰 입자들의 경우 인체영향이 크지 않다고 알려져 있는 반면, 2.5 μm 크기보다 작은 초미세먼지는 폐포에 침착되어 폐암이나 폐질환을 일으키거나 폐포의 모세혈관으로 침투하여 혈액으로 전달되어 심혈관질환의 원인이 될 수 있는 확률이 높다고 알려져 있다. 미국의 경우 PM_{2.5}의 대기기준을 적용하고 있는데, 역학조사에 의한 인체영향의 연구의 결과로 2.5~10 μm 사이의 대기 입자상 물질의 인체영향의 유의성을 확인할 수 없다고 보고하였다(EPA, 2010).

그림 A2.2에 도시의 미세먼지 크기분포를 기준으로 입경별 폐포침착률을 나타냈고, 대기 미세먼지의 입경별 무게농도와 입경별 폐포 부착율을 곱하여 대기 입자상 물질이 호흡과정에서 폐포에 부착되는 양을 계산하여 함께 나타내었다. 폐포에 부착되는 양의 효율의 계산은 MPPD (Multiple-Path Particle Dosimetry) 모델을 이용하여 계산하였다(Ji et al., 2012). 그림에서 점선은 도시의 대기 입자의 무게농도 기준의 크기분포를 나타낸다. 약 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 1 μm 이하의 연소생성물이 발생원인 피크와 1~10 μm 의 토양 등이 발생원인 피크의 이산형 분포를 나타낸다. 실선은 사람의 폐에 부착되는 비율을 나타내고 왼쪽 축에 나타냈다. 약 0.01~0.1 μm 사이의 입자의 폐포부착율이 가장 높고, 0.1~1 μm 는 상대적으로 낮은 부착율을 보이고, 1~5 μm 사이 입자의 폐포부착율이 높은 이중의 부착율 특성을 나타낸다. 0.1~1 μm 에서 부착율이 낮은 것은 사람 호흡기의 구조인 기관지와 폐가 일종의 필터 역할을 수행하기 때문에, 관성력과 확산력이 상대적으로 모두 낮은 크기에서 부착율이 낮아짐을 알 수 있다. 사각형 표식으로 나타낸 것은 입경별로 호흡 시 폐포 부착율과 무게농도를 곱해서 대기 미세먼지를 호흡할 때, 입경별로 폐포에 부착되는 농도를 나타낸다. 일반적으로 알려진 것처럼 1 μm 이하 입자의 폐포부착량이 많지만, 1~10 μm 입자의 부착량도 무시할 수 없는 수준이다. 이것은 2.5~10 μm 입자의 인체영향이 크지 않다는 연구결과로 비추어보면, 초미세먼지에 비해 대기 중에 존재하는 상대적으로 큰 입자의 독성이 낮음을 알 수 있다.

그렇지만 이와 같은 특성은 대기 입자에 한정하여 고려해야 한다. 특히, 다양한 실내공간에서 생성될 수 있는 다양한 크기와 성분의 입자상 물질에 대해서는 동일한 인체 영향이 나타난다고 볼 수 없기 때문이다. 또한 최근 독성 분야에서 주장하고 있는 것처럼 나노입자나 초미세먼지 크기 영역에서는 입자의 독성이 무게농도보다는 입자의 표면적이나 개수에 따라 더 큰 영향을 받을 수 있다. 만약 대기의 무게농도 분포를 개수농도나 표면적 농도로 나타내면 폐포에 부착되는 확률이 높아질 수 있으므로, 이에 대한 검토도 필요하다. 결국, 제어기술의 측면에서는 가능하면 모든 크기의 미세먼지가 인체에 노출되지 않도록 제거하는 것이 바람직하다. 특히

사람이 호흡하는 대기 입자 중 더 많은 에너지와 비용이 필요한 크기가 작은 초미세먼지의 제거효율을 효과적으로 증가시키기 위한 기술 개발이 필요하다.



그림 A3.2 대기 에어로졸의 크기분포 특성과 폐포 부착율의 관계

A3.3 실내 미세먼지 제거기술의 특징

일반적으로 실내공기 중 미세먼지, 초미세먼지 등 입자상 오염물질을 고효율로 제거할 수 있는 기술은 필터 여과기술과 정전기력을 이용한 집진기술이다(Bae and Ji, 2010; Ji, 2014). 필터기술은 주택이나 아파트에서는 주로 공기청정기에 채용되어있고, 건물에서는 공조장치나 외기처리장치에 중성능 필터를 채용하는 방식으로 적용되고 있다. 그렇지만 고효율 필터를 사용하면 압력손실이 높아지므로 에너지 비용이 높아진다. 또한, 필터의 성능이 높아지면 필터의 교체주기가 빨라질 수 있으므로, 필터 교체비용 등의 유지관리 비용이 고성능 필터를 채용하는 장벽이 될 수 있다. 일반 공조용 필터의 경우 작동시간이 증가할수록 대상공간의 미세먼지 농도가 높을수록 필터의 압력손실이 빠르게 증가하므로, 4~6개월에 한 번씩 필터를 교체해야 한다.

정전기력을 이용하는 집진기술로 정전필터와 전기집진기가 있다. 정전필터는 압력손실이 낮으면서 초기 집진효율이 높아, 자동차용 캐빈필터나 고효율 호흡기 마

스크 필터 등에 사용된다. 그러나 사용과정에서 초기의 정전기력이 상쇄되므로 사용시간이 증가하면 집진효율이 감소하는 단점이 있다. Frederick G. Cottrell이 산업용 전기집진시스템의 특허를 출원한 이후로 Raytheon에 의해 처음으로 가정용 전기집진 필터 시스템이 1954년 시장에 출시되었다. 압력손실이 낮고 교체비용이 들지 않지만, 같은 부피의 필터에 비해 집진효율이 낮다. 또한, 집진성능을 높이려면 오존 발생 농도를 낮게 제어해야 하고, 화재 등의 위험을 막을 수 있는 방전 안전 설계가 필요하다. 국내에서는 공조용으로 전기집진시스템이 일부 적용되고 있고, 에어컨용 집진유닛으로 일부 모델에 전기집진기가 장착되었다. 표 A2.1은 대기와 실내 미세먼지 저감 시스템의 입자상 물질 제거 효과와 특성을 정리하였다. 상세한 내용은 지준호(2014)에 설명되어 있다.

A3.4. 대상 공간(가정, 사무실, 공공장소 등)에 따른 초미세먼지 저감기술의 현황 및 필요기술

실내는 작게는 주거공간을 대표하는 주택이나 아파트, 상용공간을 나타내는 소규모 사무실 혹은 중규모, 대규모 사무실, 공공공간이나 다중이용공간인 중대형 건물, 공공시설 등으로 구분할 수 있다. 이러한 다양한 공간에서 초미세먼지의 인체 노출 저감을 위한 다양한 저감기술이 적용되고 있지만, 초미세먼지를 효과적으로 저감하기 위해서는 기존 기술을 분석하여 문제점을 찾고, 필요 기술을 고찰할 필요가 있다. 기본적으로 실내공간의 초미세먼지를 저감하는 방법으로는 아래 두 가지 방법으로 나누어 생각할 수 있다(제품에서 생성되는 오염물질을 필터 등을 이용해 누출을 막아주는 발생원의 차단기술이나 주방 환기와 같이 발생원에서 배기하는 기술은 논외로 한다).

- 내부 공기순환에 의한 미세먼지 농도 저감(공기청정기, 공조기의 내부 순환 조건의 집진장치)
- 환기 과정에서 외부 유입 미세먼지의 차단기술(외기처리장치의 집진장치, 공조기의 외기 도입 유로의 공조용 집진장치)

그림 A3.3은 외기처리장치(air handling unit, AHU)의 개념을 설명하고 있다(미국 EPA 자료). 대기로부터 실내에 유입되는 공기를 집진장치에서 제거하는 것은 물론, 실내에서 생성되는 오염물질을 포함하여 재순환되는 공기를 외기를 처리하는 동일한 집진장치를 통과시켜 효과적인 미세먼지 제거시스템을 구현할 수 있다. 국내의 일반적인 가정의 경우 창문 개폐에 의한 자연환기와 공기청정기를 이용한 실내오염 제어 방법을 사용하고 있다. 또한 공동주택에 설치된 환기시스템에서는 외기가 도입되고 배출되는 과정에서 전열교환기로 폐열을 회수하거나 중성능급 이하의 필터를 설치하여 바깥공기 중 미세먼지의 일부를 처리하고 있다. 이와 같은 외기도입장치의 환기

형 공기청정기가 가정에 도입되면, 환기와 청정을 모두 해결할 수 있는 후보 기술이 될 수 있지만, 주택에 적용하기에는 비용이 많이 소요된다는 점이 한계이다.

표 A3.1. 대기 미세먼지 저감기술과 실내 미세먼지 저감기술의 차이와 특이점.

처리 기술		집진효율	부가 특성 혹은 문제점	비고
대기 초미세먼지 배출저감시스템	전기 집진기	산업용 대규모 시스템 90% 이상의 높은 효율 초미세먼지 제거효율 높음	초기설치비 고가, 유지관리 비용이 높음 상대적으로 에너지 비용이 낮고, 필터 교체 비용이 발생하지 않음	설치비 저감과 유지관리 비용의 저감 설계 기술 필요
	백필터 집진	산업용 대규모 시스템 80~90% 이상의 효율 초미세먼지 제거효율 높음	필터 교체비용 등 유지관리 비용 요구 필터의 상대적으로 높은 압력손실로 전기집진기에 비해 에너지 비용이 높음	간단하고 오래된 기술로 산업용 적용에 신뢰성이 높음
	HEPA 필터	0.3μm 99.97% 이상의 높은 효율 초미세먼지, 나노입자 제거효율 매우 높음	클린룸, 병원, 나노작업장 등 초고효율 입자 배출 저감 시스템이 필요한 공간에 한정적으로 적용됨	에너지, 유지관리 비용에 대한 검토 필요
실내 초미세먼지 인체 노출저감시스템	전기 집진기	90% 이상의 높은 효율 초미세먼지 제거효율 높음	초기 설치비 고가, 유지관리의 어려움으로 비용이 높음 동일성능의 필터에 비해 차지하는 부피가 매우 큼 실내로 유입되는 공기의 오존농도 제어가 매우 중요함	초기 설치비 저감과 유지관리 비용의 저감 설계 기술 필요
	정전필터	초기효율은 비교적 높음(~70%), 사용에 따른 효율저하, 초기 압력손실이 낮음	많은 풍량에서 높은 집진효율을 요구하는 응용처 사용(자동차용 공조필터, 고효율 마스크 등) 사용시간에 따른 성능의 급격한 저하	적용처에 대한 신뢰성 및 수명에 대한 고려가 필요
	공조필터 집진	보통 등급에 따라 0.3μm 15~50%, 1μm 40~90% 효율 등급이 높은 고효율 필터일 경우 초미세먼지 제거효율 높아짐	필터교체 등 유지관리 비용 필요 상대적으로 낮은 초미세먼지 제거효율 MERV (minimum efficiency reporting values) 기준 등급	현재 건물 공조에 일반적으로 적용됨 저에너지 고효율 여과기술이 필요
	HEPA 필터	설계 조건에서 사용 시 0.3μm 99.97% 이상의 높은 효율 실내공기를 순환하여 제거하는 공기청정기 적용	필터교체 등 유지관리 비용 필요 필터의 높은 압력손실에 의한 에너지 비용이 매우 높음	대기의 초미세먼지 농도가 높을수록 비용 증가



그림 A3.3. 실내공간의 환기 및 청정장치 구조(US EPA)

표 A3.2는 실내를 규모가 작은 주거공간과 사무공간(소형 및 중대형)으로 구분하였고, 각 대상에 대해서 환기방식과 집진방식으로 구분하여 적용기술을 정리하였다. 기존 기술과 필요 기술을 정리하여 기술개발 방향을 고찰하였다. 적용 기술이 감당해야할 비용은 초기 설치비용(재료비, 설치비용 혹은 소비자 구입비)과 운전비용(에너지 비용, 유지관리비용)으로 나누어 생각할 수 있다. 운전비용 중 유지관리 비용에는 필터교체비용, 관리비용, 필터폐기비용 등이 포함될 수 있다.

표 A3.2. 생활 실내공간의 규모와 환기 방식에 따른 기술 검토 및 향후 기술 방향

		환기 방식 및 집진 방식	미세먼지 저감 방법		기술개발 방향
			기존 기술	필요 기술	
주거공간 (주택과 아파트) 혹은 소형 사무실	환기	창문	창문 개폐	창문형 환기 및 유입공기 청정 장치	실내에서 고농도의 미세먼지 발생 시 강제환기 필요 (조리, 흡연, 청소, 운동 행동 등) 일반환기 시 환기청정장치 가동
		기계환기 (환기장치) *대기오염물질	환기(팬, 프리필터 혹은 중성능필터)	환기 적용, 고 효율 저에너지 미세먼지 저감 장치	자연환기가 어려운 공간의 강제환 기와 연동되는 집진장치 이산화탄소 감지에 의한 자동 환 기 낮은 에너지, 고효율 장치 설치가 용이한 슬림, 컴팩트 구조
	실내 공기 청정	공기청정기 에어컨 적용 공기청정유닛 가전제품 내 공기청정 기능 융합 **대기 및 실내 오염원	HEPA급 필터 장착 공기청정 기(풍량이 클 수록 용량이 큼)	대용량, 저에너 지, 낮은 유지 관리 비용	적용공간에 따른 청정용량과 인체 노출 저감 효과 검증 저에너지, 고효율, 낮은 유지관리 비용 환기 연동 시 실내 노출 저감 효 과 검토 설치가 용이한 슬림, 컴팩트 구조
사무실 혹은 공공건물 (중대형 건물)	창문 환기	창문 자연환기 공기청정기	가정 적용 기 술	가정 적용 기 술	유지관리 편이 혹은 자동으로 유 지관리가 이루어지는 기술 설치가 용이한 슬림, 컴팩트 구조 (HEPA급의 고효율 구현)
	환기 청정 장치	외기처리장치 (환기 단독 혹은 환기와 실내공기 재순환 통합) * 대기 및 실내 미세먼지 오염원	AHU(air handling unit) 외기도입장치	HEPA급 저에 너지 청정장치 적용 및 유지 관리 비용 최 소화	슬림, 컴팩트 구조 저에너지 효과적인 제거효율(HEPA급 확 보) 교체비용, 폐기비용 최소화 유지관리 비용 최소화
	중앙 공조 장치	HVAC 시스템 (중대형 건물용) **대기 및 실내 오염원	HVAC 시스템 에 중성능 필 터 설치 및 주 기적 교체	HEPA급 저에 너지 청정장치 적용 및 유지 관리 비용 최 소화	저에너지 효과적인 제거효율(HEPA급 확 보) 교체비용, 폐기비용 최소화 유지관리 비용 최소화

A3.5. 공기청정기의 기술 현황 및 문제점

실내 공기청정기의 제품화 방향은 실제 공간에서 인간의 노출을 건강에 영향을 미치지 않는 농도 이하로 유지할 수 있는 적절한 용량의 공기청정시스템이다. 공간에서 먼지를 제거할 수 있는 용량을 표현할 수 있는 방법인 청정능력은 필터의 집진효율(η)과 필터를 통과하는 공기의 양(Q)의 곱으로 표현할 수 있다. 일반 공기청정기의 경우, 실제 적용하는 공간에 비해 청정능력이 상대적으로 낮은 경우가 많고 이로 인해 실내 초미세먼지나 미세먼지의 노출 저감에 한계를 보인다. 현재

공기청정기의 성능은 적용면적으로 제시되고 있지만, 적용면적이 의미하는 성능이 실내의 초미세먼지의 인체 노출을 얼마나 저감할 수 있는지에 대한 정보는 찾기 어렵다. 특히, 창문이 열려있거나 공기청정기의 용량에 비해 사용 대상공간이 넓은 경우, 노출 저감 효과가 감소할 수 있다. 결국, 공기청정기의 처리용량, 적용면적에 대한 인체 노출 저감 효과에 대한 실증연구가 필요하고, 이해하기 쉬운 데이터를 제시할 필요가 있다. 즉, 어느 정도 용량의 공기청정기가 어떤 환경에서 사용될 때 어느 정도의 노출 저감 효과가 있는지에 대한 객관적이고 실증적인 데이터가 필요하다. 또한, 공기청정기의 사용 과정에서 환기의 필요성과 환기가 미치는 영향에 대한 데이터 또한 부족하다. 마지막으로 적절한 공간에서 효과적인 인체노출저감 효과를 얻을 수 있는 공기청정기의 에너지비용과 유지비용에 대한 객관적인 데이터가 부족하다. 이와 같은 기초 데이터의 확보의 필요성은 인식하고 있으나, 연구 주체에 대한 인식은 아직까지 명확하지 않아 보인다. 공기청정기나 환기장치 제조회사나 업체의 이익을 대변하는 협회 등에서 만들어낸 데이터는 주로 저감장치의 효과를 부각시키는 측면이 중심이 되기 쉽기 때문에, 제품 관점의 데이터 확보에서 자유롭기 어려울 것으로 보인다. 실내환경 전체를 객관적으로 분석할 수 있고, 인체 노출에 대한 관점을 물론 제품의 성능 특성을 이해할 수 있는 전문가들의 통합적인 협력과 국가 차원의 연구 지원이 필요하다.

표 A3.3. 공기청정기의 적용 기술과 개발 방향

		미세먼지 저감 방법		기술개발 방향
		기존 기술	필요 기술	
공기청정기	자동차, 기차, 버스 등 공조장치 내 유입 혹은 재순환 공기청정장치	캐빈필터 채용(정전필터, 활성탄필터, 항균필터 통합)	고효율, 저에너지 집진기술 성능유지기술 및 유지관리 감소 기술	저압력 손실, 컴팩트 구조, 유지관리 자동기술 요구 압력손실 감소, HEPA급 효율 구현과 중성능급 이하의 압력손실 구현 유지관리가 자동으로 이루어지거나 쉽게 가능 저에너지 소모 HEPA급 성능의 지속
	차량용 혹은 작은 공간용 공기청정기	HVAC 시스템에 중성능 필터 설치 및 주기적 교체	HEPA급 집진장치 적용 및 에너지, 유지관리 비용 최소화	저압력 손실, 컴팩트 구조, 유지관리 자동기술 요구 유지관리 비용 최소화 초미세먼지 제거효율(HEPA급 확보) 교체비용, 폐기비용 최소화
	실내 가정용 공기청정기	입자대전부와 정전필터를 결합한 제품이 시장에 일부 형성됨. 전기집진기의 상용화 확대는 오존 문제로 어려운 상황임	전기집진방식을 이용한 에너지 절감형 공기청정기 - 컴팩트화 기술 - 오존제어 기술 - 간편한 유지관리 기술	HEPA급의 고성능을 확보하기 위해서는 현 수준에서 장치가 커야 하고, 오존 발생이 문제가 될 수 있음 - 컴팩트 집진시스템 및 오존 발생 억제 기술이 통합되어야 함. - 컴팩트 집진시스템과 유지관리 자동화 기술의 개발이 통합되어야 함. *** 컴팩트, 고효율, 오존저감 기술은 서로 상충관계를 가지므로, 기술의 진입장벽이 높은 첨단 기술임

A3.6. 환기 연동 공기청정기술의 필요성

실내가 오염되었거나 실내에 오염원이 존재하는 경우의 효과적인 대응 방법은 공기청정기를 가동하는 것이다. 그렇지만 환기 없이 공기청정기만을 사용할 경우 실내에서 생성되는 이산화탄소, 유해가스(휘발성유기화합물, 폼알데하이드), 냄새 등 가스상 오염물질이 실내를 쉽게 빠져나가지 못하므로, 농축되어 농도가 높아지면 재실자는 불쾌감을 느낄 수 있을 뿐 아니라 건강에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 공기청정기를 실내에서 가동하는 경우, 공기청정기의 효과를 높이기 위해 환기 없이 지속적으로 공기청정기를 가동하는 것은 실내 가스상 오염물질을 함께 관리하는 측면에서는 적절한 방법은 아니다. 특히, 주방에서 요리하거나 청소 작업 등 단기적으로 실내 먼지 발생원으로 인해 실내 미세먼지 농도가 급격히 높아지는 경우는 공기청정기를 가동하는 것보다는 창문을 여는 등의 강제환기를 실시하는 것이 바람직하다.

최근 중국발 황사나 미세먼지, 스모그 발생 등 바깥 공기의 미세먼지 농도가 높아져, 창문을 열기 어려운 경우에 환기를 어떻게 할지에 대한 고민이 높아지고 있다. 이와 같이 바깥 공기의 미세먼지 농도가 매우 높은 경우에도 환기의 경로에 고효율 집진장치를 적용할 수 있으면, 적절한 환기가 이루어지는 조건에서 미세먼지가 제거된 바깥 공기를 도입할 수 있다. 환기와 공기청정을 함께 제공하는 장치가 기존에 다양한 방식으로 제품화되었지만, 제품의 부피가 너무 커서 실내의 많은 공간을 차지하거나, 에너지비용이나 필터교체비용 등 유지관리 비용이 높을 것으로 예상되는 등 비용 대비 효과에 대한 검증이 충분하지 않았기 때문에 시장이 확대되기 어려운 상황이었다. 재실공간의 부피와 재실인원을 고려하여 이산화탄소나 유해가스의 실내 농도를 낮게 유지할 수 있어야 하고, 환기 경로에 미세먼지의 노출을 최소화할 수 있는 청정시스템을 설치하여야 한다. 환기형 청정시스템의 환기량과 미세먼지 제거성능에 대한 실증 데이터를 확보하여 기술의 요구 성능을 제시한다면, 기술개발의 성능 목표를 설정할 수 있을 것이다. 낮은 에너지를 소모하면서 초미세먼지를 고효율로 제거할 수 있는 집진장치를 소형으로 구현하여 환기 경로에 적용할 수 있다면, 환기와 미세먼지 제거가 동시에 이루어질 수 있기 때문에 실내공기를 효과적으로 관리할 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다. 중앙공조장치와 같이 외기 도입 모드와 내기 순환모드를 제공하는 장치는 공기청정기와 환기를 연동할 수 있는 효과적인 해결방안이 될 수 있을 것이다. 결국 컴팩트한 구조의 에너지 소모가 적은 고효율의 집진장치를 개발하여 환기시스템에 통합할 수 있어야 한다. 또한 간편한 유지관리 기술이 도입되어야 환기연동 공기청정장치 시장의 확대가 가능할 것이다.

A3.7. 실내 미세먼지 권고기준 설정의 필요성

실제 실내공간의 미세먼지 혹은 초미세먼지 농도 수준의 데이터와 이를 기준으로 건강에 영향을 미치지 않는 실내 농도 기준에 대한 논의가 필요하다. 예를 들면, WHO에서 제안하고 있는 사망 증가 위험이 나타나지 않는 농도인 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 실내공기의 미세먼지 농도를 유지해야 한다고 한다면, 현재 실내의 대상 기준 농도를 대기의 미세먼지 적용 기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 두 배인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 정하고(2014년 서울의 연평균 미세먼지 농도는 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이지만 2월 평균은 $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 2배 높다), 기준 농도의 20%인 미세먼지 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유지할 수 있는 공기청정기의 적용면적을 권고 사용면적으로 제시할 수 있을 것이다. 이와 같은 설정은 신뢰성 있는 데이터와 전문가 등의 충분한 논의에 의해 결정되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 국내 실제 주택 조건에서 미세먼지 노출 데이터를 얻어야 하고, 공기청정기의 용량, 운전조건, 적용공간에 따른 다양한 조건에서의 노출 저감 데이터를 확보해야 한다. 또한 이와 같이 실제 조건에서 공기청정장치의 효과와 운전에 따른 비용을 분석할 필요가 있다. 충분한 공기청정기의 비용-효과 검증 데이터와 건강 효과에 대한 연구가 이루어진다면 실내 미세먼지 혹은 초미세먼지의 권고기준의 설정에 도움을 줄 수 있는 것은 물론이고, 소비자의 실내오염에 대한 인식 전환에 도움이 될 것으로 생각된다.

표 A3.4. WHO가 설정한 미세먼지, 초미세먼지의 연평균 농도 기준의 설정 근거 및 국내 수준(WHO, 2005)

연평균	미세먼지 (PM_{10} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	설정근거
잠정기준 1 (WHO)	70	35	대기 권고기준(AQG)에 비해 15% 사망 위험 증가
잠정기준 2 (WHO)	50	25	다른 건강 효과와 함께 잠정기준 1보다 조기 사망 위험이 6%[2-11%] 감소
잠정기준 3 (WHO)	30	15	다른 건강 효과와 함께 잠정기준 2보다 사망 위험이 6%[2-11%] 감소
대기 권고기준 (AQG, Air quality guideline) (WHO)	20	10	장기간 $\text{PM}_{2.5}$ 노출에도 95% 신뢰구간에서 총 사망위험, 심폐질환과 폐암에 의한 사망율의 증가가 최소한으로 나타남
대기기준 (한국)	50	25	WHO의 잠정기준 2 채택
대기농도수준 (2014, 서울)	46	24	2월 미세먼지 평균 $84\mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울, 2014년)
실내 권고기준 (한국)	20 ?	10 ?	WHO 대기 권고 기준 이하로 실내 유지?

A3.8. 실내 초미세먼지 관리 연구와 기술의 방향

A3.8.1 주택 공기질 현황 및 공기청정장치의 효과에 대한 실증 정량 데이터 확보

공기청정기나 환기장치 구동에 따른 실내 미세먼지, 초미세먼지의 인체 노출에 대한 정량 데이터의 확보가 필요하다. 특히, 주택의 규모와 재실공간에 따른 구분과 이에 따른 분석이 필요하고, 공기청정기 용량과 환기 상태에 따른 인체 노출 저감 효과에 대한 실증 자료를 확보할 필요가 있다. 또한, 창문형 공기청정방식이나 환기장치에 적용된 공기청정장치의 성능에 따른 미세먼지 인체 노출 저감 효과에 대한 실증 데이터의 확보가 요구된다. 이와 같이 공기청정 기능을 보유한 장치들이 실내공간에 적용되는 경우의 노출 저감 효과와 장치를 설치 운전할 때 필요한 에너지 비용과 유지관리 비용에 대한 정량적인 정보를 제공한다면 소비자(국민)에게 다양한 방식의 정보를 제공하여 실내 미세먼지에 대응할 수 있도록 도움을 줄 수 있을 것이다.

표 A2.5는 주택에서 실내 미세먼지를 관리할 수 있는 방안을 정리한 것이다. 우선 노출 현황과 배경을 인식하고, 현 상황을 인식하기 위해 부족한 데이터를 확보할 수 있는 연구계획을 도출해야 한다. 실내공간의 미세먼지, 초미세먼지 특성 데이터를 확보하고, 공기청정기나 환기장치의 운전에 따른 노출 저감 특성의 실증 데이터를 체계적으로 정리해야 한다. 다양한 조건에서 장치의 운전 특성과 주택 공간의 특성에 따른 노출 저감 데이터가 확보되면, 주택 공간이나 거주인 수 등의 조건에 따른 실내 미세먼지, 초미세먼지 저감장치의 선택 프로세스를 국민들에게 제공할 수 있다. 만약, 다양한 실증 데이터를 기반으로 미세먼지와 초미세먼지의 실내 권고 농도 수준을 제안할 수 있다면, 실내 노출을 줄일 수 있는 다양한 공기청정장치들의 선택에 도움이 될 것이다. 또한 공기청정기와 환기, 환기적용집진장치의 성능, 비용, 효과 분석이 이루어지면, 향후 개발해야 할 기술의 성능 사양을 제안할 수 있으므로 미래 기술개발 방향을 제시할 수 있을 것이다.

A3.8.2 고효율 저에너지 실내 입자상 오염물질 제거기술(새로운 방식의 저에너지 집진 기술)

현재 집진기술의 기본은 필터를 적용하는 방법이다. 하지만 중성능급이건 HEPA급이건 필터의 성능이 높아지면, 동일한 공기량을 통과시키기 위해서 더 많은 에너지가 필요하기 때문에 비용에 대한 부담이 증가된다. 향후 초미세먼지까지 효과적으로 저감하려면, 집진장치의 압력손실이 낮은 저에너지 소모 조건에서 초미세먼지(혹은 나노입자)의 제거효율을 높이는 고효율화가 필요하다. 국내 가정이나 건물의 환기 경로에 사용되는 미세먼지/나노입자 제거기술은 향후 HEPA급 고효율 필터의 채용이 필요할 것으로 예상되지만, 필터방식으로는 에너지를 획기적으로 저감하기 어렵다. 미래에 집진효율과 에너지 저감의 두 가지 목표를 달성할 수 있는 기술로 전기집진 기술의 컴팩트화와 고도화가 후보가 될 것이다.

표 A3.5 실내 미세먼지 현황 분석 및 관리방안을 위한 연구 방향

	노출현황 및 배경	현 상황의 인식	데이터 확보 및 분석	지침 및 가이드라인
실내 농도 특성	하루 중 실내에 거주하는 시간 비율이 80~90% 이상으로 실내 노출이 대부분임 중국발 황사, 스모그, 도로변 주택의 자동차 매연 등 바깥공기의 오염으로 환기가 쉽지 않은 경우가 많음 호흡기, 알레르기 질환의 증가 및 민감군에 대한 영향이 증가하고 있음	실내 오염도에 대한 데이터가 부족함 -대기농도~실내농도 -대기농도 < 실내농도 -대기농도 > 실내농도 * 창문을 여는 조건, 닫는 조건, 환기장치 구동 조건에 대한 실내 미세먼지 농도 특성	국내 주택의 종류와 각 공간 분석 및 재실자 분석 대기와 실내 미세먼지, 초미세먼지의 크기분포와 청정장치의 집진효율의 상관관계 검토	주택 공간별, 거주인 조건별 실내 미세먼지, 초미세먼지 저감장치의 선택 프로세스 개발 실내 권고 미세먼지 농도 수준 제안 공기청정기와 환기, 환기적용집진장치의 성능, 비용, 효과 분석을 통한 향후 기술 개발 방향 제시
저감장치 특성 / 기술	대기오염을 단기간에 해결하지 못한다면, 미세먼지 노출을 최소화할 수 있는 기술 적용이 단기적으로 가장 효과적인 방안임 공기청정기의 효과에 대한 의문과 환기와의 연동 문제	공기청정기와 같은 저감장치가 미세먼지, 초미세먼지의 노출을 얼마나 줄여줄 수 있는지에 대한 다양한 조건에서의 데이터 부재 공기청정기, 환기장치, 환기형 공기청정장치 등의 운전 특성 이해의 부족	공기청정기의 용량에 따른 효과 분석 -미세먼지, 초미세먼지 노출 저감 관점 -실험실 조건과의 상관성 환기와 공기청정기의 연동 효과 검증	
실증 데이터 / 기준	실제 신뢰성 있는 실내 미세먼지, 초미세먼지 데이터의 부족 공기청정기, 환기장치의 실증 효과 데이터의 부족	공기청정기의 성능 기준에 대한 적합성과 이를 입증할 수 있는 실증 데이터 및 환기적용 집진장치의 필요 성능에 대한 정보가 필요 실제 실내공간에서 미세먼지, 초미세먼지의 노출 저감을 제안할 수 있는 실증 데이터가 필요	[실증]주택 공간별, 거주인 조건별 실내 미세먼지, 초미세먼지 저감장치의 성능에 따른 미세먼지, 초미세먼지 저감 효과 분석 [실증]환기 조건에 따른 효과 분석 및 환기형 집진장치의 성능 효과 분석	

A3.8.3 대용량 실내 미세먼지 제거기술(넓은 공간용, 노출저감 효과 극대화, 유지관리 비용 최소화)

실내 공기청정기의 제품화 방향은 실제 공간에서 인간의 노출을 최소화할 수 있는 충분한 용량의 공기청정시스템이다. 그렇지만 판매되는 많은 공기청정기가 실제 적용하는 공간에 비해 청정능력이 상대적으로 낮은 경우가 많고, 이로 인해 실내 초미세먼지나 미세먼지의 노출 저감에 한계를 보인다. 최근 실내 초미세먼지 노출을 효과적으로 줄이기 위한 대용량 공기청정기가 출시되고 있지만, 제품 가격의 상승과 필터 교체비용의 증가 등 유지관리 비용의 증가가 시장 확대의 어려움이 될 것으로 생각된다. 건강한 삶을 유지하기 위한 실질적인 미세먼지 노출 저감

에 소요되는 비용이 필수적이라는 인식을 가질 수 있도록 신뢰성 있는 실증 연구가 필요하다. 국내 가정의 노출 특성 데이터와 청정시스템의 용량과 운전조건 등에 따른 다양한 노출 저감 데이터를 확보하고, 장치의 품량 등 운전조건에 따른 미세먼지 노출저감 효과가 함께 분석되어야 한다. 대용량 공기청정기의 미세먼지 노출 저감 효과에 대한 실증 데이터와 비용-효과 데이터가 제시되면, 소비자들이 비용 부담의 필요성을 인식하는데 도움이 될 것이다.

A3.8.4 환기 적용 입자상 오염물질 제거기술(환기와 고효율 청정의 동시 기능, 간편한 유지관리 방법)

최근 중국발 미세먼지나 황사 등은 실내에서 유해 미세먼지에 고농도로 노출될 가능성을 높여주고 있다. 이와 같이 외기가 높게 오염된 조건에서 환기하지 않으면, 이산화탄소 농도가 증가하고, 실내 유해화학물질의 농도가 증가하므로 건강에 오히려 더 나쁜 결과를 초래할 수 있다. 적절한 환기는 실내환경에서 반드시 필요하므로, 환기장치에 적용하는 공기청정장치는 매우 효과적인 대응 방안이 될 수 있다. 그렇지만 일반적인 공기청정기는 주로 밀폐된 공간에서 운전되기 때문에, 처리할 초미세먼지의 양이 상대적으로 적은 반면, 환기시스템에 적용되어야 할 제거기술은 외부공기의 미세먼지 농도가 높은 조건에서 지속적으로 운전되어야 하기 때문에 처리먼지량이 상대적으로 많다. 이로 인해 장치의 신뢰성 확보가 중요하고 밀폐공간에서 운전되는 공기청정기에 비해 필터 교환비용 등 유지관리 비용이 증가할 수 있다. 환기장치에 적용되는 집진유닛은 외부 공기의 미세먼지 농도가 매우 높은 시기에 효과적인 운전을 수행할 수 있지만, 낮은 에너지 소모와 높은 신뢰성을 갖는 저비용 기술이 매우 중요하다. 이와 같이 가정의 공기청정기를 환기와 연동하여 운전할 수 있는 시스템이 개발되면 초미세먼지뿐만 아니라 실내 이산화탄소나 유해가스 농축에 의한 건강문제 또한 함께 해결할 수 있는 방법이 될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

박성현, 서장후, 정용호, 장현재, 황석호 (2013) 데이터센터에 적용된 외기도입 냉방 시스템에서 필터유형별 에너지 소비량 변화, 한국냉동공조학회지, 25(7), 371-376.
배귀남, 지준호 (2013) 국내 실내공기질 관리정책의 변천 및 제어기술의 현황, 한국대기환경학회지, 29(4), 378-389.

지준호 (2014) 초미세먼지 제거기술의 현황, 공기청정기술지, 107(12), pp. 36~45.

EPA, Residential Air Cleaners (Second Edition): A Summary of Available Information, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/residential-air-cleaners-second-edition-summary-available-information#indoor-air-pollutants>

- Ji, J. H. and Yu, I. J. (2012) Estimation of human equivalent exposure from rat inhalation toxicity study of silver nanoparticles using multi-path particle dosimetry model, *Toxicology Research* 1(3), 206-210.
- WHO (2005) WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Selected Pollutants.