

논문

스캐닝 라이다 관측을 통한 부산 감만항 주변 PM_{2.5} 발생원 연구

Study on PM_{2.5} Emission Sources in the Vicinity of Busan Gamman Port using Scanning LIDAR Observation

김재원, 노영민*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

Jaewon Kim, Youngmin Noh*

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University,
Busan, Republic of Korea

접수일 2023년 7월 25일
수정일 2023년 7월 31일
채택일 2023년 7월 31일

Received 25 July 2023
Revised 31 July 2023
Accepted 31 July 2023

*Corresponding author
Tel: +82-(0)51-629-6526
E-mail: nym@pknu.ac.kr

Abstract Using a scanning LIDAR, we measured the PM_{2.5} concentration with a horizontal resolution of 30 m in the port area, industrial zones, and residential areas including Gamman Port, Bukhang Port, and Yeongdo-gu in Busan, from March 2 to May 2, 2022. Among the observation areas, we categorized them into six zones: Gamman Port (A) with ships and cargo handling equipment, residential area (B) adjacent to the port, factory area (C) where steel mills are located, redevelopment area of Bukhang Port (D), industrial area (E) with shipbuilding yards, and industrial complex (F) with ship berthing facilities. We examined the characteristics of fine particle concentration based on the concentration changes of PM_{2.5} in each zone. The average concentration for the entire observation period, including all zones, was $17.0 \pm 10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. For each zone, A to F, the concentrations were 19.0 ± 12.8 , 21.0 ± 14.5 , 18.6 ± 12.5 , 15.0 ± 7.8 , 14.2 ± 7.3 , and $15.9 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Zones A, B, and C showed higher concentrations compared to zones D, E, and F. When the wind speed was strong, the concentration difference between zones A, B, and C and zones D, E, and F was small. However, as the wind speed decreased, the concentration difference between zones became more significant. The average PM_{2.5} concentration, including all zones, varied with wind direction: 14.1 ± 11.6 , 17.5 ± 9.3 , 19.1 ± 8.7 , and $17.7 \pm 6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for east, west, south, and north winds, respectively, showing the highest concentration during south winds and the lowest during east winds. Through scanning LIDAR observations, we were able to confirm the concentration changes in each zone according to the concentration difference and variations in wind direction and speed. The results of this study indicate that scanning LIDAR can provide important information for accurately understanding the fine particle status and formulating policies for mitigation and countermeasures.

Key words: PM_{2.5}, Lidar, Scanning, Policy

1. 서론

국내 최대 항만인 부산은 국내에선 유일하게 ‘세계 10대 초미세먼지 오염항만’으로 선정되는 것처럼 다른 도시와는 다르게 항만과 해양에서 기원한 대기오염물질에 의한 대기오염이 심각한 지역이다(Wan et al., 2016). 부산은 항만과 주거가 인접한 도시로, 부산시에서 발표한 2020년 대기질 진단평가시스템 운영

결과에 따르면 하절기에 특히 초미세먼지 자체 배출 영향이 큰데 이는 항만 도시의 특성으로 비도로 이동 오염원인 선박을 최대 배출원으로 보고있다(Nam, 2021). 선박에서 배출되는 주요 대기오염물질은 NO_x, SO_x, 미세먼지로 페럼, 천식 등 호흡기 질환과 알레르기성 비염, 심장질환 등의 환경성 질환을 유발한다(Seo and Lee, 2019). 부산광역시도 지역 내 초미세먼지 총 배출량의 약 37.7%를 항만 및 선박 관련 배출이

차지한다는 것을 인지하고 있다. 부산광역시 2019년 기준 오염물질 배출 현황을 살펴보면 비도로 이동 오염원 중 선박이 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량의 약 81%를 차지하고, 황산화물과 질소산화물의 경우 각각 98%와 74%를 차지하여 선박의 오염물질 배출 기여도가 상당히 높음을 인지하고 있다(NAIR, 2021). 특히, 부산지역의 미세먼지 수준(2021년 기준, PM₁₀: 31.2 µg/m³, PM_{2.5}: 15.0 µg/m³)은 세계보건기구(WHO) 권고 기준(PM₁₀: 15 µg/m³, PM_{2.5}: 5 µg/m³)에 비해 약 2~3배 높은 수준으로, 이를 해결하기 위하여 부산항만공사에서는 빅데이터 기반 미세먼지 측정망을 구축하거나, 선박 연료유의 황함유량 기준을 강화하고, 3천 톤 이상의 선박에 대해 저속유황 프로그램을 실시하는 등의 미세먼지 감축을 위한 노력을 시도하고 있다(BPA, 2022). 하지만, 이와 같은 항만에서의 오염물질 배출 현황과 영향에 대한 연구를 실제 관측 장비를 이용한 측정보다는 배출량 자료에 근거하여 추정하는 경우가 대부분이다. 현재 국가 대기오염 측정망은 β-ray 방식의 측정기를 사용하는 지점 모니터링 시스템이다. 21년 12월 기준 도시대기 측정망 505개, 도로변대기 측정망 56개, 국가배경농도 측정망 11개, 교외대기 측정망 27개, 항만대기 측정망 15개로 총 614개의 관측 지점이 운영되고 있다. 하지만 관측 지점은 대부분 인구가 밀집된 도시에 집중적으로 위치하고 있고, 실제 관측은 5분 단위로 수행되고 있으나, QA/QC를 위해 1시간 평균으로만 공개되고 있어 실시간 농도 변화 관측에는 많은 어려움이 있다. 또한, 항만지역의 선박이나 공업 및 공단지역의 공장에서의 고농도 오염물질 발생의 모니터링을 위하여 측정망을 운영하지만 발생 지점을 특정하고 발생된 오염물질의 이동과 확산을 파악하기에는 현재의 지점 측정으로는 분명한 한계점이 존재한다(Gupta *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2015). 관련된 연구 결과가 지적하는 핵심 내용은 오염원의 식별이 어렵고, 공간 분포를 완전히 이해한다는 것이 불가능하다는 점을 지적한다. 이를 보완하기 위해 드론을 이용하거나 저비용 센서를 다량 설치하는 것, 그리고 이동형 차량으로 관측을 수행하는

방법들이 시도되었지만 만족스러운 결과를 도출하지 못하였다. 시도된 방법들의 핵심 문제점은 실시간 연속 측정이 불가능하다는 것과 공간분포에 대한 문제였다.

이러한 문제들을 해결하는 새로운 접근법으로 본 연구는 스캐닝 라이다(LIDAR: Light Detection And Range)를 이용한 고해상도 실시간 연속 측정을 제안하고자 한다. 국외에서는 이미 도심지역에서 라이다를 활용한 대기오염 측정연구가 활발히 이루어지고 있다. Xian *et al.* (2020)은 스캐닝 라이다를 활용하여 중국 산시성 루량과 산둥성 쑤보의 도시 대기오염 모니터링을 실시하여 대기오염물질 주요 배출원을 찾았고, Lisetskii (2019)는 러시아 벨고로드 산업 도시 센터에서 라이다를 활용한 대기오염 모니터링을 예로 사용하여 대기 표준 확립에 있어서 라이다의 중요성을 시사했다. Noh *et al.* (2020a)은 원격 대기 탐사기술 중 하나인 라이다 기술을 응용하여 스캐닝 라이다 시스템을 자체 개발하였다.

본 연구에서는 본 연구에서는 이 스캐닝 라이다 시스템을 활용하여 부산의 주요 항만의 하나인 감만항을 대상으로 항만과 항만 주변을 수평으로 좌우 해상도 30 m 간격으로 실시간 연속적으로 산출된 PM_{2.5} 질량농도를 분석하여 항만과 항만 주변 미세먼지 농도를 파악하였다. 이를 통하여 관측 대상 지역에서의 주요 발생 지점을 특정하여 발생 원인을 파악하고 풍향과 풍속에 따른 주변의 영향을 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 스캐닝 라이다

본 연구에서는 부경대학교 원격대기환경탐사 연구실에서 개발한 스캐닝 라이다 시스템을 관측에 활용하였다. 개발된 스캐닝 라이다 시스템과 PM_{2.5} 질량농도 산출 방법에 대한 내용은 Noh *et al.* (2020b)에 자세히 설명되어 있다. 개발된 스캐닝 라이다 시스템은 두 파장(532와 1,064 nm)을 광원으로 사용하여 수

평방향으로 30분 내 360° 관측이 가능하도록 제작되었다. 관측된 데이터를 실시간으로 분석하여 반경 5 km 영역에서 수평방향으로 좌우 30 m의 고해상도로

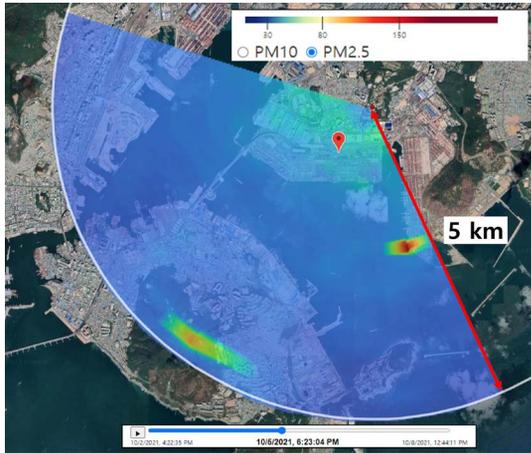


Fig. 1. Example of visualization through scanning lidar system observation data analysis. The observation was performed on Oct. 2nd, 2021.

PM_{2.5} 질량농도를 시각화하여 표출할 수 있다(그림 1 참조). 관측의 기본 절차는 그림 2에서 보여주는 것처럼 먼저 스캐닝 라이다 시스템 설치 위치와 관측 대상 지역의 지형, 건물 위치 등 지리적 여건을 시스템에 내장된 카메라로 파노라마 촬영을 수행하여 관측 영역 내 레이저 조사 위치를 미리 설정한 후 시스템 운영을 시작하게 된다. 관측이 시작되면 시스템은 자동으로 설정된 각 위치로 레이저를 조사하여 신호를 획득한 후 다음 위치로 이동한 후 다음 레이저 조사를 시작하는 방식으로 전체 설정 구역에 대하여 신호를 획득하여 관측 영역 전체에 대한 측정을 수행한 후 시작 위치로 다시 이동하여 하나의 관측 시퀀스를 마무리하게 된다. 한 시퀀스를 통하여 획득된 관측 영역 내 측정 데이터는 무선 기반으로 분석 프로그램이 설치된 서버로 전송된 후 각 방향 측정 데이터에 대한 데이터 분석을 실시간으로 수행하여 결과를 산출한 후 전체 관측 영역에 대하여 미세먼지 농도(PM₁₀과 PM_{2.5})를 시각화하여 표출하게 된다.

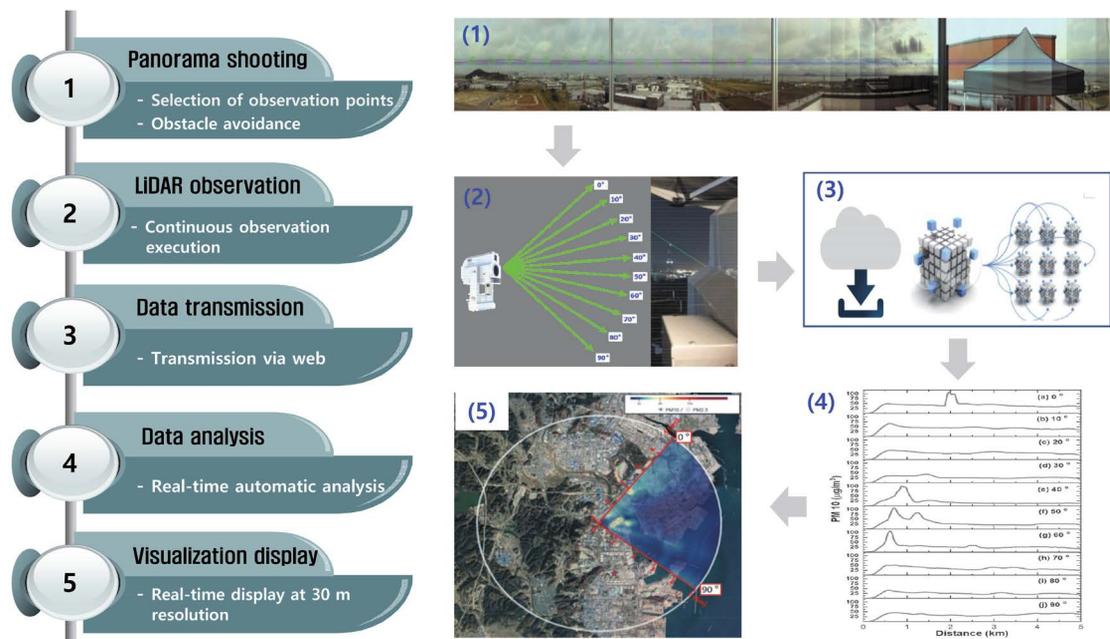


Fig. 2. Scanning lidar observation and analysis process. 1. Panoramic shooting of the observation area 2. Observation 3. Real-time data transmission 4. Real-time automatic analysis 5. Visualization display.

2.2 관측 구역과 관측 기간

본 연구에서는 부산 북항 및 감만항 인근을 관측 영역으로 하는 스캐닝 라이다를 설치하여 항만 지역의 실시간 미세먼지 고해상도 모니터링을 실시했다. 스캐닝 라이다는 부경대학교 용당캠퍼스 9공학관 옥상(위도: 35.11, 경도: 129.09, 지상 약 10 m 높이)에 설치되었으며 반경 5 km, 관측 수평각도 133° 내에서 정밀 관측을 실시했다(그림 3). 스캐닝 라이다 설치 및 관측 범위 설정 시에는 레이저의 경로가 방해받지 않도록 지대가 평탄하고 관측 영역 내에 고층건물을 피하여 레이저를 조사하였다. 관측은 2022년 3월 2일부터 5월 2일까지 약 2달간 진행되었으며, 총 42일간 1,935 루프의 관측이 있었다.

관측 영역 내에서 산출된 $PM_{2.5}$ 질량농도는 관측 영역 내 산업 특성에 따른 농도 차이를 확인하기 위하여 그림 3에서 보여주는 것처럼 분석 구역을 세분화하여 세분화된 구역의 평균값을 산출하였다. 각 구역은 선박 및 하역 장비를 보유한 감만항(A), 항만과 인접한 주거지역(B), 제강소가 위치한 공장지역(C), 재개발이 진행 중인 부산 북항(D), 조선소가 위치한 공

업지역(E), 선박 정박소가 있는 공업단지(F)로 구별하여 각 구역의 특성에 따른 $PM_{2.5}$ 의 농도변화를 확인하였다. 그리고, 스캐닝 라이다로 분석된 데이터의 검증에 위하여 국가대기오염 측정망 위치(Z)에 대한 동시간대 분석을 실시했다.

A구역은 감만항과 신감만부두 지역으로 컨테이너선이 입출항하는 컨테이너 부두이다. 컨테이너 하역 작업을 위한 크레인 등이 위치해 있고, 하역에 의한 정박과 입출항 시 선박에서 오염물질이 배출될 것으로 예상된다. 감만부두는 컨테이너선 5만 톤급 4척이 접안 가능하고, 신감만부두는 5만 톤급 2척이 접안할 수 있는 대형 부두이다. 감만부두와 신감만부두의 주요 하역 장비는 컨테이너 크레인(Container Crane, C/C) 20기, 트랜스퍼 크레인(Transfer Crane, T/C) 49기, 야드 트랙터(Yard Tractor, Y/T) 93대, 야드 사시(Yard Chassis, Y/C) 218대, 리치 스택터(Reach Stacker, R/S) 11대, 포크 리프트(Fork Lift, F/L) 7대이다. B구역은 항만과 인접한 주거지역으로, 감만항과 거리가 1 km 이내이고, 아파트 등 거주시설과 학교시설이 밀집해 있다. 해당 지역은 감만항 및 공업지역으로부터 배출

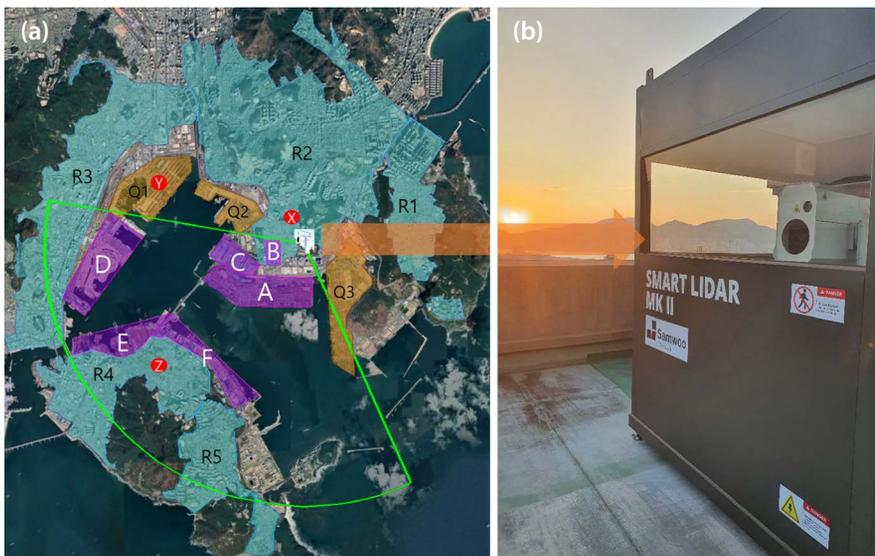


Fig. 3. (a) Classification of major facilities around and inside the scanning lidar observation area, Q is a port facility, R is a residential area, X, Y, Z are Air Korea sites (X: Daeyeon-dong branch, Z: Cheonghak-dong branch, Y is port measurement point doesn't work). (b) Scanning LIDAR installation and measurement photos.

되는 미세먼지의 영향을 직접적으로 받을 것으로 추정된다. C구역은 제강소(1차 금속 제조업)가 위치한 구역으로 해당 기업은 2020년 화학물질 배출 이동량 정보(N.I.C.S, 2022)에 따르면 대기배출량이 총 8,713 kg/year로 많은 편이다. D구역은 부산항 제1부두부터 부산항국제여객터미널까지 포함하는 구역으로, 현재 재개발이 진행되고 있다. 해당 지역에는 생활형 숙박 시설이 부산역과 인접하여 도로 교통량이 많고, 개발로 인한 비산먼지 배출이 있을 것으로 보인다. 또한 동쪽으로 자성대부두가 인접하여 선박 이동 및 하역에 의한 미세먼지 배출 영향을 받을 것으로 보인다. E구역은 중공업단지로 해당 구역에 위치한 대형 중공업 업체의 경우, 2020년 대기배출량이 13,779 kg/year(N.I.C.S, 2022)인 대형 사업장이다. F구역은 공업단지 지역으로 중 대규모 사업장이 밀집해 있으며 항구를 오가는 선박들이 정박하는 계류시설이 있다. 또한 북항 지역은 전반적으로 여객부두 및 크루즈 부두, 관공선 부두 등의 일반 공용부두들이 다수 위치하여 중 소형 및 대형 선박의 입출항이 잦은 지역이다.

3. 연구 결과

먼저 스캐닝 라이다를 이용한 고해상도 미세먼지 농도 데이터의 검증은 위하여 관측 영역 내부에 위치한 국가대기오염 측정망(이하 에어코리아, <https://www.airkorea.or.kr/>) 청학동 지점에서 측정된 PM_{2.5} 농도 자료와의 비교를 실시했다(그림 4). 스캐닝 라이다에서 산출되는 수평으로 좌우 30 m의 고해상도 데이터에서 청학동 지점에 위치한 데이터만을 추출하여 상관관계를 확인하였다. 청학동 지점의 스캐닝 라이다 농도 데이터와의 PM_{2.5} 상관관계는 0.88로 높은 상관성을 보였다. 관측 기간 중 청학동 지점에서 측정된 PM_{2.5}의 농도 분포는 2~60 µg/m³인 데 반하여 스캐닝 라이다 관측으로 산출된 농도는 1.3~39.9 µg/m³으로 청학동 지점에서 40 µg/m³ 이상의 고농도가 관측될 때 스캐닝 라이다 데이터는 상대적으로 낮은 값을 보

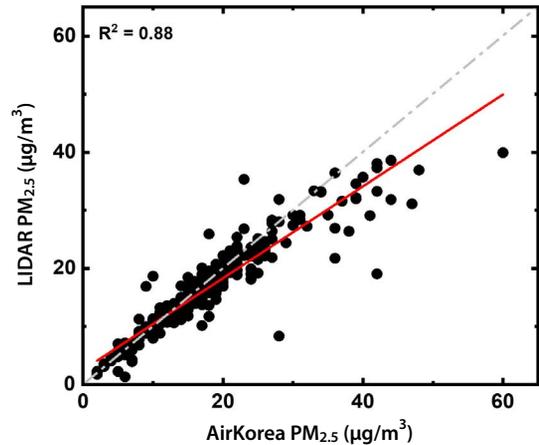


Fig. 4. Comparison of correlation between PM_{2.5} concentration analyzed by scanning lidar and concentration measured at Air Korea Cheonghak-dong branch.

이는 경향이 있었다. 저농도 사례는 충분한 관측이 이루어졌으나 고농도 사례가 제한되고 농도도 60 µg/m³으로 제한된 점이 스캐닝 라이다와 에어코리아 간의 농도 차이가 발생하는 하나의 이유가 될 수 있을 것이다. 또한, 청학동 지점의 관측은 지표면에서 5 m 높이에 설치된 분석 장비로 산출된 결과이나 스캐닝 라이다 설치 위치의 해발 고도는 200 m로 관측 고도 차이로부터 발생하는 농도 차이 또한 원인이 될 수 있을 것이다.

그림 5는 기상청 남구 감만동 지점에서 측정된 관측 기간 전체에 대한 풍향과 풍속 경향을 보여준다. 풍향 방위는 각도에 따라 동풍을 50~140도, 서풍은 250~320도, 남풍은 140~250도, 북풍은 320~50도로 나누어 분석하였다. 풍향·풍속 분석 결과 관측 기간 동안의 주풍은 남풍(42%) 계열로 풍속은 0.2~11.8 m/s로 고르게 나타났다. 남풍 계열의 빈도가 가장 많았고, 다음으로 동풍과 서풍, 북풍 순으로 나타났으며 빈도는 각각 34%, 18%, 6%였다.

그림 6은 관측 기간 전체에서 각 구역별 한시간 평균으로 표현된 PM_{2.5} 농도(위)와 풍향, 풍속(아래)을 보여준다. 관측 기간 동안 동풍 계열(남동 및 동풍)과 남풍 계열(남서 및 남풍)이 주요한 풍향이다. 동풍 계

열의 경우 관측 영역의 외부에 위치한 부두 혹은 항로 상의 선박 등에서 배출된 미세먼지의 영향을 받은 것으로 추정할 수 있으며, 남풍 계열일 경우 정지 및 이동 선박 또는 항구 시설물에 의한 항만 배출로 볼 수 있다.

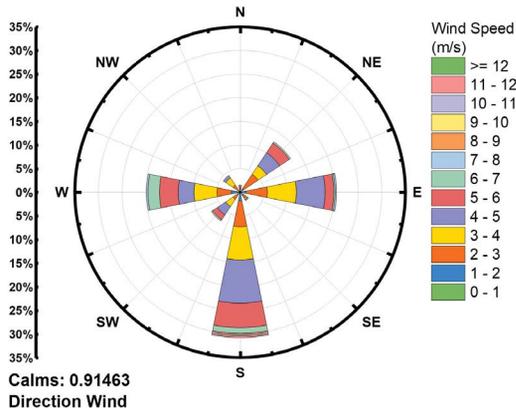


Fig. 5. Wind direction and wind speed statistics for the period from March 2nd to May 2nd, 2022, when scanning lidar measurements were performed.

관측 기간 동안 스캐닝 라이다 측정이 이루어진 시기에 청학동 지점에서 측정된 PM_{2.5} 농도는 2~60 µg/m³의 값으로 17.2±7.4 µg/m³의 평균 농도 값을 보였다. 청학동 지점 관측 데이터 기준으로 최고 농도가 측정된 2022년 3월 9일 14:00 시기에 A구역부터 F구역에서 각각의 농도는 78.4±10.4, 92.7±4.0, 76.9±5.4, 52.9±6.2, 46.2±7.0, 49.6±4.9 µg/m³으로 B구역이 가장 높고 E구역이 가장 낮은 값을 보였다. 구역별로는 감만항과 제강소가 위치한 A, B, C구역이 D, E, F구역에 비하여 높은 농도가 측정되었으며, 이 같은 구역별 농도 경향은 전 관측 기간에 나타나고 있음을 그림 6에서 확인할 수 있다. 표 1에서 확인되는 전체 관측 기간의 평균 농도는 전 구역을 모두 포함한 평균값은 17.0±10.0 µg/m³이었고, 각 구역별로는 A구역부터 Z구역까지 각각 19.0±12.8, 21.0±14.5, 18.6±12.5, 15.0±7.8, 14.2±7.3, 15.9±8.8, 15.5±8.1 µg/m³으로 A, B, C구역이 D, E, F, Z구역에 비하여 높은 경향을 보여주었다. 표 1에는 스캐닝 라이다 관측 영역 내에 위치한 에어코리아 사이트인 청학동 지점과 영

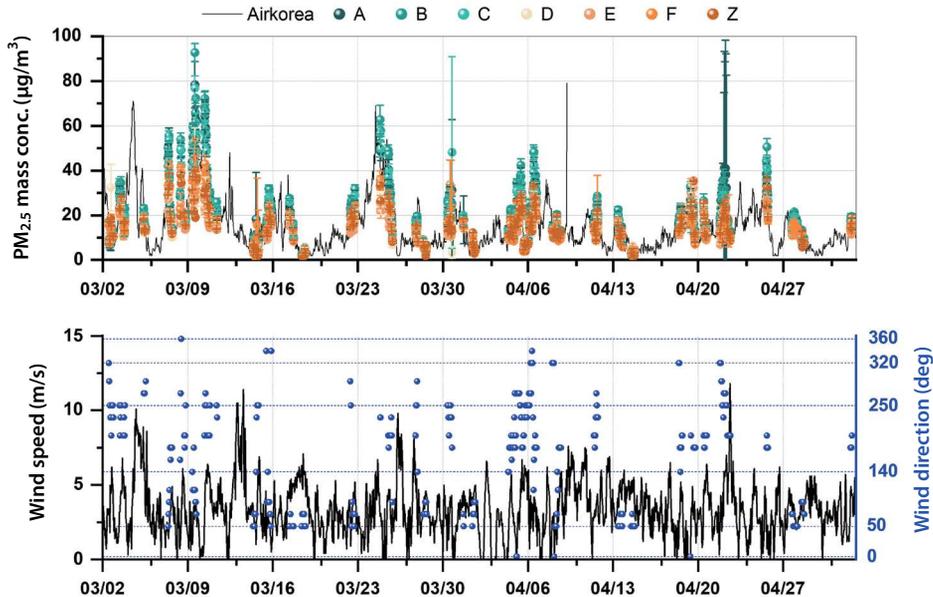


Fig. 6. Changes in PM_{2.5} concentrations over the entire observation period (top). Air Korea Cheonghak-dong branch (solid black line), zones A to Z are color-coded. Wind direction (blue circle) and wind speed (solid black line) data (bottom) for the entire observation period.

Table 1. Average value of PM_{2.5} concentration according to wind direction and wind speed.

Wind direction	Wind speed range (m/s)	PM _{2.5} (μg/m ³)									
		Cheonghak-dong (AirKorea)	Daeyeon-dong (AirKorea)	A	B	C	D	E	F	Z	All
Total	>1	25.3±13.7	20.6±8.6	30.3±19.8	32.7±17.8	29.7±19.0	21.0±7.3	19.2±6.5	22.9±10.8	22.7±8.4	25.5±12.3
	1~2	20.1±10.2	23.2±10.4	24.1±12.6	25.9±14	23.0±12.3	17.8±8.5	16.6±6.6	19.2±9.8	18.4±8.7	20.7±10.2
	2~3	17.9±9.3	21.3±11.6	21.0±12.2	23.4±14	20.8±12.3	16.2±7.9	15.7±7.8	17.1±8.3	16.8±8.2	18.7±9.6
	3~4	17.1±10.0	20.7±10.3	20.0±12.9	22.3±15.3	19.6±12.5	15.5±7.6	14.8±7.0	16.7±8.2	15.7±7.0	17.8±9.8
	4~5	15.2±9.4	16.4±9.0	17.4±11.9	19.1±13.7	16.9±11.6	14.4±7.4	13.4±6.6	14.9±8.6	15.0±8.0	15.9±9.4
	5~6	12.5±8.9	15.8±9.5	14.0±11.2	15.5±12.6	13.8±10.8	11.8±7.3	11.3±7.1	12.4±8.3	12.6±7.5	13.0±9.1
	>6	12.7±10.2	17.7±10.3	14.3±12.5	15.8±13.8	14.0±12.2	11.7±8.4	11.1±8.0	12.4±9.3	12.0±9.1	13.0±10.3
	East	>1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1~2		22.5±11.4	24.6±13	26.3±15.6	28.5±16.5	25.5±14.5	20.2±8.4	18.5±7.4	21.6±10.6	21.1±8.9	23.1±11.7
2~3		17.9±10.7	19.7±11.4	20.6±13.7	22.5±15.3	20.2±13.0	15.7±8.8	15.0±9.1	17.2±9.7	16.0±9.4	18.2±11.2
3~4		17.3±14.1	19.2±15.4	20.7±19.0	22.9±22.2	20.2±18.4	15.6±11	14.9±10.1	16.4±11.7	15.2±9.4	18.0±14.4
4~5		8.4±5.8	10.1±6.6	9.7±6.8	10.1±7.4	9.4±6.8	8.8±5.2	8.3±4.8	8.7±5.8	8.9±5.5	9.1±6.0
5~6		7.2±6.6	7.6±5.9	7.8±7.7	8.3±8.5	7.7±7.7	7.0±5.8	6.6±5.2	7.1±6.5	7.0±5.9	7.4±6.7
>6		2.0±0.0	2.7±1.2	2.1±0.0	2.4±0.1	2.1±0.0	2.0±0.1	1.9±0.0	1.9±0.0	2.0±0.2	2.1±0.0
Total		13.7±11.4	14.6±11.9	15.8±14.5	17.2±16.4	15.5±14	12.6±9.2	11.9±8.6	13.2±10.1	12.6±9	14.1±11.6
West	>1	17.0±4.2	19.0±5.7	18.9±4.2	21.6±4.8	18.7±5.2	15.8±3	15±2.2	16.3±3.8	17.5±4.8	17.7±4
	1~2	22.3±14.9	23.3±13.4	25.8±17.9	28.8±19.4	25.6±18	20±13.7	16.7±8.1	21.3±14.7	19.9±13.1	22.6±14.9
	2~3	16.0±4.3	20.5±8.0	18.7±5.4	21.1±5.8	18±5.8	15.2±3.9	14.5±2.9	15.6±4.3	15.6±4.3	16.9±4.4
	3~4	16.4±5.3	22.7±6.0	19.2±6.5	22.2±8.2	19.1±6.1	14.4±4.5	13.4±4.4	16.7±3.7	15.3±4.6	17.2±5.2
	4~5	19.3±12	22.5±9.9	23.1±16.9	25.1±18.8	22.1±16.8	15.9±7.7	15.1±6.0	17.4±10.5	16.5±8.4	19.3±11.9
	5~6	16.3±11.9	20.1±11.4	19.2±16.4	21.3±18.6	18.8±16.0	14.4±9.0	13.6±8.6	15.7±10.9	14.9±8.1	16.8±12.4
	>6	13.9±11.9	20.6±9.2	16.5±15.6	18.4±17.4	16.1±15.2	11.7±8.3	11.1±7.7	14.1±10.5	12.1±9.8	14.3±12.0
	Total	17.0±9.3	21.6±8.6	20.0±12.3	22.4±13.8	19.5±12.1	14.9±7.1	13.9±5.9	16.5±8.2	15.5±7.3	17.5±9.3
South	>1	45.0±12.7	39.0±0.0	60.0±26.1	60.8±14.4	58.3±24.1	31.8±0.7	29.1±4.0	38.8±13.1	35.5±1.4	44.9±10.2
	1~2	18.8±8.5	23.8±8.7	23.5±9.2	24.7±11.5	21.8±9.4	16.2±7.0	15.9±6.3	17.8±8.2	16.8±7.5	19.5±8.2
	2~3	19.1±9.1	23.3±13.2	23.0±12.8	25.8±15.2	23.2±13.8	17.2±7.4	17.2±7.4	17.8±7.5	18.6±7.9	20.4±9.3
	3~4	17.7±8.2	21.4±7.8	20.1±9.9	22.4±11.9	19.8±9.8	16.0±5.6	15.4±5.4	17.1±7.1	16.3±6.3	18.2±7.6
	4~5	19.8±7.8	20.5±7.1	22.1±10.4	25.0±12.5	21.7±10.0	18.8±5.8	17.3±5.5	19.5±7.1	19.8±6.3	20.6±7.7
	5~6	14.4±7.4	19.3±7.3	15.8±9.0	17.8±9.9	15.6±8.4	13.8±6.0	13.4±6.3	14.6±6.6	15.2±6.4	15.2±7.4
	>6	15.6±8.4	20.8±8.3	16.9±9.6	18.5±10.3	16.6±9.4	15.3±7.6	14.4±7.6	14.9±7.7	15.6±7.7	16.0±8.5
	Total	18.4±8.9	21.5±9.0	21.2±11.8	23.5±13.3	20.8±11.7	16.8±6.7	16.1±6.4	17.7±7.8	17.8±7.2	19.1±8.7

Table 1. Continued.

Wind direction	Wind speed range (m/s)	PM _{2.5} (µg/m ³)									
		Cheonghak-dong (AirKorea)	Daeyeon-dong (AirKorea)	A	B	C	D	E	F	Z	All
North	> 1	19.5±5.4	17.6±4.8	23.1±6.1	25.8±8.0	22.7±6.0	18.8±5.1	16.9±4.0	19.2±4.5	19.6±5.2	20.9±5.4
	1~2	13.0±0.0	15.5±2.1	14.3±1.0	16.7±1.1	14.1±0.7	12.6±0.2	12.1±0.4	12.6±0.3	13.1±0.2	13.6±0.3
	2~3	16.7±10.0	19.6±11.2	19.0±10.6	21.0±12.9	18.6±10.7	15.9±10.6	14.9±8.8	16.4±10.1	15.4±8.5	17.3±10.2
	3~4	16.0±3.0	17.4±4.7	18.0±3.8	19.5±4.1	17.7±3.5	15.1±2.6	14.6±3.2	15.5±3.0	15.6±2.6	16.6±3.0
	4~5	18.0±1.4	18.5±2.1	24.0±3.7	22.7±0.5	20.8±0.8	15.3±4.4	14.2±5.2	16.9±2.3	17.1±2.4	18.7±1.5
	5~6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	> 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		16.8±6.3	17.9±6.3	19.7±7.2	21.5±8.4	19.1±7.0	16.0±6.5	15.0±5.5	16.5±6.2	16.4±5.6	17.7±6.5
Whole data		16.4±9.9	19.0±10.3	19.0±10.3	21.0±14.5	18.6±12.5	15.0±7.8	14.2±7.3	15.9±8.8	15.5±8.1	17.0±10.0

역 내는 아니지만 B구역에서 북동쪽으로 500 m 거리에 위치한 에어코리아 대연동 지점의 측정 자료도 정리되어 있다. 청학동과 대연동 지점의 전체 평균 PM_{2.5} 농도는 각각 16.4±9.9 µg/m³과 19.0±10.3 µg/m³으로 대연동 지점이 높은 경향을 보였다. 에어코리아 사이트와 구역별 농도 결과에서 주목해야 할 점은 스캐닝 라이더 관측 영역 내 에어코리아 청학동 지점의 결과는 주변인 D, E, F구역과 유사한 값을 보이고 에어코리아 대연동 지점의 농도는 A, B, C구역과 유사한 값을 보인다는 점이다. 특히, B구역은 특별한 발생원이 없는 주거지임에도 가장 높은 농도를 보이고 있고 에어코리아 대연동 지점도 유사한 값을 보이는 것은 바로 인접한 감만항과 제강소에서 발생된 PM_{2.5}의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

풍속에 따른 농도 변화를 확인하기 위하여 풍속 범위를 1 m/s 이하, 1 m/s 이상~2 m/s 이하, 2 m/s 이상~3 m/s 이하, 3 m/s 이상~4 m/s 이하, 4 m/s 이상~5 m/s 이하, 5 m/s 이상~6 m/s 이하, 6 m/s 이상으로 구분하여 분석을 수행하였다. 풍속별 발생 빈도율은 각각 2%, 8%, 21%, 24%, 26%, 14%, 5%로 2~5 m/s의 풍속이 주요함을 확인하였다. 그림 7과 표 1에는 분석된 전체 데이터를 구분된 풍속에 따라 구역별 PM_{2.5} 농도로 표시되어 있다. 풍속이 1 m/s 이하에서부터 6 m/s 이

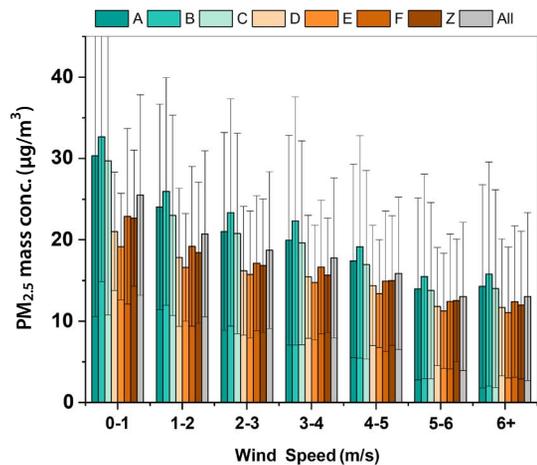


Fig. 7. Statistical data of PM_{2.5} concentration change according to wind speed. Each zone is identified by color.

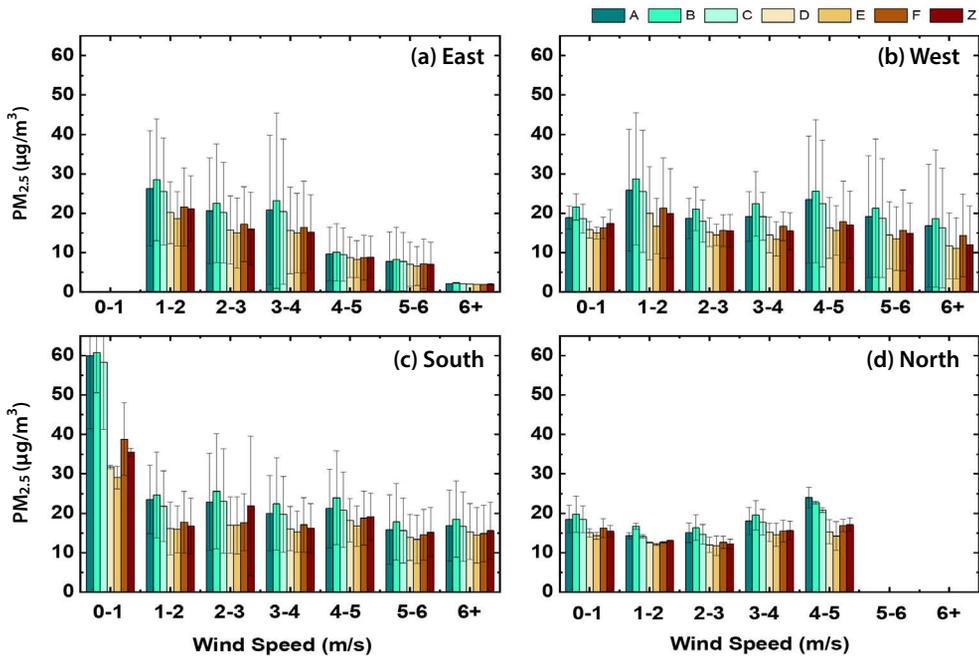


Fig. 8. Changes in PM_{2.5} concentration according to wind speed changes by wind direction classified as east (a) west (b) south (c) north (d).

상으로 증가함에 따라 전 구역을 포함하는 PM_{2.5} 농도 평균은 각각 25.5 ± 12.3 , 20.7 ± 10.2 , 18.7 ± 9.6 , 17.8 ± 9.8 , 15.9 ± 9.4 , 13.0 ± 9.1 , 13.0 ± 10.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소하였으며, 이 경향은 모든 구역에서 동일하게 확인되었다. 또한, 풍속이 변화하더라도 모든 풍향 구간에서 B구역의 PM_{2.5} 농도가 가장 높고 E구역의 농도가 가장 낮은 경향도 동일하게 확인되었다. 풍속 범위가 0~1 m/s 범위에서는 B구역과 E구역의 농도차가 13.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 풍속이 증가함에 따라 차이가 감소하여 6 m/s 이상의 구간에서는 4.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보여 풍속이 증가함에 따라 두 구역에서의 농도차가 감소함도 확인하였다.

풍속과 함께 풍향에 따른 PM_{2.5} 농도 변화를 확인하기 위하여 그림 8과 표 1에서는 풍향에 따라 동, 서, 남, 북풍으로 구분하고 각각 풍속 구간에 따른 농도를 확인하였다. 풍향에 따른 모든 구역을 포함하는 평균 PM_{2.5} 농도는 동, 서, 남, 북 풍향에서 각각 14.1 ± 11.6 , 17.5 ± 9.3 , 19.1 ± 8.7 , 17.7 ± 6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 남풍에서 가

장 높고 동풍에 가장 낮은 농도를 보였다. 이는 관측 영역의 동쪽에는 바다가 위치하여 발생원이 없어 동풍이 불 경우 농도가 낮아지는 것으로 판단된다. 남풍이 불 경우에는 관측 영역의 내륙에서 발생된 오염물질이 해양으로 배출되지 않게 막는 효과를 가지게 되어 농도가 높아지는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 부산 지역의 대기 중 미세먼지는 5~6월에 농도가 증가하는데 이는 여름철 풍향이 북서풍에서 남동풍으로 변경되는 시기에 해안에 위치한 산업시설, 선박 및 항만 시설에서 배출되는 미세먼지가 도심지역으로 유입되는 이유로 판단하는 부산연구원 (Busan Development Institute, BDI)의 발표와 같은 맥락이다 (Huh *et al.*, 2020). 본 연구에서는 시기적으로는 봄철이었지만 풍향이 남풍일 경우 내륙에서 발생된 오염물질의 이동을 막는 효과를 보이는 것이다.

그림 8은 풍향에 따라 동, 서, 남, 북의 네 방향으로 구분하고 각각 풍속에 따른 PM_{2.5} 농도를 보여주고 있다. 동풍의 경우에는 풍속이 증가함에 따라 PM_{2.5}

농도가 감소하는 경향이 명확하게 확인된다. 서, 남, 북풍에서는 풍속이 증가함에 따라 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하는 경향이 동풍처럼 명확하게 확인되지 않는다. 북풍의 경우에는 풍속이 증가함에 따라 오히려 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 풍향에 따른 차이는 이미 언급했듯이 관측 영역의 동쪽에는 미세먼지의 발생원이 없기에 풍속이 증가할수록 대기 확산이 잘 되어 풍속의 증가와 함께 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하는 경향이 뚜렷하게 확인되지만 다른 세 방향에서는 발생원이 존재하여 풍향의 영향이 적은 것으로 판단된다. 특히, 남풍의 경우 풍속이 1m/s 미만일 때 A부터 Z구역까지의 농도가 각각 60.0 ± 26.1 , 60.8 ± 14.4 , 58.3 ± 24.1 , 31.8 ± 0.7 , 29.1 ± 4.0 , 38.8 ± 13.1 , 35.5 ± 1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 A, B, C구역이 나머지 구역보다 월등히 높은 농도를 보였다. 이는 A와 C구역이 관측 영역에서 가장 주요한 미세먼지 발생원이며 바로 인접한 B구역이 높은 영향을 받는 것을 한번 더 확인시켜 주는 결과이다.

4. 요약 및 결론

본 연구를 통하여 스캐닝 라이다 시스템을 이용한 측정 데이터 분석으로 부산의 항만과 해양에서 발생하는 $PM_{2.5}$ 농도를 실시간 및 고해상도로 파악하였다. 관측 결과의 시각화와 장기 관측 데이터 분석을 통하여 스캐닝 라이다 관측 영역 내에서 $PM_{2.5}$ 의 주요 발생원의 위치 파악하고 주변의 영향성을 파악할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 스캐닝 라이다 관측 영역에서 $PM_{2.5}$ 의 농도가 높은 지역은 감만항과 제강소를 포함하는 구역이었다. 스캐닝 라이다 관측 영역 내에 어코리아 측정 지점인 청학동 지점의 농도는 감만항과 제강소 구역에 비하여 낮은 값을 보이고 있었으며 청학동 사이트 주변인 부산 북항, 영도구의 조선소와 선박 수리소가 위치한 구역들은 청학동 지점과 비슷하거나 약간 낮은 농도 경향을 보였다. 풍향별로는 남풍의 경우에 전 구역을 포함하는 농도가 19.1 ± 8.7 $\mu\text{g}/$

m^3 으로 가장 높은 농도를 보이고 동풍에서는 14.1 ± 11.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도를 보였다. 남풍의 경우에는 도심과 항만에서 발생된 오염물질의 해양으로의 이동을 막는 효과를 일으켜 $PM_{2.5}$ 농도가 높아지고 동풍에서는 해양의 깨끗한 공기가 관측 구역으로 유입되면서 농도가 낮은 것으로 판단된다.

본 연구의 기간인 2022년 3월부터 4월까지의 두 달의 기간만을 분석한 것으로 관측 영역의 일반적인 농도를 대표하기에는 한계가 있지만, 평균적으로 어느 구역이 미세먼지를 많이 발생시키고 농도가 높은지에 대한 정보를 확인할 수 있었다. 또한, 풍향과 풍속에 따라 구역별 농도 변화 추이를 확인할 수 있었다. 본 연구의 분석 사례는 스캐닝 라이다를 이용한 고해상도 미세먼지 농도를 실시간 연속적으로 측정함으로써 관측 대상 지역의 미세먼지 농도 분포, 확산 및 주변에의 영향을 파악할 수 있음을 확인시켜 주었다. 향후 장기 관측이나 인근 지역과 항만으로의 관측 대상 지역 확대가 이루어진다면 부산의 미세먼지 현황을 정밀하게 파악하여 저감과 대책을 위한 정책 수립에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2022년)에 의하여 연구되었음.

References

- Busan Port Authority (BPA) (2022) Busan Port Authority Press Release. <https://www.airkorea.or.kr/portal/web/board/7/1509/?page=14>
- Gupta, P., Doraiswamy, P., Levy, R., Pikelnaya, O., Maibach, J., Feenstra, B., Polidori, A., Kiros, F., Mills, K. (2018) Impact of California fires on local and regional air quality: The role of a low-cost sensor network and satellite observations, *GeoHealth*, 2, 172-181. <https://doi.org/10.1029/2018GH000136>
- Huh, J.-B., Lee, W.-K., Jang, H.-Y., Kim, J.-H. (2020) The manage-

- ment strategies to control ambient fine particles emitted from port facilities and ships in Busan, Policy Research, 2020, 1-154, (in Korean with English abstract).
- Kumar, P., Khare, M., Harrison, R.M., Bloss, W.J., Lewis, A., Coe, H., Morawska, L. (2015) New directions: air pollution challenges for developing megacities like Delhi, Atmospheric Environment, 122, 657-661. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.032>
- Lisetskii, F. (2019) Monitoring of emission of particulate matter and air pollution using lidar in Belgorod, Russia, Aerosol and Air Quality Research, 19, 504-515. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.12.0593>
- Ministry of Environment, National Institute of Chemical Safety (N.I.C.S) (2022) Pollutant release and transfer register, PRTR.
- Nam, H.-S. (2021) '2050 Carbon Neutral City' Transition and Busan's Response Tasks. BDI Policy Focus, 1-12.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2021) Air pollutant emission statistics in 2019.
- Noh, Y.-M., Kim, D.-H., Choi, S.-C., Choi, C.-G., Kim, K.-C., Kim, T.-G., Kim, G.-Y. (2020a) Retrieval of High resolution Fine Particle Mass Concentration Information using Multi-wavelength Scanning Lidar System, Proceedings from the Korean Society for Atmospheric Environment Conference, 154-154.
- Noh, Y.-M., Kim, D.-H., Choi, S.-C., Choi, C.-G., Kim, T.-G., Kim, G.-Y., Shin, D.-H. (2020b) High Resolution Fine Dust Mass Concentration Calculation Using Two-wavelength Scanning Lidar System, Korean Journal of Remote Sensing, 36, 1681-1690, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2020.36.6.3.5>
- Seo, H.-J., Lee, H.-S. (2019) How air pollutants influence on Environmental diseases?: Focused on Seoul Metropolitan Area, Seoul Studies, 20, 39-59, (in Korean with English abstract).
- Wan, Z., Zhu, M., Chen, S., Sperling, D. (2016) Pollution: Three steps to a green shipping industry, Nature, 530, 275-277. <https://doi.org/10.1038/530275a>
- Xian, J., Sun, D., Xu, W., Han, Y., Zheng, J., Peng, J., Yang, S. (2020) Urban air pollution monitoring using scanning Lidar, Environmental Pollution, 258, 113696. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113696>

Authors Information

김재원 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사연구원) (jaewon0106@me.com)

노영민 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 부교수) (nym@pknu.ac.kr)