



논문

LOF 이상치 알고리즘을 활용한 국내 초미세먼지 발생 특성 탐지 분석 Detection of High-level PM_{2.5} Occurrences Applying Local Outlier Factor (LOF) Algorithm

이용찬, 권용범¹⁾, 이희관*

인천대학교 대학원 환경에너지공학과, ¹⁾한국생산기술연구원 한러혁신센터

Yongchan Lee, Yongbum Kwon¹⁾ and Heekwan Lee*

Department of Environment and Energy Engineering, Graduate School,
Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

¹⁾Korea-Russia Innovation Center, Korea Institute of Industrial Technology,
Incheon, Republic of Korea

접수일 2020년 12월 24일
수정일 2021년 1월 31일
채택일 2021년 2월 2일

Received 24 December 2020
Revised 31 January 2021
Accepted 2 February 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)32-835-4752
E-mail : airgroup@inu.ac.kr

Abstract Air quality management is significant to guarantee public health and ecosystem. For the effective control and management of atmospheric environment through different forms of approaches, analyzing of monitoring data and emission inventory should be firstly considered. Air monitoring stations and their real-time data play important roles to understand pollution circumstance around certain region. However, many of atmospheric researchers frequently face difficulties to overview large volumes of monitoring data, because it requires a lot of time and efforts. Local outlier factor (LOF) broadly applied in different research fields is useful data analysis technique to discover particular values have different pattern or/and characteristic in a data group. The authors in this paper has attempted to apply the LOF algorithm to one-year of air quality monitoring data covers the whole Korean territory for suggesting easy way to preliminarily identify the high-level of PM episodes as their occurrence causes *i.e.* yellow dust, non-yellow dust and domestic wildfire events. As a result, it was effective to figure out particular LOF ranges as the high-level of PM_{2.5} episodes, because LOF values show comparatively high numbers when concentrations of PM_{2.5} are rapidly increased or decreased due to LOF algorithm characteristic. The attempt of this research has found the LOF algorithm would be useful to apply as preliminary methodology for understanding which certain episode has been occurred in tremendous data group. Therefore, it would bring further consideration for effectively analyzing the environmental big data in order to establish the air quality management strategy to environmental scientists and policy makers.

Key words: Find dust, Big data analysis, Wild fire, Disaster response, Regional air quality

1. 서론

고농도 미세먼지 사례에 대한 사회·경제적 심각성이 국내외적으로 대두됨에 따라 다양한 관점에서의 적극적인 대응 필요성이 점차 증대되고 있다. 국내에서는 미세먼지와 관련된 키워드 및 언론보도가 온라인 포털 검색 순위의 상위권을 차지하고 있는데 (Rhee and Kim, 2018), 이는 과거 정치·사회 문제에

편중되었던 국민 관심사가 환경적 요인 및 건강 피해의 요인 등에 따라 얼마나 많은 변화가 있었는지 반증하고 있다. 이에 따라 우리 정부는 미세먼지 비상저감조치 시행, 미세먼지 예·경보 발령, 고농도 미세먼지 위기관리 표준 매뉴얼 작성 등 국민 건강과 권익 향상을 위한 지속적인 노력을 기울이고 있다 (Kwon *et al.*, 2019; Kwon, 2018; Khan *et al.*, 2017).

국립환경과학원은 효과적인(지역) 대기질 관리 및

개선책 마련을 위하여 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)에 근거한 국가 대기오염물질 배출량 보고서를 매년 발간하고 있으며, 이를 기초로 하여 수행된 국내 대기오염물질 배출량 추이와 지역별·배출 부문별 기여도 및 배출량 산정 체계 고도화에 관한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다(Lim *et al.*, 2018; Kim, 2017; Choe and Lee, 2015; Kim, 2006). 배출량 보고서에 따르면 초미세먼지 배출량을 산정하기 시작한 2011년부터 2014년까지의 국내 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 연간 배출량은 전반적으로 감소하였으나, ‘비산먼지’ 및 ‘생물성연소’가 공식 배출원으로 포함된 2015년과 2016년은 그 추이가 대폭 증가하였다(NIER, 2019). 이는 배출량 산정 체계에 따라 국내 배출량 감축 정책 및 지역대기 관리 고도화 방안이 달라질 수 있다는 것을 암시하기도 한다. 반면, 대기질 농도의 관점으로 검토해 보면 대부분의 연구에서 국내 고농도 미세먼지 사례 발생 원인은 크게 장거리 오염물질 등 국외로부터 기인한 영향, 국내 배출량에 의한 영향으로 규명하고 있는데, 이 밖에도 지리적, 경제·산업구조, 기후적 요인에 따라 고농도 발생 특성이 좌우된다(Kim and Kang, 2018; Park and Shin, 2017).

예를 들어, 국외로부터 기인한 미세먼지와 초미세먼지는 난방 및 복사풍이 빈번한 봄철 및 겨울철에 주로 국내로 유입하게 되는데, 이때 대기의 흐름이 정체되어 있는 경우 고농도 사례가 발생된다(Ryoo *et al.*, 2019; Cho *et al.*, 2016). 국외 미세먼지의 국내 기여도는 계절이나 대기질 모델링 조건에 따라 차이가 있으나, 대략 30% 이상으로 보고되고 있다(Bae *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016). 국내 배출량에 의한 미세먼지 영향의 경우 화력발전소, 산업연소, 도로/비도로 오염원 등 배출 부문별 그 원인이 다양하지만 이로 인한 국내 미세먼지 고농도 발생 사례는 주로 지형적, 기상 및 기후적 특성이 좌우한다는 분석이 지배적이다(Yu *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2018; Jeon, 2012). 이 밖에도 대기오염물질의 농도를 비정상적으로 상승시키는 요인으로 대형 산불 및 화재를 예로 들 수 있겠다.

‘비산먼지; ‘도로이동오염원’과 비교하면 우려할 만큼 많은 배출량 규모는 아니지만 대형 산불 등 화재 재난의 특성상 대기오염물질이 단시간에 폭발적으로 발생하여, 인근 지역의 대기오염 농도를 급격하게 상승시킨다는 우려를 낳고 있어 관련 대응 방안이 시급히 요구되고 있는 실정이다(Lee *et al.*, 2019; Mateos *et al.*, 2019; Langmann *et al.*, 2009). 특히, Mateos *et al.* (2019)는 수 년 동안의 산불로부터 기인한 초미세먼지와 주변 지역 주민 건강 피해를 분석하여 그 상관관계 및 인체 위해의 심각성을 제기하기도 하였다.

현재 정부가 추진하고 있는 미세먼지 관리 종합대책과 같은 범 정부차원의 미세먼지 대응 정책은 연평균 미세먼지 농도 감축에 그 목적이 집중되어 있고(Hwang, 2018), 민간부문의 의무적 참여 근거를 담고 있는 『미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법』은 높아진 국민적 미세먼지 체감을 얼마나 감소시킬 수 있을지 관심을 모으고 있다(Yeo *et al.*, 2019). 특히, 『재난 및 안전관리 기본법(재난안전법)』에서는 『미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법』에 따라 미세먼지로 인한 피해를 사회 재난으로 규정하면서 그에 따른 배출 부문별 저감 전략 수립, 대기농도 측정 데이터 분석 및 관리, 대기질 예측 시스템 구축 등 더욱 효과적이고 실효성 있는(지역) 대기질 대응계획 마련에 활용될 수단이 절실히 요구되고 있다. 국민들의 대기환경적 불안 요소를 해소하기 위해서는 배출 부문별·오염물질별 배출량 저감 전략과 고농도 사례 발생 시 국민의 안전을 위한 체계적 대응체계의 마련도 중요하다. 그러나 전국적으로 수백여 곳에 달하는 도시대기측정소에서 수집되는 대응량 대기농도 측정 데이터의 효과적인 분석과 고농도 발생 기간에 대한 대기거동 특성 등 효율적인 대기질 관리와 측정 자료 분석을 위한 요소적 수단의 필요성은 아직 주목받지 못하고 있다.

과거 국내 지역별 대기오염 추이와 발생 특성에 대한 연구는 오랫동안 이루어졌지만, 다수의 연구가 고농도 추이와 발생 원인, 부문별 기여 정도 및 지역 연관성 등의 고찰에 그쳤다(Kim *et al.*, 2020; Yeo and

Kim, 2019; Choi *et al.*, 2018; Kang and Lee, 2015; Kim and Seo, 2013; Lee *et al.*, 2005). 수 년 혹은 수십 년 동안 수집된 대기 측정 자료를 분석하기 위해서는 적지 않은 시간과 비용이 필요할 뿐만 아니라 분석의 신뢰성과 객관성 또한 함께 요구된다. 때문에 방대한 규모의 대기 측정 자료의 더욱 효과적인 분석 결과 도출을 위한 사전적 방법을 활용하여 대기질 추이가 평소와 다른 수준인 경우와 그 특성을 탐지할 수 있다면, 이를 바탕으로 한 실효성 있는 대기질 관리 방안 마련을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 어려움의 해결 방안 제시를 위하여 대용량 대기오염물질 측정 농도 자료의 효과적인 관리와 특정 고농도 현상에 대한 객관적 판별 방법 목적의 요소적 수단을 제시하고자 하였다. 도시대기측정망의 초미세먼지 측정 자료를 활용하여 특정 초미세먼지 고농도 사례 선정 및 대기질 추이와 그 특성을 분석하였는데, 고농도 사례는 i) 황사로 인한 경우, ii) 황사를 제외한 장거리 이동오염물질 영향으로부터 기인한 경우, iii) 국내에서 발생한 대규모 재난 발생(산불)로 인한 경우로 구분하였다. 본 연구에서 선택한 초미세먼지 고농도 발생 특성이 뚜렷하게 나타났던 2018년 10월~2019년 9월 동안의 데이터를 활용하여 고농도 사례별 초미세먼지 농도 추이, 지속시간, 영향범위 등의 특징도 함께 분석하였다. 최종적으로는 시공간적 분석 결과를 바탕으로 과거 측정된 대기 농도 자료 중 앞서 분석한 고농도 사례를 탐지할 수 있는 요소적 수단 중 하나인 LOF (Local Outlier Factor) 알고리즘을 적용하여 객관적 방법으로 활용할 수 있는지에 대한 고찰을 진행하였다. 따라서 본 연구에서 제시하고자 하는 대용량 대기질 자료의 사전적 탐지 기법은 향후 국가 대기질 개선 및 대응체계의 고도화를 위한 기초 수단으로서의 활용가능성이 높을 것으로 기대한다.

2. 연구자료 및 방법

국내 초미세먼지 고농도 사례 발생 시 사례별 농도

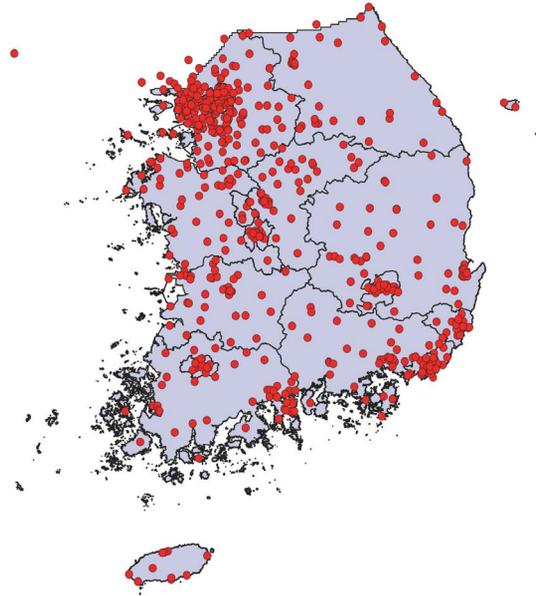


Fig. 1. Urban air quality monitoring stations in South Korea (www.airkorea.or.kr).

추이 분석을 위하여 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 2018년 10월~2019년 9월 간 1년 동안의 도시대기측정망의 초미세먼지 1시간 평균 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 측정 자료를 활용하였다. 단일 도시대기측정소에서 1년 동안 수집하는 오염물질별 1시간 평균 농도 자료는 8,760건이며, 2020년 10월 기준 전국적으로 459개 도시대기측정소가 설치된 것을 고려하면 (그림 1), 우리나라 대기오염물질별 연간 1시간 평균 농도 자료의 규모는 상당히 많은 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 우선 국내 초미세먼지 고농도 사례를 발생시키는 원인으로 꼽히는 i) 황사로 인한 영향, ii) 황사를 제외한 장거리 이동오염원에 의한 영향, iii) 이 밖의 국내 특정 상황(산불)에 따른 영향을 예로 들어 상황별 대기오염 발생 특성에 대하여 분석하였다. 단, 시베리아 등 국외에서 발생한 대규모 산불 발생으로 인한 영향은 그 빈도가 드물고 우리나라에 영향을 끼친 사례가 많지 않아 본 연구에서 고려하고자 하는 고농도 사례에서는 제외하였다. 각 사례에 해당하는 기간 동안의 값들을 시공간적으로 도식화

하기 위하여 Golden software 사의 Surfer 15 버전으로 3D 지형도 제작 소프트웨어를 사용하였다. Surfer 프로그램은 해당 기간 측정지점의 농도 값을 입력하여 공간분석을 진행하는 방식인데 지형정보는 NASA (National Aeronautics and Space Administration)와 NGA (National Geospatial-intelligence Agency)에서 개발/제공하는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3초 자료를 사용하였다. 또한 각 자료는 1201×1201의 바이너리(Binary) 파일로, 남한 전 지역을 표현할 수 있는 N33E126~N38E128 구간의 지형데이터를 활용하였다(NIER, 2013). 공간분석에는 일반적으로 Kriging 기법과 거리반비례평균 기법이 많이 사용되는데(Baek *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2004), 본 연구에서는 Kriging 분석법을 사용하였다. Kriging 공간분석은 관심 있는 지점에서의 특정 값을 알기 위하여 이미 주변에 알고 있는 값들의 선형조합으로 그 값을 예측하는 지구통계학적 기법이다(Kim and Jun, 2014; Lee *et al.*, 2011). 이를 응용하여 이미 확보된 전국의 도시대기측정망 초미세먼지 자료를 기반으로 주변 지역의 농도를 보간하여 시간평균 전국의 초미세먼지 농도분포도를 작성하였다.

이번 연구에서는 특히, 대용량 측정 자료 중 상황별 특성을 객관적으로 판별할 수 있는 기법을 제시하고자 밀도기반의 이상치 탐지 기법인 Local Outlier Factor (LOF) 알고리즘을 적용하였다. LOF 알고리즘은 변수의 분포에 상관없이 분석하고자 하는 표본 중에서 특정 값이 극히 낮거나 높을 경우 주변 데이터 밀도 차이를 기반으로 이상치를 분석하여 그 정도를 정량적인 수치(LOF 값)로 제시하는 알고리즘이다. LOF 이상치 탐지 알고리즘에서 적용되는 개념 및 수식은 아래와 같다(Breunig *et al.*, 2000).

$$\text{reach-dist}_k(p, q) = \max\{k\text{-distance}(q), d(p, q)\} \quad (1)$$

여기서, p, q 는 표본 중 특정 관측치 2개를 뜻하며, $d(p, q)$ 는 관측치 p 와 q 의 유클리드 거리, $\text{reach-dist}_k(p, q)$ 는 두 관측치 p 와 q 사이의 거리와 q 에서 k 번째 근접 이웃까지의 거리 중 큰 값, $k\text{-distance}(p)$ 는 관측

치 p 와 가장 가까운 데이터 k 개에 대한 거리의 평균을 의미한다.

$$\text{lrd}_k(p) = 1 / \left(\frac{\sum_{o \in N_k(p)} \text{reach-dist}_k(p, q)}{|N_k(p)|} \right) \quad (2)$$

$$\text{LOF}_k(p) = \frac{\sum_{o \in N_k(p)} \frac{\text{lrd}_k(q)}{\text{lrd}_k(p)}}{|N_k(p)|} \quad (3)$$

여기서, $N_k(p)$ 는 관측치 p 의 $k\text{-distance}(p)$ 보다 가까운 이웃의 집합, lrd (local reachability density)는 데이터 p 의 국소 도달가능밀도로 데이터 p 의 $N_k(p)$ 집합에 속하는 데이터들의 평균적인 lrd 의 역수이다. 식(3)에 따라 데이터 p 의 LOF 값은 데이터 p 의 lrd 와 데이터 p 에 k 번째 근접 이웃 집합에 속하는 데이터들의 평균적인 lrd 의 비율로 계산된다(Kang *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2009). 결국, 관측치 p 의 밀도 $\text{lrd}_k(p)$ 가 작을수록 LOF 값은 커지며 이웃 관측치 q 의 밀도 $\text{lrd}_k(q)$ 가 커질수록 LOF 값이 크게 나타난다.

이를 바탕으로 특정집단에서 이상치 탐지 알고리즘을 적용했을 경우 각 변수의 LOF 값이 1보다 작을 경우 밀도가 높은 분포를 뜻하고, 1에 근접할수록 정상치에 해당하고, LOF 값이 그 이상으로 나타나면 밀도가 낮은 분포, 즉 이상치로 분류하게 된다(Breunig *et al.*, 2000). 이러한 LOF 알고리즘의 이상치 탐지 기능을 활용하여 국내 대용량의 초미세먼지 농도 측정 자료 중 평상시 수준에서 고농도 현상 발생 시, 혹은 고농도 현상 발생 이후 평상시 수준으로 회복할 때 이를 이상치로 식별하도록 하였다. 따라서 초미세먼지 고농도 사례별로 다르게 도출되는 LOF 값의 정도에 따라 본 연구에서 초미세먼지 고농도 사례로 구분한 i) 황사로 인한 영향, ii) 황사를 제외한 장거리 이동오염원 등 국내외 영향에 따른 영향, iii) 이 밖의 국내 특정 상황(산불)에 따른 영향을 대규모 농도 자료 중에서 탐지해 낼 수 있도록 하였다.

3. 이상치 탐지기법 적용 사례

통계 분석에서 이상치(Outlier)란, 일반적으로 전체적인 데이터 범위 내에서 다른 패턴 혹은 특징을 보이는 관측 개체로서 정의된다. 이상치 탐지는 대부분의 데이터가 생성되는 메커니즘이 아닌 다른 메커니즘을 통해 그 생성 과정이나 정체가 불분명한 데이터를 찾아내기 위한 과정인데, 데이터 분석 시 신뢰성을 높이기 위한 수단으로 많이 활용되고 있다. 본 연구에서 적용된 Local Outlier Factor (LOF) 알고리즘은 이러한 이상치 탐지기법 중 하나로 데이터 간 거리가 아닌 밀도 기반 클러스터링 (Density-based clustering)에 기반하여 주변 데이터 간 밀도의 차이를 반영하는 방식의 기법이다. 즉, 이상치에 해당하는 데이터의 경우 주변 일정 거리 내 데이터 밀도가 현저히 낮은 특성을 활용하여 이상치를 탐지하게 되는 것이다 (Aman *et al.*, 2015). 이러한 특징 때문에 LOF 이상치 탐지 알고리즘은 데이터의 신뢰성 향상을 위한 수단과 더불어 대용량 데이터를 수집 및 분석하는 다양한 분야에서도 활용되고 있다.

예를 들면, Kim *et al.* (2009)은 데이터 마이닝 또는 머신 러닝 분야에서 활용하는 대용량 데이터에 더 효율적으로 적용하기 위한 LOF 알고리즘을 모색하여, 대용량 데이터에 적용 가능한 계산시간을 줄인 LOF 알고리즘 방법론을 제시하고 그 유용성을 입증한 바 있다.

수집하는 데이터 용량이 지속적으로 증가하고 복잡해짐에 따라 매우 중요한 위치를 차지하고 있는 데이터 분류 알고리즘 중 Support Vector Machine (SVM) 알고리즘의 데이터 분류 성능을 개선하기 위하여 LOF를 도입하여 이상치를 제거한 사례도 있다 (Kim *et al.*, 2011). 해당 연구에서는 이상치로 판단될 가능성이 높은 데이터를 성공적으로 제거함으로써 데이터 분류 알고리즘의 학습능력을 증가시키고, 분류가 어려운 데이터를 미리 제거함으로써 데이터 분류 결과의 신뢰성을 높였다.

대용량 자료뿐만 아니라 악성코드와 보안 위협이

지속적으로 증가하고 있는 상황에서 Hwang *et al.* (2020)은 이러한 공격에 대응하고 사용자의 의심스러운 행위를 탐지하기 위해 LOF 알고리즘을 적용하여 공격 의심 행위를 탐지하였다. 데이터 밀도를 기반으로 한 LOF 알고리즘을 활용하여 거리와 밀도의 차이가 있는 정상적인 행위와 비정상적인 행위의 특징을 분석하여 공격 의심 행위를 비교하는 방식을 적용하였는데, 이러한 방식은 또한 알려진 정보가 없는 데이터의 이상 여부를 판단하고 다양한 유형의 공격 형태를 탐지할 수 있어 효과적이라고 결론지었다.

LOF 이상치 탐지 알고리즘은 산업 공정 분야에서도 효과적으로 활용이 가능하다. 최근 공정 분야의 경우 자동화 및 대형화 추세에 따라 데이터가 증가하고 있어 작업자가 실시간으로 이상현상을 파악하기에 여러 문제점이 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다 (Venkatasubramanian *et al.*, 2003). 이와 같은 이상현상은 크기에 상관없이 전체 공정 시스템의 장애를 가져올 수 있기 때문에 Lee *et al.* (2011)은 이상현상 탐지 성능을 개선하기 위해 LOF 알고리즘을 통합한 새로운 공정 모니터링 방법론을 제안하였다. 그 결과 모니터링에 사용되는 변수들의 통계적 분포와 관계 없이 개선된 성능을 보였고, LOF의 단점 중 하나인 계산 부담을 줄이는 근사 알고리즘을 사용하여 실시간 공정 모니터링에 더욱 실용적으로 적용하였다.

그러나 다양한 분야에서 적용되었던 LOF 알고리즘이 현재로서 대기오염과 같은 환경 측정 자료 분석을 위한 수단으로 적용된 사례는 찾아보기 어렵다. 그만큼 다양한 기법을 활용한 특정 현상 탐지 목적의 환경분야 빅데이터 활용은 그 필요성에 비하여 연구의 진척이나 성과는 아직 부족한 것이 사실이다.

4. 고농도 발생 사례와 LOF를 적용한 탐지

4.1 고농도 사례별 대기질 시공간 모사 이해

대용량 대기질 측정 자료 중 고농도 사례를 구분 탐지하는 수단으로써의 LOF 알고리즘 적용에 앞서

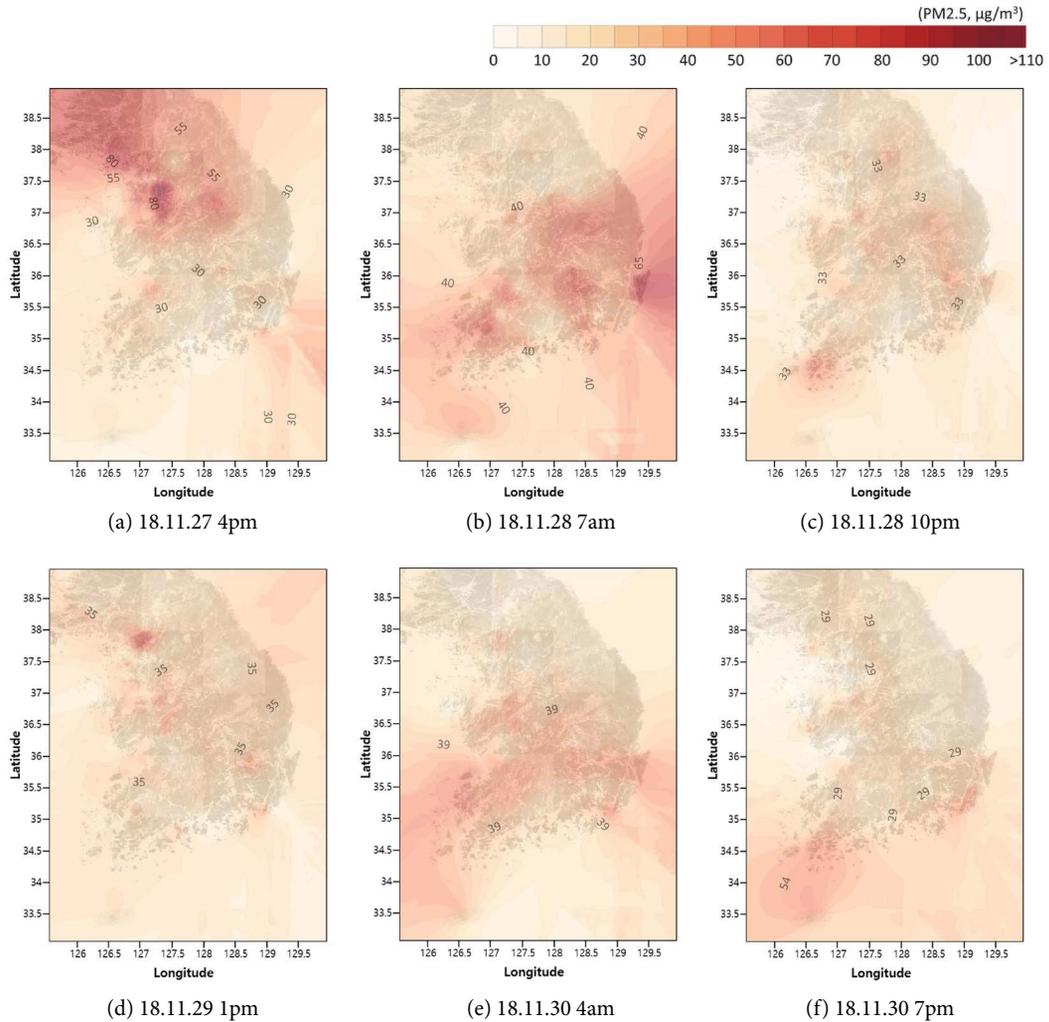


Fig. 2. Yellow dust episode and the overall $PM_{2.5}$ concentration during 27~30 NOV, 2018.

초미세먼지 고농도 사례별 대기 거동 및 확산 특성을 살펴보기 위하여 먼저 각 발생 기간 동안의 시공간적 농도분포를 분석하였다(그림 2~4). 참고로, 그림 2~4에서 묘사하고 있는 농도 분포는 해당 고농도 사례 전체 기간을 일정한 시간 간격 등분하여 나타내었다. 국내 황사 사례의 경우 확산 정도와 그에 따른 대기질 영향이 뚜렷하게 나타난 2018년 11월 27일부터 30일 동안의 사례를 예로 분석하였는데, 해당 기간 동안 황사는 발원지인 북서쪽 방향에서부터 넓은 범위에 걸쳐 점차 남쪽으로 확산되는 경향을 보였다.

그림 2와 같이 27일 오후 시간대를 기해서 국내 황사가 유입됨에 따라 경기 및 관동 지방에서부터 호서지방 순으로 초미세먼지 농도가 급격히 상승한 것을 알 수 있다. 당시 초미세먼지 농도가 가장 높았던 지역은 경기도 동두천시로 11월 27일 시간 평균 농도 최대 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. 이후 황사는 점차 남쪽으로 하강하여 11월 30일 대구광역시 일대에서 시간 평균 농도 최대 $135 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. 또한, 황사 발생 기간 동안 전국적으로 초미세먼지 대기 권역별 주의 보가 총 23회 발령되었으며, 권역별로 인천, 경기, 충

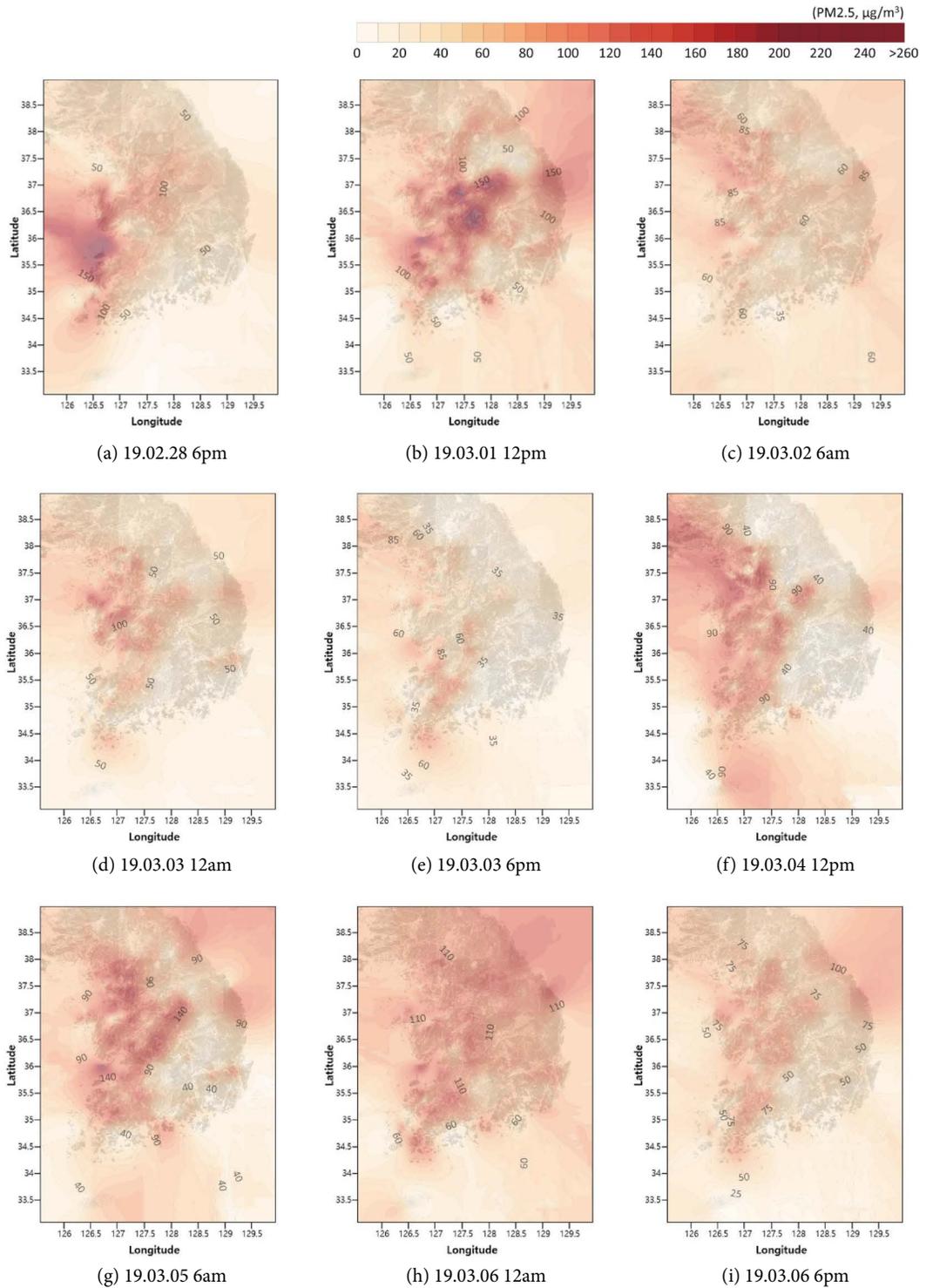


Fig. 3. High level of PM_{2.5} episode during 28 FEB~6 MAR, 2019.

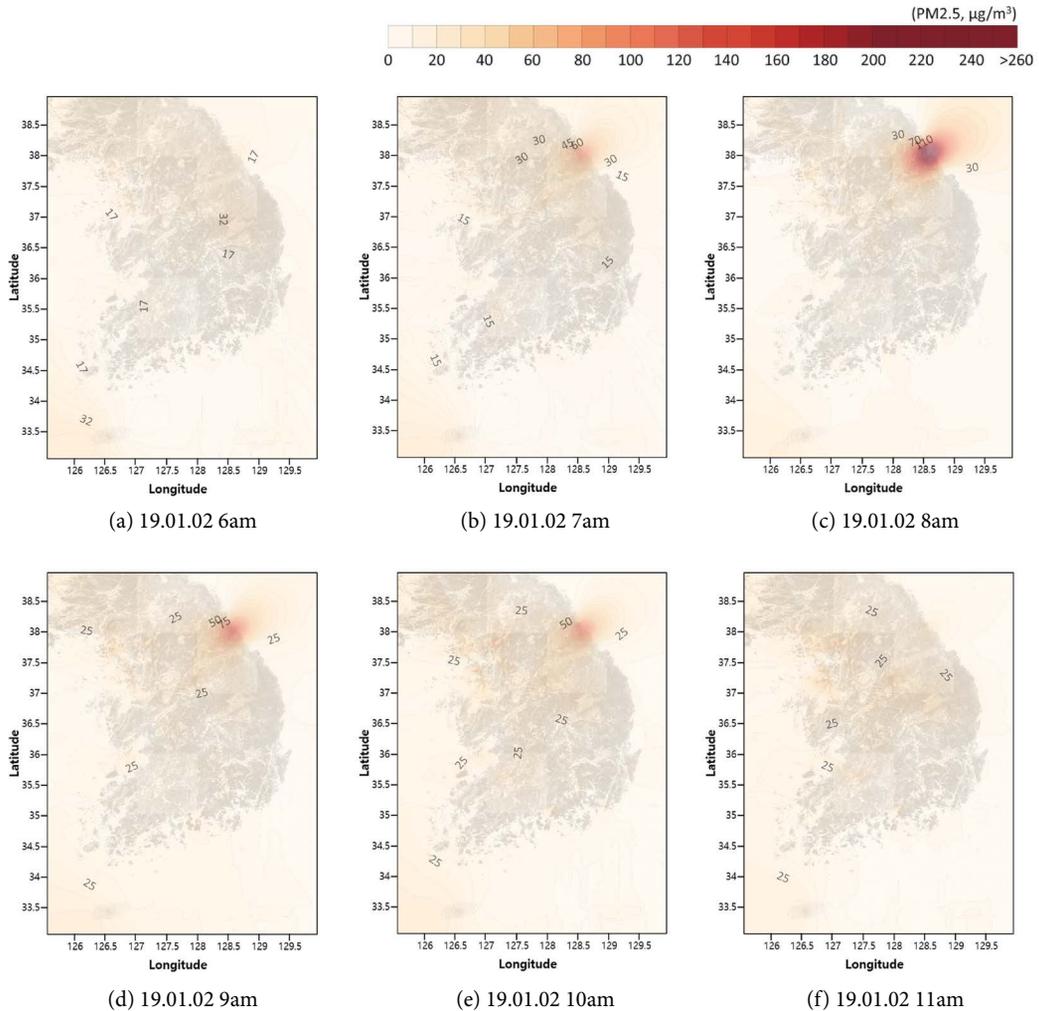


Fig. 4. Forest fire event around Yang-yang area (Gangwon province) in JAN, 2019.

북, 전북, 경남 순으로 순차적으로 발령되었다. 이는 곧 황사의 광역적 영향 특성을 그대로 반영하는 것으로도 볼 수 있겠다. 국지적으로 황사로 인한 고농도 초미세먼지 지속 시간은 당시 기상 및 지형적 특성에 따라 다소 상이하지만, 일반적으로 1~2일 정도로 나타났다.

반면, 황사를 제외한 장거리 이동오염물질로부터 야기된 국내 초미세먼지 고농도 사례는 국외로부터 유입된 장거리 오염물질 혹은 국내에서 발생한 초미세먼지가 대기 이동의 정체로 인하여 상당기간 축적

됨으로써 발생하는 특징을 나타내었다. 이는 토양먼지 등의 대기오염물질의 이동으로 발생하는 황사와는 그 특징이 대별되었다. 특히, 2019년 2월 28일부터 3월 6일까지 발생되었던 초미세먼지 고농도 발생 사례를 살펴보면(그림 3), 그림 2의 황사 사례와 마찬가지로 광범위한 지역에 걸쳐서 영향을 끼친다는 점은 그 공간적 특징에서 보았을 때 비슷하지만, 대기 이동의 특성상 오염물질의 이동 추이 및 진행 속도가 확연히 다르다는 것을 알 수가 있다. 이와 같은 현상은 특정 지역에서 발생하는 초미세먼지 고농도 지속

시간에도 영향을 주게 된다. 황사의 경우 분석결과에 의하면 짧게는 1~2일 정도이지만, 초미세먼지 고농도 사례의 경우에는 이보다 긴 3~4일 정도로 나타났다. Park *et al.* (2012)은 황사와 초미세먼지 고농도 사례 시 대기 중 오염물질 입자의 화학 성분 특성이 서로 다르다고 보고하였는데, 황사 사례 시 입자 성분은 발원지의 토양의 영향, 해염입자의 영향, 그리고 연소배출원의 영향을 받아 황산암모늄과 미량의 유해중금속의 농도가 높게 검출된 반면, 고농도 초미세먼지 사례의 경우에는 연료 등의 연소 및 비산먼지로부터 기인한 인자들의 검출이 그것이다. 따라서 고농도 초미세먼지 사례별 인체에 미치는 위해성 또한 달라지게 되므로 고농도 사례별 발생 특성의 효과적인 분석법과 이를 기반으로 한 대응 체계의 고도화 필요성이 더욱 중요하다.

앞서 살펴본 황사 사례와 황사를 제외한 국내 발생 혹은 장거리 이동오염원에 따른 고농도 초미세먼지 사례와는 다르게 대규모 화재 등 국내에서 단시간에 폭발적으로 발생한 오염물질로 인하여 발생한 고농도 초미세먼지 현상은 공간적 및 시간적 특성 모두가 다른 양상을 보였다. 산불과 같이 대규모 화재가 발생했을 당시 기상 특성에 따라 차이는 있으나 화재로 인하여 단시간에 발생한 대규모 대기오염물질의 확산 범위는 황사 및 비황사 장거리 이동오염원에 의한 사례보다 국지적이었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 2019년 1월 발생한 강원도 양양 산불의 경우 화재로 기인한 초미세먼지의 영향 범위가 발화 지점으로부터 약 40 km 반경 정도로 한정적이었고 지속시간도 수 시간 정도였지만, 화재 발생 지점 주변 지역 및 풍하 방향에 위치한 지역의 초미세먼지 농도는 단시간 안에 폭발적으로 증가함을 알 수 있다. 2019년 양양 산불 발생 기간 중 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 시간 평균 최대 농도가 각각 $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $278 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었으며, 이는(초)미세먼지 시간 평균 '보통' 수준에서 단 1~2 시간 만에 '매우 나쁨' 수준 이상으로 악화된 것이었다. 또한, 바람이 비교적 강했던 경우에는 대기 정체 정도가 약해져 국지적 고농도 현상 발생이 어렵거나

빠른 시간 내로 해소되었지만, 양양 산불의 경우 넓은 화재 범위와 타 대형 산불(2017년 5월 강릉 산불, 2019년 4월 속초 산불)과 비교하여 보았을 때, 상대적으로 약한 풍속(화재 기간 중 평균풍속 3.8 m/s 및 분평균 최대 풍속 7.2 m/s, data.kma.go.kr)으로 인하여 화재로 기인한 미세먼지가 대기질에 더욱 밀접하게 영향을 끼친 것으로 볼 수 있다.

4.2 고농도 사례별 LOF 분석 비교

데이터 밀도 기반의 이상치 탐지 기법인 Local Outlier Factor (LOF) 알고리즘은 변수의 분포에 상관 없이 모집단에 대한 어느 특정 값의 이상 정도를 정량적 수치로 제공하는 기법이다. 이러한 방법은 분석하고자 하는 데이터 중 정상 개체들이 갖는 주변 밀도에 비해 어느 특정 값이 극히 낮거나 높은 성질을 구분하여 이상치로 탐지하게 되는데, 다른 이상치 탐지 알고리즘에 비하여 전체 데이터 개체의 이상 정도를 나타내는 단일 지표값(LOF)으로 산정할 수 있고 부분 이상치에 대하여도 탐지가 가능하다는 장점이 있다(Kim *et al.*, 2010). 본 연구에서는 대용량 대기질 농도 자료 분석 시 특정 고농도 사례를 효과적으로 탐지하고자 LOF 알고리즘 적용하였다. 각 고농도 사례 동안 전국 측정망에서 관측되는 초미세먼지 시간 평균 농도를 활용하여 LOF 값을 산출한 다음 이상치 값의 크기, 이상치 탐지 범위, 이상치 값의 변화 정도 등을 분석하였다. LOF 값(좌)과 같은 기간 초미세먼지 농도(우)를 나타내고 있는 그림 5~7은 각각 황사로 인한 초미세먼지 고농도 사례(그림 2), 황사를 제외한 장거리 이동에 의한 초미세먼지 고농도 사례(그림 3) 및 국내 산불로 인한 초미세먼지 고농도 사례(그림 4)와 각각 대응하도록 하였다. 또한, 그림 5~7에서는 측정소 위치 별 지역 구분을 (a) 서울; (b) 경기; (c) 인천; (d) 충남/대전/세종; (e) 충북; (f) 전북; (g) 전남/광주; (h) 강원; (i) 경북/대구; (j) 경남/부산/울산; (k) 제주와 같이 나타내었다.

황사가 우리나라 북서 방향으로부터 유입되던 2018년 11월 27일 오후 4시경(그림 2(a), 그림 5(a))

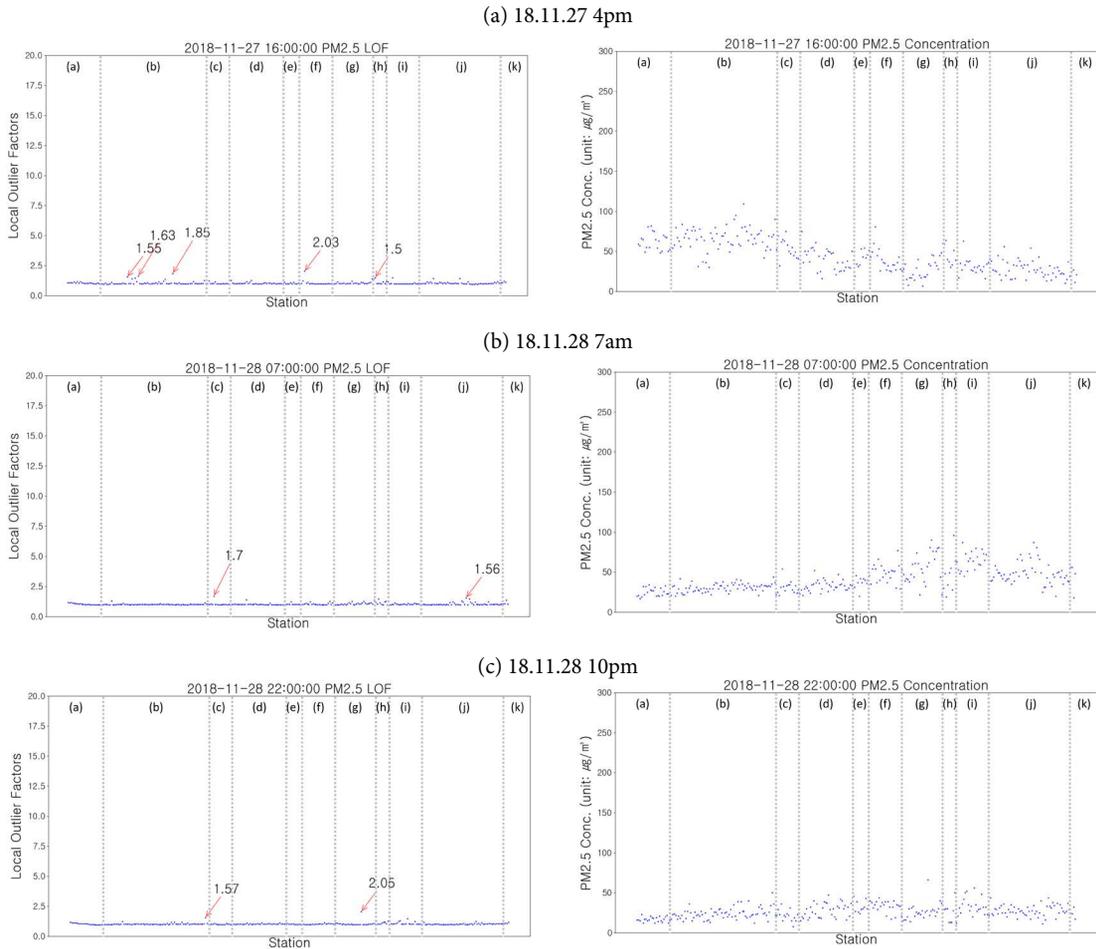


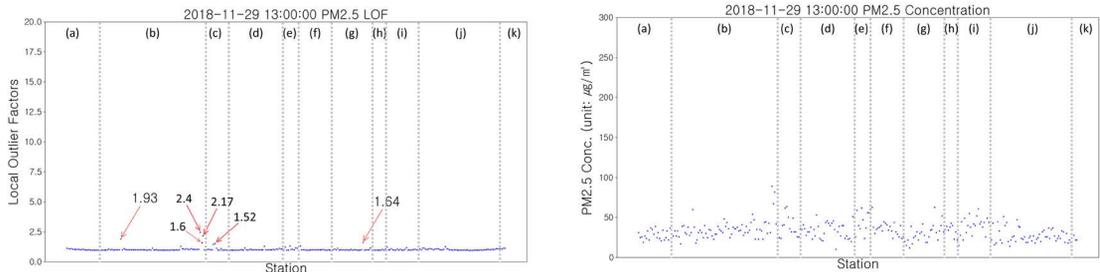
Fig. 5. Distributions of LOF values and $PM_{2.5}$ concentration collected from urban air quality monitoring stations during the yellow dust event.

수도권을 비롯하여 한반도 서쪽 지역에서 초미세먼지 농도가 높아지기 시작하였는데, 이때 그림 5(a)에서 나타내는 바와 같이 경기 지역의 LOF 값이 1.6 이상의 값을 보였다. 또한 황사의 영향으로 인하여 타 지역보다 초미세먼지 농도가 높아지기 시작했던 전북 지역 또한 LOF 값이 2 이상으로 다소 높게 나타났다. 이후 28일 오전 7시경(그림 2(b), 그림 5(b)) 인천과 경상도 지역까지 미세먼지 농도가 높아짐에 따라 LOF 값도 1.5 이상을 기록했다. 같은 날 오전시간 때에는 황사로 인한 초미세먼지 농도가 다소 감소하였으나, 29일 오후(그림 2(d), 그림 5(d)) 경기, 인천, 전

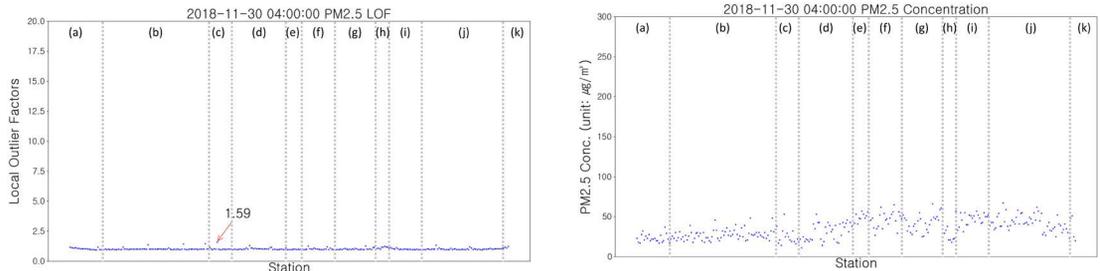
남 지역을 중심으로 다시 증가세를 보이면서 해당 지역의 LOF 값은 1.5에서 2.4의 범위를 나타내었다.

황사를 제외한 장거리 이동오염물질 등 국내외 초미세먼지의 영향에 기인한 고농도 사례를 나타낸 그림 3과 그림 6의 경우에는 2019년 2월 29일 오후 6시에 전남 지역의 초미세먼지가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 확연히 높게 나타나는데, 이때 LOF 값 또한 1.6 이상을 보였다. 경기 일부 지역에서도 $PM_{2.5}$ 의 농도가 시간 평균 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였는데 이때의 LOF 값도 1.5에 이르렀다. 3월 2일 6시경(그림 3(c), 그림 6(c)) 계속해서 높게 유지되었던 초미세먼지 농도가 일시적으

(d) 18.11.29 1pm



(e) 18.11.30 4am



(f) 18.11.30 7pm

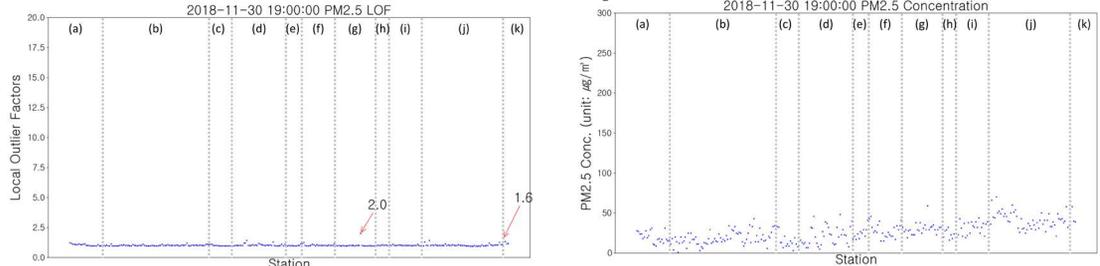


Fig. 5. Continued.

로 감소하면서 LOF 값이 1.5 내외로 다소 높았지만 같은 날 저녁 충청 지역과 영남 일부 지역의 농도가 다시 높아지면서 해당 지역의 LOF 값 1.5~2.0 범위의 이상치가 검출되었다. 3월 5일 오전 6시(그림 3(g), 그림 6(g))에는 수도권, 충청과 호남 지역 등 우리나라 서쪽 전 지역의 초미세먼지 농도가 다시 높아졌는데 이때 해당 지역 상당수의 측정소에서 1.5~2.2 범위의 LOF 값을 나타내었다. 3월 6일 오전 0시경에는 우리나라 동쪽까지 짙은 초미세먼지가 확산되어 광주를 포함한 전라도, 강원도 등에서 1.5 이상의 LOF 값이 검출되었고, 반면 제주 지역에서는 초미세먼지 농도가 높았다가 점차 감소한 탓에 2 내외의 LOF 값

을 나타내었다. 이후 PM_{2.5} 115 µg/m³의 농도에서 90 µg/m³ 이하의 수준까지 낮아진 강원과 경남 일부 지역에서 1.5~1.8의 LOF 값이 나타났다. 앞서 살펴본 황사의 경우 그 확산 특성에 따라 LOF 값들이 수도권을 시작으로 충청, 강원 및 호남, 영남 지역 순으로 높아지는 양상을 보였으나, 장거리 이동오염물질 등 국내외 초미세먼지의 영향에 기인한 고농도 사례의 경우 광범위한 지역에서 초미세먼지 농도가 높아지거나 일시적으로 낮아짐에 따라 이상치의 값도 산발적으로 나타나는 특징을 보였다.

국내에서 발생한 대규모 산불로 인한 초미세먼지 고농도 사례의 경우를 살펴보면 산불이 발생하여 초

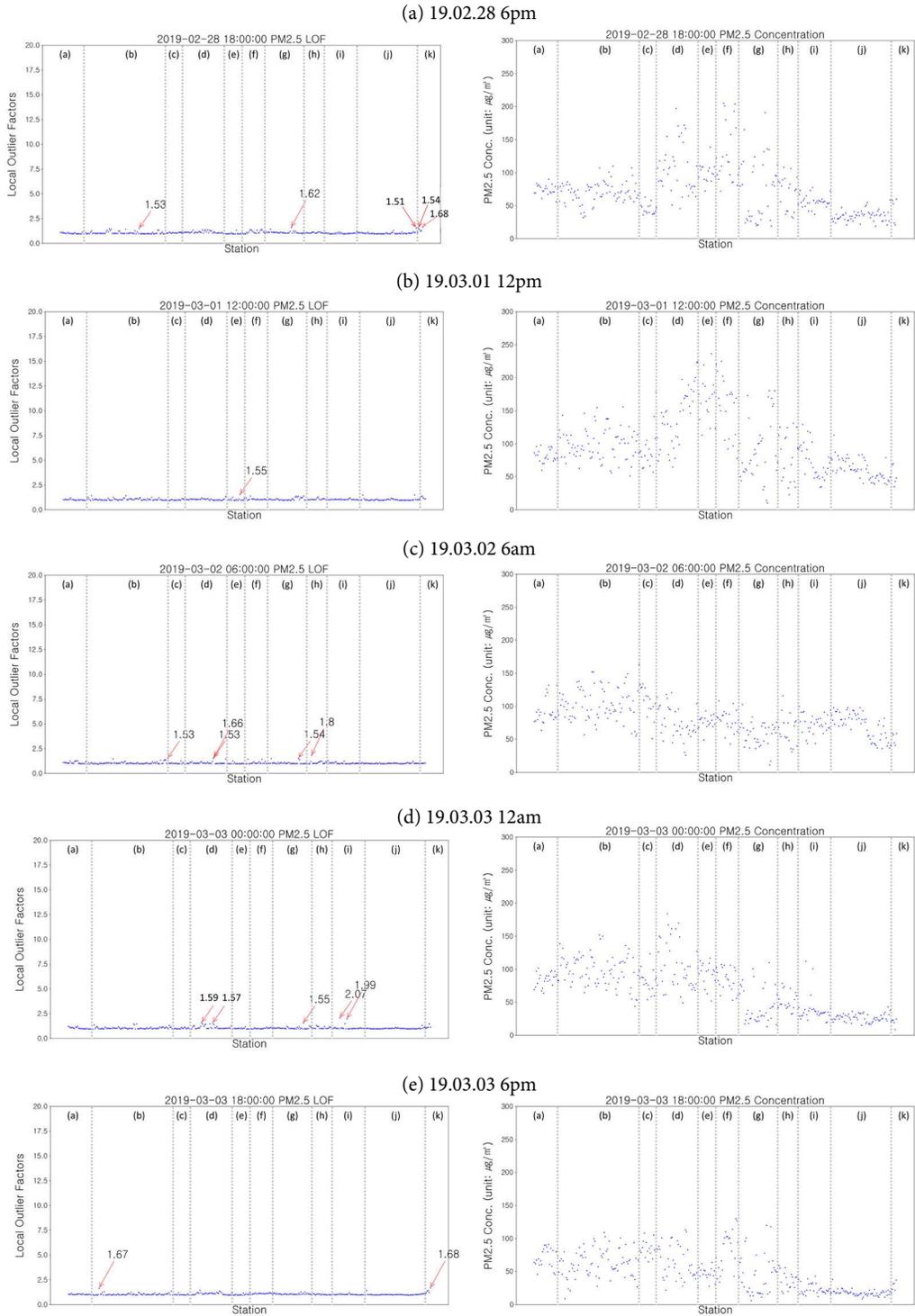


Fig. 6. Distributions of LOF values and PM_{2.5} concentration collected from urban air quality monitoring stations during the high-level of fine dust event.

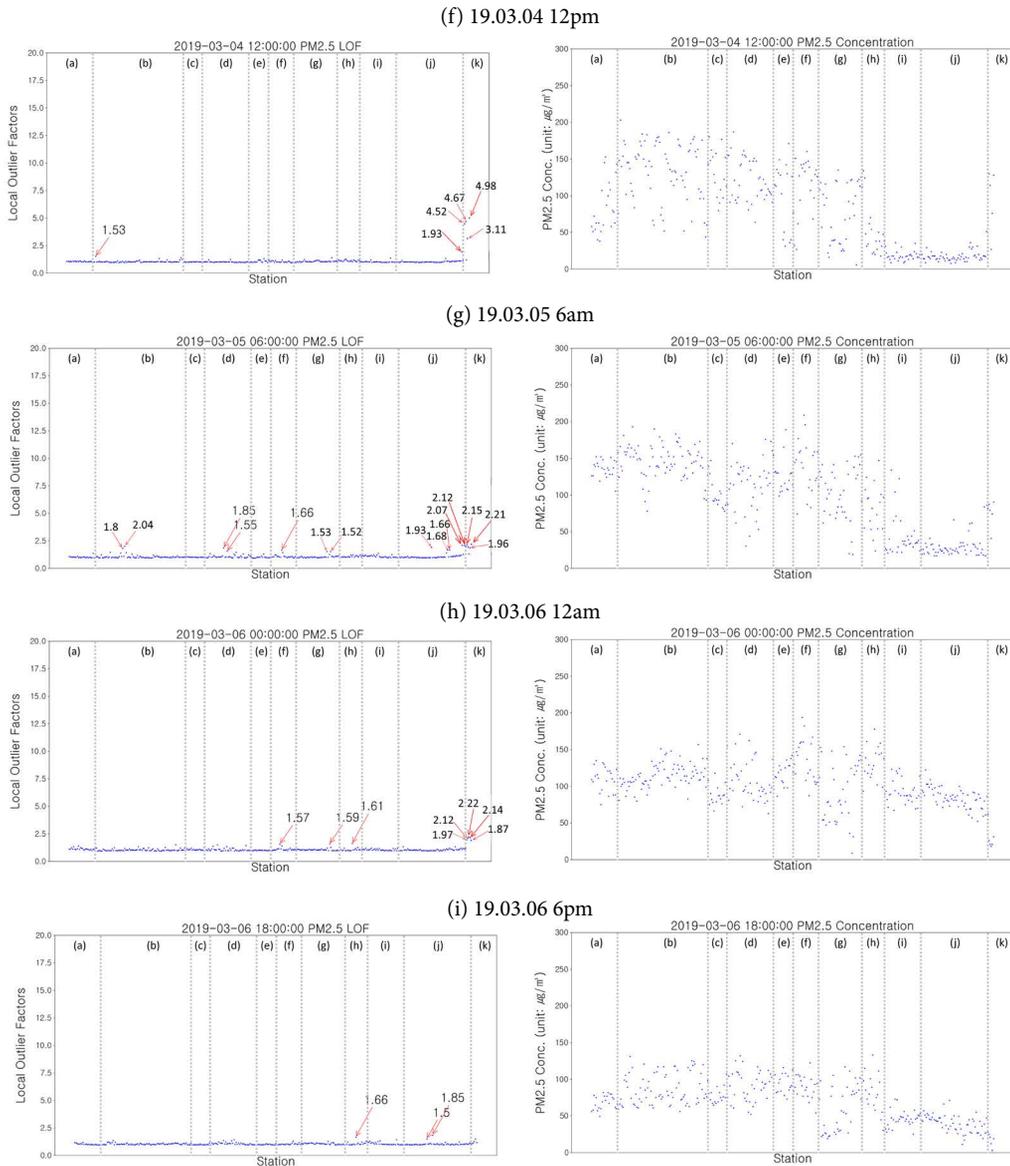


Fig. 6. Continued.

미세먼지 농도가 급격하게 증가하기 시작한 2019년 1월 2일 오전 7시부터 강원 지역의 LOF 값이 높아졌다(그림 4(b), 그림 7(b)). 한 시간 뒤인 오전 8시경 산 불로 인한 초미세먼지 농도가 최대치를 나타내는데(그림 4(c), 그림 7(c)) 이때의 LOF 값은 15를 넘어선 것을 알 수 있다. 이후 산불 발생으로 인한 초미세먼지 영향 범위 내 농도가 낮아짐에 따라 LOF 값도 점

차 감소하였으며, 산불 초미세먼지의 영향이 완전히 해소되는 오전 11시경 강원 지역의 LOF 값은 이전 수준을 회복하였다. 그림 7(e)에서는 전국적으로 초미세먼지가 일시적으로 높아짐에 따라(그림 4(e)) LOF 값도 높아지는 양상도 보였으며, 오전 11시를 기해서 그 농도가 점차 낮아지면서 해당 지역의 LOF 값이 1.5 이상을 기록했다. 특히 본 연구에서 초미세

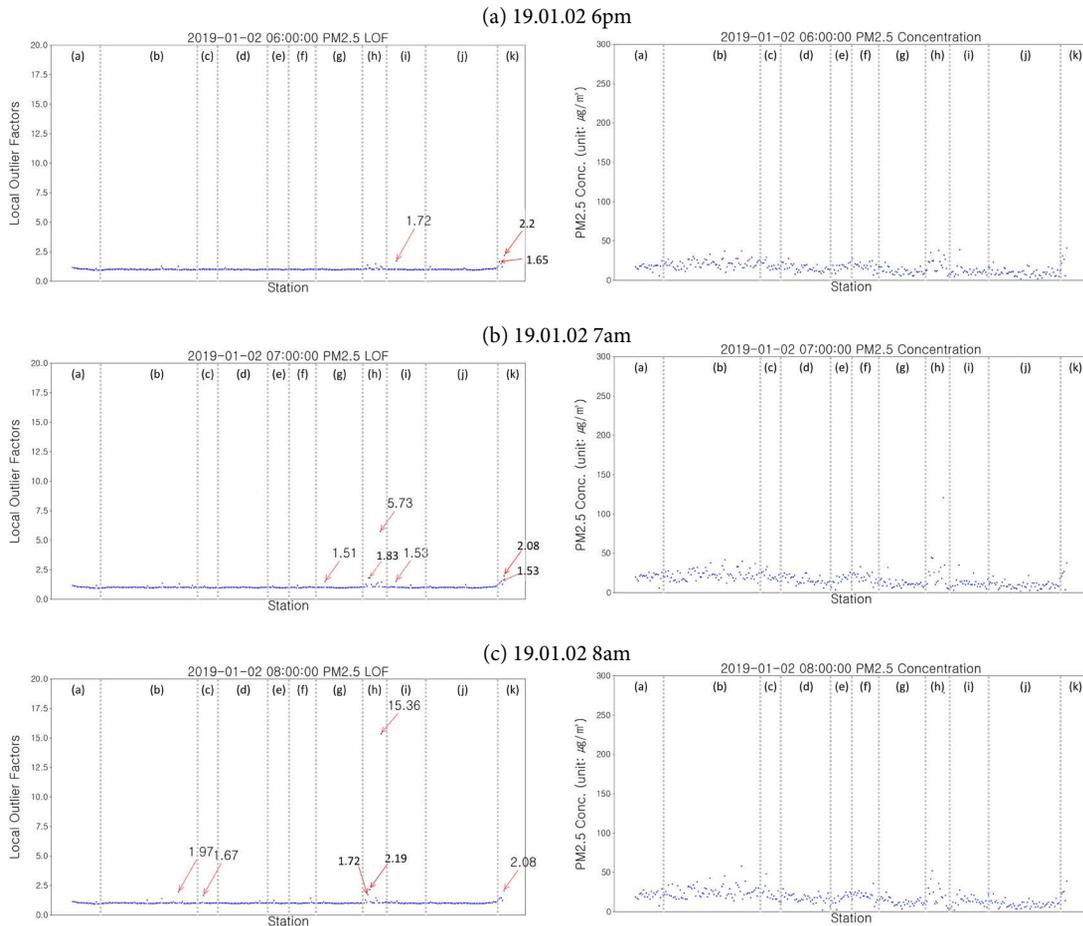


Fig. 7. Distributions of LOF values and PM_{2.5} concentration collected from urban air quality monitoring stations during the forest fire event.

먼지 고농도 사례로 꼽은 황사로 인한 경우와 장거리 이동오염물질 등 국내외 영향에 의한 경우와 비교하였을 때 LOF 값의 변동 폭이 매우 크게 나타났으며, 이상치 탐지 범위도 협소하여 그 차이가 분명함을 알 수 있다.

5. 결론 및 시사점

국내 고농도 초미세먼지에 대한 건강영향, 사회·경제적인 측면에서 국민 관심이 증가하면서 다양

한 방면에서의 효과적이고 실효성 있는 대기 관리 방안에 대한 필요성이 계속해서 제기되고 있다. 이에 우리 정부는 대기질 개선정책뿐만 아니라 오염 부문별 배출량 저감과 관리를 위하여 매년 국가대기오염물질 배출량을 산정하고 있다. 또한, 전국적으로 도시 대기측정망을 운용함으로써 실시간 대기질 측정 자료 수집이 가능해졌다. 연구자들은 오랫동안 이러한 측정 자료를 활용하여 지역별 대기질 특성과 오염물질별 발생부문별 기여도 분석 등 국내 대기환경의 효과적 관리와 오염물질 배출량 감축을 위한 다양한 연구를 추진함으로써 국가 대기 개선을 위한 노력을 뒷

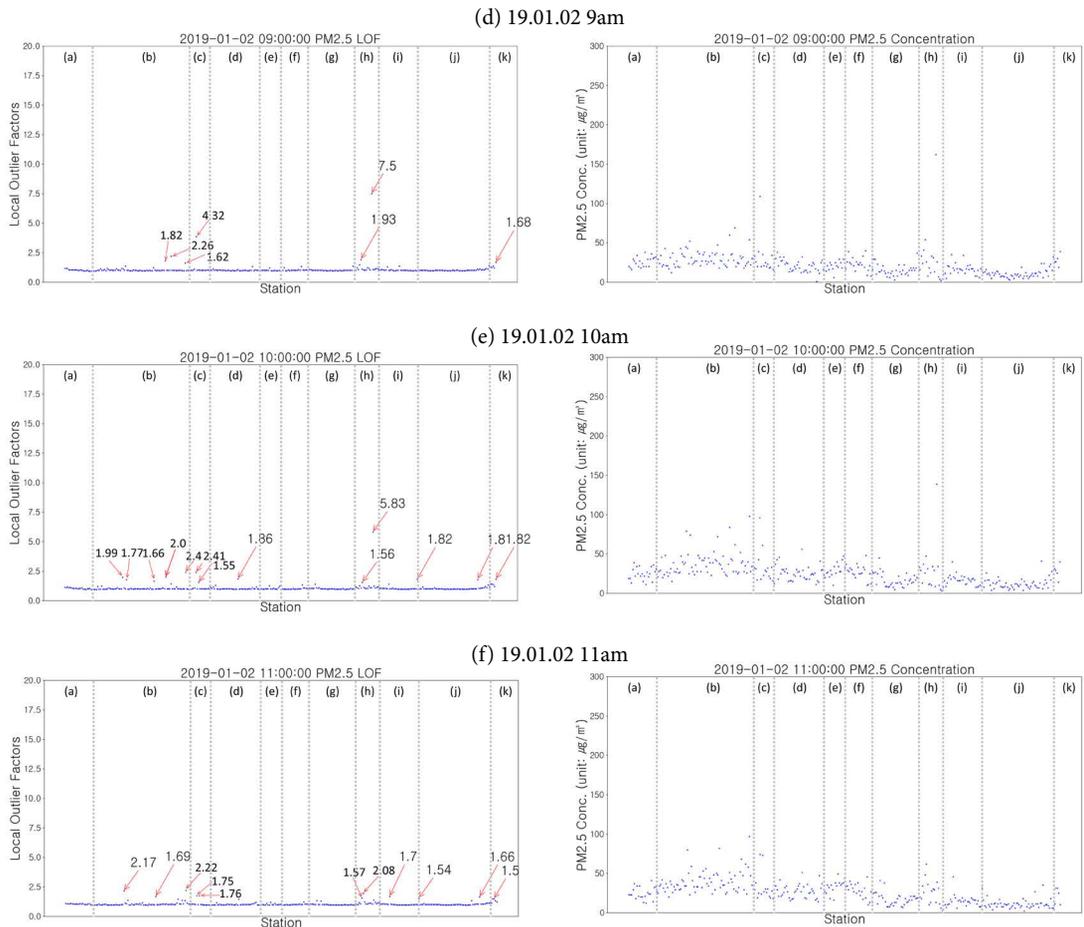


Fig. 7. Continued.

받침해 왔다. 그러나 한편으로는 대용량 대기측정 자료 분석에 대한 시간적·경제적 부담에 대한 연구 피로도도 계속해서 제기되었고, 그에 따른 객관적이고 효과적인 분석 방법의 필요성도 함께 부각되었다.

본 연구에서는 2018년 10월~2019년 9월 1년 동안 전국의 도시대기측정소에서 수집된 초미세먼지 1시간 평균 자료를 기반으로 i) 황사의 영향으로 기인한 경우, ii) 황사를 제외한 장거리 이동오염물질 등 국내외 영향에서 기인한 경우, 이 밖에 iii) 국내 대형 산물로 인한 경우의 세 가지 대표 고농도 사례를 꼽아 그 거동 추이와 특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 대규모 측정 자료 중에서 초미세먼지 사례를 판별할 수

있는 기초수단으로 LOF (Local Outlier Factor) 알고리즘을 적용하여 대기환경적 이상 징후를 탐지할 수 있는지 시도하고자 하였다. LOF 알고리즘이 국내 고농도 초미세먼지 사례를 탐지할 수 있는지 가능성 판단을 위하여 먼저 살펴본 세 가지 고농도 사례별 특징을 시공간적으로 모사하여 분석한 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다.

- 황사로 인한 초미세먼지 고농도 사례의 경우 황사의 발원지인 북서쪽 방향에서부터 넓은 범위에 걸쳐 한반도 남동 방향으로 확산되는 경향을 보였으며, 특정 지역의 고농도 지속시간은 1~2일

정도로 나타났다.

- 장거리 이동오염물질을 포함한 국내의 영향에 의한 초미세먼지 고농도 사례의 경우에는 국내외에서 기인한 오염물질이 대기이동의 정체로 인하여 상당기간 축적되어 발생되며, 이러한 특징 때문에 특정 지역에서의 고농도 지속시간은 황사로 인한 지속시간보다 3~4일 정도로 비교적 길게 나타났다.
- 산불과 같은 대규모 산불과 같은 영향에 따른 고농도 사례는 단시간에 발생한 대규모 대기오염물질로 인하여 그 농도가 급격히 상승하지만, 지속시간과 고농도 영향 범위는 다른 사례보다 현저히 적은 것을 알 수 있었다.

이와 같은 특징을 바탕으로 각 측정소에서 측정된 초미세먼지 농도변화에 대응하는 LOF 값을 산출하여 비교/분석하였다. LOF 알고리즘은 모집단에서 어느 특정 값이 극히 높거나 낮은 경우 이에 의해 주변 데이터 밀도가 낮아지고 커질 때 그 이상치 값은 높게 나타나는 특성을 갖는다. 본 연구에서는 이러한 특징을 대기질 측정 자료 분석에 활용하여 고농도 사례를 일으키는 원인에 따라서 초미세먼지 농도가 낮은 수준에서 높아지거나 고농도 현상이 지속되었다가 낮아지는 경우에 나타나는 LOF 값을 분석하였다. 그 결과 고농도 사례에 따라 i) 황사로 기인한 경우 최소 1.4에서 최대 2.6, ii) 황사를 제외한 장거리 이동오염원 등 국내의 영향에 따른 초미세먼지에서 기인한 경우 최소 0.92에서 최대 5.79, iii) 국내 발생한 산불로부터 기인한 고농도 초미세먼지의 경우에는 최소 0.94에서 최대 15.5의 값을 나타내었다. 고농도 초미세먼지 사례의 사전적 탐지 수단으로 도출된 LOF 값들의 변동 특성을 살펴보았을 때, LOF 값이 높아지는 두 지점을 빠른 시간순으로 각각 고농도 발생 시작 시기와 해소 시기로 보고 인근 두 점 사이의 기간을 고농도 지속 시간으로 이해할 수 있었다. 따라서 당시 도출되는 LOF 값의 크기 정도에 따라 그 원인이 황사로 인한 경우인지, 황사를 제외한 장거리 이

동오염원 등 국내외 영향으로 인한 경우인지, 산불 등 오염물질의 폭발적 발생으로 인한 경우인지 대략적으로 판단이 가능하였다.

결론적으로 국가 대기오염측정망을 통하여 측정/수집되고 있는 초미세먼지 대기오염자료, 특히 대기오염사례별로 분석해 본 결과, LOF 알고리즘을 통하여 통계적으로 구별할 수 있음을 확인하였다. 특히, 단시간에 발생하고 전개되는 산불과 같은 대기오염 에피소드의 경우는 다른 사례들, 즉 황사나 황사 이외 장거리 이동에 의한 경우들과 대별되는 것으로 나타났다. 이를 기반으로 산불과 같은 에피소드를 감지하고 이에 따른 신속한 대응조치 및 고농도 대기오염 대응에 적용되어야 할 것이다. 이를 바탕으로 향후 사분범위 (Interquartile Range, IQR), 관리도 차트 (Control chart) 기법, 인공지능 등 이상값을 제어하는 다양한 기법을 활용한 대응량 환경 관측자료 분석에 관한 연구도 진행된다면 유의미한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서 시도한 LOF 알고리즘 기반의 대응량 환경 관측자료 중 특정 사례 사전 탐지 방법은 지난 2019년 초미세먼지 현상을 사회재난으로 규정/개정된 재난 및 안전 관리 기본법에 따른 대응계획 수립에도 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Aman, M., Solangi, K., Hossain, M., Badarudin, A., Jasmon, G., Mokhlis, H., Bakar, A., Kazi, S.N. (2015) A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1190-1204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.086>
- Bae, C., Yoo, C., Kim, B., Kim, H., Kim, S. (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (III) Application of the Modeled and Observed PM_{2.5} Ratio on the Contribution Estimation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 445-457, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.5.445>

- Baek, S., Lee, T., Kim, S., Kim, D. (2008) Studies on the spatial analysis for distribution estimation of radon concentration at the Seoul area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 538-550, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2008.24.5.538>
- Breunig, M.M., Kriegel, H.-P., Ng, R.T., Sander, J. (2000) LOF: identifying density-based local outliers, *Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 93-104. <https://doi.org/10.1145/342009.335388>
- Cho, S.-H., Kim, P.-R., Han, Y.-J., Kim, H.-W., Yi, S.-M. (2016) Characteristics of Ionic and Carbonaceous Compounds in PM_{2.5} and High Concentration Events in Chuncheon, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 435-447, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.4.435>
- Choe, J., Lee, Y. (2015) A Study on the Impact of PM_{2.5} Emissions on Respiratory Diseases, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 23(4), 155-172, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2015.23.4.155>
- Choi, B., Lee, H., Ra, Y. (2004) Spatiotemporal Analysis of Air Quality using GIS, *Journal of Korean Society of Civil Engineers D*, 24(6D), 1009-1015, (in Korean with English abstract).
- Choi, D.-R., Yun, H.-Y., Koo, Y.-S. (2018) A Development of Particulate Matter Forecasting System with Inverse Modeling using Source Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 889-910, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.6.889>
- Hwang, C., Kim, S., Lee, T. (2020) LOF-based Attack Suspicious Behavior detection Technology Research, *Conference Proceedings on the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 24(1), 3-5.
- Hwang, I. (2018) Particulate Matter Management Policy of Seoul: Achievements and Limitations, *Journal of Korean Society for Policy Studies*, 27(2), 27-51.
- Jeon, B. (2012) Meteorological Characteristics of the Winter-time High PM₁₀ Concentration Episodes in Busan, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(7), 815-824, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/jes.2012.21.7.815>
- Kang, B.-W., Lee, H.S. (2015) Source Apportionment of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) in the Chungju City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 437-448, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.5.437>
- Kang, B., Kim, D., Kang, S.-H. (2010) Extended KNN Imputation Based LOF Prediction Algorithm for Real-time Business Process Monitoring Method, *Journal of Korean Society for e-Business Studies*, 15(4), 303-317, (in Korean with English abstract).
- Khan, A., Kim, K.-H., Szulejko, J.E., Brown, R.J., Jeon, E.-C., Oh, J.-M., Shin, Y.S., Adelodun, A.A. (2017) Long-term trends in airborne SO₂ in an air quality monitoring station in Seoul, Korea, from 1987 to 2013, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(8), 923-932. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1305009>
- Kim, C.-K., Seo, Y.H. (2013) Identification of sources contributing to west coast regional aerosol of Daechon city, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 19(1), 29-38, (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Jun, M. (2014) Analysis on Relationship between Urban Development Characteristics And Air Pollution level - A Case of Seoul Metropolitan Region -, *Journal of Korea Planners Association*, 49(7), 151-167, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.17208/jkpa.2014.11.49.7.151>
- Kim, J. (2017) Assessment and Estimation of Particulate Matter Formation Potential and Respiratory Effects from Air Emission Matters in Industrial Sectors and Cities/Regions, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(4), 220-228, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/ksee.2017.39.4.220>
- Kim, J., Choi, D., Koo, Y., Lee, J., Park, H. (2016) Analysis of Domestic and Foreign Contributions using DDM in CMAQ during Particulate Matter Episode Period of February 2014 in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 82-99, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.1.082>
- Kim, J., Kang, S. (2018) Analysis of Factors Influencing PM₁₀ Pollution in Korea, *Proceeding on Journal of Korean Society for Environmental Economics*, 2018, 779-791, (in Korean with English abstract).
- Kim, M., Son, S., Yoo, S.-I. (2011) A study on improvement of Support Vector Machine with Incremental Local Outlier Factor, *Conference Proceedings on the Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, 38(1C), 354-357.
- Kim, S., Cho, N., Kang, S. (2009) Density-based Outlier Detection for Very Large Data, *The Korean Operations*

- Research and Management Science Society (KORMS), 346-361, (in Korean with English abstract).
- Kim, S., Cho, N., Kang, S. (2010) Density-based Outlier Detection for Very Large Data, *Journal of Korean Operations Research and Management Science Society*, 35 (2), 71-88, (in Korean with English abstract).
- Kim, T., Myoung, J., Jung, M., Lee, Y., Suh, I. (2020) Analytical Study on the Trends of the High PM_{2.5} Concentrations and Interregional Association, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 275-286, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.2.275>
- Kim, Y. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553, (in Korean with English abstract).
- Kwon, S. (2018) A Comparative Policy Analysis on Living Environment Crisis in Local Government-Focusing on the Policy and Management of Fine Particulate Matter in Korea, *Crisisonomy*, 14(3), 31-46, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14251/crisisonomy.2018.14.3.31>
- Kwon, Y., Lim, H., Lim, Y., Lee, H. (2019) Implication of activity-based vessel emission to improve regional air inventory in a port area, *Atmospheric Environment*, 203, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.036>
- Langmann, B., Duncan, B., Textor, C., Trentmann, J., van der Werf, G.R. (2009) Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate, *Atmospheric Environment*, 43(1), 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.047>
- Lee, B., Cho, S., Lee, S.-K., Woo, C., Park, J. (2019) Development of a Smoke Dispersion Forecast System for Korean Forest Fires, *Forests*, 10(3), 219. <https://doi.org/10.3390/f10030219>
- Lee, H., Jeong, Y., Kim, S., Lee, W. (2018) Atmospheric Circulation Patterns Associated with Particulate Matter over South Korea and Their Future Projection, *Journal of Climate Change Research*, 9(4), 423-433, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/kscctr.2018.9.4.423>
- Lee, H.S., Kang, C.-M., Kang, B.-W., Lee, S.-K. (2005) A Study on the PM_{2.5} Source Characteristics Affecting the Seoul Area Using a Chemical Mass Balance Receptor Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(3), 329-341, (in Korean with English abstract).
- Lee, M.J., Lee, J.H. (2011) Coupled Model Development between Groundwater Recharge Quantity and Climate Change Using GIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 14(3), 36-51, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11108/kagis.2011.14.3.036>
- Lee, J., Kang, B., Kang, S. (2011) The Use of Local Outlier Factor (LOF) for Improving Performance of Independent Component Analysis (ICA) based Statistical Process Control (SPC), *Journal of Korean Operations Research and Management Science Society (KORMS)*, 36(1), 39-55, (in Korean with English abstract).
- Lim, J., Kwak, K., Kim, J., Jang, Y. (2018) Analysis of Annual Emission Trends of Air Pollutants by Region, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 76-86, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.1.076>
- Mateos, A.C., Amarillo, A.C., Busso, I.T., Carreras, H.A. (2019) Influence of meteorological variables and forest fires events on air quality in an urban area (Córdoba, Argentina), *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77(2), 171-179. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00618-9>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Composition of the high resolution topography data and practice manual for air policy modeling. (NIER-GP2013-038).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) National Air Pollutants Emission 2016.
- Park, S., Moon, K., Park, J., Kim, H., Ahn, J., Kim, J. (2012) Chemical Characteristics of Ambient Aerosol during Asian Dusts and High PM Episodes at Seoul Intensive Monitoring Site in 2009, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 282-293, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2012.28.3.282>
- Park, S., Shin, H. (2017) Analysis of the Factors Influencing PM_{2.5} in Korea: Focusing on Seasonal Factors, *Journal of Korean Society for Environmental Policy and Administration*, 25(1), 227-248, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.1.227>
- Rhee, J., Kim, S. (2018) New frames in the coverage of fine-dust disaster: Application of Structure Topic Modeling, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 62(4), 125-158, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.20879/kjics.2018.62.4.004>
- Ryoo, J.-Y., Kwon, T.-H., Kang, I.-S., Lee, K.-S., Jo, C.-W., Kim, J.-S., Kim, H.-H., Jang, W., Park, J.-J., Yoo, T.-S. (2019) A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter

- and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 701-712, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.6.701>
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., Kavuri, S.N. (2003) A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods, *Computers & Chemical Engineering*, 27(3), 293-311. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-6)
- Yeo, M., Kim, Y. (2019) Trends of the PM₁₀ Concentrations and High PM₁₀ Concentration Cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.2.249>
- Yu, G.-H., Lee, B.-J., Park, S.-S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Kim, S. (2019) A Case Study of Severe PM_{2.5} Event in the Gwangju Urban Area during February 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 195-213. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.2.195>

Authors Information

이용찬 (인천대학교 환경에너지공학과 석사과정)
권용범 (한국생산기술연구원 한러혁신센터 연구원)
이희관 (인천대학교 환경에너지공학과 교수)