

Editorial

실내 외 미세먼지 측정 및 관리 기술 동향

김재진 ¹⁾ · 최원식 ^{2)†} · 김진수 ³⁾ · 노영민 ⁴⁾ · 손운석 ⁴⁾ · 양민준 ⁵⁾

Indoor and Outdoor Particulate Matter: The Current and Future in Monitoring, Assessment, and Management

Jae-Jin Kim ¹⁾ · Wonsik Choi ^{2)†} · Jinsoo Kim ³⁾ ·
Youngmin Noh ⁴⁾ · Youn-Suk Son ⁴⁾ · Minjune Yang ⁵⁾

Abstract: Air pollution is one of the most severe threats to society globally due to the rapid expansion of urbanization and industrialization. Particularly, particulate matter (PM) pollution was recently designated as a social disaster by the Korean government because of increases in public concerns and the accumulation of scientific evidence that links high levels of PM_{2.5} (PM smaller than 2.5 μm in diameter) to a long list of adverse health effects. Atmospheric PM concentrations can also affect the indoor PM levels to which people are exposed most of the time. Thus, understanding the characteristics of indoor and ambient PM pollution based on measurements, model simulations, risk assessments, and management technologies is inevitable in establishing effective policies to mitigate social, economic, and health costs incurred by PM pollution. In this special issue, we introduce several interesting studies concerning indoor and outdoor PM from the perspective of monitoring, assessment, and management being conducted by i-SEED (School of Integrated Science for Sustainable Earth & Environmental Disaster at Pukyong National University) and SPMC (School Particulate Matter Center for Energy and Environmental Harmonization). We expect that this special issue can improve our understanding of the current and future of indoor and outdoor PM pollution, integrating the results from interdisciplinary research groups from various academic fields.

Key Words: air pollution, particulate matter, PM_{2.5}, health effect, indoor and outdoor air quality

요약: 대기오염은 최근 급속한 인구증가와 산업화 등으로 인해 인류가 해결해야 할 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히 미세먼지 노출에 따른 질병 사례들의 증가와 대기 질 정보에 대한 국민의 관심 증대로 인해 미세먼

Received December 9, 2020; Revised December 14, 2020; Accepted December 15, 2020; Published online December 28, 2020

¹⁾ 부경대학교 환경대기과학과 정교수 (Professor, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University)

²⁾ 부경대학교 환경대기과학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University)

³⁾ 부경대학교 공간정보시스템공학과 부교수 (Associate Professor, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University)

⁴⁾ 부경대학교 환경공학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University)

⁵⁾ 부경대학교 지구환경과학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University)

† Corresponding Author: Wonsik Choi (wschoi@pknu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지는 환경문제를 넘어 사회적 재난 수준의 심각한 이슈로 대두되고 있다. 아울러 대기 중 미세먼지 농도는 실내 미세먼지 농도에 밀접하게 관여하여 실내 공기질의 악화를 야기시킬 수 있다. 따라서 실내의 미세먼지 측정, 모델링, 기여도 평가를 통한 오염 특성을 이해하고, 이를 과학적으로 규명하는 것은 매우 중요하다. 본 특별호는 부경대학교 i-SEED 지구환경교육연구단과 학교미세먼지관리 기술개발사업단에서 진행하고 있는 다양하고 흥미로운 실내의 미세먼지 측정과 관리 기술에 대한 여러 연구들을 소개한다. 이를 통하여 실내의 미세먼지 측정과 관리 기술에 대한 현 주소를 파악하고 참여 연구그룹의 연구 결과에 대한 정보 공유에 본 특별호가 기여하길 기대한다. 더불어 미세먼지에 관련한 지속적 연구주제 발굴과 국가적인 지원을 이끌어 내기 위한 관련 전문가들의 노력을 기대한다.

1. 서론

급속한 인구증가와 함께 도시화와 산업화 등으로 인해 인류는 다양한 대기오염물질로부터 직접적으로 노출되고 있다(Kumar *et al.*, 2014). 대기오염물질 중 최근 특히 문제가 되고 관심이 증가하는 것은 입자상 물질이다. 미세먼지(particulate matter, PM)는 호흡기를 통해 폐나 순환기계로 유입되어 인체에 부정적인 영향을 미쳐 각종 질환의 원인이 된다(Ristovski *et al.*, 2012). 이에 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 미세먼지를 1군 발암물질로 분류하고 있다.

오늘날 산업 및 주거환경의 변화로 인해 실내에서 생활하는 시간이 증가하고 있고(Klepeis *et al.*, 2001), 현대인들이 실내에서 보내는 시간은 하루 24시간 중 평균 80%에 이르는 것으로 보고되었다(Choi and Ko, 2013). 미세먼지는 실내에서 위험한 오염물질로 작용하여 여러 질병을 유발할 수 있지만, 사람마다 그 체감도가 다르기 때문에 대기오염에 비해 그 중요성에 대한 인식이 상대적으로 낮다. 지금까지 미세먼지의 물리·화학적 특성, 배출 원 특성, 실내 또는 실외 대기오염물질 농도 특성 등에 관련한 국내외 연구는 활발히 진행된 반면, 외부환경과 활동도 등에 따른 미세먼지의 오염 특성을 규명하기 위한 노력은 미흡했다. 특히 학생들의 경우 성인에 비해 대기오염물질에 더욱 민감한 것으로 알려져 있고(Son, 2020), 학생들이 하루 중 많은 시간을 학교에서 보내기 때문에 실내외 미세먼지 농도 간의 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다. 실내 외 공기 질 통합 관리를 위한 국내 연구가 전무한 현 시점에서 실내외 미세먼지 발생 특성을 이해하고, 이를 과학적으로 규명하기 위한 연구와 기술개발은 꼭 필요한 상황이다.

미세먼지에 대한 감수성이 매우 큰 학생들을 위한 미세먼지 관리의 요구와 필요성이 대두됨에 따라 과학기술정보통신부와 교육부는 학교 미세먼지 관리사업의 일환으로 “에너지·환경 통합형 학교 미세먼지관리 기술개발” 사업을 2019년 6월부터 수행하고 있다. 이 연구는 2024년까지 학교 미세먼지 발생 관련 모든 특성 규명과 학생 건강영향평가 등의 연구를 토대로 최적의 교육시스템을 마련하기 위한 기술개발을 목표로 하고 있다. 본 특별호에 참여한 부경대학교 i-SEED 지구환경교육연구단의 연구팀들은 이 사업에서 외부환경과 활동도를 바탕으로 학교 미세먼지 오염 특성을 규명하려는 시도를 하고 있다.

이번 특별호는 실내 외 미세먼지 측정, 모델링, 기여도 평가 기술에 관련한 연구를 돌아보고, 최근 부경대학교 i-SEED 지구환경교육연구단과 학교미세먼지관리 기술개발사업단에서 활발히 진행하고 있는 연구 내용과 결과를 공유하고자 기획되었고, 이에 관련한 총 8편의 논문이 소개된다. 먼저 실내외 미세먼지 측정을 통한 학교 실내 공기질의 특성과 I/O ratio 분석 결과를 소개하고 있다. 특히 532와 1064 nm 두 파장 관측 채널로 수평으로 360° 스캐닝 관측이 가능한 스캐닝 라이다 시스템 개발과 이를 활용한 질량 농도 산출 기법의 소개로 고농도 미세먼지 발생원의 모니터링에 있어 유용한 정보 제공이 가능하다고 평가된다. 도심지 학교 주변의 건물 밀집 지역을 대상으로 상세 흐름과 초 미세먼지 농도 분포 특성 분석을 통해 도시 지역에서 지형과 건물 효과를 반영한 현실적인 기상 장과 초 미세먼지 농도장의 모의 가능성을 제시한다. 대기 중 미세먼지를 구성하는 주요 수용성 이온이 수질에 미치는 영향과 다변량 통계분석을 이용한 기상인자와 미세먼지 농도 간 관계에 대한 연구 결과와 더불어 머신 러닝 알고리즘을 적

용한 미세먼지 예측에 이르기까지 실내외 미세먼지 측정과 관리를 위한 다양한 연구가 소개되어 있다.

2. 실내외 미세먼지 측정 및 관리 기술 동향

실내외 미세먼지 오염 특성을 규명하기 위해서 주변 환경에 따른 미세먼지 범주화 자료를 바탕으로 실내외 미세먼지 측정 기법에 대한 이해에서부터 실내외 미세먼지 발생원 여부 확인과 외부 미세먼지의 기여도 평가 기술, 그리고 미세먼지 유입을 저감시킬 수 있는 주변 영향과 시설물 증재 효과를 평가하고 모니터링 할 수 있는 지속 가능한 분석 기술이 필요하다. 본 특별호는 먼저 학교 내부와 외부에서 측정된 미세먼지 농도를 바탕으로 농도 비(I/O ratio) 분석을 통한 실내외 공기 질 특성을 소개하였다. Kim *et al.* (2020)은 서울 내 초등학교를 대상으로 실내 외에서 측정된 PM 농도를 분석하여 초등학교의 실내공기질의 특성을 이해하기 위한 연구를 수행하였다. 대상 초등학교에서 PM₁₀은 대기 질보다 내부 발생원의 영향이 더 크며, PM_{2.5} 및 PM₁과 같은 미세입자는 내부 발생원보다는 외부 대기질의 유입이 더 큰 영향을 미친다는 것을 밝혔다. 이러한 결과를 통해 초등학교의 실내외 미세먼지의 거동특성과 발생기원에 대하여 충분한 고찰을 제공할 수 있으며, 추후 실내공기오염에 취약한 시설을 대상으로 실시간 측정 및 관리를 위한 기초자료로서 가치가 있을 것으로 기대된다. Kang *et al.* (2020b)은 평택과 부산의 초등학교를 대상으로 학교 주변 지역과 교실 내부의 16지점에 자체 제작한 미세먼지 센서노드를 설치하여 학교 내부와 외부의 농도비(I/O ratio) 변화를 측정하였다. 이 측정 결과를 다양한 건물에 대해 실내외 미세먼지 동시 측정을 통해 I/O ratio를 보고한 국외 선행연구 결과의 리뷰와 함께 비교하였다. 총 30여 건의 선행연구에 포함된 144건의 사례를 실내활동, 측정계절, 건물용도, 주변환경에 대하여 다양한 세부항목별로 분류하여 I/O ratio를 비교한 결과, 실내외의 PM₁₀은 주변 외기의 농도와 함께 특히 물리적 활동에 따른 재비산 같은 실내발생원의 영향을 받는 반면, PM_{2.5}는 실내 연소 원(예를 들면, 흡연이나 요리 활동)이 없는 경우 실내활동보다는 외기의 영향을 더 받는 것으로 제시하였고 부산과 평택의 초등학교 측정

결과 역시 유사한 경향성을 나타내었다. 또한 학생활동이 있는 시간에 창문을 닫고 공기청정기를 가동하는 것이 실내외 미세먼지의 저감에 효율적이며, 강제환기가 창문개방과 같은 자연환기보다 실내외 미세먼지의 저감에 효율적인 것으로 제시하였다. 이러한 결과들을 종합하여 학생들의 물리적활동이 예상되는 교실 내 공기 질 개선을 위해서는 PM₁₀의 농도에 주의를 기울일 것과 실내 PM_{2.5} 농도에 대해서는 외기와의 차단에 주의를 기울이며 학교의 환기방식을 기존의 자연환기 방식보다는 강제환기 방식으로 전환하는 것이 효율적일 수 있음을 제시하였다. 이 연구는 많은 시간을 교실에서 보내는 학생들의 미세먼지 노출 저감을 위한 정책을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있으며 그 방향성을 제시하는 것으로 평가된다.

최근 인공위성, 라이더 등 원격탐사 기술을 이용하여 대기오염물질에 대한 시공간적 한계를 극복하기 위한 연구가 이루어지고 있으나(Choi *et al.*, 2020; Joo *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019), 원격탐사 기술로 산출된 광학적 수치를 부유입자 크기 별로 구분하여 각각의 질량 농도를 산출할 수 있는 기술개발 사례는 전 세계적으로 드물다. Noh *et al.* (2020)은 532와 1064 nm 두 파장 관측 채널을 구비하고 수평으로 360° 스캐닝 관측이 가능한 스캐닝 라이더 시스템을 개발하였다. 532와 1064 nm에서 산출되는 두 파장에서의 후방산란계수를 이용하여 미세먼지를 PM_{2.5-10}(조대)와 PM_{2.5}(미세)입자로 구분하고 각각의 질량농도를 산출할 수 있는 분석법도 개발하여 스캐닝 라이더 시스템의 데이터 분석에 적용하였다. 개발된 스캐닝 라이더를 이용하여 2020년 8월 13일 09:00부터 09:15분까지 울산 온산공단에서 관측을 수행하였다. 관측을 통하여 공단내에서의 미세먼지 분포가 공간별로 높은 차이를 보여 각각 22 - 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 7-78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 보임을 확인하였다. 라이더 관측으로 분석된 결과는 라이더 관측 영역 주변의 지상에서 측정된 질량농도와 유사한 값을 보였으며, 공장 등에서 배출되는 지점에서 PM_{2.5}가 각각 80-110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 60-78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 고농도가 측정되는 사례를 확인하였다. 본 연구를 통하여 개발된 스캐닝 라이더 시스템과 질량농도 산출 분석법은 공단지역의 배출원 감시와 배출량 산정, 농촌 지역 불법 소각 감시와 현황 파악에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

최근 도시지역의 미세먼지 확산과 시설물 중재 효과를 조사하기 위해, 수~수십 미터의 높은 공간해상도와 초 단위의 시간 해상도를 채용할 수 있는 전산유체역학 (computational fluid dynamics, CFD) 모델을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Kang *et al.*, 2020a; Kim *et al.*, 2018, Kwon *et al.*, 2020; Mun and Kim, 2018; Mun and Kim, 2020). Park *et al.* (2020c)와 Park *et al.* (2020d)는 도심지 학교 주변의 건물 밀집 지역을 대상으로 상세 흐름과 PM_{2.5} 농도 분포특성 연구를 수행하였다. 기상청에서 협업으로 운영하는 국지예보시스템(local data assimilation and prediction system, LDAPS)이 매시간 예측한 기상장과 학교 주변에 위치한 도시대기측정소에서 매시간 측정된 PM_{2.5} 농도를 CFD 모델의 초기·경계 자료로 사용하였다. 건물 옥상과 도로변에서 측정된 기상 자료와 PM_{2.5} 농도를 이용하여 수치 모의 결과를 검증하고, 도로 배출 유·무에 따른 PM_{2.5} 농도 분포 특성을 분석하였다. 도로 배출이 건물 밀집 지역의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해, PM_{2.5}의 연간 시·군·구별, 배출 원소 별, 연료 별 도로이동오염원·비산먼지 배출량 자료와 월별·일별·시간 별 배출 계수를 이용하여 부산의 단위 면적당 시간 별 PM_{2.5} 배출량을 산정하였다. LDAPS-CFD 접합 모델은 상세한 지형과 건물 효과를 반영하여 측정 결과와 유사한 풍향과 풍속을 수치 모의하였다. 도로 배출을 포함했을 경우, 수치 모의한 PM_{2.5} 농도는 측정된 PM_{2.5} 농도와 유사하였다. 그리고 통계 검증 지수를 이용해 수치 모의 성능을 분석하였다. 도로로부터의 미세먼지 배출량이 많은 출·퇴근 시간대(2020년 6월 22일 07시와 19시)에 대해 상세 흐름과 PM_{2.5} 농도 분포 특성을 조사하였다. 07시에는 경계 지역에서 유입되는 동북풍이 수치 도면 내에 위치한 지형과 건물에 의해 변화하였다. 이에 따라 PKNU-SONIC 지점에서 측정된 동남동풍을 잘 모의하였다. 19시에는 경계 지역의 남동풍이 풍향 변화없이 PKNU-SONIC 지점까지 유입되면서, 측정 풍향을 잘 모의하였다. 학교 건물에서 수치 모의된 PM_{2.5} 농도는 도로 배출 영향을 크게 받지 않았지만, 도로변에서는 도로 배출 영향이 크게 나타났다. 도로 배출을 고려한 경우, 풍속이 약한 학교 북쪽 도로와 긴 도로 협곡에 위치한 학교 서쪽 도로에서 PM_{2.5} 농도가 높았고, 건물 밀집도가 낮은 학교 동쪽 도로에서는 PM_{2.5} 농도가 낮았다. 이 연구는 건물 밀집 지역의 상세 흐름

과 PM_{2.5} 농도 분포가 건물과 지형에 따라 매우 복잡하게 나타나고, 건물 구조와 배치에 따라 지역별 도로 배출 영향이 차별적으로 나타날 수 있음을 수치 모의하였다. 본 연구에서 제시한 상세 규모의 수치 모의 기법은 도시 지역에서 지형과 건물 효과를 반영한 현실적인 기상장과 초 미세먼지 농도 장을 모의하고, 지역적 특성에 따른 3차원적인 기상-대기 질 정보를 제공하는데 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

지금까지 기상청 주요 수치모델인 전지구예보모델(global data assimilation and prediction system, GDAPS)과 LDAPS 내 수문기상인자를 이용한 미세먼지 농도 추정 에 대한 몇몇 보고가 있었다(Jeong *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2019). Park *et al.* (2020a)은 부산지역을 대상으로 강우 강도에 따른 대기 중 PM₁₀ 저감효과와 대기 중 PM₁₀을 구성하는 주요 수용성 이온이 수질에 미치는 영향을 평가하였다. 자체 제작한 PM 센서를 이용하여 측정된 대기 중 PM₁₀ 농도와 집수 장치를 이용하여 샘플링 된 총 282개의 빗물 샘플 수질을 비교·분석한 결과, 강우 지속에 따라 대기 중 PM₁₀ 농도가 저감되었으며, 빗물의 pH는 지속적으로 증가하고, 전기전도도(electrical conductivity, EC)와 수용성 이온 농도는 감소하는 패턴을 보였다. 이러한 경향은 강우 강도에 따라 상이하게 나타났다. 강우 강도가 >7.5 mm/h인 경우, 시간에 따른 대기 중 PM₁₀ 농도의 저감효율은 높게 나타났으며, 빗물의 pH는 지속적으로 증가하고 EC와 이온 농도는 상대적으로 감소하였다. 반면, 강우 강도가 <5 mm/h인 경우, 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 내 이온농도의 저감효율은 상대적으로 낮았으며, 시간에 따른 빗물 수질의 일정한 변화 패턴은 확인할 수 없었다. Park *et al.* (2020b)은 다변량 통계분석을 이용하여 다양한 기상인자가 대기 중 PM₁₀ 농도에 미치는 영향을 분석하고, 대기 중 PM₁₀ 농도에 따른 빗물 수질 변화를 평가하였다. 총 11번의 강우 이벤트를 대상으로 기상자료, PM₁₀ 모니터링 자료, 빗물의 수질 분석 자료를 이용하여 주성분 분석과 피어슨 상관 분석 결과, 누적강우량과 강우 강도가 대기 중 PM₁₀ 농도 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 강우 강도가 >5 mm/h인 경우, 누적 강우량에 따른 대기 중 PM₁₀ 농도는 유의한 음의 상관관계를 보였으며, 대기 중 PM₁₀ 농도가 빗물의 수질 특성에 영향을 미치는 요인으로 작용하였다. 반면, 강우 강도가 <5 mm/h인 경우, 누적 강

우에 따른 대기 중 PM₁₀ 저감 영향은 미비하였으며, 대기 중 PM₁₀ 농도와 빗물 수질 간 통계적으로 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 부산지역의 대기 중 PM₁₀ 농도와 기상인자 및 빗물 수질에 대한 두 연구의 결과는 대기 특성과 수문기상학적 요인 중 하나인 경우에 대한 복합적 관계 특성을 해석할 수 있는 지표가 될 것으로 기대된다. Son and Kim (2020)은 에어코리아에서 제공하는 PM₁₀ 농도와 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 기상인자를 바탕으로 대표적인 머신 러닝 모델인 support vector machine (SVM)과 random forest (RF)를 이용하여 서울시 PM₁₀ 농도를 예측하고 그 성능을 평가하였다. 모델의 훈련과 검증을 단계적으로 수행한 결과, 앙상블 모델인 RF의 예측 성능이 가장 높게 나타났다. 입력 자료로 사용된 9개 기상인자 중 상대습도와 황사발생유무가 RF 모델의 예측 성능에 가장 크게 기여하였고, 최고기온과 평균풍속은 상대적으로 낮은 기여도를 나타냈다. 또한 관악구, 강남대로, 종로구와 같이 인접한 위치에 기상관측소(automatic weather system, AWS) 또는 모델 학습을 위한 대기오염측정망(air quality monitoring sites, AQMS)가 소재하는 경우 머신 러닝 모델의 예측 정확도가 높고, 반대의 경우인 용산구에서 모델의 정확도가 가장 낮은 점에 비춰볼 때, AQMS와 AWS 간 인접성과 훈련 데이터 셋의 공간적 분포는 PM₁₀ 농도 예측에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 소개했다. 또한 PM₁₀ 농도에 유의미하게 영향을 미치는 AOD(aerosol optical depth), NDVI(normalized difference vegetation index), 토지피복 등을 고려한 다양한 시도를 통해 PM₁₀ 농도 예측의 정확도가 보다 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2019M3E7A1113103). 본 사설에 소개된 부경대학교 i-SEED 지구환경교육연구단 연구 그룹에 다시 한번 감사를 전합니다. 또한 본 특별호 발간을 위해 많이 노력해주신 심사위원들과 대한원격탐사학회 관계자들과 깊이 감사드립니다.

References

- Choi W. E., H. L. Lee, C. U. Choi, Y. W. Lee, and Y. M. Noh, 2020. Investigation of O4 Air Mass Factor Sensitivity to Aerosol Peak Height Using UV-VIS Hyperspectral Synthetic Radiance in Various Measurement Conditions, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2-1): 155-165 (in Korean with English Abstract).
- Choi, Y. J. and K. J. Ko, 2013. A Study on Seoul Citizens' Perception and Management Behavior of Indoor Air Quality in Homes, *The Seoul Studies*, 14(2): 131-144 (in Korean with English abstract).
- Jeong, Y. M., Y. J. Youn, S. B. Cho, S. Y. Kim, M. R. Huh, and Y. W. Lee, 2020. Prediction of Daily PM₁₀ Concentration for Air Korea Stations Using Artificial Intelligence with LDAPS Weather Data, MODIS AOD, and Chinese Air Quality Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(4): 573-586 (in Korean with English abstract).
- Joo, S. H., N. Dehkhoda, and Y. M. Noh, 2020. A Study on the Characteristic and AOD Variation according to Aerosol Types Using AERONET Sunphotometer Data in Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2-1): 93-101 (in Korean with English Abstract).
- Kang, G., J. J. Kim, and J. B. Lee, 2020a. A Numerical Study on the Effects of Buildings and Topography on the Spatial Distributions of Air Pollutants in a Building-Congested District, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2-1): 139-153 (in Korean with English Abstract).
- Kang, J. W., C. J. An, and W. S. Choi, 2020b. Indoor and outdoor levels of particulate matter with a focus on I/O ratio observations: Based on literature review in various environments and observations at two elementary schools in Busan and Pyeongtaek, South Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1691-1710 (in Korean with English Abstract).

- Kim, D. H., Y. S. Son, T. J. Lee, and Y. M. Jo, 2020. A Comparative Study on concentrations of Indoor and Outdoor Particulate Matters in Elementary Schools, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1721-1732 (in Korean with English Abstract).
- Kim, D. J., J. W. Wang, S. J. Park, and J. J. kim, 2018. A Study on the Effects of Wind Fence on the Dispersion of the Particles Emitted from the Construction Site Using GIS and a CFD Model, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(5): 763-775 (in Korean with English Abstract).
- Kim, D. W., H. L. Lee, J. S. Park, W. E. Choi, J. W. Yang, and H. W. Kang, 2019. Ambient CO₂ Measurement Using Raman Lidar, *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(6-3): 1187-1195 (in Korean with English Abstract).
- Klepeis, N. E., W. C. Nelson, W. R. Ott, J. P. Robinson, A. M. Tsang, P. Switzer, J. V. Behar, S. C. Hern, and W. H. Engelmann, 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3): 231-252.
- Kumar, P., L. Morawska, W. Birmili, P. Paasonen, M. Hu, M. Kulmala, R. M. Harrison, L. Norford, and R. Britter, 2014. Ultrafine particles in cities, *Environ. Int.*, 66: 1-10.
- Kwon, A. R., S. J. Park, G. Kang, and J. J. Kim, 2020. Carbon Monoxide Dispersion in an Urban Area Simulated by a CFD Model Coupled to the WRF-Chem Model, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(5-1): 679-692 (in Korean with English Abstract).
- Lee, S. C., J. H. Jeong, J. M. Park, H. H. Jeon, and M. H. Choi, 2019. Estimating Fine Particulate Matter Concentration using GLDAS Hydrometeorological Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(6-1): 919-932 (in Korean with English Abstract).
- Mum, D. S. and J. J. Kim, 2018. A Study on the Flow Changes around Building Construction Area Using a GIS Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-1): 879-891 (in Korean with English Abstract).
- Mum D. S. and J. J. Kim, 2020. High-Resolution Flow Simulations Around a Steep Mountainous Island in Korea Using a CFD Model with One-way Nested Grid System, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(4): 557-471 (in Korean with English Abstract).
- Noh, Y. M., D. H. Kim, S. C. Choi, C. G. Choi, T. G. Kim, G. H. Kim, and D. H. Shin, 2020. High resolution fine dust mass concentration calculation using two-wavelength scanning lidar system, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1681-1690 (in Korean with English Abstract).
- Park, H. M., M. H. Byun, T. Y. Kim, J. J. Kim, J. S. Ryu, M. J. Yang, and W. S. Choi, 2020a. The washing effect of precipitation on PM₁₀ in the atmosphere and rainwater quality based on rainfall intensity, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1669-1679 (in Korean with English Abstract).
- Park, H. M., T. Y. Kim, and M. J. Yang, 2020b. The effect of meteorological factors on PM₁₀ depletion in the atmosphere and evaluation of rainwater quality, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1733-1741 (in Korean with English Abstract).
- Park, S. J., W. S. Choi, and J. J. Kim, 2020c. A Numerical Study on the Characteristics of Flows and Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Distributions in an Urban Area Using a Multi-scale Model: Part I – Analysis of Detailed Flows, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1643-1652 (in Korean with English Abstract).
- Park, S. J., W. S. Choi, and J. J. Kim, 2020d. A Numerical Study on the Characteristics of Flows and Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Distributions in an

- Urban Area Using a Multi-scale Model: Part II – Effects of Road Emission, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1653-1667 (in Korean with English Abstract).
- Ristovski, Z. D., B. Miljevic, N. C. Surawski, L. Morawska, K. M. Fong, F. Goh, and I. A. Yang, 2012. Respiratory health effects of diesel particulate matter, *Respirology*, 17(2): 201-212.
- Son, S. H. and J. S. Kim, 2020. Evaluation and Predicting PM₁₀ Concentration using Multiple Linear Regression and Machine Learning, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3): 1711-1720 (in Korean with English Abstract).
- Son Y. S., 2020. Particulate Matter and Influencing Factors in Domestic Elementary Schools, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2): 153-170 (in Korean with English abstract).