

미세먼지 환경플랫폼

스마트시티
혁신성장동력 프로젝트

Technical Report [2부-7권]

[3-1 세부과제]
주관연구기관-KT



국토교통부



과학기술정보통신부



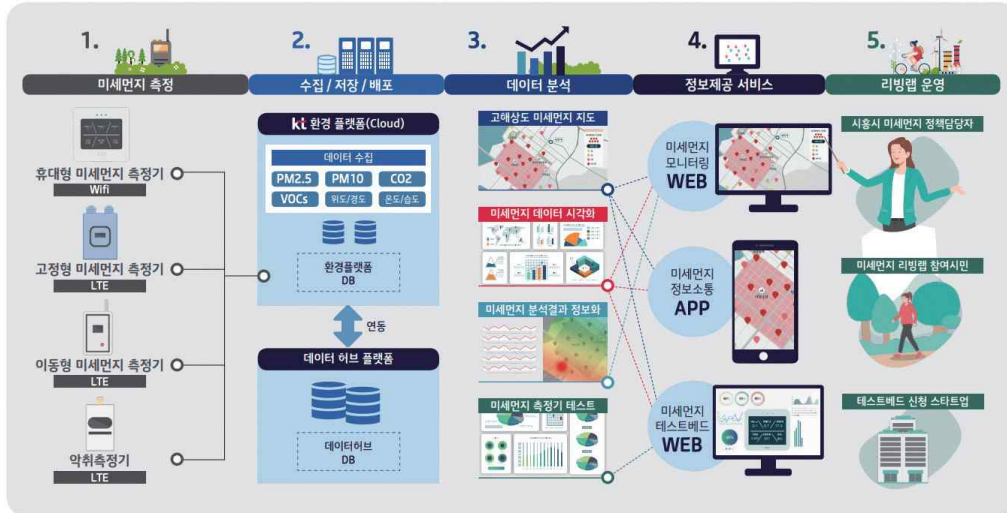
국토교통과학기술진흥원



DEAPCITY
National Strategic Smart City Program

과제명	클라우드소싱 기반 도시 대기환경 측정 및 예측 기술 개발	연구기간	'18.10~'22.12(4년 3개월)
		예산	총 51억 원(정출금 : 26억 원)

개념도 (서비스 시나리오)



KPI (성과지표)	미세먼지 관측 해상도 증가율	90% ↑	미세먼지 정보제공 주기 단축율	80% ↑	미세먼지 정보제공 서비스 만족도	80점 ↑
------------	-----------------	-------	------------------	-------	-------------------	-------

과제 개요

- (배경) 미세먼지는 시민의 생활과 직결되는 문제로 국가 차원의 거시적 관점의 대응을 넘어 지자체의 문제 해결 방안이 중요시되고 있음
- (목적) 중·소규모 도시 지역에 대해 세밀하게 미세먼지 정보를 수집/분석/표출하여 시민 및 지자체에 정보를 제공함으로써 미세먼지 문제 해결 지원

주요 연구내용

- (환경플랫폼 구축) 고정형/이동형 미세먼지 측정기를 개발하여 실증지역 65곳에 설치하고 지자체 전용 구축형 환경플랫폼에서 측정된 데이터를 수집/저장/활용
- (미세먼지 분석) 환경플랫폼에 수집된 데이터를 활용하여 실증지역의 오염원 분석, 대기오염 예측 등의 연구를 수행하며, 시민참여 유도를 위한 리빙랩 시범 운영
- (정보 제공) 지자체 담당자/시민/미세먼지 관련 스타트업 등 3개 주요 사용자에 대한 서비스 개발 및 제공

기술적 차별성

- 실증지역에 미세먼지 측정기를 설치하여 상세한 미세먼지 농도를 측정하고 이를 기반으로 미세먼지 오염원 및 중심지 분석(공간해상도: 0.5km)
- 일반적인 60분 단위인 미세먼지 정보제공 주기를 10분 주기로 단축하여 시민과 지자체 담당자는 미세먼지 농도 변화에 따라 보다 민첩한 대응이 가능

기대효과

- 중·소규모 도시 지역에 대해 세밀하게 미세먼지 정보를 측정/분석/표출하여 지방자치단체 환경 관련 담당자에게 정보를 제공해서 환경문제 해결 지원
- 하향식의 환경 문제해결에서 상향식 방식으로 문제를 함께 해결하는 시민참여형 리빙랩 모델 제시
- 환경 관련 스타트업 기업들에게 미세먼지 테스트베드를 제공함으로써 측정기 개발 지원 및 관련 생태계 활성화 기여

참여기관

[주관]



[위탁]



[공동]

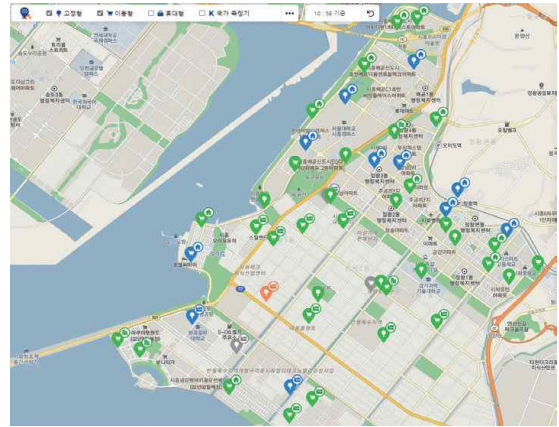


시흥녹색환경지원센터

실증경과 및 결과

- ① 미세먼지 측정기 및 환경플랫폼 구축
 - 시흥시 정왕동 행정구역 내 고정형/이동형 측정기 65대를 설치하여 환경플랫폼을 통해 데이터를 수집하고, 수집된 데이터 기반으로 지자체 미세먼지 관제서비스(Web), 시민용 미세먼지 현황 제공 앱(App)으로 도심 내의 10분 단위 미세먼지 정보 서비스를 제공
- ② 미세먼지 시민 리빙랩 운영
 - 본 과제에서 개발한 이동형 미세먼지 측정기를 들고 시민이 생활권 주변을 이동하면서 데이터를 수집하는 리빙랩 활동 수행 중('20-22)
- ③ 미세먼지 테스트베드 구축
 - 미세먼지 스타트업/연구기관 등에 자사의 미세먼지 측정기를 정왕동에 설치할 수 있는 공간과 환경플랫폼에 연동할 수 있는 기술을 지원

실증 대상지(시흥시 정왕동, 65개 측정소)



단위서비스 및 요소기술

지자체 미세먼지 관제 서비스

- (웹 서비스) 미세먼지 현황 및 통계/분석



시민용 미세먼지 모바일 앱 서비스

- (앱 서비스) 시민 생활 주변 현재 미세먼지 정보를 제공



미세먼지 테스트베드 서비스

- (연동) 환경관련 스타트업 기업에게 미세먼지 측정기 설치공간과 모니터링시스템 제공



미세먼지 측정기

- (수집) 미세먼지 수집 데이터를 환경플랫폼으로 전송



미세먼지 오염원 분석 기술

- (분석) 미세먼지의 성분분석과 모델링을 통한 오염원 도출



대기오염 예측 기술

- (예측) 시흥시 행정구역 전체 대기오염 예측을 위한 모델 구축 및 검증



실증을 통한 시사점

- (요구사항) 지자체 미세먼지 관제 서비스는 지자체 별 환경에 따라 요구사항이 다를 수 있으므로 실증을 통해 구현한 결과를 기반으로 실제 사용할 기능을 선별하여 운영을 최적화하고 필요 시 추가 요구사항에 대한 개발을 고려
- (리빙랩) 시민들이 휴대형 미세먼지 측정기로 생활환경 주변의 미세먼지를 측정하는 리빙랩을 무료 봉사 형태의 자발적인 참여로 시범 활동을 하였으나, 리빙랩의 지속적인 운영을 위해서는 지자체에서 다양한 형태의 보상방안 검토가 필요
- (홍보) 미세먼지 테스트베드는 실증 과정에서 다양한 이용자 확보를 위해 전시회 등을 통한 홍보가 필요

타 지자체 확산방안

- 서비스 도입 목적에 따라 서비스 운영 대상과 규모를 탄력적으로 설계하여 단계적 적용이 가능
 - 미세먼지 측정기: 도심의 특성에 맞는 수량 설계
 - 환경플랫폼: 다양한 종류의 인프라에 설치 방식으로 구축
 - 서비스: 지자체/시민/기업서비스 선택적 구축 가능
- 환경플랫폼 및 서비스를 공유할 수 있도록 공통 플랫폼으로 구축하거나, 미세먼지 측정기를 지역 내 설치한 뒤 이를 공통 플랫폼으로 연동하여 서비스를 이용하는 방식 모두 가능



연구책임자

(주)케이티
오진수 PM
jinsoo.oh@kt.com



집필자

(주)케이티
이종수 부장
jongsoo.lee@kt.com

• 목차 •

제1장

개요

- 1. 배경 및 필요성 298
- 2. 서비스 특징 299
- 3. 기대 효과 300
- 4. KPI 설정 302

제2장

연구 개발 성과

- 1. 도메인 통합 시나리오 303
- 2. 아키텍처 및 시스템 구성도 304
- 3. 단위 서비스(기능)별 시나리오 305
- 4. 요소 기술 313

제3장

실증 경과

- 1. 지자체용 미세먼지 정보제공 서비스 ... 325
- 2. 미세먼지 시민 리빙랩 336
- 3. 미세먼지 테스트베드 340

제4장

확산 방안

- 1. 운영 · 확산방안(안)..... 344

제5장

Lesson Learned

- 1. 문제 해결 사례 345
- 2. 기술적 한계 346
- 3. 거버넌스 관련 347

· 용어 정리 ·

용어	정의
API	응용 프로그램 프로그래밍 인터페이스, 다른 소프트웨어 시스템과 통신하기 위해 애플리케이션 소프트웨어를 구축하고 통합하는 정의 및 프로토콜 세트(Application Programming Interface)
CAPSS	대기오염물질 배출목록(Air Pollutants Emission Inventory)에 근거한 배출 정보 종합시스템으로, 체계적인 기초 자료 수집·관리를 통해 대기환경 정책 수행에 필요한 배출량 통계 정보를 산정·제공하는 시스템(Clean Air Policy Support System)
CMAQ	대기 질 모델 시뮬레이션을 수행하기 위한 일련의 프로그램으로 구성된 US EPA의 적극적인 오픈 소스 개발 프로젝트(Community Multiscale Air Quality Model)
EDGAR	그리드에서 국가별 대기 오염 물질 및 온실 가스의 전 세계 과거 및 현재 인위적 배출량을 제공(Emissions Database for Global Atmospheric Research)
GIS	지리 정보 체계, 생활에 필요한 지리정보(위치자료와 속성자료)를 데이터로 변환하여 효율적으로 활용하기 위한 정보시스템(Geographic Information System)
GPS	위성 항법 시스템, 3개 이상의 GPS 위성에서 송신된 신호를 수신하여 위성과 수신기의 위치를 결정하는 체계(Global Positioning System)
HDFS	하둡 분산 파일 시스템, 빅데이터 기술로써 대용량 데이터 분석 처리를 위한 오픈소스 프레임워크(Hadoop Distributed File System)
IoT	사물인터넷, 고유 식별이 가능한 사물이 만들어낸 정보를 인터넷을 통해 공유하는 네트워크 기반 환경(Internet of Things)
LTE-M	기계 간 및 사물 인터넷 (IoT) 을 위해 표준화 단체(3GPP)에서 개발한 일종의 저전력 광역 네트워크 무선 통신 기술 표준(Long-Term Evolution Machine Type Communication)
Open API	누구나 사용할 수 있도록 공개된 API(Open Application Programming Interface)

용어	정의
PM10	미세먼지, 입자의 크기가 10 μ m 이하인 먼지(Particulate Matter Less than 10 μ m)
PM2.5	초미세먼지, 입자의 크기가 2.5 μ m 이하인 먼지(Particulate Matter Less than 2.5 μ m)
PMF	EPA 과학자들이 개발한 수학적 수용체 모델로, 대기 및 수질 표준과 환경 법의학의 개발 및 구현을 위한 과학적 지원을 제공(Positive Matrix Factorization)
Private Cloud	인터넷 또는 개인 내부 네트워크를 통해 일반 사용자가 아닌 특정 사용자에게만 제공되는 컴퓨팅 서비스
SDK	특정한 소프트웨어 꾸러미, 소프트웨어 프레임워크, 하드웨어 플랫폼, 컴퓨터 시스템, 게임기, 운영 체제 등을 위한 응용 프로그램 등을 만들 수 있게 해주는 개발 도구(Software Development Kit)
SMOKE	CMAQ, REMSAD, CAMX 및 UAM과 같은 다양한 대기 품질 모델에 입력하기 위해 그리드로 구분된 시간별 배출을 생성하도록 설계된 배출 처리 시스템(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions)
SNS	사용자 간의 자유로운 의사소통과 정보 공유, 그리고 인맥 확대 등을 통해 사회적 관계를 생성하고 강화해주는 온라인 플랫폼(Social Networking Service)
WRF	대기 연구 및 운영 예측 요구사항을 모두 충족하도록 설계된 수치 기상 예측 (NWP) 시스템((Weather Research and Forecasting)

• 표 목차 •

〈표 1-1〉 KPI 지표	302
〈표 2-1〉 서버 용도	305
〈표 2-2〉 휴대형 측정기 사양	315
〈표 2-3〉 초미세먼지 오염원 유형 추적 기술의 연구 내용	319
〈표 2-4〉 초미세먼지 상세 매핑 및 도심지역 도출 기술의 연구 내용	321
〈표 2-5〉 대기오염예측 모델 구축 내용	323
〈표 3-1〉 연도별 시민참여단 수	337
〈표 3-2〉 테스트베드 실증 절차	340
〈표 3-3〉 실증 현장 적용 측정기 정보	341

· 그림 목차 ·

〈그림 1-1〉 KPI 지표	302
〈그림 2-1〉 도메인 통합 시나리오	303
〈그림 2-2〉 아키텍처	304
〈그림 2-3〉 시스템 구성도	304
〈그림 2-4〉 지자체용 웹서비스	306
〈그림 2-5〉 시민용 앱서비스	308
〈그림 2-6〉 스마트시티 테스트베드 웹 주요 프로세스	310
〈그림 2-7〉 실내 미세먼지 테스트베드 LAB 전경	311
〈그림 2-8〉 실외 미세먼지 테스트베드 LAB 전경	311
〈그림 2-9〉 스마트시티 테스트베드 웹 주요 서비스	312
〈그림 2-10〉 측정기 전처리 기술 내용	314
〈그림 2-11〉 고정형 미세먼지 측정기 시제품 구성도	314
〈그림 2-12〉 휴대형 측정기 및 어플 사용 화면	315
〈그림 2-13〉 이동형 미세먼지 측정기 시제품 구성도	317
〈그림 2-14〉 환경플랫폼 구성	318
〈그림 2-15〉 초미세먼지 오염원 유형 추적을 위한 PMF 모델링	319
〈그림 2-16〉 초미세먼지 상세 지도화 절차	320
〈그림 2-17〉 대기오염예측 모델 도메인	322
〈그림 2-18〉 대기오염물질 예측모델 프로세스 및 고도화 내용	324
〈그림 3-1〉 실시간 미세먼지 현황지도	325
〈그림 3-2〉 미세먼지 측정기 수집 데이터의 시간별 변화 그래프	326
〈그림 3-3〉 통계 분석 조건 입력 화면	326
〈그림 3-4〉 통계 분석 조건에 따른 조회 결과 화면	326
〈그림 3-5〉 초미세먼지 오염원 유형 추적 결과(10종)	328
〈그림 3-6〉 초미세먼지 오염원 유형별 우심지역 도출 결과	329
〈그림 3-7〉 모델 결과 검증 방법	330
〈그림 3-8〉 정성적 검증 결과 이미지	330

〈그림 3-9〉 정량적 검증 결과 - PM10	331
〈그림 3-10〉 정량적 검증 결과 - PM2.5	331
〈그림 3-11〉 시흥시 대기오염 예측	332
〈그림 3-12〉 유형별/시간별 수신현황	333
〈그림 3-13〉 측정기 데이터 현황	334
〈그림 3-14〉 지점별 미세먼지 현황	334
〈그림 3-15〉 미세먼지 실황 지도 (행정동별)	335
〈그림 3-16〉 미세먼지 실황 지도 (관심구역별)	335
〈그림 3-17〉 휴대형 미세먼지 측정기 모니터링 동선 지도화 현황	336
〈그림 3-18〉 미세먼지 시민 리빙랩 운영체계	337
〈그림 3-19〉 시민 참여단 교육	338
〈그림 3-20〉 미세먼지 측정 활동	338
〈그림 3-21〉 리빙랩 활동 설문조사 시행	338
〈그림 3-22〉 시흥시 정왕동의 테스트베드 랩	341
〈그림 3-23〉 실외 테스트베드의 공감센서 측정기 설치 현장	342
〈그림 3-24〉 공감센서 측정기 연동 및 데이터 수신 확인	342
〈그림 3-25〉 ETRI의 현장 적용 측정기(공감센서)의 실제 측정 데이터	343
〈그림 3-26〉 1개월간 현장 측정기 수집 데이터(기온) 그래프	343

1 | 배경 및 필요성

1-1 연구개발 배경

- 통계청은 시민의 삶의 질을 평가하기 위해 11가지 지표(가족·공동체, 건강, 교육, 고용·임금, 소득·소비·자산, 여가, 주거, 환경, 안전, 시민참여, 주관적 웰빙)를 제시하였고, 이중 환경 지표는 현재를 살고 있는 사람들의 삶의 질에 매우 즉각적인 방식으로 영향을 미치는 지표이다. 환경 지표 중 객관적 지표는 미세먼지(PM_{2.5}) 농도, 농어촌 상수도 보급률, 1인당 도시공원 면적 등 3개이며 이중 미세먼지 농도(PM_{2.5})는 시민의 삶의 질에 가장 민감한 지표이다.
- 2017년도 우리나라의 초미세먼지(PM_{2.5}) 평균 농도는 25.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 OECD 평균 농도 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 2배에 해당한다. (OECD, 「<http://stats.oecd.org>, Exposure to air pollution」 2019. 6)
- 클라우드기술, IoT플랫폼 기술과 빅데이터 분석 기술의 발전은 빠른 시간 내에 다양한 IoT센서로 부터 데이터를 수집하고 분석, 대안까지 제시할 수 있는 수준에 도달하였다. 이러한 기술발전을 초미세먼지 분야까지 확장하여 과거에는 분석처리가 매우 어려웠던 대기 환경분야를 스마트시티에 적용하는 것이 가능해졌다.
- 실증 단지인 시흥시 정왕동에서 초미세먼지 데이터를 수집하여 그 결과를 지자체 담당자 및 시민들에게 제공하고 초미세먼지로 인한 도시문제의 해결방안을 함께 찾고자 한다.

1-2 연구개발 필요성

- WHO는 대기오염 및 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하고 있으며, 우리나라에서는 2018년도, 2019년도에 고농도 미세먼지가 수일간 지속되어 국민들의 불안이 고조되었다. 특히 국회는 2019년 3월 미세먼지 문제를 단순 환경오염 문제에서 사회재난으로 관점을 변화했으며, 이는 미세먼지의 심각성을 전 국가적으로 인지하고 있음을 보여준다. 특히 도시관점에서의 미세먼지 대응은 중앙정부보다는 지방자치단체의 역할이 크며, 지방자치단체는 미세먼지 문제를 해결하기에 현재 역량이 매우 부족한 상태이다.
- 이와 관련 현재 4차산업혁명이 진행되는 중 스마트시티 기술 및 IoT 기술을 이용해 미세먼지 문제를 해결하고자 하였다. 또한, 미세먼지 문제해결에 지방자치단체뿐만 아니라 시민의 참여가 중요하므로, 리빙랩의 시범적 운영을 통해 문제해결 공감대를 형성하고 지자체 리빙랩 모델의 정착에 기여하고자 한다.
- 시흥시 정왕동 시범지역은 5km(가로) X 8km(세로)의 공간분포도를 가지고 있으며, 지리적으로는 해안가와 산업단지 및 주거단지가 공존하고 있다. 본 연구는 시흥시 정왕동 시범지역에 도시 곳곳의 미세먼지 농도를 측정하고 이를 기반으로 미세먼지 상시 오염지역 및 우심지역을 파악하기 위해 대기질 모델링의 수평해상도를 높여야 한다. 또한, 현재 1시간 단위로 측정되는 미세먼지 측정주기를 단축하여 미세먼지 변화에 민첩한 대응이 가능하도록 지원할 필요가 있다.

2 | 서비스 특징

- 서비스는 미세먼지 데이터 수집에서 정보 제공 서비스까지 전체 영역을 포함하고 있다. 주요 영역으로는 미세먼지 측정기, IoT 플랫폼, 데이터 분석, 정보제공 웹/앱/API 등이 있다.
- 또한, 미세먼지와 관련된 다양한 이해 관계자를 위한 맞춤형 서비스를 별도의 어플리케이션을 통해서 제공하며 이해관계자 및 제공 서비스는 아래와 같다.
- 지자체: 미세먼지 현황, 통계, 분석 기능을 통한 미세먼지 정책 수립 지원
- 시민: 생활 환경 주변의 실시간(10분 단위) 미세먼지 정보 조회

- 미세먼지 관련 기업: 미세먼지 측정기 IoT 연동개발/측정기 설치 및 데이터 수집 실증
- 이 서비스는 시범 지역인 시흥시 정왕동뿐만 아니라 시흥시 전체로 확장 및 타 지자체 확산에 용이하다. 운영 측면에서 다양한 측정기를 쉽게 연동할 수 있도록 측정기 연동 어댑터를 제공하며, 데이터허브 등 타 시스템에 미세먼지 데이터를 쉽게 연동할 수 있도록 Open API(Open Application Programming Interface, Open API)를 제공하고 있다.

3 | 기대효과

3-1 기술적 측면

- 성능인증 받은 미세먼지 간이측정기로부터 미세먼지 정보를 실시간으로 수집하며, 수집 밀집도가 매우 촘촘하여 해당 지역으로부터 수집하는 미세먼지 정보는 매우 자세하다. 이러한 자세한 정보는 미세먼지 고농도 시 시민들의 자발적인 초기 대응을 가능하게 한다.
- 중소도시를 대상으로 미세먼지 정보를 상세히 측정하고 다양한 분석방법(기술적 통계, 기상 모델링 등)을 통해 중·소규모 도시 지역에 맞춤형 미세먼지 정보 제공이 가능하다. 본 연구는 중·소규모 도시 지역에 대해 세밀하게 미세먼지 정보를 측정/분석/표출하여 시민 및 지방자치단체의 환경담당자에게 정보제공이 가능하다는 의미가 있다.

3-2 사회·환경적 측면

- 시민들 스스로 문제를 찾아내고 시민, 정책 담당자, 연구자, 기업들과 소통하여 시민들이 스스로 문제를 해결할 수 있는 능력을 배양한다. 이는 환경문제 해결에 있어 과거 정부주도의 문제해결 방식에서 시민이 참여하여 문제를 함께 해결하는 방식으로 탈바꿈하고자 하며, 이를 위하여 리빙랩이라는 방법론을 사용하고자 한다.
- 미세먼지 문제는 대한민국에서 매우 큰 영향을 미치는 사회·환경적 이슈이다. 현재 우리나라의 미세먼지 정책은 미세먼지 저감 방법 및 정책에 초점을 맞추고 있다. 본

연구는 미세먼지 저감보다는, 미세먼지 환경 안에서 시민들이 슬기롭게 대응할 수 있는 정보를 제공하는 데 주목적이 있다. 정부주도의 하향식(Top-Down) 문제해결방식에서 시민들이 참여하여 문제를 해결하는 상향식(Bottom-Up)으로 정보를 제공하며, 그 결과는 시민이 직접 스마트시티를 만들어 가는 데 참여하고 함께 문제를 해결하기 위해 리빙랩(Living Lab) 방법론을 수행한다.

3-3 경제적 측면

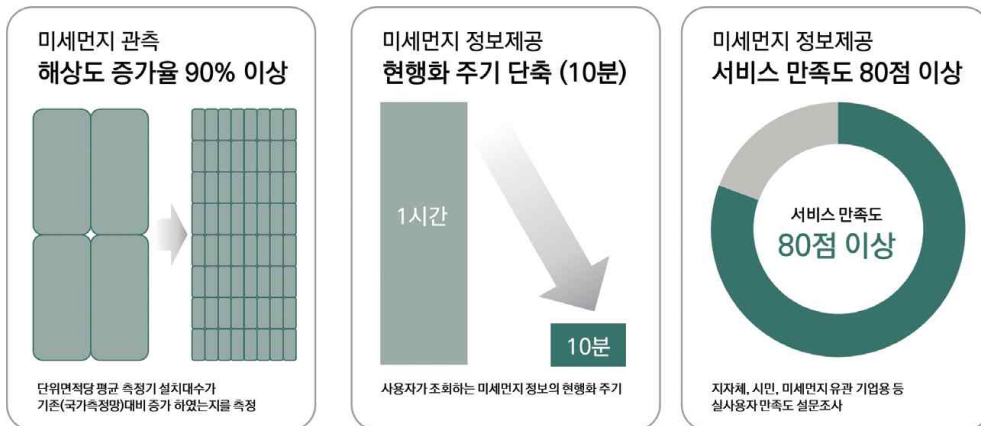
- 중소도시에서 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 미세먼지 간이측정기 설치가 확산될 것이며, 또한, 공급 증가 및 기술 발전을 통해 가격 또한 하락할 것으로 기대하며 이는 향후 미세먼지 저감 장비의 수요를 확대할 수 있다.
- 실증지역인 시흥시 정왕동을 대상으로 미세먼지 측정 분야에 대해 글로벌 테스트 베드 구축 목적도 포함하고 있다. 따라서 국내외 미세먼지 관련 스타트업 기업들이 실증단지를 방문하여 미세먼지 측정기 및 저감 장비에 대한 테스트를 진행한다며 현장 설치, 플랫폼과 연동을 통한 데이터 획득, 타 측정기와 데이터 비교, 표준화 적합성 등을 비교 분석이 가능하며 이는 스타트업기업들의 상품개발 경쟁력 향상에 기여할 것이다.

4 | KPI 설정

- KPI 지표는 미세먼지 관측해상도 증가율, 미세먼지 정보제공 주기 단축율, 미세먼지 정보제공 서비스 만족도로 설정하였으며, 지표에 대한 설명과 목표는 아래와 같다.

〈표 1-1〉 KPI 지표

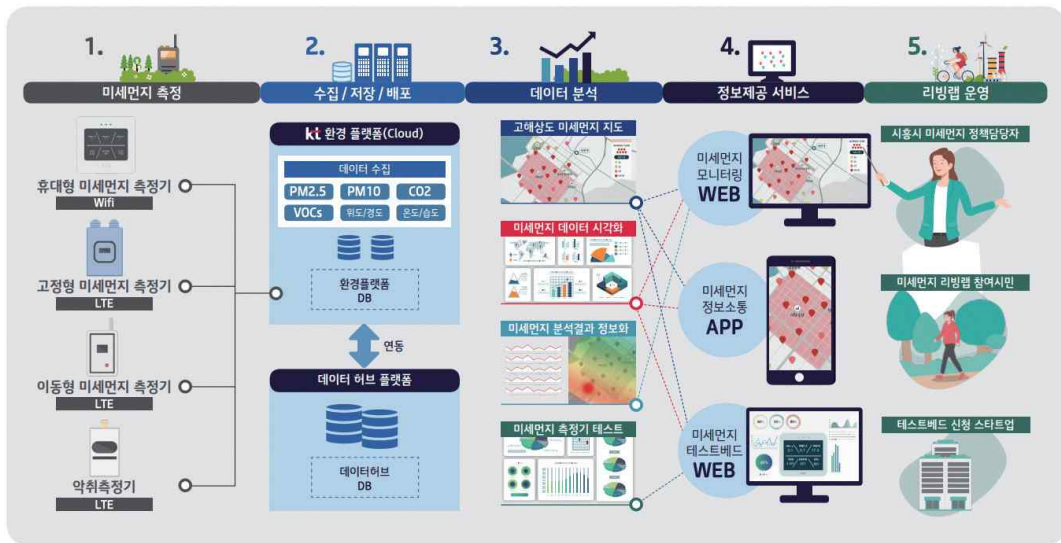
지표	지표 설명	목표
미세먼지 관측 해상도 증가율	단위면적당 평균 측정기 설치 대수가 기존(국가 측정망) 대비 증가하였는지 측정	90% 이상
미세먼지 정보제공 주기 단축율	사용자가 조회하는 미세먼지 정보의 현행화 주기가 얼마나 줄어들었는지 측정	80% 이상
미세먼지 정보제공 서비스 만족도	지자체, 시민, 미세먼지 유관 기업용 등 실사용자 만족도 설문조사	80점 이상



〈그림 1-1〉 KPI 지표

1 | 도메인 통합 시나리오

- 시흥시에 설치된 미세먼지 측정기는 미세먼지 농도 등 수집한 데이터를 환경플랫폼으로 전송한다. 환경플랫폼은 데이터를 저장하여 타 시스템(데이터허브 등)으로 데이터를 배포한다. 정보제공 서비스 단계에서는 환경플랫폼에서 제공받은 데이터들은 분석단계에서 나온 결과를 지도 기반으로 시각화하여 시민들에게 서비스한다.

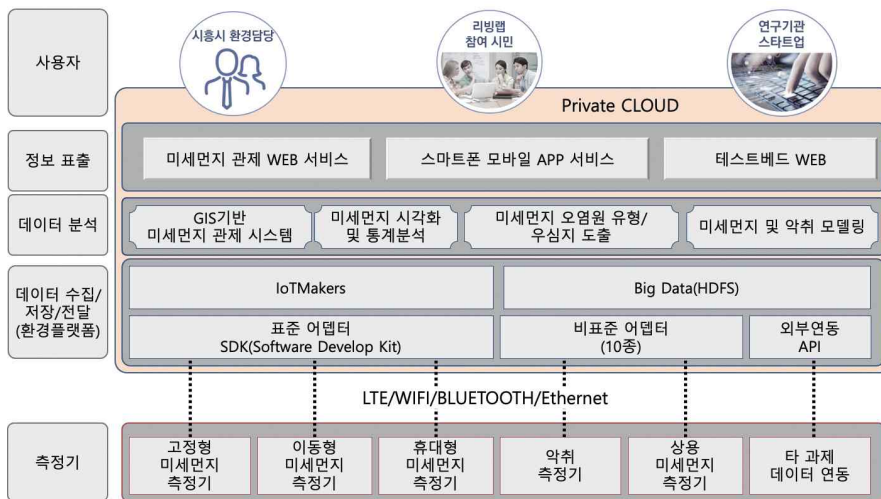


〈그림 2-1〉 도메인 통합 시나리오

2 | 아키텍처 및 시스템 구성도

○ 아키텍처

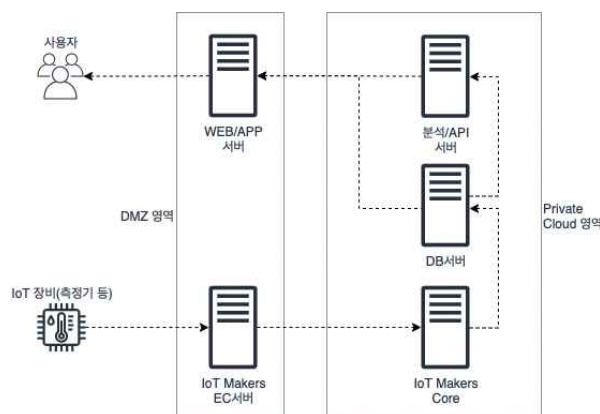
- 시스템 확장 및 이관이 용이한 프라이빗 클라우드(Private Cloud) 기반으로 인프라를 KT의 개방형 IoT 플랫폼 'IoT Makers' 솔루션을 통해 측정기 및 데이터 수집/저장/배포 수행
- 데이터 분석 단계에서 가공된 데이터를 정보 표출 WEB/APP을 통해 사용자에게 제공



〈그림 2-2〉 아키텍처

○ 시스템 구성도

- 물리적 서버의 구성과 미세먼지 데이터의 흐름은 다음과 같다.



〈그림 2-3〉 시스템 구성도

〈표 2-1〉 서버 용도

순서	서버 이름	용도
1	DB서버	메타데이터, 수집 데이터, 통계 데이터 처리
2	IoT Makers Core	MQ 이벤트 처리 엔진 데이터 배포(DB 등)
3	분석/API서버	데이터 분석 및 모델링 데이터 전송용 API 제공
4	IoT Makers EC서버	단말 인증, 데이터 수집
5	WEB/APP 서버	사용자 서비스 UI 제공

3 | 단위서비스(기능)별 시나리오

3-1 지자체용 미세먼지 정보제공 서비스

서비스 개요

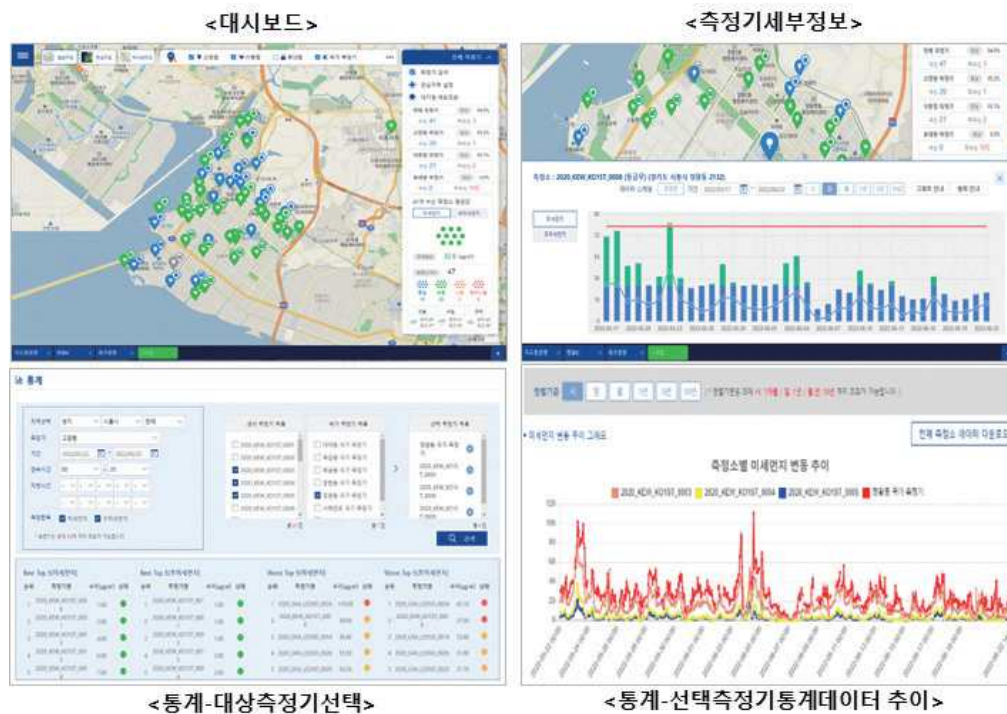
- 지자체 미세먼지 관련 정책 담당자를 위한 GIS에 의한 데이터를 이용해 관리/분석하는 웹서비스이다. 기본적으로 시흥시 정왕동에 설치된 미세먼지 측정기의 현재 미세먼지 농도를 지도 기반으로 표시해 준다. 실시간으로 수집된 데이터는 통계데이터로 저장되어 정책 담당자가 다양한 조건 기반으로 데이터를 분석할 수 있도록 지원한다. 또한 본 연구과제에서 미세먼지 데이터를 분석하여 도출한 오염원 분석, 대기 오염 예측 등을 제공한다.

서비스 시나리오

- 초기 화면에서 전체 미세먼지 측정기 위치를 아이콘 형태로 조회할 수 있으며, 아이콘의 색깔로 미세먼지 데이터 수준을 파악할 수 있다. 또한 우측 대시보드를 통해 전체 미세먼지 측정기의 정상 상태나 평균 미세먼지 수치 등의 요약 정보를 확인할 수 있다.
- 지도상에 위치한 특정 지역에 대한 미세먼지 정보를 확인하기 위해 측정기 아이콘

을 클릭하면 선택된 측정기에서 수집한 미세먼지/초미세먼지 등 측정기에서 수집한 대기상태 상세 정보를 시간대별 그래프로 확인할 수 있다.

- 관리자는 WEB에서 제공하는 통계 기능을 이용하여 측정기별/기간별/일별/시간대별 통계정보를 수치와 추이 그래프로 확인할 수 있으며 또한 검색 및 기간, 시간대를 조합한 통계 데이터를 조회하여 지자체의 미세먼지에 대한 적절한 대응책을 마련할 수 있다.



〈그림 2-4〉 지자체용 웹서비스

기대효과

- 국가에서 제공하는 '우리 동네 대기질 서비스' 보다 측정망 밀집도를 향상하여, 측정기 설치에 따른 세밀한 측정데이터를 수집할 수 있음에 따라 미세먼지 저감 정책을 보다 구체적으로 설계하고 실현할 수 있는 효과를 가져온다.
- '우리 동네 대기질 서비스'에서 제공하는 서비스와 비교하여, 분 단위 측정데이터 수집을 통한 10분 주기의 미세먼지/초미세먼지 정보제공을 통해 관내의 더 정확한 미세먼지 대응 정책을 결정할 수 있다.

- 통계/시각화 등 다양한 분석 데이터를 제공함으로써 지자체 담당자의 미세먼지 저감 정책 수립에 활용할 수 있으며 또한 지자체의 미세먼지에 대한 적절한 대응책을 마련할 수 있다.

3-2 시민용 미세먼지 정보제공 서비스

1 서비스 개요

- 시흥시민을 위한 미세먼지/초미세먼지 정보를 제공하는 서비스로 기본적으로 시흥시 정왕동에 설치된 미세먼지 측정기의 현재 미세먼지 농도를 지도 기반으로 표시해 준다. 실시간으로 수집된 데이터는 시민의 스마트폰 앱에 실시간으로 제공되어 시민은 언제나 자신의 주변에 대한 대기질 정보를 제공받아 미세먼지, 대기상태 등 상황에 따른 생활 가이드를 얻을 수 있다.
- 사용자 위치를 기반으로 미세먼지 오염정보를 제공하고 위험 정보에 대한 알림, 오염정보에 따른 대응 요령 정보제공, SNS(Social Networking Service)를 통한 미세먼지 정보를 공유한다.

1 서비스 시나리오

- 사용자의 위치에 기반하여 지역별, 장소별, 현 위치의 정확한 공기질 정보와 다양한 생활행동 요령을 제공할 수 있는 기능을 개발하여 제공한다.
- 사용자 애플리케이션의 홈 화면은 미세먼지 정보, 예보, 생활 가이드 등의 정보를 제공한다. 따라서 시민이 현재 내 주변 가장 가까운 곳의 미세먼지 정보를 1시간 단위가 아닌 실시간적인 10분 단위로 제공받아 미세먼지 상태에 따른 빠른 대처가 가능하도록 도움을 줄 수 있다.
- 지도상에 있는 측정기를 선택하여 선택된 측정기에 대한 미세먼지 상태 정보를 쉽게 확인할 수 있으며 또한 확인 내용을 SNS 공유 채널을 통해 가까운 지인들에게 전파할 수 있다.
- 안전 행동 요령이라는 메뉴를 제공함으로써 오염물질 또는 폭염으로부터 시민이 대처해야 하는 행동 요령을 사용자 유형에 따라 구분하여 제공한다.



<그림 2-5> 시민용 앱서비스

기대 효과

- 개인이 직접 휴대형 측정기를 통해 주변의 미세먼지 정보를 수집함으로써 서비스 제공 대상인 시민 참여형 서비스를 제공함에 따라 시민에게 이동하면서 수집되는 미세먼지 데이터가 고정형과 이동형 데이터와 융합하여 내 주변의 미세먼지 농도를 서비스 할 수 있다.
- 국가관측망 이외의 대기오염 관측망 구성과 시민을 통한 촘촘한 측정망을 통해 다양한 서비스 제공을 통하여 시민 참여형 서비스를 제공하여 정보제공의 신뢰 향상과 대기환경에 대한 시민의 관심을 유발해 좀 더 나은 삶의 질을 추구할 수 있다.
- 시민의 참여로 조밀한 대기오염 관측정보 제공으로 대기환경에 대한 시민의 관심을 유발하고 확장된 서비스를 제공하여 적극적인 대기환경 오염원에 대한 방어 활동을 유도할 수 있다.

3-3 미세먼지 테스트베드

서비스 개요

- 스마트시티가 도입되는 도시공간에 국내외 기술개발 업체나 연구소, 관련 기관 등을 대상으로 미세먼지 테스트베드 구축 및 플랫폼 환경을 제공함으로써 개발 기술의 완성도를 검증한다. 그리고 실증 대상 지역의 지자체나 시민들에게 테스트 제품을 직간접적으로 홍보하게 하여 고객의 요구 파악 및 매출 판로 확보에 기여한다.

서비스 시나리오

- 미세먼지 테스트베드를 이용하고자 하는 신청자는 테스트베드 웹을 통해 접속하고, 테스트베드 운영 담당자의 확인 및 승인 절차를 거친다. 신청자는 측정기의 사양, 통신 프로토콜 규격, 실외 측정장소 및 설치 방법에 관한 내용을 숙지하고, 테스트 측정기의 환경플랫폼에 연동한다.
- 테스트 측정기가 비표준 규격일 경우에도 환경 플랫폼에 연동할 수 있도록, 환경플랫폼에 연동 가능한 데이터 규격을 웹을 통해 제공하고 있다. 따라서 측정기 개발업체가 데이터 규격에 맞게 개발한다면 환경플랫폼에 연동이 가능하다.
- 테스트 장비의 연동 확인 후 국가측정망과 1등급 측정기가 설치된 실외 테스트 장소의 거치대에 설치하여, 수집 데이터를 테스트베드 웹을 통해 모니터링하도록 지원한다.
- 테스트베드 웹에서는 실시간으로 수집되는 테스트 측정기 데이터를 동일 환경에서 측정되는 1등급 측정기와 비교할 수 있으며, 이벤트 등록, 통계 기능, 수집 데이터 다운로드 등 각종 편의 기능을 제공한다. 또한 시흥시 시민/미세먼지 관련 산업 종사자/전문가가 포럼 주제에 맞게 자유롭게 소통할 수 있는 커뮤니티 기능도 제공한다.



〈그림 2-6〉 스마트시티 테스트베드웹 주요 프로세스

1 기대효과

- 미세먼지 측정기 관련 업체, 연구단체, 기관을 대상으로 테스트베드 LAB 환경 및 플랫폼 환경을 제공하여 제품 출시 전 실제 생활환경에 적용함으로써 다양한 기상 및 환경조건에서 측정기 성능이나 한계점 등을 파악할 수 있다.
- 테스트베드에 참여한 측정기는 별도의 시간과 비용을 들이지 않고 측정기 운영 및 플랫폼 연동을 할 수 있으며, 이런 경험은 타 지자체의 스마트시티 사업 및 미세먼지 관련 시장에 경쟁력을 가지게 될 것으로 기대된다.
- 스마트시티 테스트 실증환경 및 연구 결과물 제공을 통해 향후 다양한 스마트시티 플랫폼 구축 사업 시, 연동 측정기에 대한 실증 사례로 활용할 수 있다.
- 지자체나 시민들은 실증환경에 설치된 테스트용 측정기를 미리 경험해봄으로써 직·간접적으로 제품을 체험하여 다양한 제품군을 확인할 수 있다.
- 또한 스마트시티 플랫폼 환경에 적용된 측정기를 실증대상지에서 제품의 성능(연동, 데이터 수신율, 유지보수 이력 등)을 확인하여 미세먼지 관련 측정기 확대 사업을 진행할 경우 검증된 제품을 구매하는데 기초 자료로 활용할 수 있다.

1 관련 시설 및 시스템

○ 미세먼지 테스트베드 LAB

- 실내 테스트베드 LAB : 실외 테스트를 진행하기 전 테스트 제품의 통신 방식, 테스트 기간 등 사전 협의를 진행을 위해 운영한다. 데이터 분석 결과 취득 방법 및 통신 프로토콜 가이드 등을 제공한다. 필요시 비표준어댑터 기술 지원을 이곳에서 실시한다.



〈그림 2-7〉 실내 미세먼지 테스트베드 LAB 전경

- 실외 테스트베드 LAB : 실외 테스트용 측정기 설치를 위한 거치대 및 전원박스 등 실증환경을 제공한다. LTE 라우터 무료 서비스지원 및 실시간 데이터 전송 여부 확인 등 현장 연동 기술을 지원한다.



〈그림 2-8〉 실외 미세먼지 테스트베드 LAB 전경

○ 스마트시티 테스트베드 웹 서비스

- 테스트베드 웹 서비스는 미세먼지 관련 산업에 종사하는 국내외 기업들에게 신제품/시제품의 기능과 성능 실증을 지원하는 온라인 테스트 공간이다.

- 테스트베드 웹 서비스는 자신의 측정기를 등록하여 수집되는 데이터를 모니터링하고, 이벤트 등록, 측정데이터 다운로드, 측정값 통계 산출, 측정기 홍보 및 개발자 포럼 등 다양한 서비스를 이용할 수 있다. 또한 본 연구과제를 통해 제공되는 1등급 미세먼지 측정기 데이터와의 비교 분석도 가능하다.
- 사용자는 별도의 프로그램 개발 없이 측정기를 플랫폼에 연동해보고 측정기 데이터를 수집하여 다운로드 할 수 있으며, 측정기 관리 및 모니터링, 시제품 테스트 및 검증, 미세먼지 데이터 분석 등 다양한 분야에 활용할 수 있다.

① 메인화면



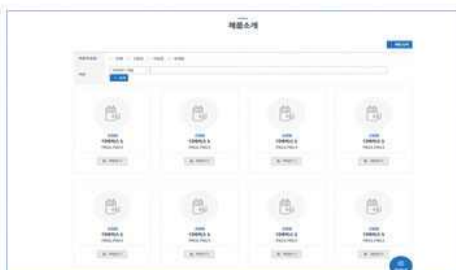
② 테스트베드 신청



③ 측정값 모니터링



④ 커뮤니티



〈그림 2-9〉 스마트시티 테스트베드 웹 주요 서비스

4 | 요소기술

4-1 미세먼지 측정기(고정형/휴대형/이동형)

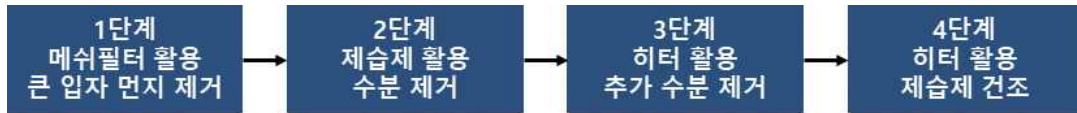
고정형 미세먼지 측정기

○ 고정형 미세먼지 측정기 기본 정보

- 제품 크기 : 가로(35cm) / 세로(26cm) / 두께(15cm)
- 측정 센서 : 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5), 온도, 습도
- 통신 방법 : LTE-M (분 단위 측정을 위한 모바일 통신)
- 전력공급 : 상전

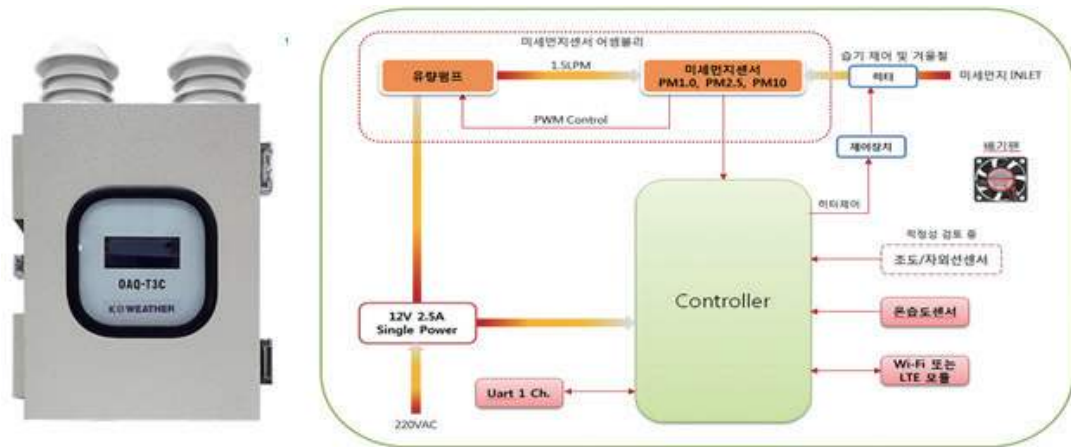
○ 고정형 미세먼지 측정기 시제품 특징 및 고도화 기술

- 미세먼지 센서는 광산란 방식, 단일 입자 계수 방식의 고가 센서를 적용하여, 환경부 기준 1등급 성능인증 등급을 달성할 수 있도록 센서를 탑재했다.
- 유량 펌프는 1.5 L/min의 유량으로 공기를 흡입하고 연속 측정 시 펌프의 수명이 단축될 수 있으므로 측정 시에만 작동하도록 구성하여 펌프의 수명이 연장되도록 개발하였다.
- 온·습도 센서는 저온과 고온에서 안정적으로 동작하는 산업용 센서를 탑재했다.
- 미세먼지 측정기는 수분 입자를 미세먼지로 오인하여 고농도 상태로 측정할 수 있으므로 정확도 높은 측정기의 개발을 위해 전처리 기술을 보강하였다. 전처리 기술로 메쉬필터를 통한 기타 입자 제거, 제습제를 통한 수분 제거, 히터를 통한 추가 수분 제거 등의 기술을 적용하였다.
- 내부 히터는 측정기 흡입구(Inlet)에 부착되어 입자의 수분을 제거하는 목적으로 사용한다.
- 배기 팬은 내부 공기를 순환하기 위해 사용되며 배기용 팬 1개를 사용한다.



장비명	이미지	용도
INLET 메쉬필터		큰 입자 먼지 제거
제습제 (실리카겔)		먼지 입자에 붙어있는 수분 제거
히터		먼지 입자에 붙어 있는 수분 제거 및 제습제(실리카겔) 건조 목적
유량펌프		일정량의 먼지 유입을 위해 평균 1.1L/min의 유량으로 외부 공기 흡입

〈그림 2-10〉 측정기 전처리 기술 내용



〈그림 2-11〉 고정형 미세먼지 측정기 시제품 구성도

휴대형 미세먼지 측정기

○ 휴대형 측정기 정보

- 휴대형 측정기는 광학 센서를 통해 공기 중 미세먼지 입자의 크기 및 개수를 측정하여 극초미세먼지(PM1.0), 초미세먼지(PM2.5), 미세먼지(PM10)의 농도값을 디스플레이 상에 표출하고, 보조 센서를 통해 VOC(휘발성 유기화합물), HCHO(포름알데히드), CO₂(이산화탄소) 농도 및 온도와 습도 등의 기상 현상을 함께 측정하여 현황 정보를 표출한다. 이때, 미세먼지 농도에 따라 '좋음, 보통, 나쁨 및 매우 나쁨' 수준을 LED를 통해

파랑, 녹색, 노랑, 빨강으로 표시한다.

〈표 2-2〉 휴대형 측정기 사양

기능	사양
미세먼지 측정 방식 및 농도 범위	광산란 단일 입자 계수 방식, 0~1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
이산화탄소 측정 방식 및 농도 범위	NDIR 방식, 0~2000ppm
총 휘발성 유기화합물 측정 방식	반도체 센서, 0~60ppm
폼알데하이드 측정 방식	전기화학식 방식, 0~5ppm
사용 환경 조건	온도: -20~55 $^{\circ}\text{C}$, 습도: 0~90%RH (non-condensing)
통신 방식	Bluetooth, Wi-Fi
입력 전원	5.0 VDC, 1.2 A
내장 배터리	Li-Ion, 3.7V, 1,800mAh 완충시간: 약 3시간, 사용시간: 약 3시간
충전 타입	C Type 5 VDC 충전기 사용
규격 (WxHxD)	100 mm x 100 mm x 40 mm

- 휴대형 측정기에서 측정한 정보는 블루투스 방식을 통해 휴대폰 어플에 실시간으로 전송되며, 해당 앱을 이용해 측정기에서 전송받은 데이터를 다시 시흥 스마트시티 웹페이지에 표출하도록 연계한다.



〈그림 2-12〉 휴대형 측정기 및 어플 사용 화면

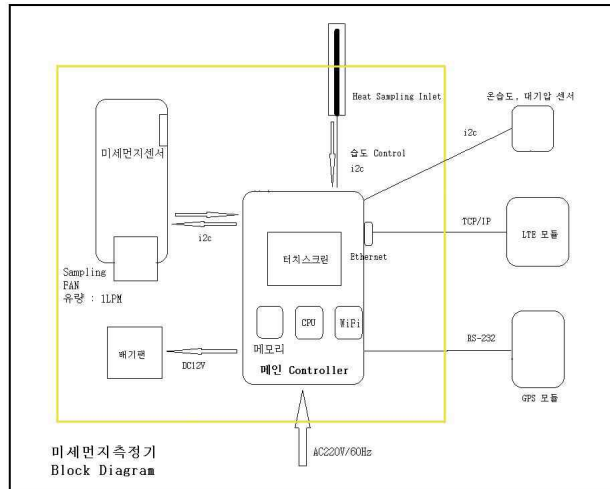
이동형 미세먼지 측정기

○ 이동형 미세먼지 측정기 기본 정보

- 제품크기 : 가로(22cm) / 세로(30cm) / 두께(16cm) / 무게(5kg)
- 측정센서 : 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5), 온도, 습도, 대기압, GPS(위치정보)
- 통신방법 : LTE 방식(분단위 측정) / WiFi 및 Ethernet 지원
- 전력공급 : 상전

○ 고정형 미세먼지 측정기 시제품 특징 및 고도화 기술

- 미세먼지 센서는 광산란 방식, 단일 입자 계수 방식의 고가 센서를 적용하여 2등급 성능인증 등급을 달성할 수 있도록 센서를 탑재한다.
- 유량펌프는 1L/min의 유량으로 공기를 흡입하고 연속 측정 시 펌프의 수명이 단축될 수 있으므로 측정 시에만 작동하도록 구성하여 펌프의 수명이 연장되도록 개발하였다.
- 온·습도·대기압 센서는 글로벌 시장에서 널리 사용되는 산업용 센서인 보쉬 센서텍(Bosch Sensortec) 센서를 적용한다.
- 미세먼지 측정기는 수분 입자를 미세먼지로 오인하여 고농도로 발생할 수 있으므로 정확도 있는 측정기로 개발하기 위해, 전처리 기술로 미리 설정된 온도와 습도의 기준값에 따라 히터를 자동으로 가동하여 미세먼지 측정값의 정확도를 향상시킨다.
- 기존 고정형 미세먼지 측정기에 비해 컴팩트한 사이즈와 무게로 제작되어 버스정류장, CCTV 거치 기둥 등 고정식 설치물에 설치하는 물론, 차량 등 이동체에도 설치가 가능하고 핸디형으로도 커스터마이징이 가능하여 다양한 방식으로 설치 공간의 제약없이 미세먼지 측정이 가능하다.
- GPS(Global Positioning System)센서를 장착하여 위치기반의 미세먼지 측정이 가능할 뿐만 아니라, 대기압 센서를 이용한 고도수치 측정이 가능하며, 고도 기반의 미세먼지 측정도 가능하다.



<그림 2-13> 이동형 미세먼지 측정기 시제품 구성도

4-2 환경플랫폼

IoT 플랫폼 개요

- IoT(Internet of Things)는 사물들의 인터넷으로 실세계와 가상 세계에 존재하는 사물들을 네트워크로 연결하여, 사람과 사물, 사물과 사물 간에 언제 어디서나 서로 소통할 수 있는 지능적 환경이다. 환경플랫폼은 'IoT Makers' 솔루션 기반으로 구축되었다. 이 플랫폼을 통해 IoT 디바이스(미세먼지 측정기 등)를 연결하고, 수많은 디바이스가 수집한 데이터를 실시간으로 수집/저장/관리한다. 또한 환경플랫폼은 서비스 어플리케이션 개발에 필요한 SDK 및 Open API를 제공함으로써 어플리케이션 개발을 용이하게 한다.

주요 기능

- 환경플랫폼의 구성은 아래와 같으며, 주요 기능은 다음과 같다.
 - 디바이스 연계관리 : IoT 디바이스 등록 관리 및 전송/인증 기능 수행
 - 데이터 수집분석 관리 : 대용량 데이터 처리 및 규칙 기반 데이터 관리 기능 제공
 - Open API 관리 : 디바이스 관리, 데이터 전송/조회 등 환경플랫폼의 기능을 외부

애플리케이션에서 요청 시 처리해 주는 역할 수행

- 외부기관 연계관리 : 외부기관 데이터 연동을 통한 서비스 확장 지원

Open API 관리		외부기관 연계 관리
기준정보 관리	PUSH 관리	연계기관 관리
인증/권한관리	데이터 이력관리	연계데이터 관리
데이터 수집분석 관리		
WorkFlow 관리	이벤트 관리	
지능형 Rule Engine		
실시간 데이터 처리 Engine		
분산처리		
디바이스 연계 관리(V2X/IoT)		
연결/세션 관리	트랜잭션 관리	QoS/라우팅 관리
디바이스/시스템 인증		전송보안

〈그림 2-14〉 환경플랫폼 구성

4-3 오염원 유형 추적 및 도심지역 도출

1) 초미세먼지 오염원 유형 추적

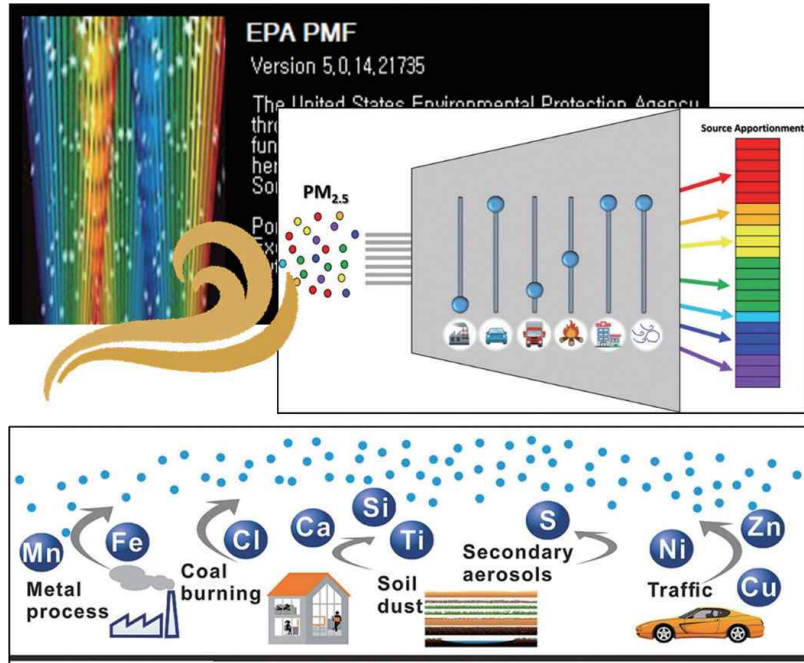
○ 개요

- 초미세먼지 오염원 유형 추적은 분석 대상 지역의 초미세먼지가 어떤 오염원(Source)에서 기여한 것인지를 정성, 정량적으로 추적하는 것을 말한다. 과학적인 초미세먼지 관리를 위해 오염원을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 하지만, 배출원 정보가 충분하지 않고, 초미세먼지는 대기 중에서 생성되기도 하는 등의 복잡한 특성상 배출원의 파악이 쉽지 않다. 이때, 배출원이 가진 특징적인 원소나 주요 화학비 정보를 이용한다면 오염원을 구분하고 그 기여도를 추정할 수 있다.

○ 활용 기술

- 초미세먼지 오염원 유형 추적 모델링에는 미국 환경성(US EPA)에서 개발한 PMF 모델(Positive Matrix Factorization Model)이 활용되며, 초미세먼지 오염원 유형 추적을 위

해 세계적으로 가장 활발하게 사용되는 모델이다. 해당 모델은 초미세먼지 내 세부 화학성분 자료를 입력 데이터로 이용하며, 이를 세 개의 양인자 행렬들로 분리하는 것을 기본 원리로 한다.



〈그림 2-15〉 초미세먼지 오염원 유형 추적을 위한 PMF 모델링

○ 기대효과

- PMF 모델을 통해 대상 지역에 대한 초미세먼지 오염원 유형이 도출되고, 각각 오염원의 일별 기여도가 분석 기간 동안 제시된다.

〈표 2-3〉 초미세먼지 오염원 유형 추적 기술의 연구 내용

구분	연구 내용
입력자료 확보	세부 화학성분 데이터 확보
모델링 수행	PMF 모델링 기법을 활용한 오염원 유형 8종 이상 도출
결과 검증 및 분석	모델의 신뢰성 확보 및 비교 분석을 통한 시흥시 특화 결과물 도출, 도출 결과물의 SCI급 논문 발표를 통한 국제 경쟁력 확보
S/W 모듈 개발	오염원 유형 추적 결과물의 시각화

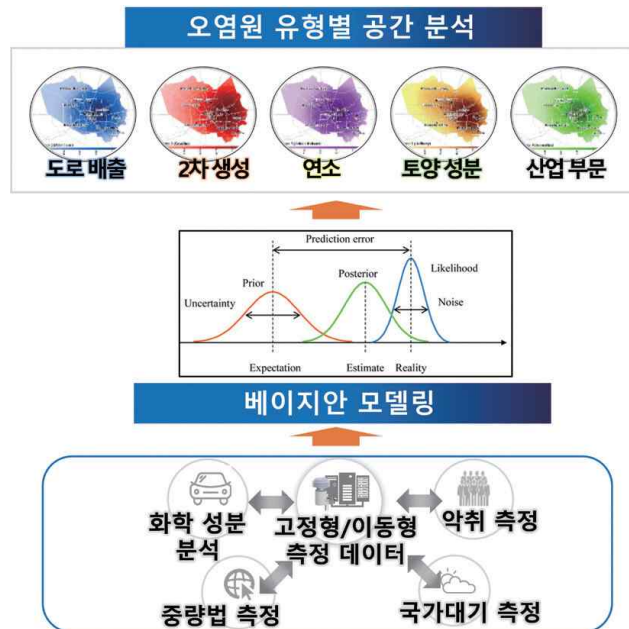
1 초미세먼지 우심지역 도출

○ 개요

- 초미세먼지 상세 지도화 및 우심지역 도출은 분석 대상 지역의 초미세먼지가 오염 원별로 어떤 분포를 갖는지를 정량적으로 추정하는 것을 말한다. 초미세먼지의 오염 원별로 분포를 파악할 수 있다면 과학적인 초미세먼지 관리를 위한 기초 자료로 매우 중요하게 활용될 수 있다. 대상 지역에 대해 오염원 추정 결과가 이미 있다면, 이를 기반으로 추가 정보를 반영하여 오염원 유형별 공간 추정으로 확장할 수 있다. 이를 초미세먼지 상세 지도화라 칭할 수 있다.

○ 활용 기술

- 베이저안 추론 모델이 이용된다. 통계학적 방법론 중 하나인 베이저안 모델은 사전 정보를 기반으로 파라미터 추정이 가능하다는 장점이 있으며, 본 연구에서는 PMF 모델 결과와 시흥시의 대기오염에 대한 배경지식이 사전 정보를 구성하는 데 활용된다. 시흥시 정왕동 지역의 초미세먼지 오염원 유형별로 그 공간분포를 지도화하고 우심지역을 도출한다. 이를 위해, 측정기 데이터(고정형/이동형), 오염원 유형 정보(수용 모델 결과물)를 활용한다.



〈그림 2-16〉 초미세먼지 상세 지도화 절차

○ 기대 효과

- 본 요소기술을 통해 대상 지역에 대한 초미세먼지 오염원 유형별, 위치별 기여도가 도출되고, 각각 오염원의 일별 기여도가 지도 시각화 결과로 제시된다. 이를 통해, 과학적이고 세부적인 결과물을 바탕으로 초미세먼지에 대응이 가능하다.

〈표 2-4〉 초미세먼지 상세 지도화 및 우심지역 도출 기술의 연구 내용

구분	연구 내용
입력자료 결정	시흥시 실정에 적용 가능한 입력자료 결정
알고리즘 구축	국내 사용 가능 데이터에 맞춰 베이지안 알고리즘 수정
모델링 수행	오염원 유형별 상세 지도화 및 우심지역 도출을 위한 모델링 수행
결과 검증 및 분석	타 기관 연구와 연계된 베이지안 모델의 검증 도출 결과물의 SCI급 논문 발표를 통한 국제 경쟁력 확보
S/W 모듈 개발	축적데이터 기반 우심지역 도출이 가능한 S/W 모듈 개발

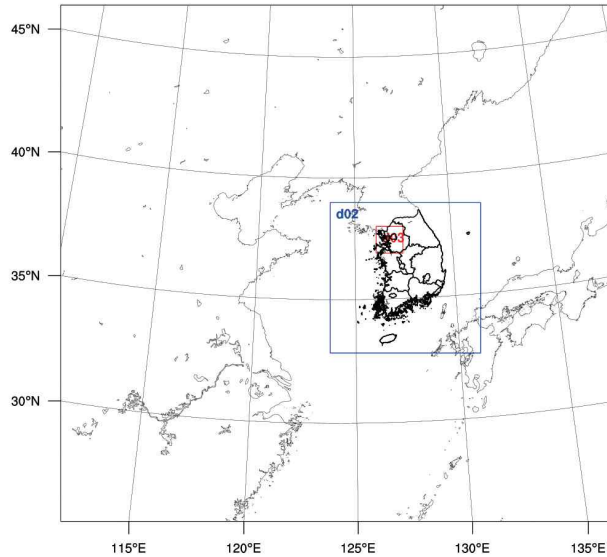
4-4 대기오염 예측 모델

대기오염예측 모델 구축 및 자동화

○ 대기오염예측모델 도메인 정의

- 시흥시 범위의 대기오염 예측을 위해 기상예측모델(WRF), 배출량 모델(SMOKE), 대기확산모델(CMAQ)을 활용하여 대기오염예측모델(WRF-SMOKE-CMAQ)을 구축하고, 수치모델 수행을 위한 영역을 세 개 도메인으로 설정한다. 첫 번째 도메인(25km)은 중국내륙 및 산둥반도를 포함하여 중국에서부터 수송되는 오염물질을 고려하기 위해 설정하였으며, 두 번째 도메인(5km)은 국내 오염물질의 지역 간 이동을 고려하기 위해 한반도 전체로 설정, 마지막 세 번째 도메인(1km)은 관심 지역인 시흥시를 중심으로 설정하였다.

WPS Domain Configuration



〈그림 2-17〉 대기오염예측 모델 도메인

○ 대기오염예측모델 입력자료

- WRF 모델의 초기 및 경계자료는 GFS(Global Forecast System) 모델자료를 사용하였으며, GFS 모델은 NCEP의 기상예보모델로 예측정확도를 향상시키기 위해 대기-해양-대륙-해빙 모델을 결합하여 예측한다.
- SMOKE 모델에 입력되는 대기오염물질의 배출량은 EDGAR(Emissions Database for Global Atmospheric Research) HTAP V2와 CAPSS(Clean Air Support System)를 사용한다. EDGAR 자료는 MICS-Asia, UPA-US/Canada, TNO 등 국가적으로 보고된 배출량을 사용한 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 해상도의 전구 데이터이며, CAPSS는 환경부 산하의 국가미세먼지정보센터에서 배출 데이터를 수집, 산정하는 시스템으로 매해 3년 전 데이터에 대한 배출량을 발간한다.

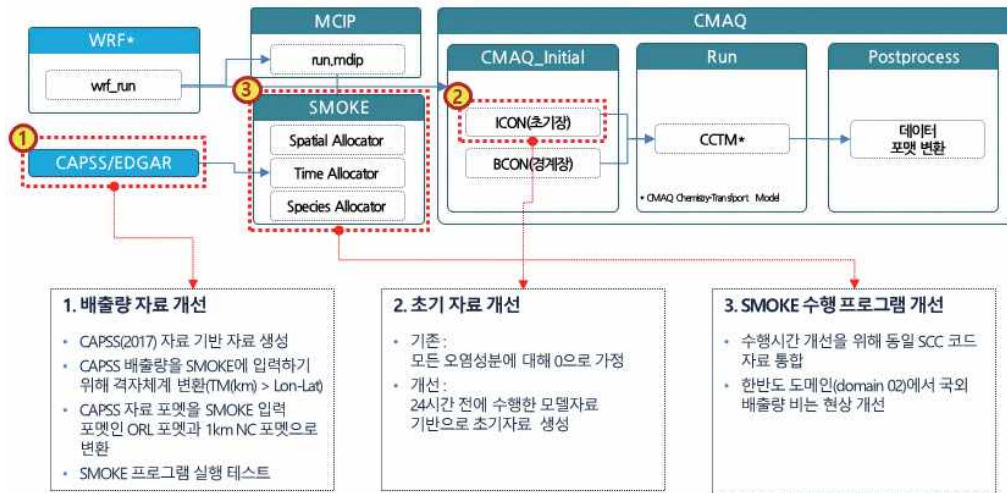
○ 대기오염예측모델 자동화 체계 구축 및 고도화

- 각 모델이 유기적으로 연동하여 수행될 수 있도록 자동화 체계를 구축하고 대기오염예측 모델의 성능(예측시간 및 예측성능)을 개선하기 위해 배출량 자료 개선과 초기자료 개선을 수행했다.

〈표 2-5〉 대기오염예측 모델 구축 내용

구분	연구 내용
배출량 생산체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 최신 배출량 자료 조사 • 시간/종 할당 계수 선정 • CAPSS 배출량을 SMOKE에 입력하기 위해 격자체계 변환 • CAPSS 자료 포맷을 SMOKE 입력 포맷으로 변환 • SMOKE 프로그램 실행
기상모델 구축 및 도메인 설정	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 및 경계 자료 조사 • 광역도메인(9km)/지역간도메인(3km)/지역도메인(1km) 설정 • 지형자료 생성, 초기 입력자료 강화, 물리과정 결정 등 WRF 모델 컴파일
WRF 모델 자동화	<ul style="list-style-type: none"> • WRF 자동화 디렉토리 구조 설계 • WPS(WRF Preprocessing System)/WRF 네임리스트 자동 작성 프로그램 개발 • WRF 모델 자동화 프로그램 테스트
SMOKE 모델 자동화	<ul style="list-style-type: none"> • EDGAR/CAPSS 배출량 디렉토리 구조 설계 • EDGAR 배출량 설정 파일 작성 • 면 오염원/도로 이동 오염원/비도로 이동 오염원 처리 자동화 프로그램 • SMOKE 자동화 프로그램 테스트
CMAQ 모델 자동화	<ul style="list-style-type: none"> • CMAQ 모델 디렉토리 구조 설계 • MCIP 자동화 프로그램 개발 • ICON/BCON/CCTM 자동화 프로그램 개발 • CMAQ 수행 테스트

- 배출량 자료는 CAPSS 최신 배출량인 2017년으로 변경하였으며, 한반도 도메인에서 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 배출량에는 누락되어 있는 국외 배출량 부분을 EDGAR(Emissions Database for Global Atmospheric Research), 자료를 사용하여 보완하였다. 또한 프로그램 수행시간 개선을 위해 중복된 배출 코드 데이터를 통합하였다.
- 초기자료는 기존 CMAQ의 초기 데이터가 없기 때문에 모든 오염물질의 농도를 0으로 두고 spin-up 시간을 주어 예측을 수행하였으나, 부족한 spin-up 시간으로 인해 예측수행 능력이 예측시간 초기에 매우 낮게 나오는 이슈가 발생하였다. 해당 문제를 개선하기 위해 예측 수행 전날의 예측자료를 사용하여 예측 초기자료를 개선하였다.



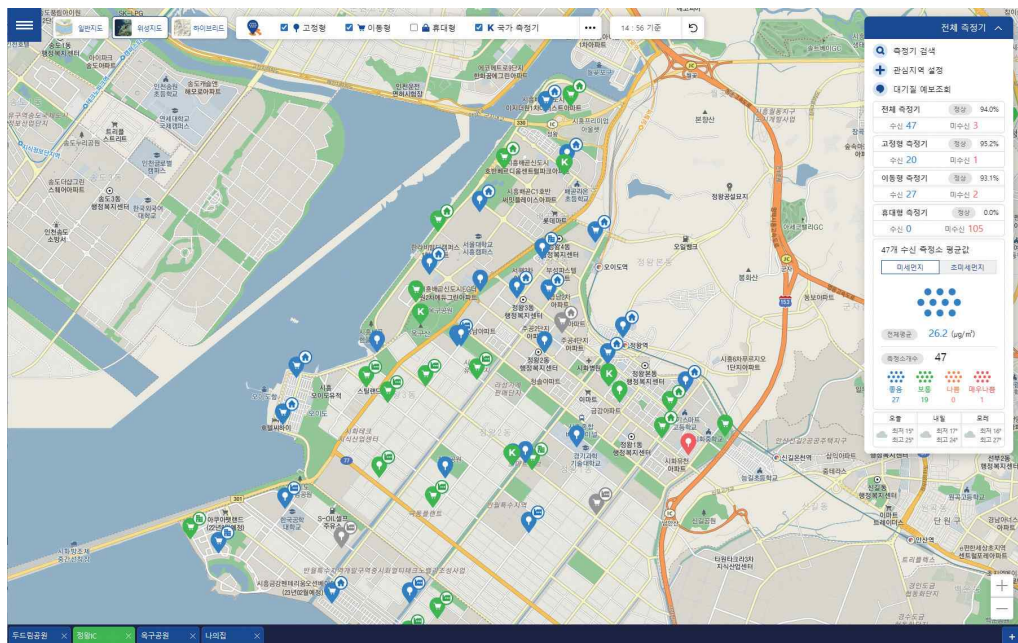
〈그림 2-18〉 대기오염물질 예측모델 프로세스 및 고도화 내용

1 | 지자체용 미세먼지 정보제공 서비스

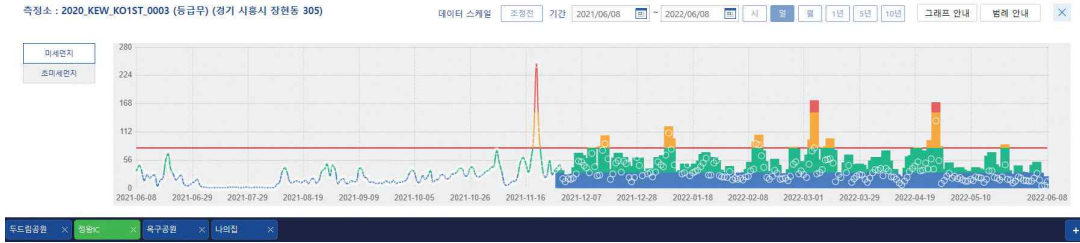
1-1 미세먼지 현황 지도 및 데이터 조회

○ 실시간 미세먼지 현황 지도

- 미세먼지 측정기에서 실시간 측정된 미세먼지(PM2.5/PM10) 농도를 10분 주기로 지도상에 제공
- 특정 측정기 선택 시 측정기가 수집한 미세먼지 데이터의 시간별 변화 그래프 확인 가능



〈그림 3-1〉 실시간 미세먼지 현황지도



〈그림 3-2〉 미세먼지 측정기 수집 데이터의 시간별 변화 그래프

통계

지역선택: 경기 | 시/군/구: 시흥시 | 전체

측정기: 전체

기간: 2022/05/29 ~ 2022/06/08

연속시간: 00 ~ 23

지정시간: - - - - -

측정항목: 미세먼지 초미세먼지

* 측정기는 최대 10개 까지 조회가 가능합니다.

센서 측정기 목록

- 2020_KEW_KO1ST_0001
- 2020_GRA_LE2ND_0001
- 2020_KEW_PO3RD_0001
- 2020_KEW_PO3RD_0002
- 2020_KEW_KO1ST_0002
- 2020_KEW_KO1ST_0003

총 155 건

국가 측정기 목록

- 대야동 국가 측정기
- 옥감동 국가 측정기
- 백문동 국가 측정기
- 장원동 국가 측정기
- 정왕동 국가 측정기
- 서해안로 국가 측정기

총 4 건

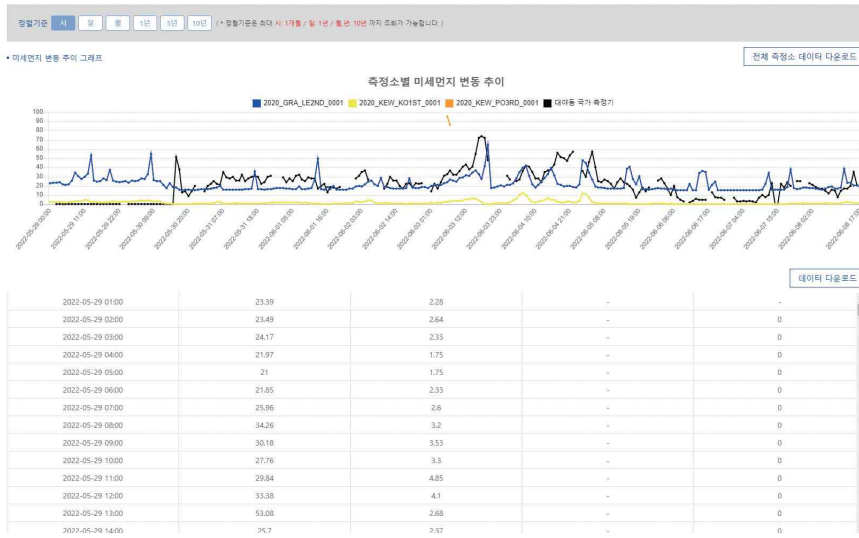
선택 측정기 목록

- 2020_KEW_KO1ST_0001
- 2020_GRA_LE2ND_0001
- 2020_KEW_PO3RD_0001
- 대야동 국가 측정기

총 4 건

Best Top 5(미세먼지)				Best Top 5(초미세먼지)				Worst Top 5(미세먼지)				Worst Top 5(초미세먼지)			
순위	측정기명	수치(µg/m³)	상태	순위	측정기명	수치(µg/m³)	상태	순위	측정기명	수치(µg/m³)	상태	순위	측정기명	수치(µg/m³)	상태
1	2020_KEW_KO1ST_0006	1.00	●	1	2020_KEW_KO1ST_0010	3.00	●	1	2021_KEW_KO1ST_0019	30004.00	●	1	2021_KEW_KO1ST_0019	30004.00	●
2	2020_KEW_KO1ST_0005	1.00	●	2	2020_GRA_LE2ND_0016	3.00	●	2	2020_GRA_LE2ND_0022	49.60	●	2	2020_GRA_LE2ND_0022	28.60	●
3	2020_KEW_KO1ST_0004	1.00	●	3	2020_GRA_LE2ND_0015	3.00	●	3	2020_GRA_LE2ND_0024	41.00	●	3	2020_GRA_LE2ND_0024	20.40	●
4	2020_KEW_KO1ST_0015	2.00	●	4	2020_KEW_KO1ST_0003	3.00	●	4	2020_GRA_LE2ND_0009	35.40	●	4	2020_KEW_KO1ST_0009	18.00	●
5	2020_KEW_KO1ST_0007	2.00	●	5	2020_GRA_LE2ND_0011	3.70	●	5	2021_KEW_KO1ST_0020	35.00	●	5	2020_GRA_LE2ND_0009	17.20	●

〈그림 3-3〉 통계 분석 조건 입력 화면



〈그림 3-4〉 통계 분석 조건에 따른 조회 결과 화면

- 미세먼지 데이터 통계 분석
 - 동일 장소(측정기)의 시간의 흐름에 따른 미세먼지 농도 변화 조회/분석
 - 동일 시점에 서로 다른 장소(측정기)의 미세먼지 농도 차이 조회/분석
 - 일별 특정 시간대(출근/퇴근/새벽 등) 미세먼지 농도 추이 조회/분석

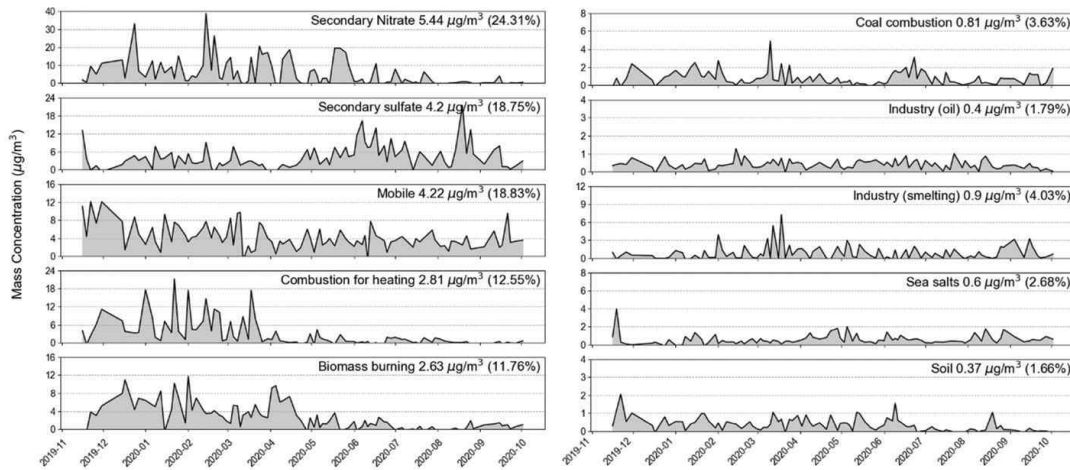
1-2 미세먼지 오염원 분석

1 초미세먼지 오염원 유형 추적

- 실증체계
 - 오염원 유형 추적 결과의 실증은 모델링을 통해 추정된 초미세먼지 농도와 실제 측정된 초미세먼지 농도를 1:1로 비교를 통해 가능하다. 즉, 실제 측정값과 모델링 계산값을 1:1로 비교해 실증하며, 결정계수가 0.90 이상인 경우에는 모델 추정이 성공적이라고 간주한다. 실증을 마친 초미세먼지 오염원 유형 추적 결과를 분석하여 세부 특성을 파악한다.

- 실증결과
 - 모델링 값과 관측값의 결정계수(R^2)가 0.92로, 매우 높은 정확도를 나타냈다. 따라서 연구의 결과물로서 대상 지역에 대한 초미세먼지 오염원 10종을 도출하고, 오염원 별 시간별 기여도를 추정하였다. 추정된 결과는 <그림 3-5>와 같다.
 - 대상 지역에서는 2차 생성 오염원에 의한 초미세먼지 기여도가 약 43%로 나타났으며, 교통량에 의한 기여도가 약 19%로 나타났다. 2차 생성 오염원은 우리나라의 다른 도시들과 큰 차이가 없었으며, 교통량의 기여도는 다소 높았다. 이는 차량 운행의 영향이 우리나라의 다른 도시에 비해 다소 높음을 의미하며, 각종 물류 이동량에 따른 것으로 판단된다.
 - 또한, 산업 오염원이 2종류로 도출되어 중유 이용 관련 오염원과 제련 오염원이 각각 구분되었다. 이는 대상 지역 인근에 있는 산업단지의 영향으로 보이며, 다른 도시들과 구분되는 특성이었다. 하지만, 기여도는 약 5.8%로 산업 오염원의 기여도가 다른 도시들보다 크게 높지는 않은 것으로 나타났다.

- 다른 오염원으로 도출된 석탄연소, 생물체 연소, 난방 연소, 해양입자, 토양 성분은 우리나라의 다른 도시들과 뚜렷하게 구분되는 특성은 나타나지 않았다. 해당 오염원들은 우리나라 전반에 걸친 영향과 비슷한 수준으로 판단된다.

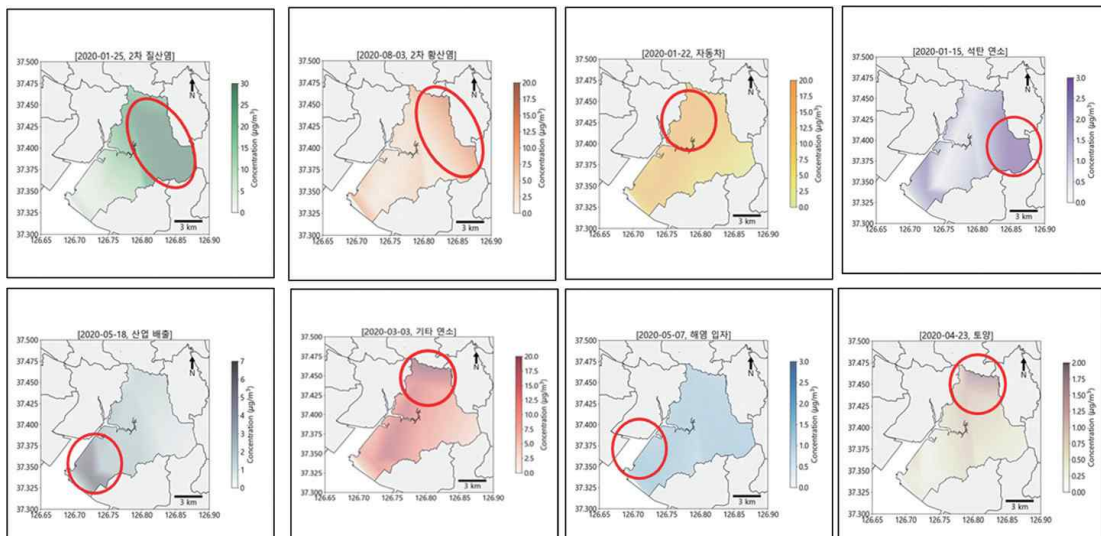


〈그림 3-5〉 초미세먼지 오염원 유형 추적 결과(10종)

1 초미세먼지 우심지역 도출

- 실증체계
 - 상세 지도화 및 우심지역 도출 결과의 실증은 모델링을 통해 추정된 초미세먼지 농도와 실제 측정된 초미세먼지 농도를 1:1로 비교를 통해 가능하다. 즉, 실제 측정값과 모델링 계산값을 1:1로 비교해 실증하며, 결정계수가 0.90 이상이면 모델 추정이 성공적이라고 간주한다. 실증을 마친 모델링 결과를 바탕으로 오염원별 상세 지도화 및 우심지역 도출 분석을 진행한다.
- 실증결과
 - 모델링 값과 관측값의 결정계수(R^2)가 0.90으로, 매우 높은 정확도를 나타냈다.
 - 시흥시 실증지역에 대한 초미세먼지 오염원 유형의 케이스별 변화 패턴, 계절별 분포 특성 분석 등을 통해 8종 오염원 유형에 대한 우심지역을 아래 그림과 같이 도출하였다.

- 시흥시의 초미세먼지는 북쪽을 중심으로 높은 농도가 형성되었으며, 겨울에서 봄까지의 농도가 높았다.
- 오염원 유형별로는 겨울에서 봄까지 2차 질산염의 농도가 높았으며, 시흥시 북동쪽을 중심으로 우심지역이 도출되었다. 2차 황산염은 여름이 높았고, 우심지역은 시흥시의 북동쪽이었다.
- 교통량에 의한 오염은 뚜렷한 계절 패턴은 없었으나, 가을철이 다소 높았고 시흥시의 북쪽에서 북서쪽을 중심으로 고농도가 형성되었다. 이는 고속도로의 위치와 일치했다. 산업 배출의 경우 봄, 가을로 기여도가 높은 특성을 보였으며, 위치는 산업단지가 밀집해 있는 시흥시 남서쪽 인근이었다.
- 석탄연소, 해양입자, 토양 성분 등의 계절 패턴은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 해당 오염원들의 우심지역 위치는 아래 그림과 같다. 기타 연소는 겨울철 기여도가 높았으며, 이는 난방 연소의 영향으로 판단된다.



〈그림 3-6〉 초미세먼지 오염원 유형별 우심지역 도출 결과

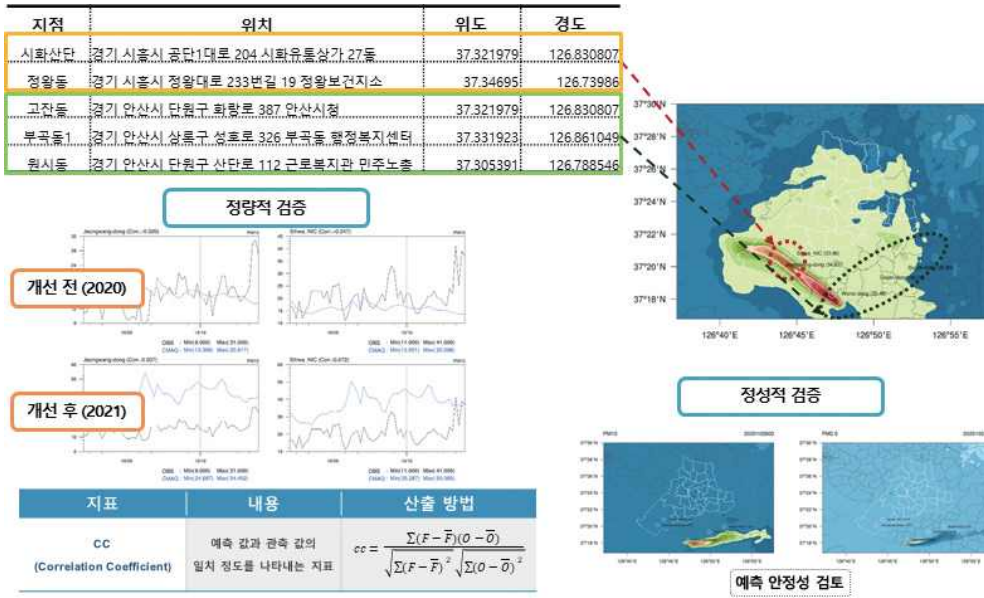
1-3 대기오염예측 모델

대기오염예측 모델 결과 검증

- 대기오염예측 결과의 정성적 검증을 위해 한국환경공단의 예보자료와 대기오염예측 모델 결과를 비교 분석하고, 정량적 검증을 위해 시화산단, 정왕동, 고잔동, 부곡동,

원시동 5개 지점에 대해 예측값과 관측값의 상관계수를 산출하였다.

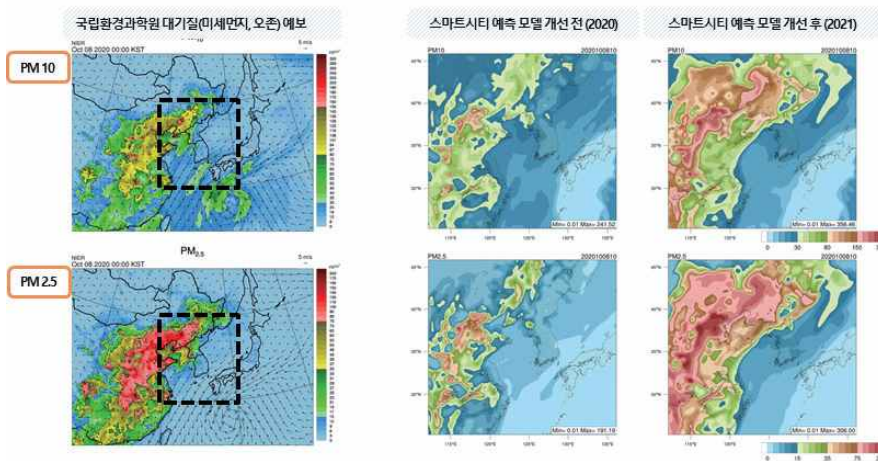
- 검증기간 : 2020.10.08~2020.10.10
- 검증 자료 : 한국환경공단 Air Korea PM10/PM2.5 자료



〈그림 3-7〉 모델 결과 검증 방법

○ 정성적 검증 결과

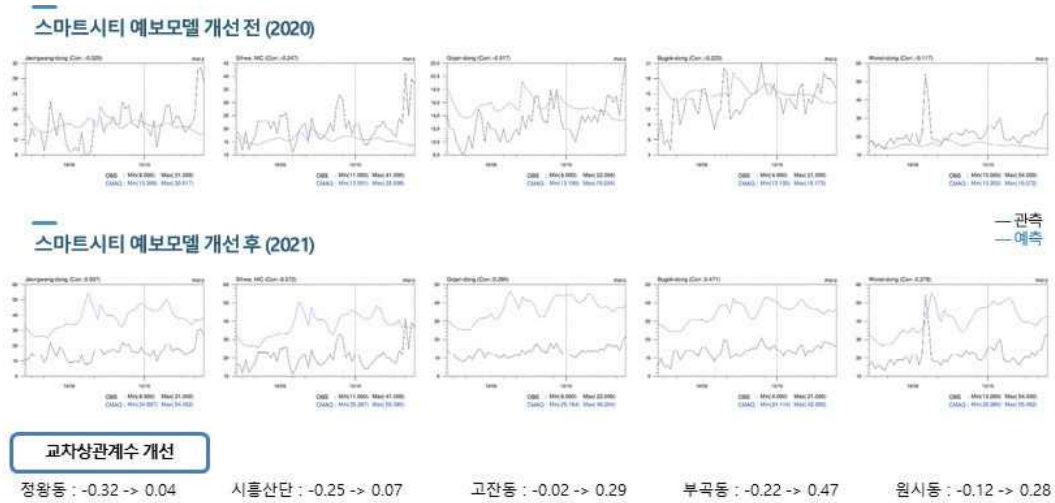
- 대기오염예측 결과로 분포도를 생성하여 동일한 시간대의 국립환경과학원 대기질 예보 이미지와 비교 분석하였다. 분석 결과 대기오염예측모델 고도화 이후 미세먼지 강도 및 공간분포가 개선됨을 보여준다.



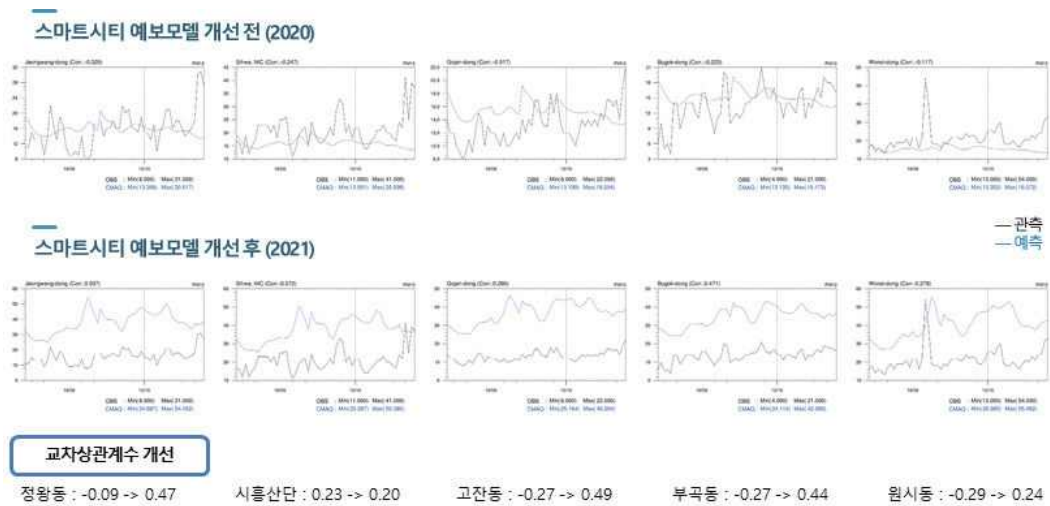
〈그림 3-8〉 정성적 검증 결과 이미지

○ 정량적 검증 결과

- 시화산단, 정왕동, 고잔동, 부곡동, 원시동 5개 지점에 대해 예측값과 관측값의 상관 계수 산출하여 정량적 검증 수행하였다. 정량적 검증 결과 대기오염 예측모델 고도화 이후 대부분의 지역에서 상관관계수가 향상된 결과를 보였다.



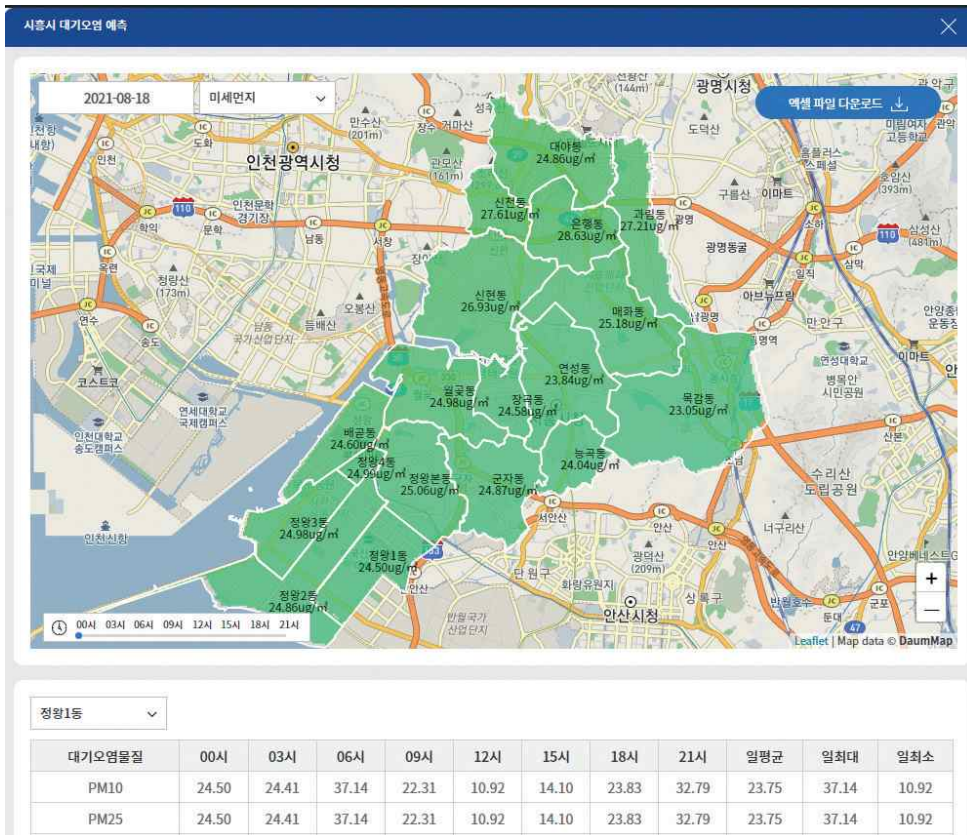
<그림 3-9> 정량적 검증 결과 - PM10



<그림 3-10> 정량적 검증 결과 - PM2.5

○ 대기오염 예측 결과물 시각화

- 예측 항목별, 시간(일별, 시간별) 조회에 따른 대기오염 예측 결과를 시흥시 지도에 히트맵 차트 방식으로 지도화하여 시각화한다. 행정동별 예측 데이터의 측정항목별로 시간 단위, 일평균, 일최대, 일최소 통계 결과값을 리스트로 표출한다.



〈그림 3-11〉 시흥시 대기오염 예측

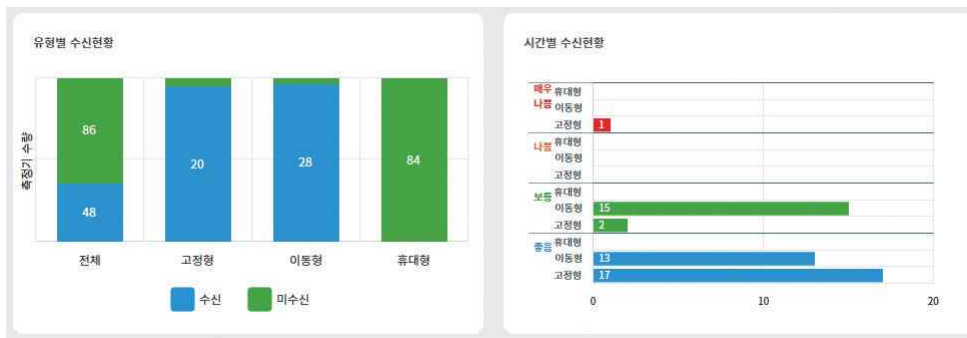
1-4 시각화/분포지도화

- 시각화/분포지도화 S/W 모듈은 실증지역에 설치된 고정형, 이동형, 휴대형 측정기의 수집 데이터 및 예측 모델 결과를 사용자가 즉각 시각적으로 이해하고 분석 및 활용에 참고할 수 있도록 했다.

1 시흥시 종합 단계별 발생 현황 대시보드

○ 유형별/시간별 수신현황

- 유형별 수신현황 : 전체, 고정형, 이동형, 휴대형 측정기로 구분하여 각 구분별 설치 측정기 총수량 가운데 데이터 수신과 미수신 상태인 측정기 수량을 비교하여 막대 그래프 차트 형태로 표출한다.
- 시간별 수신현황 : 환경부 기준 농도 구간 4단계에 따라 각 측정기 유형에 따른 시간별 데이터 수신현황을 막대그래프 차트 형태로 표출한다.



〈그림 3-12〉 유형별/시간별 수신현황

○ 측정기 데이터 현황

- 실증지역의 고정형/이동형/휴대용 측정기의 리스트를 기준으로 분류하여 지점 관리 번호별 최근 데이터 수신 시각 및 미세먼지, 초미세먼지, 온도, 습도의 수집 결괏값을 실시간으로 표출한다. 결괏값은 환경부 기준 4단계 구분 색깔로 명기하여 사용자가 직관적으로 파악할 수 있게 한다.

○ 지점별 미세먼지 현황(동별 농도순위 현황/측정기별 농도순위 현황)

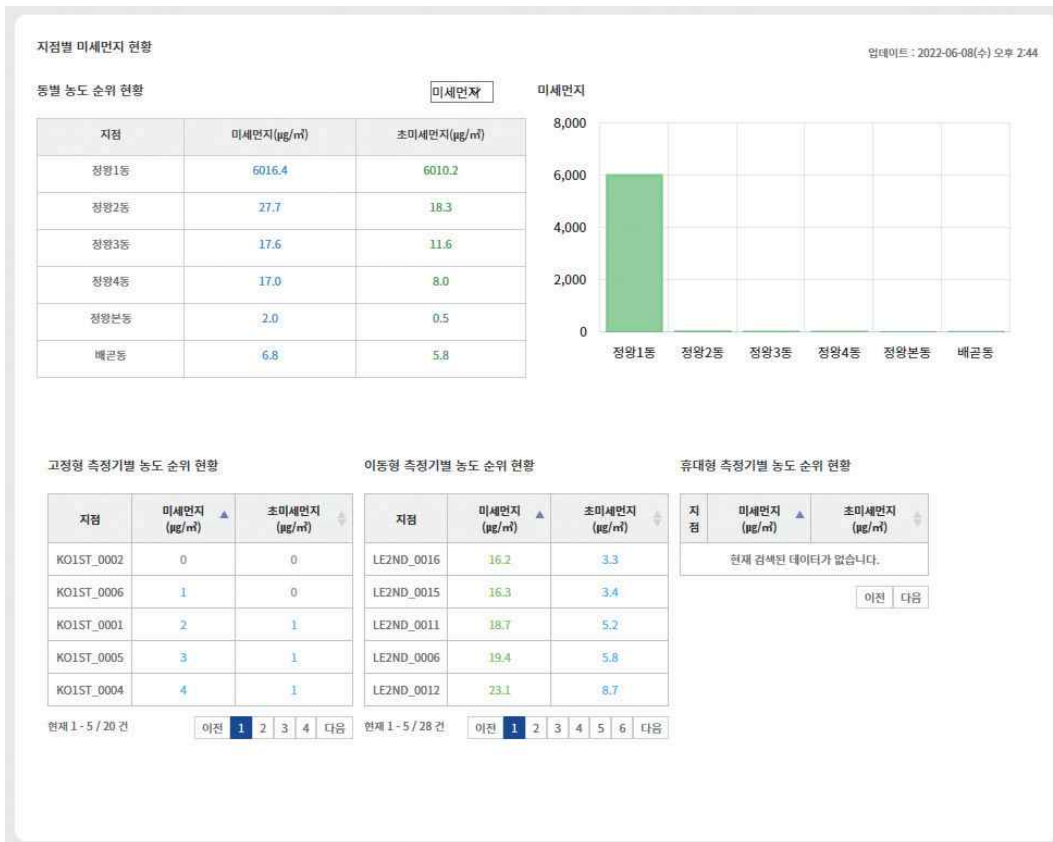
- 동별 미세먼지, 초미세먼지의 동별 농도 순위와 측정값을 리스트로 표출하여 거주지역민의 야외활동에 활용할 수 있도록 하였으며, 측정기별 농도순위 현황을 통해 상세 지역 정보를 제공한다.

측정기 데이터 현황 고장명

번호	관리 번호	데이터 시각	미세먼지(µg/m³)	초미세먼지(µg/m³)	온도(°C)	습도(%)
1	2020_KEW_KO1ST_0001	2022-06-08 14:28	1	3	25.7	53
2	2020_KEW_KO1ST_0002	2022-06-08 14:28	0	0	25.7	52
3	2020_KEW_KO1ST_0003	2022-06-08 14:28	10	24	25.3	54
4	2020_KEW_KO1ST_0004	2022-06-08 14:28	2	6	27.9	49
5	2020_KEW_KO1ST_0005	2022-06-08 14:28	1	4	27.2	49
6	2020_KEW_KO1ST_0006	2022-06-08 14:28	1	3	26.2	51
7	2020_KEW_KO1ST_0007	2022-06-08 14:28	2	4	24.1	57
8	2020_KEW_KO1ST_0008	2022-06-08 14:28	11	18	26	55
9	2020_KEW_KO1ST_0009	2022-06-08 14:28	25	39	24.8	60
10	2020_KEW_KO1ST_0010	2022-06-08 14:28	9	26	23.3	65

현재 1 - 10 / 20 건 이전 1 2 다음

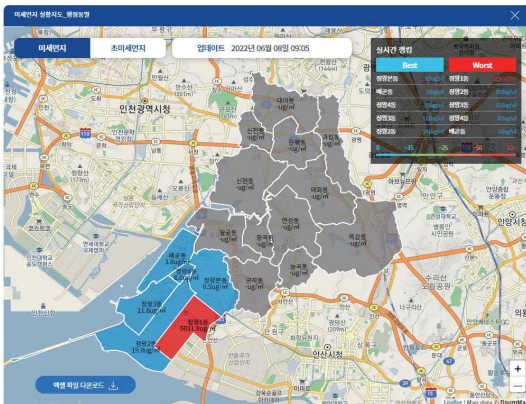
〈그림 3-13〉 측정기 데이터 현황



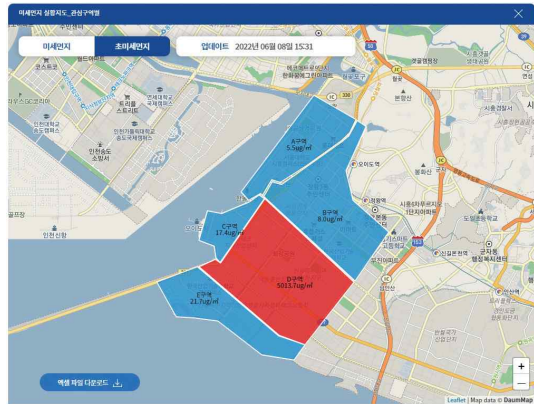
〈그림 3-14〉 지점별 미세먼지 현황

1 미세먼지 현황지도 (행정동별/관심구역별)

- 미세먼지 현황 지도 중 행정동별 시각화는 최근 업데이트된 미세먼지, 초미세먼지 현황 데이터를 행정동으로 구분된 지도에 파랑(좋음), 녹색(보통), 주황(나쁨), 붉은색(매우 나쁨)으로 4단계화 하여 구역별로 표출한다.
- 실시간 행정동별 미세먼지, 초미세먼지 순위를 최상(Best) 1~3순위, 최악(Worst) 1~3순위로 구분하여 행정동명과 상세 데이터값을 4단계 색상으로 나타내어 주민들의 생활에 밀착된 정보를 제공한다.
- 미세먼지 현황 지도 중 관심구역별 시각화는 최근 측정 데이터 기반으로 각 관심구역의 면적별 농도값을 산출하여 A~E 구역별로 지도화하여 4단계 구분 색상으로 표출한다.



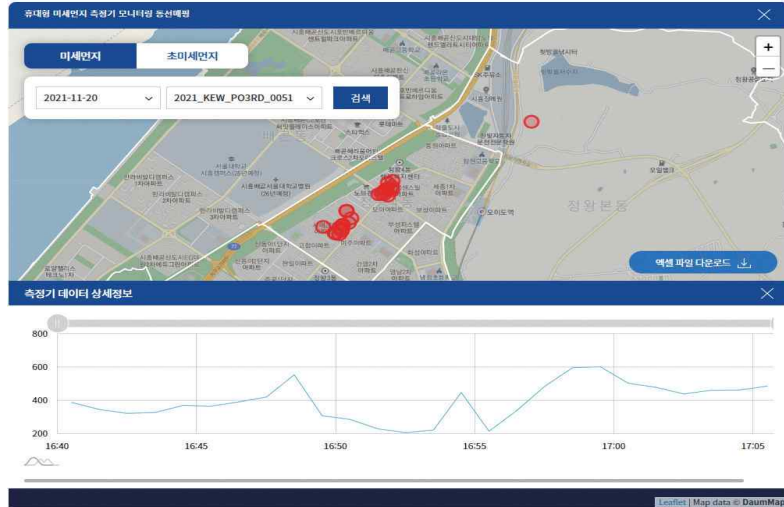
〈그림 3-15〉 미세먼지 현황 지도 (행정동별)



〈그림 3-16〉 미세먼지 현황 지도 (관심구역별)

1 휴대형 미세먼지 측정기 모니터링 동선 지도화

- 휴대형 측정기의 측정기별 일단위로 미세먼지 측정기의 모니터링 동선을 지도상에 지도화한다. 리빙랩에 참여한 시민들이 휴대용 측정기를 소지하고 이동하면 경로별 동선이 원형 아이콘으로 라인 생성된다. 지도의 확대 및 축소가 가능하며 선택한 휴대형 측정기의 시계열 라인 차트 시각화가 구성되어 있다. 해당 시흥 지역의 지점별 미세먼지 현황을 동선으로 파악하기 쉽게 표현한다.



〈그림 3-17〉 휴대형 미세먼지 측정기 모니터링 동선 지도화 현황

2 | 미세먼지 시민 리빙랩

2-1 실증 체계

1D 미세먼지 시민 리빙랩 개요

- 미세먼지 시민 리빙랩은 시흥시 정왕동과 배곧동에 거주하는 시민들이 휴대용 미세먼지 측정기로 공원과 학교 등 생활환경 주변의 분류 별 미세먼지(PM10, PM2.5)를 측정하여 환경문제를 개선하기 위한 정책 및 연구에 활용하는 시민참여 연구 활동이다.

1D 미세먼지 시민 리빙랩 운영체계

- 미세먼지 리빙랩은 휴대용 측정기를 제작하여 배포 후 교육을 실시하였고 측정활동을 시작하였다. 휴대용 측정기에서 수집된 데이터는 환경 플랫폼을 통해 정보를 제공 받는다.



〈그림 3-18〉 미세먼지 시민 리빙랩 운영체계

2-2 실증 대상

○ 시민 참여단 운영

- 미세먼지 시민 리빙랩은 2020년에 시작하여 2022년 현재까지 진행 중이다. 2020년에는 COVID-19의 영향으로 댁내에서 미세먼지 측정 활동을 하였다. 하지만 2021년부터 참여 시민의 주변 생활권을 이동하면서 미세먼지를 측정하는 리빙랩 활동을 하였다. 시민 참여단 수는 점차 확대되어 2022년 현재 약 70명이 활동 중이다.

〈표 3-1〉 연도별 시민참여단 수

연도	2020년	2021년	2022년
시민참여단 수	33명	50명	70명

○ 시민 참여단 활동 내용

- 연구과제에서 제작한 이동형 미세먼지 측정기를 실제 환경에서 사용하면서 측정기 안정성 검증 및 개선사항 도출을 지원하였다.
- 연평균 3개월 정도 매주 일정 시간에 지정된 경로를 이동하면서 이동형 미세먼지 측정기를 사용하여 미세먼지 데이터를 수집하였다.
- 연구과제 담당기관 및 지자체에 미세먼지 리빙랩 활동내역과 활성화 방안 등 의견을 개진하였다.

2-3 실증 경과

- 리빙랩 참여 시민에게 휴대용 미세먼지 측정기를 배포하고 측정기 사용법과 리빙랩 활동 방식에 대한 교육을 주기적으로 진행하였다.
- 리빙랩 참여 시민들은 지정된 측정장소로 이동하면서 휴대형 미세먼지 측정기로 미세먼지 데이터를 측정하였으며, 또한 미세먼지 웹 서비스를 통해 데이터 정상 수집 유무를 확인하고 수집된 데이터를 조회하고 분석에 활용하였다.
- 리빙랩 활동에 대한 연말 성과보고회와 참여한 시민 대상 설문조사를 시행하여 개선 방향을 파악하고 다음 연도 리빙랩 활동에 반영하였다.



〈그림 3-19〉 시민 참여단 교육



〈그림 3-20〉 미세먼지 측정 활동



〈그림 3-21〉 리빙랩 활동 설문조사 시행

2-4 실증 결과

- 휴대형 미세먼지 측정기 사용성 개선
 - 리빙랩에 사용된 휴대형 미세먼지 측정기는 자체 제작한 연구성과물이다. 제작 단계에서 내부 시험을 진행했지만, 시민들이 실제로 사용하는 과정에서 다양한 개선점들이 도출되었다. 이러한 과정을 통해 휴대형 미세먼지 측정기의 사용성이 크게 개선되었다.

- 시민 생활 주변 미세먼지 정보 수집
 - 실증지역에 설치된 미세먼지 측정기는 '22년 7월 현재 50대이며 '22년 말까지 총 65대가 설치될 예정이다. 기존 국가에서 운영 중인 측정기보다 훨씬 많은 숫자로 더 세밀하게 실증지역 곳곳의 미세먼지 정보를 수집할 수 있게 되었지만, 현실적으로 시민 생활공간 주변은 시민들이 직접 휴대형 미세먼지 측정기를 사용해야 측정할 수 있다. 이에 따라 자원봉사 형태로 시민의 자발적인 리빙랩 참여 결과 실증지역에서 측정한 미세먼지 데이터는 약 20만 건이며, 미세먼지 연구에 소중한 데이터로 활용되고 있다.

- 미세먼지 시민리빙랩 활동 모델 제시
 - 지자체 문제 해결에 대한 참여 기회 보장으로 미세먼지 환경 개선에 대해 시민들이 관심을 갖게 되었으며, 자발적인 시민의 참여를 유도하여 지자체와 시민이 함께 고민하고 해결하는 연구 활동으로 선순환 방식의 리빙랩 모델을 제시하였다.

3 | 미세먼지 테스트베드

3-1 실증체계

– 테스트베드 실증은 다음과 같은 절차에 의해 운영한다.

〈표 3-2〉 테스트베드 실증 절차

단계	내용
테스트 신청 및 접수	미세먼지 테스트베드를 이용하고자 하는 신청자를 Web을 통해 접수 받고, 이용목적 및 예약일시 등을 등록하여 테스트를 위한 사전 미팅을 진행한다.
현장미팅	담당자는 신청자와의 예약 일정에 따라 미세먼지 테스트베드 LAB 실 내공간에서 현장 미팅을 진행하며, 테스트베드 LAB 목적 및 지원범위 소개, 측정기의 사양 조사, 통신 프로토콜 규격 확인, 실외 측정장소 소개 및 설치 방법에 대하여 설명한다.
측정기 연동 지원	테스트 장비가 표준 규격일 경우 환경플랫폼이 제공하는 연동 규격에 맞춰 진행하며 비표준 방식인 경우 측정기의 데이터가 구축 플랫폼에 연동이 가능하도록 비표준어댑터 기술을 지원받는 측정기 연동 지원 단계를 거친다.
현장실증	테스트 장비의 연동 확인이 완료되면 현장 설치 일정을 정하고, 실외 테스트베드에 있는 거치대에 설치하여 테스트 측정기를 운영하는 동시에 현장 실증을 진행한다.
데이터 분석	테스트베드에 설치된 측정기는 수신 상태 확인 및 데이터 측정값을 테스트베드 Web을 통해 확인 가능하며, 1등급 시제품 측정기와 동일 환경에서 측정된 미세먼지 측정값과 비교가 가능하도록 비교용 측정 정보 제공 및 데이터 분석 기능을 제공한다.
실증완료	실증에 참여한 측정기 업체는 해당 절차에 따라 시제품 측정기의 테스트를 수행하고, 수행과정 및 내용에 대한 만족도 평가를 실시하여 미세먼지 테스트베드의 실증을 완료한다.

3-2 실증대상

- 테스트베드 실증을 위해 시흥시 정왕동 정왕보건지소에 실외 테스트베드 랩을 구축하였다.
- 실외 테스트베드 랩 장소인 정왕보건지소에는 미세먼지 국가측정망과 고정형 측정기 1대, 이동형 측정기 1대가 설치되어있어 테스트 측정기와 비교가 가능하도록 구축되어 있다.



〈그림 3-22〉 시흥시 정왕동의 테스트베드 랩

- 테스트베드 실증을 위한 현장 적용 테스트 측정기는 한국전자통신연구원(ETRI : Electronics and Telecommunications Research Institute)의 공감센서 측정기 측정기로 진행되었다.
- 공감센서 측정기에 대한 상세 정보는 다음과 같다.

〈표 3-3〉 실증 현장 적용 측정기 정보

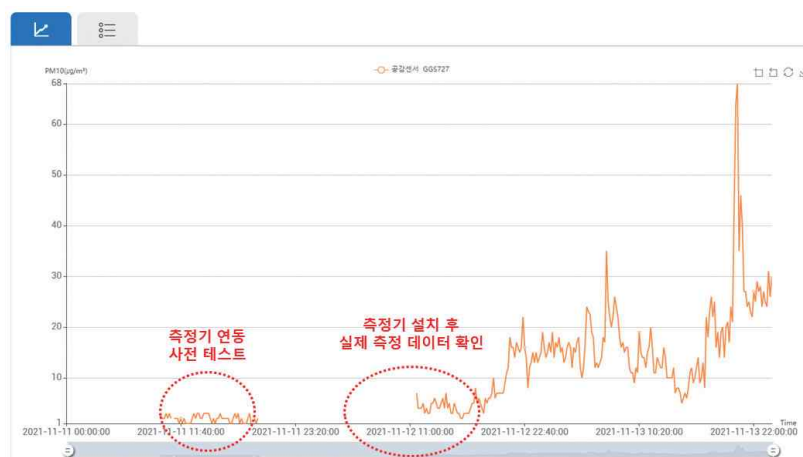
이미지/품명	구분	
GG5727	제조국	국내
	제조 회사	ETRI(공감센서)
	측정 물질	PM-2.5
	전송 방식	WiFi

3-3 실증 경과

- 공감센서 및 관련 연구진들의 사전 미팅을 통해 실증 내용 설명, 측정기 제품사양 조사, 측정기 설치 방안 안내, 측정기 연동 및 테스트베드웹 안내 등 테스트베드 참여에 대한 논의를 진행하였다.
- 측정기 연동을 위해 비표준 어댑터에 맞는 데이터 형식으로 측정기 펌웨어를 수정하고, 설치 시기를 정한 뒤 준비사항을 전달하였다.
- 테스트베드웹을 통해 테스트베드에 참여 신청을 진행하고, 측정기 등록 및 연동을 진행하였다.
- 11월 12일 오전 11시 실외 테스트베드 장소인 정왕보건지소에 공감센서의 테스트 측정기 설치를 진행하고, 현장에서 테스트베드웹에 수신되는 측정정보를 확인하였다.



〈그림 3-23〉 실외 테스트베드의 공감센서 측정기 설치 현장



〈그림 3-24〉 공감센서 측정기 연동 및 데이터 수신 확인

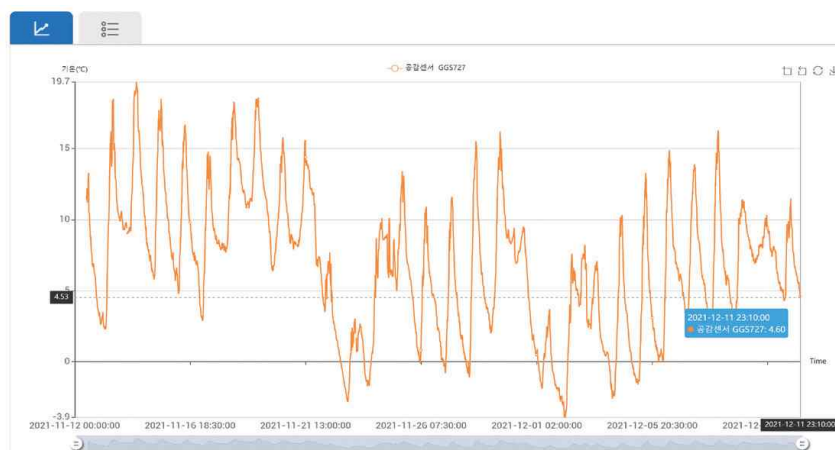
3-4 실증 결과

- 실증현장에서의 미세먼지 측정치와 플랫폼 연동으로 수집된 미세먼지 측정치가 일치함을 확인하고, 테스트베드웹에 등록된 실증 대상 측정기 모니터링을 통해 실시간 데이터 수집율(연동율) 100%임을 검증하였다.



〈그림 3-25〉 ETRI의 현장 적용 측정기(공감센서)의 실제 측정 데이터

- 실증현장에 설치된 테스트 측정기는 동일 현장에 설치된 1등급 측정기와 비교 분석이 가능하며, 일정 기간 수집된 데이터를 통해 측정결과 검증, 수집 데이터 통계 분석, 측정기 상태 모니터링 등 다양한 분석 및 시험이 가능하다.



〈그림 3-26〉 1개월간 현장 측정기 수집 데이터(기온) 그래프

1 | 운영·확산방안(안)

1-1 시흥시 내 확산방안

- 현재 실증 지역은 시흥시의 정왕동이며, 이를 시흥시 전체로 확대 시 미세먼지 측정기를 제외한 환경플랫폼의 증설이나 서비스의 추가 개발은 필요하지 않을 것으로 보인다. 운영 확대 대상 지역의 미세먼지 측정기 추가 설치 하는 방법은 다음과 같다.
 - 연구과제에서 개발한 측정기 추가 제작
 - 상용 미세먼지 측정기 구매(환경 플랫폼 연동 가능 제품: 현재 10종)
 - 확대 지역 내 기설치된 미세먼지 측정기 사용(환경플랫폼과 연동이 불가능한 경우 일부 개발 필요)

1-2 타 지자체 확산방안

- 타 지자체에 서비스 구축 시 서비스 도입 목적에 따라 아래와 같이 서비스 운영 대상과 규모를 탄력적으로 설계하여 단계적 적용이 가능하다.
 - 미세먼지 측정기: 지역 환경 특성에 맞는 수량 설계
 - 환경플랫폼: 다양한 종류의 인프라에 설치 방식으로 구축 가능
 - 서비스: 지자체/시민/기업용 서비스 중 선택적 구축 가능
- 환경플랫폼 및 서비스를 여러 지자체가 공유할 수 있도록 공통 플랫폼으로 G-Cloud 상에 구축하고 개별 지자체는 미세먼지 측정기만 지역 내 설치한 뒤 이를 공통 플랫폼으로 연동하여 공통 서비스를 이용하는 방식도 검토해 볼 수 있다

1 | 문제 해결 사례

- 시흥시 도심 내 미세먼지 현황 모니터링 및 도시문제 해결의 기반 데이터 수집을 위해 국가 관측망의 한계를 보완할 수 있는 고정형 미세먼지 측정기와 시민참여 리빙랩 운영을 위한 휴대형 미세먼지 측정기를 개발하여 클라우드소싱 기반 측정 환경 구현하였다.
 - 기존 국가관측망 대비 약 25배 소형화된 광산란 측정기와 동시에 거점형/보완형 측정기의 이원화로 시흥시 미세먼지 측정망 구축 비용을 절감하였다.
 - 측정지점은 6개 실증대상 지역 협의 후 주거단지에 500~1km 해상도 미만의 격자 지점과 산업단지 인근의 1~1.5km 해상도 미만의 격자 배치를 고려하여 시흥시 산업단지의 오염원이 주거단지에 미치는 영향을 모니터링할 수 있는 기본 인프라를 마련하였다.
- 미세먼지 측정기 관련 업체 및 연구기관이 개발 기술의 완성도를 검증하고 실증 대상 지역의 지자체와 시민들에게 테스트 제품을 직간접적으로 홍보할 수 있도록 미세먼지 테스트베드를 구축하였다.
 - 테스트베드 참여기관은 별도의 구축 비용 없이 측정기와 플랫폼을 연동하여 관측 정보를 모니터링 할 수 있으며, 시제품 측정기를 1등급 측정기와 비교 분석할 수 있도록 웹 서비스를 제공한다. 또한 AI 기반 이상 감지 모델을 통해 측정기 고장이나 외부 환경적 요인으로 인해 측정 데이터에 문제가 생겼을 때, 데이터 이상 여부를 판별하고, 이상 데이터에 대한 보정 데이터를 제공한다.
- 초미세먼지 오염원 유형 기여도 정량화를 통해 오염원 유형을 추적하였다.
 - 10종의 초미세먼지 오염원 유형에 대해 일별 기여도 정량화가 가능하였으므로, 이

- 를 통해 초미세먼지의 오염 현황에 대한 구체적인 수치를 제시할 수 있었다.
- 향후 초미세먼지 저감 정책 시행에 따른 효과를 정량적으로 예측할 수 있는 과학적인 분석 결과물을 제공할 수 있었다. 예를 들어, 차량 2부제와 같은 정책을 시행할 때, 저감 가능한 초미세먼지 질량농도는 본 연구에서 도출된 교통 부문의 기여도에서 최대 절반 이하로 예상할 수 있다.
- 초미세먼지의 세부 화학성분 정량 결과를 통해 건강 영향에 미치는 성분에 대한 정량화 정보를 제공하였으며, 주변 도시들과의 비교를 통해 시흥시의 초미세먼지 오염 현황에 대해 화학성분 중심으로 분석하였다. 이를 통해, 주변 공업 단지의 영향이나 우선적으로 저감이 필요한 초미세먼지 화학성분을 도출하였다.
- 초미세먼지 오염원 유형별 오염지도를 구현하여 우심지역을 도출하였다.
- 초미세먼지 오염원 유형별 오염지도를 우리나라에서 최초로 구현하여 제공하였으며, 이는 기존의 초미세먼지 질량농도 중심의 오염지도보다 세분된 정보를 제공할 수 있는 중요한 정보라 할 수 있다.
- 초미세먼지 오염원 유형별 오염지도를 통해, 특정 오염원 유형이 상습적으로 고농도로 형성되는 우심지역을 도출할 수 있었으며, 이는 효율적인 초미세먼지 관리를 위해 지역별로 관리 우선순위를 정할 수 있는 중요 자료가 된다.

2 | 기술적 한계

- IoT 센서기반 고정형, 휴대형 측정기는 연속적인 센서 검정 및 유지보수가 필요하다.
- 시흥시는 미세먼지 계절 관리제 기간 중 도로 재비산먼지 평균 농도가 전국에서 가장 높으며(20.12. 한국환경관리공단) 본 사업의 해당 지역은 산업단지를 포함하고 있어 센서의 정확도 유지를 위해 지속적인 관리가 필요하다.
- 휴대형 측정기의 경우 정확도 이슈로 센서의 소형화의 한계가 있으며, 반대로 지나치게 소형화할 경우 배터리 용량 부족으로 사용성이 떨어질 수 있다.
- 미세먼지 테스트베드에서 제공하는 비표준 어댑터 10종에 해당하지 않는 측정기의 경우 환경플랫폼에 연동하기 위해서 측정기 개발사의 개발자는 테스트베드 운영자가 제공하는 프로토콜 형식에 맞게 측정기 프로그램을 수정해야 한다.

- 초미세먼지 오염원 유형을 추적하기 위해서는 기초 자료 확보의 어려움이 있으며, 모델링의 전문성이 필요하다.
- 초미세먼지 오염원 유형 추적을 위한 기초 자료가 되는 초미세먼지 화학성분 자료는 장기간의 확보가 매우 어렵다. 현장에서의 초미세먼지 포집부터 시료의 보관, 최첨단 기기를 활용한 정량화 분석과정까지 거쳐야 모델링을 위한 기본 자료가 생성된다.
- 기본 자료가 생성된다고 하더라도, 모델링 과정에서 연구자의 판단에 따른 자료에 대한 신뢰성 결정과 데이터 전처리 과정은 전문적인 노하우가 없이는 수행하기 어려우며, 우리나라에서 초미세먼지 오염원 유형 추적이 전문적으로 가능한 팀도 많지 않다.
- 초미세먼지 상세 지도화 및 도심지역 도출을 위한 모델 결과 검증 다변화의 어려움이 있다.
- 결과에 대해 연구진 자체의 분석 방법으로 판단하고 정확도 높은 결과를 제시하였으나, 우리나라에서 최초로 시도되는 연구이므로 결과의 검증 결과를 다변화하기 어려웠다. 특히, 기초 자료부터 모델링 수행까지 전 과정에 대해 세계적으로도 비교대상을 찾기 어려워 모델 결과를 다른 방법으로 추가 검증이 사실상 불가능하였다. 추후 후속 연구로 검증 방법이 다양해질 수 있을 것이다.

3 | 거버넌스 관련

- 지자체 미세먼지 관제 서비스는 지자체별 환경에 따라 요구사항이 다를 수 있으므로 실증을 통해 구현한 결과를 기반으로 실제 사용할 기능을 선별하여 운영을 최적화하고 필요시 추가 요구사항에 대한 개발을 고려해야 한다.
- 고정형 측정기, 미세먼지 테스트베드 LAB 등 시흥시 내에 설치된 여러 사업 결과물의 지속적인 활용을 위해 향후 유지보수 및 관리 주체의 지정이 필요하다.
- 미세먼지 테스트베드는 실증 과정에서 일부 연구기관과 미세먼지 측정기 개발사가 이용 중이나 보다 다양한 이용자 확보를 위해 전시회 등을 통한 홍보가 필요하다.
- 시민들이 휴대형 미세먼지 측정기로 생활환경 주변의 미세먼지를 측정하는 리빙랩을 시범적으로 수행하였다. 무료 봉사 형태의 자발적인 참여로 시범 활동을 하였으나, 리빙랩의 상시적 운영을 위해서는 지자체에서 다양한 형태의 보상방안 검토가 필요하다.

참고문헌

- Lee, Y.S., Kim, Y.K., Choi, E., Jo, H., Hyun, H., Yi, S.-M., Kim, J.Y., 2022. Health risk assessment and source apportionment of PM_{2.5}-bound toxic elements in the industrial city of Siheung, Korea. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20462-0>
- Park, E.S., Hopke, P.K., Kim, I., Tan, S., Spiegelman, C.H., 2018. Bayesian Spatial Multivariate Receptor Modeling for Multisite Multipollutant Data. *Technometrics* 60, 306-318. <https://doi.org/10.1080/00401706.2017.1366948>
- Kim, S., Kim, T.Y., Yi, S.M., Heo, J., 2018. Source apportionment of PM_{2.5} using positive matrix factorization (PMF) at a rural site in Korea. *J. Environ. Manage.* 214, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.027>
- US-EPA, 2014. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. Environ. Prot. Agency Off. Researc Dev. Publusing House Whashington, DC 20460 136
- IEA, 2019. World Energy Balances, www.iea.org/data-and-statistics, All rights reserved, as modified by Joint Research Centre, European Commission.
- Jalkanen, J. P., Johansson, L., Kukkonen, J., Brink, A., Kalli, J., & Stipa, T. 2012. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), 2641-2659. doi:10.5194/acp-12-2641-2012
- Johansson, L., Jalkanen, J.-P., & Kukkonen, J. 2017. Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution. *Atmospheric Environment*, 167, 403-415. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.08.042
- 미세먼지/초미세먼지 자료, 대기환경정보, 한국환경공단(URL: <https://www.airkorea.or.kr/web/>)

스마트시티
혁신성장동력
프로젝트



SMART CITY