

미세먼지 라이다 스캐닝 서비스

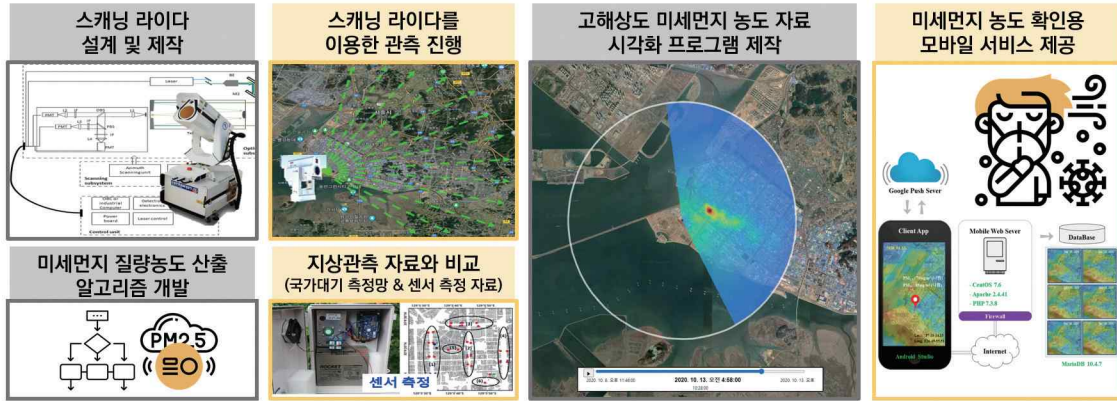
Technical Report [3부-2권 별책1]

스마트시티
혁신성장동력 프로젝트

[3-5세부과제]
주관연구기관-차세대융합기술연구원

과제명	미세먼지 라이다 스캐닝 서비스	연구기간	'19.11 ~ '21.12 (2년 2개월)
		예산	총 13억원 (정출금 : 5억원)

▶ 개념도 (서비스 시나리오)



▶ 과제 개요

- (배경) 미세먼지 지점관측 농도 자료의 공간적 한계 보완을 위한 고해상도 미세먼지 실시간 모니터링 시스템 필요
- (목적) 고해상도 관측이 가능한 스캐닝 라이다 시스템을 이용하여 광범위한 영역의 미세먼지 농도와 배출원 그리고 확산경로를 30분 주기로 신속하게 파악할 수 있는 시스템을 구축

▶ 주요 연구내용

- 30분 주기로 반경 5km를 30m 거리분해능 수준으로 측정가능한 미세먼지 관측용 3차원 스캐닝 라이다 시스템 설계 및 제작
- 라이다 측정 신호를 이용하여 미세먼지를 황사, 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)로 구분하고 각각의 질량농도를 산출하며 알고리즘을 개발 및 검증
- 라이다로 측정된 미세먼지 질량농도를 실시간으로 시각화하여 시흥시에 특화된 스마트 대기환경 서비스 제공 지원 블록체인 시스템 설계 및 구현

▶ 기술적 차별성

- 30분 주기로 반경 5km를 30m 거리분해능 수준으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 위치기반(초)미세먼지 농도 데이터를 24시간 실시간으로 시각화하여 제공 가능
- 라이다 관측데이터를 이용하여 황사와 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)를 질량농도로 분석하는 기술을 세계 최초로 개발

▶ 기대효과

- 1대의 스캐닝 라이다 시스템으로 시화 산단 전역을 모니터링할 수 있는 광역 감시 성능을 보유. 따라서 여러대의 미세먼지 관측 장비가 필요한 기존 방식에 비해 소요 예산을 대폭 절감. 동일 면적 관측에 필요한 설치 장소가 비약적으로 줄어 유지·보수 비용 또한 최소화 가능
- 대기오염 발생원을 정밀하게 추적하고 미세먼지 발생원을 예측할 수 있는 기술로 발전할 수 있어 지점 관측망의 한계 보완 가능
- 고농도 피크가 자주 발생하는 미세먼지 우심 지역을 선정하여 우선적이고 신속한 대응을 할 수 있어 이에 따라 지자체 예산 절감 및 효율적인 정책 마련에 도움

▶ 참여기관

[주관]



지체대응기술연구원

[공동]



포항대학교



한양대학교



Samwoo

실증경과 및 결과

① 스캐닝 라이다 제작

- 라이다 제작 경험이 풍부한 한밭대학교, 삼우티시에스(주)와 함께 컨소시엄을 구성하여 최적화된 설계도를 바탕으로 라이다를 제작하였다. 스캐닝 라이다 운영 시 발생하는 문제사항이나 개선되어야 할 부분이 발생하는 경우 즉시 수정하여 반영하고자 하였다. 이를 통해 고해상도 미세먼지 농도 관측이 가능한 스캐닝 라이다 1대를 제작하였으며 스캐닝 라이다 미세먼지관리시스템 시연회를 개최하였다.

② 미세먼지 질량농도 산출 알고리즘 개발

- 라이다 측정 신호를 이용하여 미세먼지를 황사, 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)로 구분하고 각각의 질량농도 산출 알고리즘 개발하였다. 인접한 국가대기오염측정망의 미세먼지 농도와 라이다를 통해 산출된 미세먼지 농도를 비교하였을 때 미세먼지(PM10)가 91%, 초미세먼지(PM2.5)가 95%로 높은 상관관계를 보였다.

③ 시각화 서비스 제공

- 관측된 라이다 데이터를 실시간으로 시각화 서비스를 제공하여 위치 정보가 제공되는 스마트기기에서 현재 위치에서의 미세먼지 농도 정보를 30m 고해상도로 제공하였다. 팀인터페이스와의 협업을 통해 서비스에 대한 시민들의 만족도 설문조사를 진행하였다.

실증 대상지

시흥시 한국산업기술대학교 제2캠퍼스

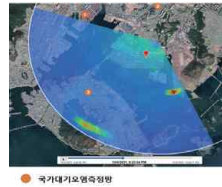
- 시흥시는 시화 공단이 위치해 있고 인천항만과 중국이 가까이 국내외 영향에 의한 미세먼지 농도가 높다. 한국산업기술대학교 제2캠퍼스 옥상에 스캐닝 라이다를 설치하여 시흥시 정왕동과 시화반월산업단지 주변의 미세먼지를 실시간으로 모니터링하고, 이를 기반으로 미세먼지 배출원을 추적하였다.



단위서비스 및 요소기술

광범위 고해상도 미세먼지 농도 표출

- 원격감지를 통한 지역 단위의 미세먼지 고해상도 농도 정보 제공



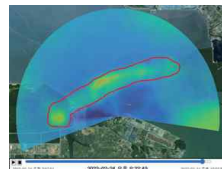
실시간 미세먼지 농도 정보제공 서비스

- 위치 탐색 서비스를 이용하여 시민 편의에서 수요자 주변의 미세먼지를 즉각 확인할 수 있는 시각화 시스템



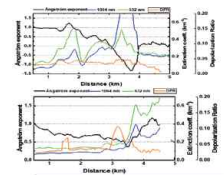
미세먼지 배출 및 확산 모니터링

- 미세먼지 연속 스캐닝으로 오염물질의 확산 범위 확인



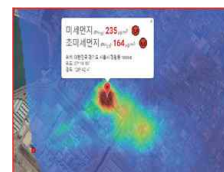
미세/초미세먼지 농도 구분 산출

- 관측된 라이다 신호를 황사, 미세먼지(PM10) 그리고 초미세먼지(PM2.5) 질량농도로 구분하여 산출하는 알고리즘 개발



지자체 미세먼지 우심지역 관리

- 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 우심 지역을 선정하여 효율적인 미세먼지 대책 수립이 가능하도록 지원



자동화·원격관리 시스템 구축

- 관측, 얼라인먼트 자동화와 웹 기반 원격관리 시스템 구현으로 유지/관리 편의성 마련으로 상용화 발판 마련



연구책임자
부경대학교
노영민 교수
nym@pknu.ac.kr



집필자
부경대학교
주소희 박사과정
thgm11gh@pukyong.ac.kr

• 목차 •

제1장

개요

- 1. 배경 및 필요성 342
- 2. 서비스 특징 342
- 3. 기대효과 344
- 4. KPI 설정 345

제2장

연구 개발 성과

- 1. 도메인 통합 시나리오 346
- 2. 아키텍처 및 시스템 구성도 347
- 3. 단위서비스(기능)별 시나리오 351
- 4. 요소기술 353

제3장

실증 경과

- 1. 실증 체계 354
- 2. 실증 대상 355
- 3. 실증 경과 356
- 4. 실증 결과 358

제4장

확산 방안

- 1. 운영방안 360
- 2. 향후 연계 가능한 시나리오 361

제5장

Lesson Learned

- 1. 문제해결 사례 363
- 2. 기술적 한계 363

· 용어 정리 ·

용어	정의
거리분해능	동일 방향에 있는 2개의 목표물이 접근되어 있어도 구별하여 확인할 수 있는 최소 거리차이
공간적 해상도	영상/이미지를 공간 영역 상에서 얼마나 자세하게 표현할 수 있는가의 척도
대기오염측정망	전국적인 대기오염실태, 변화추이 및 대기환경기준 달성 여부 등을 파악하기 위하여 환경부에서 대기오염물질 측정 장비를 이용하여 설치 및 운영하는 시스템
라이다비	라이다 상수라고도 하며 에어로졸 소산계수와 후방산란계수의 비를 의미
리빙랩	생활 공간 속의 실험실이라는 뜻으로 시민들의 참여로 사회문제를 해결하는 개방형 실험실
미세먼지	에어로졸 중에서 입자의 크기가 10 μ m보다 작은 먼지를 미세먼지(PM10)라고 하고, 2.5 μ m의 작은 먼지는 초미세먼지(PM2.5)로 구분
미세먼지 계절 관리제	초미세먼지 농도가 높아지는 12월부터 이듬해 3월까지 강화된 미세먼지 배출 저감 및 관리 조치를 시행하는 제도
소산계수	대기 중에 부유하는 입자(에어로졸이나 구름방울 등)에 의한 빛의 산란과 흡수에 의해 빛이 감쇠되는 정도
질량소산효율	단위 질량당 에어로졸에 의한 소산 효율
파장역지수	에어로졸 광학두께의 파장 의존도를 나타내는 값으로, 낮을수록 에어로졸 입자의 크기가 큼을 의미(Ångström exponent)
편광소멸도	라만 분광법에서 라만 산란광의 수직 성분과 평행성분 사이의 강도 비율로 정의
후방산란계수	에어로졸과 공기 분자에 의한 탄성산란신호와 공기 분자에 의한 라만산란신호, 그리고 기준거리에 따라 산출되는 값

Contents

• 표목차 •

〈표 1-1〉 평가방안.....	345
〈표 2-1〉 스캐닝 라이다 장비 사양서.....	348

· 그림 목차 ·

〈그림1-1〉 본 연구에서 개발된 스캐닝 라이다 시스템 장비	343
〈그림1-2〉 실시간 관측데이터 시각화 (지도 출처: Googlemap)	344
〈그림2-1〉 시흥시 특화 스캐닝 라이다 모니터링 시스템 구현 시나리오 (지도 출처 :Googlemap)	346
〈그림2-2〉 미세먼지 관측 라이다 시스템 구성도.....	347
〈그림2-3〉 라이다를 이용한 야간 수직 관측.....	349
〈그림2-4〉 라이다로 관측된 고도별 미세먼지 분포에서 황사와 오염입자(PM _{2.5} 와 PM _{2.5-10})으로 구분 예시	350
〈그림2-5〉 고농도 미세먼지 발생 우심지역 확인 (지도 출처 : Googlemap)	351
〈그림2-6〉 고농도 미세먼지 발생 및 확산 범위 (지도 출처 : Googlemap)	353
〈그림3-1〉 한국산업기술대학교 제2캠퍼스에 설치된 자체 개발한 스캐닝 라이다 시스템	356
〈그림3-2〉 스캐닝 라이다 미세먼지관리시스템 시연회 개최.....	357
〈그림3-3〉 (a) 스캐닝 라이다로 계산된 미세먼지(PM ₁₀) 농도와 초미세먼지(PM _{2.5})를 국가 대기오염 측정망 자료와 비교 검증한 결과, (b) 스캐닝 라이다 관측 반경 내 대기오염 측정망 위치 확인(①과 ②) (지도 출처 : Googlemap)	358
〈그림3-4〉 스캐닝 라이다와 드론 관측의 미세먼지 농도 공간 분포 비교 검증	359
〈그림4-1〉 스캐닝 라이다 원격화 및 자동화 시스템 구축	360
〈그림4-2〉 스캐닝 라이다를 이용한 불법 소각 모니터링 (지도 출처 : Googlemap)	361
〈그림4-3〉 항만 지역 선박 배출 확인 사례 (지도 출처 : Googlemap).....	362

1 | 배경 및 필요성

- 미세먼지는 세계보건기구에서 지정한 1급 발암물질이며, 국내에서는 미세먼지를 자연재난이 아닌 ‘사회 재난’으로 규정하였다. 미세먼지의 영향이 심각해짐에 따라 미세먼지 정보에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지고 있으며, 산업/도시 규모가 아닌 동네 규모 이하에서 미세먼지 선택적 저감 방안의 필요성이 제기되고 있다.
- 환경부 미세먼지 관측망, 기상청 미세먼지 예보는 공간적 해상도가 낮아 현재의 관측 기반으로는 동네 규모 이하의 미세먼지 정보제공에 한계가 있다. 하지만 대기 중 미세먼지는 관측 장비의 위치에 따라 다른 농도를 보이는 경향이 있어 시공간적 고해상도 분석이 필수적이다. 또한, 바람의 속도에 따라 빠르게 이동하는 미세먼지 특성상, 현재의 1시간 단위 관측 자료 등을 이용한 미세먼지 거동 분석 및 재난 대응이 어려운 상황으로 30분 이내의 관측 자료가 필요하다.
- 본 연구에서는 30분 주기로 반경 5km를 30m 거리분해능 수준으로 관측할 수 있는 미세먼지 스캐닝 라이다를 이용하여 광범위한 지역의 미세먼지 농도와 배출원을 신속하게 파악하여 이에 대한 효율적인 저감 방안을 마련할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였다.

2 | 서비스 특징

2-1 기존 미세먼지 관측망의 한계점

- 현재 공인된 미세먼지 측정 자료는 β -ray 방식의 측정기를 사용하는 ‘국가대기오염 측정망(에어코리아 <https://www.airkorea.or.kr/>)에서 산출되고 있다. 하지만 국가대기오염 측정망의 현재 해상도는 전국 기준 8km로 도시지역에 분포가 집중되어 있고, 발생지

점 파악, 지점 간 이동 및 확산 등 미세먼지에 대한 정밀한 분석 자료로 사용하기에는 한계가 존재한다.

- 고가의 미세먼지 측정기를 대체할 방안으로 저비용의 센서를 이용한 간이측정기가 제시되었으나 학교나 건설 현장에 설치된 미세먼지 간이측정기 정확도 검증 결과 48%에서 86%까지 다양하여 정확도 및 정밀도 검증이 필요하다. 또한, 근거리에서의 상세 미세먼지 정보제공을 통하여 실제 시민의 삶의 질 향상을 위한 스마트시티 구축을 위해서는 보다 조밀한 관측이 필요하다. 따라서 저비용의 센서 기반 측정기도 지역적, 경제적 한계가 있다.

2-2 미세먼지 스캐닝 라이다의 차별적 특징

- 광역적 공간분포상에서 100m 이하의 고해상도로 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 농도 산출이 실시간 및 연속적으로 가능한 신뢰도 높은 미세먼지 측정기술이 필요하다. 따라서 도시 내 미세먼지 측정 가용자원 부족을 해결할 수 있고 동시에 미세먼지 공간분포를 연속 측정할 수 있는 스마트 원격탐사 기술인 라이다(LIDAR: Light Detection And Range) 기반 미세먼지 농도 측정이 필요하다.
- 미세먼지 라이다 스캐닝 서비스에서는 레이저를 광원으로 하여 선택적 파장의 빛을 수평으로 대기 중에 조사하고 공기 분자와 미세먼지 입자들에 의해 후방산란된 빛을 망원경으로 수집하여 미세먼지 농도를 분석하는 기술을 개발하였다. 라이다 관측데이터를 이용하여 황사와 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)를 질량농도로 분석하는 기술을 세계 최초로 개발한 바 있다.



〈그림 1-1〉 본 연구에서 개발된 스캐닝 라이다 시스템 장비

- 30분 주기로 반경 5km를 30m 거리분해능 수준으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 위치기반 (초)미세먼지 농도 데이터를 24시간 실시간으로 시각화해 제공할 수 있다. 기존 대기오염 측정기술이 가지는 긴 관측 주기 및 측정기기 간 거리로 인한 고해상도 미세먼지 농도 자료 산출 한계를 보완할 수 있다.



〈그림 1-2〉 실시간 관측데이터 시각화 (지도 출처: Googlemap)

- 2대에서 3대만으로 시화 산단 전역을 모니터링할 수 있는 광역 감시 성능을 보유하고 있어 여러 대의 미세먼지 관측 장비가 필요한 기존 방식에 비해 소요 예산을 절감할 수 있으며 동일 면적 관측에 필요한 설치 장소가 비약적으로 줄어들어 유지·보수 비용을 최소화할 수 있다.

3 | 기대효과

- 공인 측정망의 관측 주기가 1시간인 것에 비해 30분 주기로 반경 5km를 30m 고해상도로 관측할 수 있어 대기오염 발생원을 정밀하게 추적하고 미세먼지 발생원을 예측할 수 있는 기술로 발전할 수 있다. 또 지점 관측망이 가지는 한계를 보완할 수 있다.

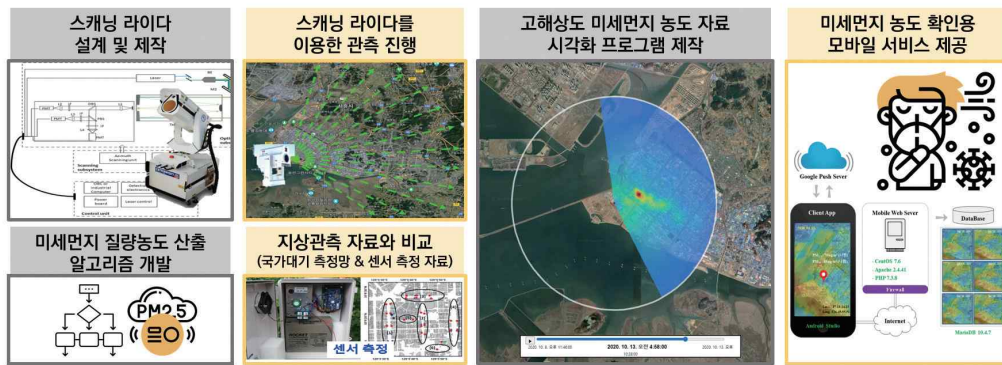
- 개인이 시각화 프로그램을 통하여 미세먼지 발생 및 확산경로를 파악할 수 있고 시민들에게 동네 단위 이하의 실시간 미세먼지 정보를 제공할 수 있어 미세먼지에 대한 시민들의 개별적 대응이 가능하도록 한다. 또 이로써 시민들이 미세먼지에 대한 불안감을 해소할 수 있다.
- 고농도 피크가 자주 발생하는 미세먼지 우심 지역을 선정하여 우선적이고 신속한 대응을 할 수 있으며 이에 따라 지자체 예산 절감 및 효율적인 정책 마련에 도움을 줄 수 있다.
- 고농도 미세먼지가 발생한 경우 정확한 대기오염 배출원, 발원지, 확산에 관한 데이터를 확보할 수 있어 이와 관련된 대기질 연구에 활용이 가능하다.

4 | 서비스 목표 평가방안

〈표 1-1〉 평가방안

지표	내용	평가
스캐닝 라이다 시스템 구축 및 실증	미세먼지 모니터링을 위한 스캐닝 라이다 시스템 구축	미세먼지 스캐닝 라이다 1개 설계 및 제작 후 실증
미세먼지 농도 정보 제공 해상도 개선	기존 국가대기오염측정망 대비 미세먼지 농도 정보 수평 거리 해상도 개선	국가대기오염측정망의 미세먼지 농도와 라이다를 통해 산출된 미세먼지 농도 비교 후 상관관계 확인
위치기반 미세먼지 농도 정보제공	위치 정보가 제공되는 스마트기기(스마트폰, 태블릿PC 등)에서 현재 내 위치의 미세먼지 농도 정보를 30m 해상도로 제공	팀인터페이스와의 협업을 통한 시민만족도 설문조사 진행

1 | 도메인 통합 시나리오



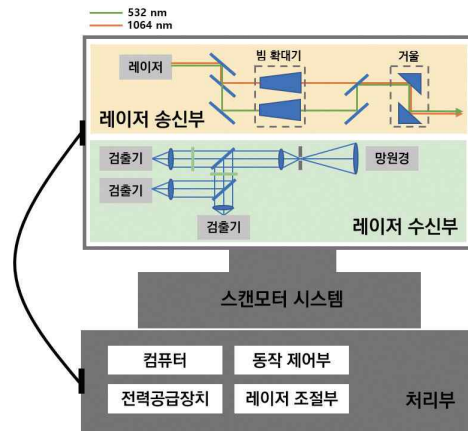
〈그림 2-1〉 시흥시 특화 스캐닝 라이다 모니터링 시스템 구현 시나리오
(지도 출처 : Googlemap)

- 두 파장(532, 1064nm)과 편광소멸도 관측 채널(532P, 532S)을 구비하여 수평·수직 관측이 가능하고, 수평 30m(조사방향) 고해상도 스캐닝 라이다 시스템을 설계 및 제작하여 미세먼지 종류를 황사, 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)로 구분하여 각각 질량농도를 산출할 수 있는 분석법을 개발한다(Noh et al., 2020).
- 이를 통해 산출된 고해상도 미세먼지 데이터를 효율적으로 관리할 수 있는 다차원 시공간 데이터에 특화된 데이터베이스를 구축하고 지점관측 농도 및 센서 측정 자료와의 상호 보완을 통해 최종 산출된 고해상도 미세먼지 농도를 실시간으로 확인할 수 있는 시스템을 개발한다. 그리고 미세먼지 확산경로와 고농도 미세먼지가 발생하는 우심지역을 확인할 수 있는 분석 지원 시스템을 구축한다.
- 미세먼지 농도 제공 서비스 앱 및 웹 개발을 통해 스마트 대기환경 서비스를 구현할 수 있으며 시민들은 본인이 위치한 지점의 정확한 미세먼지 농도를 실시간으로 확인할 수 있다.

2 | 아키텍처 및 시스템 구성도

2-1 미세먼지 관측 라이다 시스템 구성도

- 스캐닝 라이다는 크게 레이저 송신부, 레이저 수신부, 검출기 그리고 처리부로 구성되어 있다. 각각의 역할은 다음과 같다.
 - 레이저 송신부 : 레이저를 중심으로 레이저를 대기 중으로 발사한다.
 - 레이저 수신부 : 망원경이 주 구성이며 대기 중에서 산란되어 오는 신호를 수집한다.
 - 검출기 : 수신된 신호의 세기를 전기적 신호로 변환 및 측정한다.
 - 처리부 : 최종 신호를 분석 및 처리한다.
- 수평 측정거리 5km, 거리분해능 30m인 장비로 30분마다 360° 관측 가능하다.
- 532와 1064nm의 두 개 파장을 이용하며 532nm의 경우 532P와 532S 편광소멸도 관측 채널을 구축하고 있어 총 3개 채널을 구비하고 있다.



〈그림 2-2〉 미세먼지 관측 라이다 시스템 구성도

〈표 2-1〉 스캐닝 라이다 장비 사양서

레이저 송신부	
레이저 종류	Nd:YAG 레이저
레이저 파장	532nm, 1064nm
빔 확대기	× 10배
레이저 수신부	
망원경 크기	8inch
망원경 시각	0.25~3mrad
신호 획득부	
신호 수신 채널	3채널 (편광소멸도 측정용 532nm P와 S 채널, 1064nm 채널)
측정 거리	5km 이상
거리분해능	30m 이내
스캔 각도 분해능	2° 이내
자료 산출 소프트웨어(S/W)	
	거리보정된 후방산란(backscatter) 프로파일
산출 파라미터	거리별 미세먼지 종류 구분 프로파일
	거리별 질량농도 산출 프로파일

2-2 라이다 시스템 분석 방법

○ 기본 원리

- 라이다는 레이저를 광원으로 거리에 대한 정보를 산출하는 원격탐사 장비를 지칭한다.
- 광원인 레이저가 대기 중으로 조사되고, 조사된 레이저 광이 대기 중에 분포하는 공기 분자와 입자들에 의해 산란할 때, 후방으로 산란한 광을 망원경으로 수집하여 신호를 측정하는 원리이다.

- 레이저 광이 조사된 시간과 망원경으로 수집된 시간을 측정하여 거리에 대한 정보를 산출한다.
- 대기 관측에는 주로 수직으로 레이저 광을 조사하여 미세먼지의 고도별 분포에 대한 정보를 산출하고 있으나 스캐닝 방식을 적용할 경우 수평 수직 관측이 모두 가능하다.

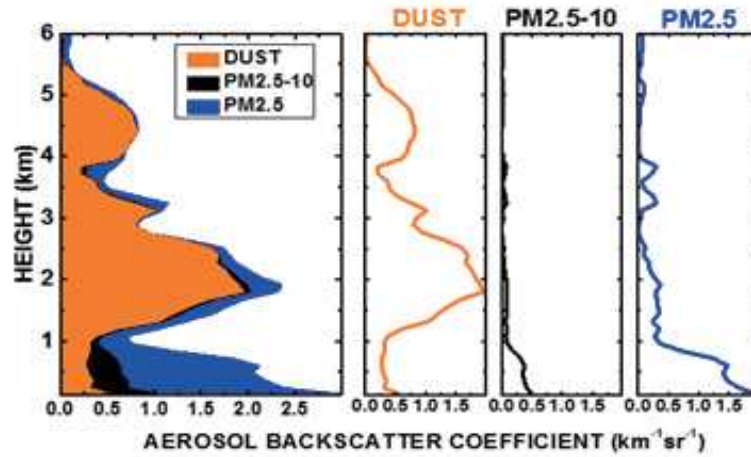


〈그림 2-3〉 라이다를 이용한 야간 수직 관측

2-3 미세먼지 질량농도 산출 알고리즘

- 황사와 황사 외 오염입자의 후방산란계수로 구분
 - 황사 입자는 다른 대기 입자에 비하여 입자의 크기가 크고, 비 구형의 형태를 가지고 있으며 자외선 영역대에서는 빛을 흡수하나 가시광선과 적외선 영역대에서는 빛을 산란하기만 하는 특성을 가져 다른 대기 입자와 확연히 다른 물리적, 광학적 특성을 보여준다.
 - 라이다 비와 질량 농도 산출 시 적용되는 질량소산효율(Mass extinction efficiency)도 명확히 구별되는 값을 보인다.
 - 따라서 라이다 관측으로 산출된 소산계수로부터 질량 농도를 산출하기 위해서는 황사와 황사 외 오염입자를 분리하는 것이 우선적이다.
 - 라이다의 핵심 관측 요소 중 하나인 편광소멸도(Depolarization ratio)를 이용하여 황사와 황사 외 오염입자를 구분할 수 있으며, 이 방법은 학술적으로 검증을 마쳤다.

- 필수 관측 요소는 편광소멸도 532P와 532S, 두 파장의 후방산란계수(최적 파장: 532와 1064nm)이다.



〈그림 2-4〉 라이다로 관측된 고도별 미세먼지 분포에서 황사와 오염입자 (PM2.5와 PM2.5-10)로 구분 예시

- 오염 입자를 미세먼지(PM2.5-10)와 초미세먼지(PM2.5)로 구분
- 황사는 입자 크기가 대부분 조대입자 영역에 속하여 라이다에서 측정되는 532nm와 1064nm의 파장에서 산란값에 차이가 나지 않는다.
- 황사의 후방산란계수는 입자 크기가 큰 관계로 532nm와 1064nm에서의 값이 동일하다는 특성을 이용하여 편광소멸도로 산출된 532nm에서 황사의 후방산란계수 값을 1064nm에 동일하게 적용한다. 그러면 1064nm에서도 황사와 황사 외 오염입자의 후방산란계수를 산출할 수 있다.
- 532와 1064nm에서 오염입자의 후방산란계수를 이용하여 입자의 크기 정보와 상관관계가 높은 파장역지수(Ångström exponent) 값을 산출한다(Müller et al., 2005).
- 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 파장역지수 값의 기존 연구 자료와 mie theory를 이용한 계산자료로부터 미세먼지만 있을 경우에는 0, 0.1 μ m 이하의 초미세먼지만이 존재할 경우 4의 파장역지수를 적용한다.
- 황사를 제외한 오염입자만의 532와 1064nm의 파장역지수 값을 산출하고, 이 값과 설정된 각각의 파장역지수 값으로부터 오염입자의 후방산란계수에서 미세먼지와 초미세먼지로 구분할 수 있다.

3 | 단위서비스(기능)별 시나리오

3-1 광범위한 고해상도 미세먼지 농도 표출

- 3차원 스캐닝 라이다 시스템을 이용하여 원격감지를 통한 지역 단위의 미세먼지 고해상도 농도 정보제공이 가능하다.
- 스캐닝 라이다를 통해 관측을 진행할 경우, 1대의 스캐닝 라이다로 반경 5km의 광범위한 지역을 거리분해능 30m의 고해상도로 미세먼지 관측이 가능하다.
- 장비 원격 지원 등 실시간 및 연속 관측 시스템 토대 마련
- 고해상도 미세먼지 농도 정보를 상시 제공하기 위한 장비 원격 및 자동화 시스템을 도입하여 상용화의 토대를 마련한다.
- 관측 부스 내 온습도 원격 관리 시스템을 도입하여 최적의 라이다 시스템 환경을 조성하고 관측환경에 따른 장비 문제 발생에 대한 사전 예방 조치가 가능하다.
- 비전문가의 스캐닝 라이다 시스템 활용성을 높이기 위해 자동 alignment 및 관측 시스템을 도입하여 24시간 라이다를 통한 고해상도 미세먼지 농도 제공 서비스를 구축할 수 있다.

3-2 지자체 미세먼지 우심지역 관리



〈그림 2-5〉 고농도 미세먼지 발생 우심지역 확인(지도 출처 : Googlemap)

- 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 우심 지역(Hotspot)을 선정하여 이에 대한 효율적인 대책 수립이 가능하다.
- 다른 지점에 비해 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 지역을 우심 지역으로 선정하여 우심 지역 살수차 동원과 같은 지자체의 우선적이고 효율적인 관리가 가능하다.
- 고농도 미세먼지 알림 서비스를 통해 미세먼지에 대한 시민들의 개별적인 대응이 가능하다.
- 시민들이 위치한 지점에 고농도 미세먼지가 발생하면 이에 대한 알림 서비스를 시민들에게 제공하여 외출 자제 및 마스크 착용과 같은 고농도 미세먼지에 대한 시민들의 개별적 대응을 가능하게 할 수 있다.
- 장기 관측을 통해 방대한 양의 미세먼지 데이터를 확보하여 우심 지역에 대한 미세먼지 예보 시스템 구축이 가능하다.
- 스캐닝 라이다를 이용하여 장기적으로 미세먼지 농도 관측을 진행할 경우 미세먼지에 대한 방대한 양의 데이터를 확보할 수 있어 적절한 미세먼지 저감 대책 마련이 가능하다.
- 또한, 이러한 데이터를 지역의 인구밀도, 교통량 그리고 기상자료와 같은 다른 자료와 결합하게 되면 우심 지역에 대한 미세먼지 예보 시스템을 구축할 수 있다.

3-3 산업단지 배출원 상시 모니터링

- 산업단지에서 스캐닝 라이다를 활용할 경우 원격·자동화 시스템 구축을 통해 산업단지 오염물질 배출원을 24시간 상시 감시할 수 있다.
- 스캐닝 라이다를 이용하여 산업단지를 모니터링하는 시스템을 구축하여 24시간 상시 고농도 미세먼지 배출원을 감시할 수 있다. 이러한 시스템을 통해 평소 단속하기 힘들었던 소규모 사업장의 불법행위를 적은 인력으로 단속할 수 있다.
- 상시 감시되고 있다는 것을 사업장들이 인식하게 되면 이에 대한 경각심을 느껴 배출 물질을 줄이고자 하는 노력을 스스로 하도록 만들 수 있다.

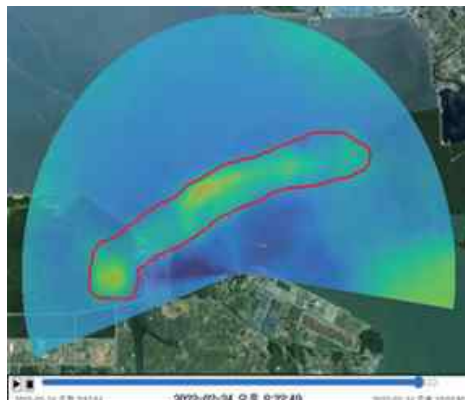
4 | 요소기술

4-1 고해상도 미세먼지 농도 정보제공을 통한 시민 편의 향상

- 위치 탐색 서비스를 이용해 시민 편의에서 수요자 주변의 미세먼지를 실시간으로 확인할 수 있는 시각화 시스템을 제공할 수 있다.
- 국가에서 운영되고 있는 기존의 지점 관측망은 실제로 시민이 위치한 지점과의 거리가 있어 수요자가 정확한 미세먼지 농도 정보를 얻는 데 한계가 있었다.
- 반면, 라이다로 관측된 신호가 시각화 프로그램을 통해 표출되면 시민은 자신이 위치한 지점을 시각화 프로그램에서 선택하고 원하는 곳의 미세먼지 농도 정보를 실시간으로 제공받을 수 있다.

4-2 미세먼지 배출 및 확산 모니터링

- 미세먼지 연속 스캐닝으로 오염물질의 배출원과 확산경로 및 범위를 확인할 수 있다.
- 광범위한 지역을 30분 주기로 연속 관측을 진행하기 때문에 고농도 미세먼지가 발생하면 신속하게 오염물질 배출원을 추정할 수 있으며 오염물질의 확산경로 및 범위 또한 확인할 수 있다.
- 풍향 및 풍속과 같은 기상 데이터를 함께 확인하여 오염물질이 주거지역으로 확산되는 현상을 파악할 수 있다.



〈그림 2-6〉 고농도 미세먼지 발생 및 확산 범위 (지도 출처 : Googlemap)

1 | 실증체계

1-1 목표

- 미세먼지의 수평·수직 측정이 가능하고, 반경 5km의 영역에서 수평 30m(조사방향)의 고해상도 스캐닝이 가능한 라이다 모니터링 시스템을 구축한다.
- 입자 크기와 종류별(황사, 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)) 미세먼지 질량농도 산출 방법을 개발한다.
- 관측 결과의 시각화를 통하여 시흥시 스마트시티 실증지역(정왕동)과 스마트 산단(시화반월산업단지)에서 동네 단위 이하의 미세먼지 농도 정보 제공이 가능한 미세먼지 모니터링 시스템 구축과 실증 및 웹을 통한 미세먼지 농도 특화 서비스를 제공한다.

1-2 추진전략 및 방법

- 컨소시엄 구성
 - 부경대학교, 삼우티시에스(주), 한밭대학교로 컨소시엄을 구성하였다.
 - 가장 핵심적인 부분은 532와 1064nm, 532nm의 편광소멸도가 동시에 관측 가능한 '스캐닝 라이다 시스템'의 구축인 점을 감안해 국내에서 라이다 관련 최고 전문가로서 다양한 라이다 시스템 제작 경험이 있는 한밭대학교, 그리고 라이다 시스템 제작 경험이 풍부한 삼우티시에스(주)와 컨소시엄을 구성하였다.
 - 미세먼지 종류 구분 및 질량 농도 산출의 경우 부경대학교 연구책임자가 지속적으로 연구해온 분야이기 때문에 부경대학교에서 알고리즘 개발을 진행하고자 하였다.
 - 라이다 제작은 삼우티시에스(주)에서 담당하였으며 부경대학교와 한밭대학교와의 지속적인 논의를 통해 최적화된 설계도를 바탕으로 라이다를 제작하고자 하였다.

- 스캐닝 라이다 제작
 - 한밭대학교의 라이다 시스템 제작 경험을 바탕으로 스캐닝 라이다 시스템 구성 및 설계를 진행하였다.
 - 라이다 시스템의 핵심 부분인 '레이저 구매'를 주관기관인 부경대학교에서 실시할 경우 구매에만 많은 시간이 소요되는 점을 감안하여 라이다 시스템 제작 경험이 있는 삼우티시에스(주)에 설계된 라이다 시스템의 제작을 요청하였다.
 - 스캐닝 라이다 실사용 시 발생하는 문제 사항이나 개선되어야 할 부분이 발생하는 경우 즉시 수정하여 반영했다. 관측 시 기상 상황에 의해 발생하는 레이저 불안정이나 수평 관측에서 나타나는 분석 알고리즘의 정밀도와 재현성을 보완하기 위하여 관측 부스를 제작하거나 노이즈 제거 등 신호 알고리즘을 개선하기 위한 작업을 실시했다.

2 | 실증대상

2-1 시흥시 정왕동 및 시화반월산업단지

- 제작된 스캐닝 라이다를 이용하여 시흥시 스마트시티 실증지역(정왕동)과 스마트 산단(시화반월산업단지)에서 2020년 9월, 10월, 12월 동네 단위 이하의 미세먼지 모니터링을 실시하였다.
 - 시흥시 지리적 특성상 중국으로부터 장거리 수송뿐만 아니라 북쪽의 인천항만에서 발생해 유입되는 미세먼지, 충남 화력 발전소에서 발생해 유입되는 미세먼지 등 국내·외 영향에 의한 미세먼지 농도가 전국적으로 높은 편이다.
 - 또한, 불법 배출원 감시에 대한 시흥시 시민들의 수요가 높아 첨단 미세먼지 모니터링 시스템 개발이 필요하다.
 - 시흥시 정왕동의 경우 산업단지와 주거지역이 동시에 위치해 있어 고농도 미세먼지 발생 여부 및 발생원을 파악하는 것이 중요하다.
 - 시흥시에 위치한 한국산업기술대학교 제2캠퍼스에 스캐닝 라이다를 설치하고 관측을 진행하였다.



〈그림 3-1〉 한국산업기술대학교 제2캠퍼스에 설치된 자체 개발한 스캐닝 라이다 시스템

3 | 실증경과

3-1 실증을 위한 지자체 및 이해관계자와의 협력

- 시흥시 스마트시티 사업단과의 협력을 통하여 실증을 위한 관측 수행
 - 실증 지역인 시흥시 정왕동과 시화공단에서 측정을 통해 개발된 스캐닝 라이다 시스템 실증을 위하여 시흥시 스마트시티 사업단과 긴밀히 협력하였다.
 - 관측 수행 장소인 ‘한국산업기술대학교 제2캠퍼스’의 장소 물색과 협조는 시흥시 스마트시티 사업단의 적극적인 지원으로 원활히 섭외되었으며 실증지역 관측을 수행할 수 있었다.

- 리빙랩 운영
 - 개발된 기술을 시민들이 체험할 수 있는 리빙랩을 타 세부과제 운영기관인 ‘팀인터페이스’와의 협업을 통하여 운영하였다.
 - 스캐닝 라이다 미세먼지관리시스템을 통해 산출된 미세먼지 질량 농도를 시각화하여 웹을 통해 제공하고 이에 대한 시민만족도 조사 등에서 도움을 받았다.

3-2 대외홍보 활동

- 스캐닝 라이다 미세먼지 관리시스템 시연회 개최
 - 2020년 10월 한국산업기술대학교 제2캠퍼스에서 ‘스캐닝 라이다 미세먼지관리시스템 시연회’를 개최하였다.
 - 지역 내 대기오염물질(미세먼지)의 측정/관리/조사/활용 등을 진행하고 있는 기관에 재직 중인 50명 이내의 참석자를 대상으로 스캐닝 라이다를 이용하여 미세먼지를 관측하고 실시간으로 시각화하여 위치기반 초미세먼지를 파악하는 것을 시연하였다.
 - 기존 국가 대기관측망 2곳에서만 측정되었던 미세먼지 농도를 30m 격자 간격의 실시간 정보로 제공함으로써 100건 이상의 언론보도를 통해 주목받았다.

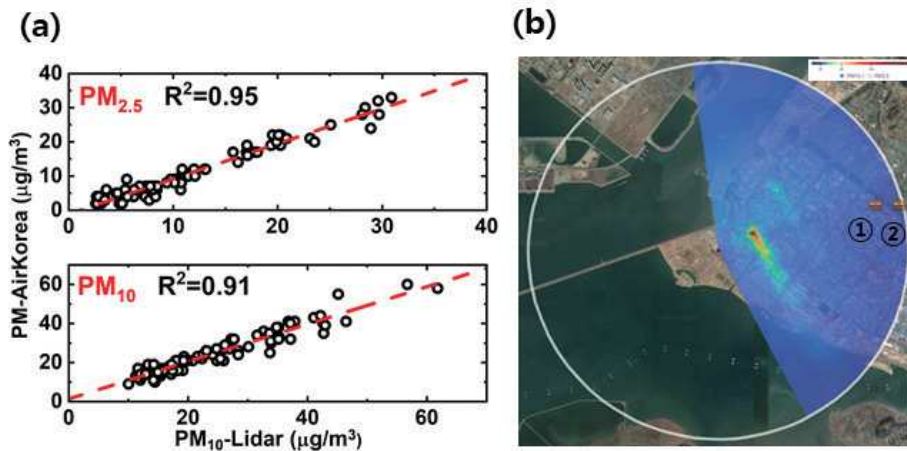


〈그림 3-2〉 스캐닝 라이다 미세먼지관리시스템 시연회 개최

4 | 실증결과

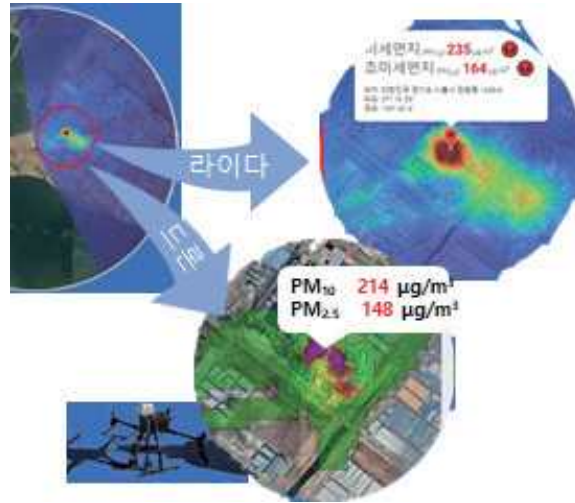
4-1 미세먼지 질량농도 산출 알고리즘

- 라이다로 산출된 광학적 농도를 초미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM₁₀)로 구분되는 질량농도로 환산하였다.
- 라이다로 산출되는 두 파장(532, 1064nm)의 후방산란계수와 532nm의 편광소멸도를 활용하여 미세먼지를 황사 초미세먼지(PM_{2.5}), 미세먼지(PM₁₀)로 구분하고 각각의 질량농도를 산출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.
- 알고리즘을 통해 산출된 분석 결과를 시각화하는 프로그램을 제작하였으며 알고리즘과 관련된 특허 1건을 출원하였다.
- 시흥시의 경우, 스캐닝 라이다 관측 데이터와 국가 대기오염 측정망 자료의 상관관계가 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})에서 각각 0.91과 0.95로 높게 나타났다.



〈그림 3-3〉 (a) 스캐닝 라이다로 계산된 미세먼지(PM₁₀) 농도와 초미세먼지(PM_{2.5})를 국가 대기오염 측정망 자료와 비교 검증한 결과, (b) 스캐닝 라이다 관측 반경 내 대기오염 측정망 위치 확인(①과 ②) 지도 출처 : Googlemap

- 스캐닝 라이다 관측 시 확인한 고농도 사례에 대하여 센서 장비를 탑재한 드론 관측을 통해 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 검증을 실시하여 농도와 미세먼지의 공간분포에서 유사한 결과를 도출하였다.
- 이를 통해 스캐닝 라이다로 대기오염측정망 자료의 공간적 한계를 보완할 수 있음을 확인하였다.



〈그림 3-4〉 스캐닝 라이다와 드론 관측의 미세먼지 농도 공간 분포 비교 검증

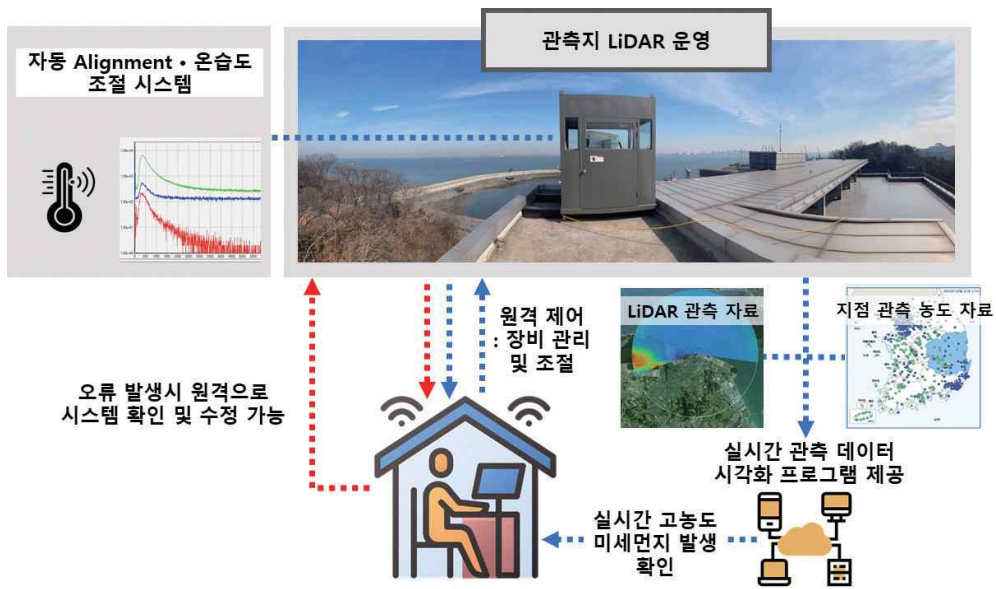
4-2 미세먼지 정보제공 모바일 서비스

- 스캐닝 라이다 시스템으로 관측된 후 분석된 미세먼지 질량 농도를 일반 시민들이 쉽게 확인할 수 있도록 시각화하여 웹과 모바일 환경에서 제공한다.
- 일반 시민들이 현재 자신의 위치에서 라이다로 산출된 고해상도 미세먼지 정보를 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 각각의 질량 농도를 GPS와 연동하여 자신의 위치에서 위치 정보와 함께 확인할 수 있는 모바일 서비스를 제공하였다.
- 분석된 미세먼지 질량 농도 결과를 관측 영역 전체에 걸쳐 30m 해상도로 농도 분포를 색깔로 표시하였으며 이와 관련된 소프트웨어 2건을 등록하였다.

4-3 3차원 스캐닝 라이다 시스템 장치

- 수평 방향으로 30m 고해상도 스캐닝이 가능한 라이다 시스템 설계
- 수직·수평 방향을 위치기반으로 실시간 관측할 수 있는 기기를 국내 기술로 개발하여 관측 장비와 기술의 해외 의존도를 낮추었다.
- 스캐닝 라이다 시스템 설계 관련된 특허를 2건 출원하였으며 1건을 등록하였다.
- 스캐닝 라이다 시스템 구축과 관련된 소프트웨어 2건을 등록하였다.

1 | 운영방안



〈그림 4-1〉 스캐닝 라이다 원격화 및 자동화 시스템 구축

1-1 스캐닝 라이다 시스템 타 지자체로의 확산

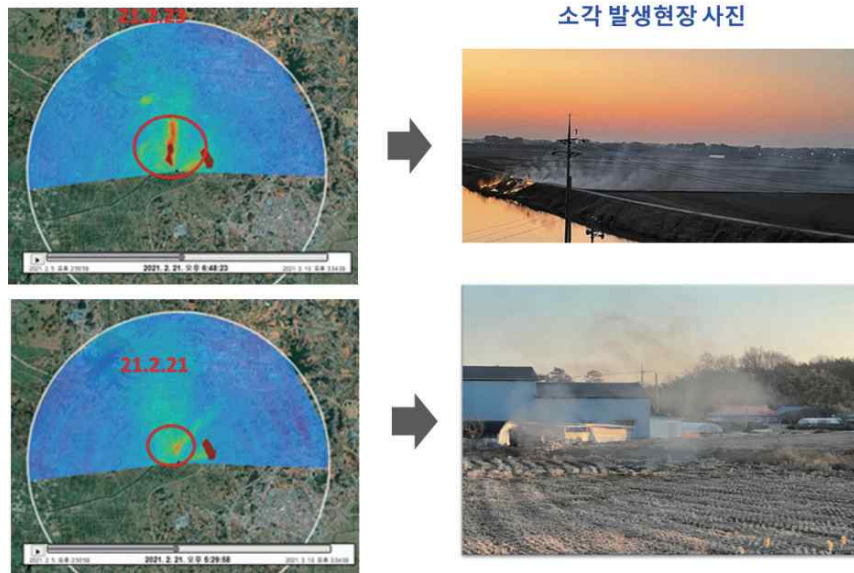
- 스캐닝 라이다 시스템의 실증을 완료하여 스캐닝 라이다 시스템 운영으로 산출되는 미세먼지 질량 농도 시각화 자료에 대한 효용성, 신뢰성을 확보하고 리빙랩 운영을 통하여 시민 만족도를 충족하는 동시에 타 지자체로 확산될 수 있도록 한다.
- 언론 홍보, 개발된 기술의 사업화를 추진하여 개선된 서비스가 타 지자체에 제공될 수 있도록 함으로써 서비스를 확산시킬 예정이다.

1-2 라이더 상시 관측을 위한 원격 및 자동화 시스템 구축

- 상시 라이더 관측이 가능하도록 관리자가 실시간 원격으로 조정이 가능한 원격제어 라이더 시스템을 구축하였다.
- 자동 alignment 및 관측이 가능한 라이더 시스템을 개발하여 전문가 이외의 일반 관리자가 스캐닝 라이더 시스템을 운영(관측, 분석)할 수 있는 시스템을 구축한다.
- 원격제어 시스템을 도입할 경우 장비에 대한 문제가 발생하면 유지 및 보수가 가능하다.

2 | 향후 연계 가능한 시나리오

2-1 불법소각 감시



〈그림 4-2〉 스캐닝 라이더를 이용한 불법 소각 모니터링(지도 출처 : Googlemap)

- 미세먼지 계절 관리제 시행 기간(겨울~봄철) 동안 농촌 지역에서 연속 스캐닝 관측을 진행하여 불법 소각 감시 가능
 - 영농 부산물의 불법 소각을 감시하기 위하여 스캐닝 라이더를 이용한 연속적인 관측을 진행하고 불법 소각이 발생할 경우 관측지점을 특정할 수 있다.

- 불법 소각 지점에서 미세먼지 농도가 증가하는 사례를 확인하여 불법 소각 감시에 스캐닝 라이다를 효과적으로 활용할 수 있다.
- 지자체에서 광범위한 농촌 지역의 불법 소각을 단속할 경우 스캐닝 라이다를 이용하여 효율적으로 이를 단속할 수 있으며 상시 단속이 가능하기 때문에 주민들의 불법 소각에 대한 경각심도 일으킬 수 있다.

2-2 항만 지역 미세먼지 주거지 영향 확인

- 항만 지역에서 발생하는 미세먼지 배출원 및 주거지 영향 확인
 - 항만 지역의 집중 관측을 통해 항구에 정박한 선박뿐만 아니라 항만 하역 및 운송 장비에서 비정기적으로 발생하는 고농도 오염물질을 실시간으로 확인할 수 있다.
 - 부산항과 같이 인구밀도가 높은 항만도시의 경우 항만에서 발생하는 오염물질이 주거지역으로 확산되는 경우 주민들에게 악영향을 미칠 수 있어 미세먼지의 확산경로를 파악하는 것이 매우 중요하다. 스캐닝 라이다 시스템을 통해 관측된 항만 지역 고농도 미세먼지를 기상 데이터(풍향, 풍속)와 함께 확인함으로써 항만에서 발생한 미세먼지가 주거지역에 미치는 영향 및 영향 범위 관측 자료를 확보할 수 있다.



〈그림 4-3〉 항만 지역 선박 배출 확인 사례 (지도 출처 : Googlemap)

1 | 문제해결 사례

1-1 레이저 운영 승인

- 레이저 광선 관리운영 규정 특례 허가 요청
 - 인천국제공항이 관측지점인 한국산업기술대학교와 근접해 있어 레이저광선 위험구역 문제에 대한 해결이 필요하였다.
 - 한국산업기술대학교와 인천공항과의 거리가 25km 이상으로 레이저광선 위험 구역에 포함되지 않는다는 점과 인천국제공항을 이착륙하는 항공기 경로와의 거리도 10km 이상 떨어져 있어 항공기 운항에 직접적 영향을 미치지 않는다는 점을 확인하였다. 따라서 서울지방항공청에 레이저광선 관리운영 규정 특례 허가를 요청하였다.

2 | 기술적 한계

2-1 기상에 따른 스캐닝 라이다 운영 한계

- 강수 상황에서 라이다에서 조사된 레이저 빛이 물방울 입자에 의해 산란되기 때문에 정확한 미세먼지 농도 측정이 불가하다. 하지만 비가 내리는 경우엔 대기 중에 있는 미세먼지가 비에 의해 제거되기 때문에 대기 상태가 깨끗하여 고농도 미세먼지가 발생할 확률이 낮다.

참고문헌

- Klett, J. D. (1981). Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Applied optics*, 20(2), 211–220.
- Müller, D., Mattis, I., Wandinger, U., Ansmann, A., Althausen, D., & Stohl, A. (2005). Raman lidar observations of aged Siberian and Canadian forest fire smoke in the free troposphere over Germany in 2003: microphysical particle characterization. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D17).
- Noh, Y., Kim, D., Choi, S., Choi, C., Kim, T., Kim, G., & Shin, D. (2020). High resolution fine dust mass concentration calculation using two-wavelength scanning lidar system. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6_3), 1681–1690.



스마트시티
혁신성장동력
프로젝트



SMART CITY