

논문

# 국가제철산업단지 초미세먼지 원인별 정량적 기여량 평가 - PMF 모델 적용(PART I)

## Primary Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> in the National Steel Industrial Complex - Implication of PMF Model (PART I)

최서영, 오세호, 송명기, 전하정, 유근혜, 배민석\*

국립목포대학교 환경공학과

Seoyeong Choe, Sea-Ho Oh, Myoungki Song, Hajeong Jeon,  
Geun-Hye Yu, Min-Suk Bae\*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Muan,  
Republic of Korea

접수일 2023년 3월 20일  
수정일 2023년 4월 3일  
채택일 2023년 4월 4일

Received 20 March 2023  
Revised 3 April 2023  
Accepted 4 April 2023

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)61-450-2485  
E-mail : minsbae@mnu.ac.kr

**Abstract** The purpose of this study is to analyze PM<sub>2.5</sub> in the Gwangyang National Industrial Complex to present the characteristics of regional PM<sub>2.5</sub> and analyze emission sources. As a result, the concentration of PM<sub>2.5</sub> during the observation period was presented as 24.28 µg/m<sup>3</sup>. The major components of PM<sub>2.5</sub> were identified as organic carbon (OC), elemental carbon (EC), water soluble ions, heavy metals, etc. Metal Oxide and Fe were higher in winter than in summer. Fe showed high concentrations during the winter daytime, indicating that it was due to local industrial activity. According to Positive Matrix Factorization analysis, the sources of PM<sub>2.5</sub> in the Gwangyang National Industrial Complex were classified as (1) OCEC & Fe, (2) Soil Dust, (3) Secondary nitrate, (4) Secondary Sulfate & trace elements, and (5) Sea salt. The contribution of each source was OCEC & Fe 29%, Soil Dust 10%, Secondary nitrate 35%, Secondary sulfate & trace elements 23%, Sea salt 3%. The results of the study can be used for policies and improvements in the steel industry and environmental improvement in order to reduce fine dust in the Gwangyang National Industrial Complex.

**Key words:** Source apportionment, PM<sub>2.5</sub>, Industrial source

### 1. 배 경

산업 발전은 경제 발전에서 주요 역할을 담당하지만 환경경제학적 관점에서 판단할 경우 산업의 발전은 환경 오염과 반비례적인 관계에 있다(Sarwar and Maqbool, 2019; Landrigan, 2017). 또한 도시 계획발전과 고도 산업화를 위한 공업용 산업 관련 건물 등이 밀집된 산업단지는 생산제품 및 생산과정 등의 산업단지 구조에 따라 주변 지역에 특성화된 환경오염 물질을 배출하는 대형배출원으로 작용한다(Yang *et al.*, 2020a). 특히 이러한 대형배출원은 산업구조에 따른 대기오염물질 배출 특성에 의해 중금속, 휘발성유기

화합물 (Volatile organic compounds; VOCs), 다환방향족탄화수소 (Polynuclear aromatic hydrocarbons; PAHs) 등 특정 위해성 물질의 농도가 높은 것으로 알려져 있다(Yang *et al.*, 2020b; Zhang *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2017).

대형배출원인 산업단지의 주요 배출물질에 대한 다양한 선행 연구가 있다. 선행 연구를 살펴보면 안산에 위치한 반월국가산업단지 PM<sub>2.5</sub> 내 중금속 함유량이 주변 지역과 비교하였을 때 높게 나타났으며, 여수산업단지는 산업단지에서 배출되는 PAHs의 농도 및 도시 지역 PAHs 농도와 높은 상관성이 나타난다(Choi and Kim, 2023; Lim *et al.*, 2010). 또한 구미시의 경우

VOCs 농도가 산업단지, 도시 지역, 주거 지역 등으로 농도가 높게 나타나는 특성을 보였다(Choi *et al.*, 2004). 업종을 기준으로 분류할 경우 제철산업단지 주변 지역은 중금속 오염의 특성이 있으며, 석탄연소 및 석유화학단지 등은 VOCs의 배출 특성이 있고, 세부적으로 VOCs는 사용 원료 및 공정에 따라 배출되는 VOCs의 종류가 다른 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2010). 이러한 연구 결과는 대형배출원에 대한 대기오염물질이 주변환경에 미치는 영향들을 제시하고 있다. 따라서 대형배출원에 대한 대기오염물질의 관리는 대형배출원뿐만 아니라 대형배출원 주변 환경의 관리를 위해 절실히 필요하다.

한편, 광양국가산업단지는 제철산업단지로 지정면적 96,405,000 m<sup>2</sup> 크기를 가지고 있는 전라남도에서 가장 큰 제철산업단지이다. 선행 연구에 의하면 광양국가산업단지의 초미세먼지는 수용성 이온인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 및 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 등의 성분이 높으며, 특별히 광양국가산업단지 이외 지역과 비교하여 중금속 성분의 함량이 높게 관측되었다(Park *et al.*, 2021). 또한 관측된 광양국가산업단지의 중금속 물질의 농도와 종류는 장기노출로 인한 발암 발생 가능성이 있는 것으로 알려져 있다(Jeon *et al.*, 2010). 또한, 광양국가산업단지는 주기적인 해륙풍의 순환이 일어나는 지역에 위치하여 육풍을 타고 유출된 오염물질이 해풍에 의해 다시 유입되는 특성을 가지고 있다(Baek *et al.*, 2019). 따라서 광양국가산업단지 주변 지역에 대한 환경오염 및 인체 위해성을 저감시키기 위해서는 광양국가산업단지에서 배출되는 대기오염물질의 절대량을 감소시킬 필요가 있으며, 이를 위해서는 선행적으로 광양국가산업단지에서 배출되는 대기오염물질을 명확하게 규명해야 한다.

대기오염물질에 대한 배출원을 규명하는 다양한 방법이 있다. 대표적으로 Positive Matrix Factorization (PMF), Chemical Mass Balance (CMB), Principle Component Analysis (PCA), 미국 환경 보호청 (US EPA)의 UNMIX 모델 등이 있으며, 이 방법들은 PM<sub>2.5</sub>를 구성

하는 성분 중 특정 요소를 이용하여 배출원을 추정하는 수용모델이다(Kim *et al.*, 2018). 특히 PMF 모델은 변수들의 상호관련성을 소수의 인자로 추출하여 공통인자를 찾아내 각 변수가 받는 영향의 정도와 집단의 특성을 규명하며, 측정데이터의 오차 추정 (error estimate) 정보를 가중최소자승법 (weighted least-squares fit) 알고리즘을 사용하여 음의 값을 제거하기 때문에 기존 모델보다 진일보한 방법으로 평가된다(Song *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2018; Bove *et al.*, 2014). 이에 다양한 연구가 PMF 모델을 활용하여 이루어졌다. 대표적으로 서울의 대기오염물질을 관측하여 PM<sub>2.5</sub>의 발생 기여도 정량화 연구, 평택의 대기오염물질 관측 자료를 활용하여 미세먼지의 오염원별 기여도 분석 등이 있다(Park *et al.*, 2021; Heo *et al.*, 2018).

본 연구는 광양국가산업단지 대기오염물질의 특성과 배출원을 규명하는 것을 목적으로 한다. 연구를 위하여 광양국가산업단지의 PM<sub>2.5</sub>를 포집하여 화학 성분을 분석하였으며, 분석 결과를 활용하여 PMF 모델을 통해 대기오염물질의 배출원을 규명하였다. 연구 결과는 광양국가산업단지 PM<sub>2.5</sub>의 특성과 배출원을 분석하고, 향후 광양국가산업단지 대기오염물질의 관리를 위해 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 방 법

### 2.1 측정지점 및 연구 기간

측정지점은 그림 1에 제시한 전남 광양시 금호동에 위치한 미세먼지연구센터이다. 미세먼지연구센터는 광양국가산업단지와 약 1.2 km 떨어져 있기 때문에 배출원으로부터 직/간접적인 영향을 받을 것으로 판단된다. 측정을 위해 미세먼지연구센터에 이동식 트레일러를 설치하여 시료 포집 및 실시간 측정을 진행하였다. 관측 기간은 2021년 01월 03일부터 24일까지와 2021년 06월 20일부터 07월 08일까지로 두 계절에 대한 총 42일 관측을 수행하였다. 이동식 트레일러 내에는 (1) 기상장비, (2) 실시간 측정장비 (i.e., PM<sub>2.5</sub>

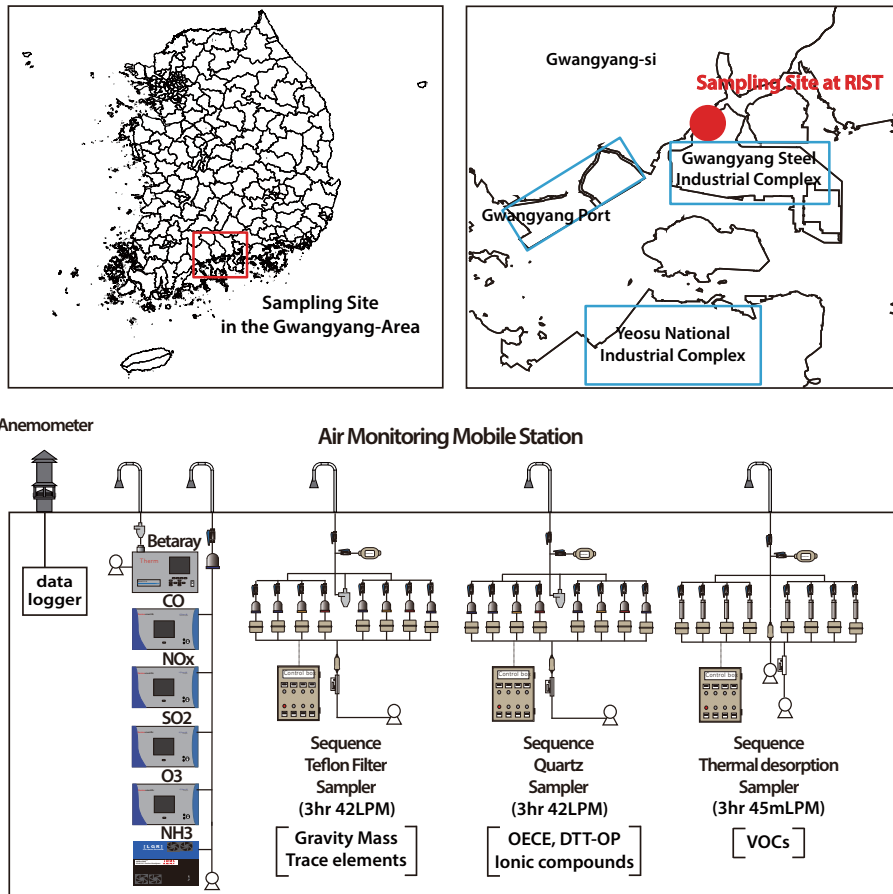


Fig. 1. Sampling location in the Gwangyang industrial area and schematic diagram of air monitoring mobile station.

mass, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>) 및 (3) 준실시간 PM<sub>2.5</sub> (테프론, 석영 필터 각 1대) 및 VOCs 샘플러를 운영하였다. 준실시간 샘플러는 자체 제작한 것으로 매 3시간마다 하루 8개 시료가 자동 포집되도록 설계되었다.

## 2.2 PM<sub>2.5</sub> 관측 및 분석

관측 기간 PM<sub>2.5</sub> 농도는 베타레이 측정기 (5014i Continuous Particulate Monitor, Thermo Scientific, USA)를 사용하여 실시간 관측하였다. 또한 PM<sub>2.5</sub>를 3시간 간격으로 필터 포집한 후 중량법에 근거하여 PM<sub>2.5</sub> 농도를 산정하여, 등가성 평가를 진행하였다.

PM<sub>2.5</sub> 성분 분석 항목은 Organic Carbon (OC)과 Elemental Carbon (EC) 등의 탄소 성분, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등 수용성 이온, Si, Fe, Zn 등 원소 성분이었다. 세부적으로 PM<sub>2.5</sub> 성분 분석을 위하여 석영 필터와 테프론 필터를 사용하여 3시간 간격으로 PM<sub>2.5</sub> 포집을 수행하였으며, 시료의 포집은 42 LPM하에 싸이클론이 장착된 자동시료 포집기를 이용하였다. 원소 성분의 분석은 테프론 필터에 포집된 시료를 대상으로 하였으며, 분석은 X-선 형광분광법(XRF, X-ray fluorescence spectrometry, QUANT'X, Thermo Scientific, USA)을 이용하였다. 탄소 성분인 OC와 EC의 분석은 석영 필터에 포집된

시료를 대상으로 하였으며, 분석은 National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH 5040) 프로토콜(protocol)을 기초로 한, 탄소분석기(Lab based OCEC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset laboratory Inc., USA)를 이용하여 분석하였다.

수용성 이온 성분 분석은 석영 필터에 포집된 시료를 대상으로 하였으며, 포집 필터를 증류수 10 mL와 함께, 향온 유체 순환기(CA-111, Eyla, Japan)와 연결된 초음파기(8800, Branson, USA)를 이용하여 2시간 동안 향온 추출한 후 음이온(Metrohm 930 Switzerland, Metrosp A Supp 150/4.0 column, 3.7 mM Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> & 1.0 mM NaHCO<sub>3</sub>) 및 양이온 이온크로마토그래피(Metrohm 930 Switzerland, Metrosep C4-250/4.0 column, 5 mM HNO<sub>3</sub>)를 이용하여 정량 분석하였다.

모든 시료에 대해서 15개 분석 시, 표준시료를 주입하여 초기 검량선의 일관성을 5% 이내에서 유지하였으며, 중복 분석을 통해 3% 이내 정밀성을 유지하였다. 또한, 최소 3배의 signal to noise (S/N) 피크를 매 시료마다 확인하여, 정량 분석의 기기분석 최저 한계 이상을 확인하였다. 자세한 분석 조건, 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL), 및 quality assurance/quality control (QA/QC) 등은 선행 연구에 자세히 나타냈다(Lee *et al.*, 2020, 2019).

### 2.3 수용모델

본 연구에서 사용한 PMF 모델은 2차원 행렬로 구성된 모집단의 원인 기여도를, 계산된 오염원 분류표에 의해 정량적으로 least-squares minimization (LSM)에 의해 계산하는 방법이다. CMB 모델과 비교해 볼 때, 오염원 분류표가 필요하지 않은 장점이 있으나, 모델 수행에 따른 입력 자료의 수가 최소 100개 이상 필요하고, 계산된 오염원 분류표 해석에 모델 수행자의 많은 결과 해석 경험이 필요하다. 본 연구에서는 광양 국가산업단지에서 배출되는 1차 오염원에 대한 정량적 기여량을 분석하고자, PM<sub>2.5</sub>, OCEC, 이온 성분, 및 원소 성분을 모델의 입력자료로 각 성분의 분석최저한계를 이용하여 불확도와 함께 활용하였다.

## 3. 결 과

광양에 위치한 국가산업단지 대기오염물질의 특성과 배출원을 규명하고자 2021년 1월과 6월 중에 미세 먼지연구센터에 이동식 트레일러를 설치하여 석영 및 테프론 필터에 PM<sub>2.5</sub>를 3시간 간격으로 시료를 포집하였다. 포집된 시료는 기기분석 후 PMF 모델을 통해 대기오염물질의 배출원을 규명하였다. 관측 기간 동안의 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 PM<sub>2.5</sub> 성분 분석 결과를 표 1에 나타냈으며, 주요 분석 성분의 일중 변화를 그림 2에 제시하였다. 표에서와 같이 관측 기간 동안의 PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도는 24.28 µg/m<sup>3</sup>으로 나타났으며, 세부적으로 겨울은 27.39 µg/m<sup>3</sup>, 여름은 20.66 µg/m<sup>3</sup>으로 나타나 여름과 비교하여 겨울이 높았다. 또한 그림 2에서와 같이 계절별 PM<sub>2.5</sub>의 일 변화의 서로 다른 양상을 보였으며, 일별 최고 농도를 기준으로 살펴볼 경우 겨울은 00~03시, 여름은 15~18시에 최대 농도를 나타냈다.

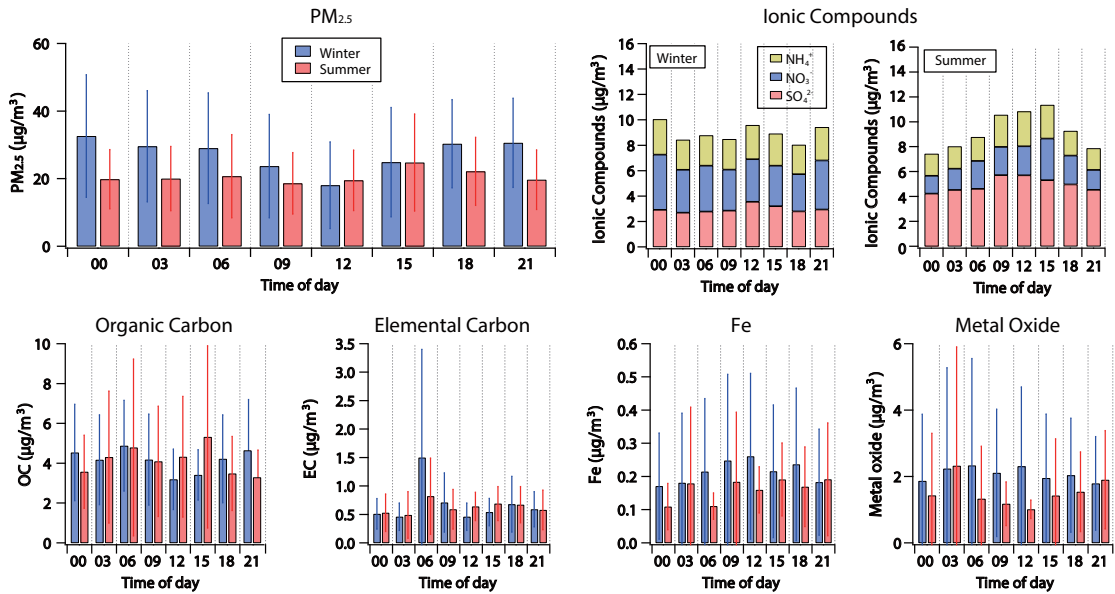
PM<sub>2.5</sub>를 구성하는 OC, EC, 수용성 이온 및 원소 성분의 특성을 살펴보았다. PM<sub>2.5</sub>를 구성하는 OC의 평균 농도는 4.15 µg/m<sup>3</sup>이었으며, 계절별 OC의 농도는 겨울 4.16 µg/m<sup>3</sup>, 여름 4.15 µg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. EC의 평균 농도는 0.65 µg/m<sup>3</sup>, 계절별 농도는 겨울 0.68

**Table 1.** Results of chemical compounds of PM<sub>2.5</sub> in the Gwangyang Industrial Area.

| (unit : µg/m <sup>3</sup> )<br>Compound | Winter<br>Average ± Std <sup>1)</sup> | Summer<br>Average ± Std | Overall<br>Average ± Std |
|---|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| PM <sub>2.5</sub>                       | 27.39 ± 15.98                         | 20.66 ± 10.57           | 24.28 ± 14.15            |
| OC                                      | 4.16 ± 2.21                           | 4.15 ± 3.18             | 4.15 ± 2.70              |
| EC                                      | 0.68 ± 0.81                           | 0.62 ± 0.41             | 0.65 ± 0.66              |
| Metal Oxide <sup>2)</sup>               | 2.08 ± 2.29                           | 1.52 ± 1.86             | 1.82 ± 2.12              |
| Fe                                      | 0.21 ± 0.22                           | 0.16 ± 0.15             | 0.19 ± 0.19              |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>            | 2.51 ± 1.50                           | 2.15 ± 1.44             | 2.34 ± 1.48              |
| Na <sup>+</sup>                         | 0.17 ± 0.13                           | 0.35 ± 0.69             | 0.25 ± 0.48              |
| Cl <sup>-</sup>                         | 0.19 ± 0.14                           | 0.33 ± 0.69             | 0.26 ± 0.48              |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>            | 3.49 ± 2.91                           | 2.15 ± 2.62             | 2.87 ± 2.86              |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>           | 2.98 ± 1.51                           | 4.95 ± 3.16             | 3.89 ± 2.61              |

<sup>1)</sup>Standard deviation

<sup>2)</sup>Sum of oxides of major crustal elements using Si, Al, Fe, Mg, Ti, Ca, and K from XRF analyses (Stone *et al.*, 2009).



**Fig. 2.** Diurnal patterns of PM<sub>2.5</sub> mass, ionic compounds, organic carbon, elemental carbon, Fe, and metal oxides concentrations during the sampling periods (note; error bars indicate standard deviation).

µg/m<sup>3</sup>, 여름 0.62 µg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 즉, OC 및 EC는 계절 변화에 따른 농도의 차이가 크지 않았으며, EC는 겨울과 여름 모두 06~09시 사이에 가장 높은 값을 나타내었는데 이는 광양국가산업단지의 출근 시간으로 차량 배출에 의한 것으로 해석된다.

PM<sub>2.5</sub>의 수용성 이온은 분석 성분의 약 58%를 차지하고 있었으며, 수용성 이온 중 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (SNA)는 분석된 수용성 이온 성분의 90% 이상으로 대부분의 수용성 이온은 SNA로 확인되었다. 세부적으로 SNA의 계절별 농도 변화를 살펴보면 겨울은 여름과 비교하여 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도가 높은 반면 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도가 낮게 나타났으며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 겨울과 여름의 차이가 크지 않았다. 하지만 겨울의 SNA 농도는 8.89 µg/m<sup>3</sup>, 여름의 SNA 농도는 9.25 µg/m<sup>3</sup>으로 나타나 계절에 따른 SNA의 총 농도는 유사하게 나타났다. SNA의 물비를 살펴본 결과, [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>]/[SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]를 이용하여 계산된 ammonium-rich는 겨울 4.49, 여름 2.32로 나타나 겨울과 여름이 모두 1.5 이상으로 ammonium-rich 상태로 나타났으며, [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]/[SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]는 겨울 1.55, 여름

1.55로 나타났다. 또한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 반응하여 생성되는 물질을 황산암모늄((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 질산암모늄(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)이라 가정할 경우 당량비(2 × [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] + [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>])/[NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)는 겨울 0.79, 여름 1.53으로 나타났다(Hu *et al.*, 2014; Pathak *et al.*, 2004). 즉, [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>]/[SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]를 이용한 ammonium-rich는 측정 지점의 여름이 SNA의 형성이 쉬운 환경이라는 것을 보여주지만 실제 SNA의 물비를 계산할 경우 측정 지점의 여름 PM<sub>2.5</sub> 내 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 반응하기 부족한 수준이었다. 즉, 겨울과 다르게 여름은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 이외의 중화 성분 존재 또는 산성 상태(acidic condition)로 분석된다.

한편, 측정 지점은 주기적인 해륙풍의 순환이 일어나는 지역에 위치하여 해풍에 의한 영향을 받으며, 해양에서 생성된 에어로졸이 유입될 수 있다(Baek *et al.*, 2019). 해양 생성 에어로졸은 주로 바다에서 화이트캡(whitecap)이 형성되는 동안 거품이 터지면서 생성되며, 이에 해양 생성 에어로졸은 Na, Cl, Mg, S, Ca, Br 등을 포함하며 해수와 유사한 조성을 가진다(Ada-

chi and Buseck, 2015; Athanasopoulou *et al.*, 2008). 또한 대기 수송과정에서 해양 생성 에어로졸은 대기 중 NaCl, HCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 및 NaNO<sub>3</sub> 등을 형성한다 (Steinfeld, 1998). 측정 지점의 Cl<sup>-</sup> 농도는 겨울 0.19 µg/m<sup>3</sup>, 여름 0.33 µg/m<sup>3</sup>으로 겨울과 비교하여 여름에 높다. 또한 계절별 시료 수 160개 중 Cl<sup>-</sup>이 PM<sub>2.5</sub>의 13% 이상을 차지한 시료는 겨울 0개, 여름 6개였으며, Cl<sup>-</sup>이 PM<sub>2.5</sub>의 5~13%를 차지한 시료 수는 겨울 2개, 여름 9개로 분석되었다. Cl<sup>-</sup>의 농도가 PM<sub>2.5</sub>의 13% 이상일 때 해염에 의한 영향이 강하다는 것을 고려할 경우 겨울과 비교하여 여름에 해염의 영향이 높다는 것을 알 수 있다(Tao *et al.*, 2014; Xiu *et al.*, 2004). 또한 Na<sup>+</sup>의 농도 역시 겨울 0.17 µg/m<sup>3</sup>보다 여름이 0.35 µg/m<sup>3</sup>으로 높게 나타났다. 앞서 설명한 바와 같이 여름과 겨울의 SNA 농도는 겨울과 여름이 유사하지만

SNA 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 농도는 여름이 겨울과 비교하여 절반 수준으로 나타났으며, 여름의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 몰비로 계산할 경우 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 반응하기 어려운 수준이었다. 반면 여름은 해풍에 의한 해염 입자의 영향이 겨울과 비교하여 강하게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 측정 지점의 SNA 형성 메커니즘은 겨울과 여름에 차이가 있으며, 겨울과 비교하여 여름은 해염에 함유된 Na<sup>+</sup> 등의 성분에 의해 SNA가 형성되었음을 추정할 수 있다.

Metal Oxide 및 Fe는 겨울 2.08 µg/m<sup>3</sup>, 0.21 µg/m<sup>3</sup>, 여름 1.52 µg/m<sup>3</sup>, 0.16 µg/m<sup>3</sup>으로 여름과 비교하여 겨울에 높게 나타났다. 특히, Fe의 경우 겨울 낮 시간에 높은 농도를 나타내 지역 산업활동에 의한 것으로 판단된다. 좀 더 자세히, Fe/PM<sub>2.5</sub>의 겨울 일중 변화를 분석하면, 00~03시 사이의 비율보다 12~15시 사이의

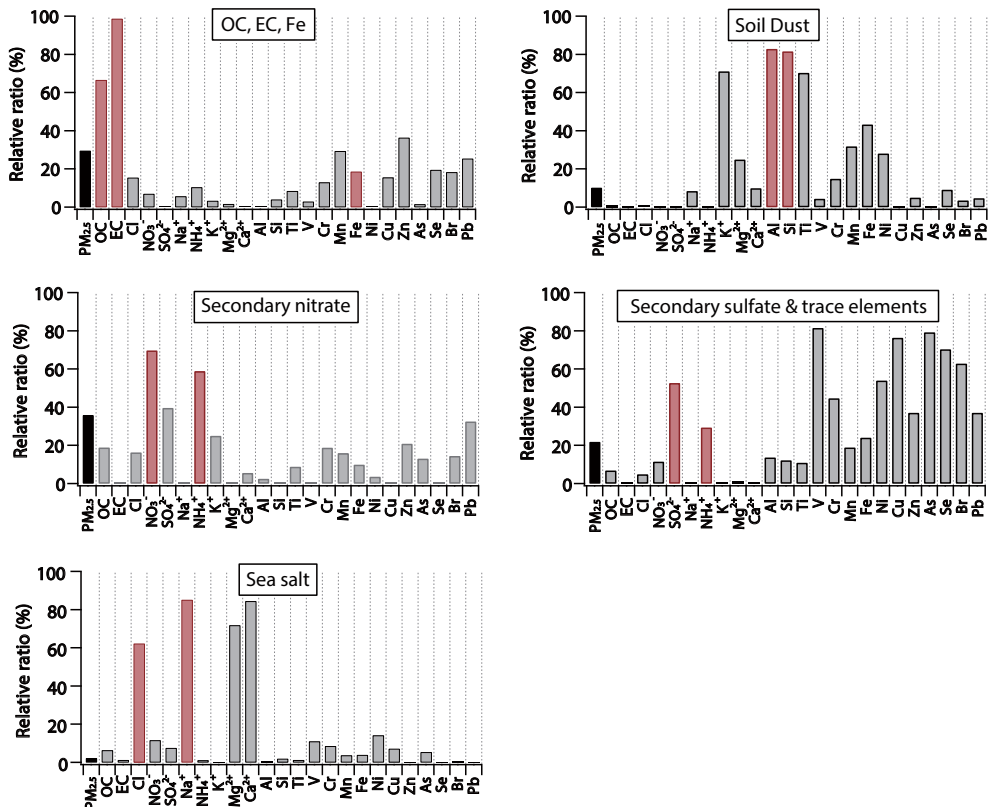


Fig. 3. Source profiles of Positive Matrix Factorization (PMF).

비율이 2.8배 높게 나타나 지역 Fe의 농도는 기상강도보다 산업활동의 의한 농도증가가 상대적으로 크게 나타났다. Fe를 포함한 지역 배출원인을 자세히 분석하고자 PMF 모델을 수행하였다.

그림 3은 수용모델 PMF로부터 계산된 측정 지점의 1차 발생 원인을 분류한 것이다. PMF 분석 결과, 5가지 원인으로 분류되었다. 좀 더 자세히 설명하면, 지역 1차 배출원인인 OCEC & Fe, Soil Dust, Secondary nitrate, Secondary sulfate & trace elements, Sea salt로 분류되었다. 본 연구의 목적은 Fe를 포함한 지역적 1차 배출의 대기 중 PM<sub>2.5</sub>의 정량적 기여량을 분석하는 것을 포함한다. Fe의 경우 토양 및 외부 유입 등 다양한 원인이 있으므로, 수용모델을 통해서 이를 분류하고자 하였다. OCEC & Fe 원인의 경우, 원인별 지표 성분 (source marker) 중 Fe/Si의 비율이 4.6으로, soil dust의 비율 0.5보다 매우 높게 나타났다. 따라서, 분

석된 Fe 농도의 19% 및 43%는 OCEC & Fe 및 Soil Dust로부터 기인한 것으로 해석된다. 물론, 토양으로부터 상대적으로 많은 농도가 대기 중으로 기여되지만, OCEC & Fe 원인 지표 성분을 살펴보면, 많은 유기 성분이 함께 지역 농도에 기여한 것으로 해석된다. Secondary Nitrate, Secondary Sulfate & Trace Elements의 경우, 원인 지표 성분 2차 이온 성분과 함께 미량원소가 함께 존재한다. 본 연구에서는 이를 성분을 분류하여 해석하지 않고 함께 기여량을 분석하였다. 마지막으로, 앞서 설명한 바와 같이, Sea Salt는 NaCl에 의한 해염입자 원인으로 분류하였다.

그림 4는 겨울과 여름에 측정된 PM<sub>2.5</sub>를 구성하는 원인 중 OCEC & Fe의 값을 나타낸 그래프와 시간별 일중 변화 및 PMF로 분석된 원인분류를 나타낸 그래프이다. 그림 2에서 PM<sub>2.5</sub>의 농도값은 여름보다 겨울에 더 높은 값을 나타냈지만 OCEC & Fe의 농도값은

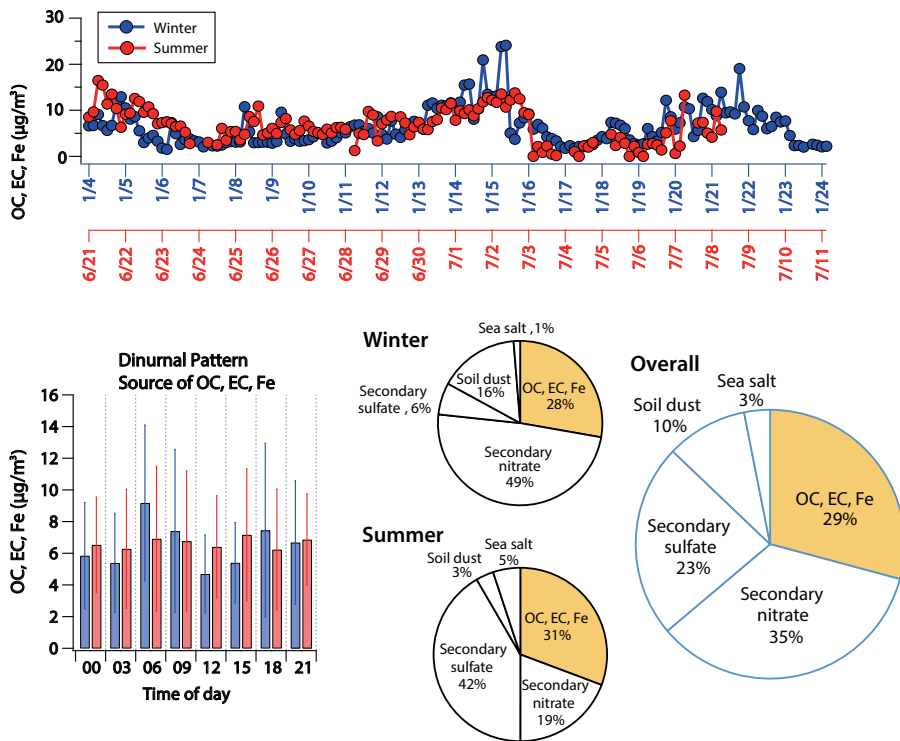
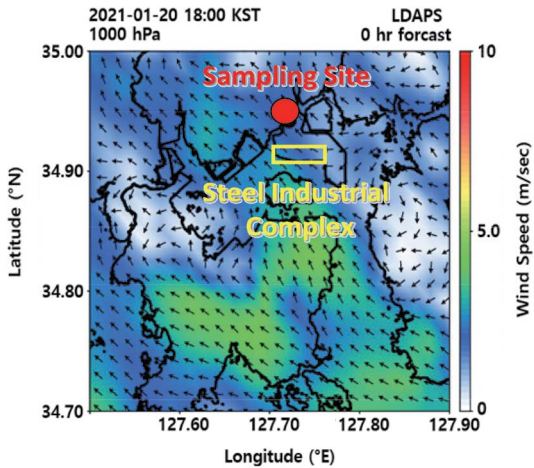


Fig. 4. Time series of source of OCEC & Fe, diurnal pattern of source of OCEC & Fe during the sampling periods, and PMF results of source contributions in seasons.



**Fig. 5.** Result of Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) model on January, 20th 2021.

겨울과 여름 사이에 큰 차이가 나타나지 않았다. 즉, 본 원인은 계절적 기상요인보다 배출원에 의한 강도가 일정하게 나타났을 것으로 판단한다. 또한, 겨울의 일중 변화를 살펴보면, 06시에서 09시까지가 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 이는 광양국가산업단지의 특성상 출근 시간의 이동상이 원인 및 배출 등 복합적으로 나타났을 것이라고 예측된다. 결과, PM<sub>2.5</sub>를 내 OCEC & Fe에 의한 원인은 관측 기간 동안 겨울이 약 28%, 여름이 약 31%로, 평균 약 29%로 분석되었다.

그림 5에서 PM<sub>2.5</sub>를 구성하는 원인 중 OCEC & Fe의 값이 상대적으로 높은 겨울철 사례일 (2021년 01월 20일 18시의 바람장)을 선정하여, Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) 모델 결과를 나타냈다. 물론, 전체 측정에 대한 결과는 아닐지라도, 사례 분석 결과, 광양국가산업단지에서 측정 지점으로 PM<sub>2.5</sub> 원인 중 OCEC & Fe가 영향을 미칠 가능성이 크다. 향후, 미기상학적 수치해석을 통해, 정밀한 기상분석을 진행할 예정이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 광양국가산업단지의 PM<sub>2.5</sub>를 분석하여

지역적 PM<sub>2.5</sub>의 특성을 제시함과 동시에 배출원을 분석하는 것을 목적으로 한다. 연구 결과 관측 기간 동안의 PM<sub>2.5</sub> 농도값은 24.28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 관측되었다. PM<sub>2.5</sub>의 성분 분석 결과 주요 성분은 OC 및 EC의 탄소 성분과 수용성 이온, 중금속 등으로 분석되었으며, Metal Oxide 및 Fe는 겨울 2.08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 0.21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 여름 1.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 0.16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 여름과 비교하여 겨울에 높게 나타났다. 특히, Fe의 경우 겨울 낮 시간에 높은 농도를 나타내 지역 산업활동에 의한 것으로 판단된다. PMF 분석 결과 광양국가산업단지의 PM<sub>2.5</sub> 발생 원인은 OCEC & Fe, Soil Dust, Secondary nitrate, Secondary Sulfate & trace elements, Sea salt로 분류되었으며, 각 분류에 의한 기여량은 OCEC & Fe 29%, Soil Dust 10%, Secondary nitrate 35%, Secondary sulfate & trace elements 23%, Sea salt 3%로 나타났다. 연구 결과는 광양국가산업단지의 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 배출원을 제시하며 초미세먼지 저감을 위해 정책 및 제철산업단지 환경 개선에 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 미세먼지사업단(NRF-2020 M3G1A1I15000) 및 국립환경과학원 남부권 미세먼지 연구센터(NIER-2021-03-03-007) 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- Adachi, K., Buseck, P.R. (2015) Changes in shape and composition of sea-salt particles upon aging in an urban atmosphere, *Atmospheric Environment*, 100, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.036>
- Athanasopoulou, E., Tombrou, M., Pandis, S.N., Russell, A.G. (2008) The role of sea-salt emissions and heterogeneous chemistry in the air quality of polluted coastal areas, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(19), 5755-5769. <https://doi.org/10.5194/acp-8-5755-2008>
- Baek, K.-M., Seo, Y.-K., Baek, S.-O. (2019) Occurrence of Particulate Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthal-



- ates in the Ambient Air of Yeosu · Gwangyang Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 767-785. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.767>
- Bove, M., Brotto, P., Cassola, F., Cuccia, E., Massabò, D., Mazzino, A., Prati, P. (2014) An integrated PM<sub>2.5</sub> source apportionment study: positive matrix factorisation vs. the chemical transport model CAMx, *Atmospheric Environment*, 94, 274-286.
- Choi, M.-S., Kim, Y.-H. (2023) A Study on Air Pollutants Emitted from Yeosu National Industrial Complex Affecting Air Quality in Yeosu, Republic of Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 77-93, (in Korean with English Abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.77>
- Choi, W.-G., Bae, S.-H., Park, D.-S., Jeong, Y.-K., Kim, T.-O. (2004) Characterization of Volatile Organic Compounds concentrations in the ambient air of the Kumi industrial complex, *Journal of the Environment Sciences*, 13(3), 205-214, (in Korean with English Abstract).
- Heo, J., Kim, C., Min, Y., Kim, H., Sung, Y., Kim, J., Lee, K., Heo, J. (2018) Source Apportionment of PM<sub>10</sub> at Pyeongtaek Area Using Positive Matrix Factorization (PMF) Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 849-864. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.849>
- Hu, G., Zhang, Y., Sun, J., Zhang, L., Shen, X., Lin, W., Yang, Y. (2014) Variability, formation and acidity of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> in Beijing based on the semi-continuous observations, *Atmospheric Research*, 145-146, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.014>
- Jeon, J.-M., Kang, B.-W., Lee, H.-S., Lee, C.-M. (2010) Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM<sub>2.5</sub> in Industrial Areas, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 36(4), 294-305. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2010.36.4.294>
- Kim, S., Kim, T.-Y., Yi, S.-M., Heo, J. (2018) Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> using positive matrix factorization (PMF) at a rural site in Korea, *Journal of Environmental Management*, 214, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.027>
- Landrigan, P.J. (2017) Air pollution and health, *The Lancet Public Health*, 2(1), 4-5.
- Lee, Y., Kim, E., Oh, S., Park, M., Chong, J., Lee, H., Song, H., Kwak, N., Lee, E., Kim, K., Park, K., Bae, M. (2019) Assessment between MSA and Land Originated Secondary Organic Products of PM<sub>2.5</sub> Using LC/MSMS in Gwangju Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 636-646, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE>
- Lee, Y., Song, M., Kim, E., Oh, S., Park, C., Choi, W., Lee, T., Shon, Z., Bae, M. (2020) Source Identification of PM<sub>2.5</sub> Major Elemental Components at the Harbor Industrial Area in Busan - Comparison of Trace Elemental Concentrations Using Two XRFs, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 16-227, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.216>
- Lim, J.-M., Lee, J.-H., Moon, J.-H., Chung, Y.-S., Kim, K.-H. (2010) Airborne PM<sub>10</sub> and metals from multifarious sources in an industrial complex area, *Atmospheric Research*, 96(1), 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.11.013>
- Lu, Z., Liu, Q., Xiong, Y., Huang, F., Zhou, J., Schauer, J.J. (2018) A hybrid source apportionment strategy using positive matrix factorization (PMF) and molecular marker chemical mass balance (MM-CMB) models, *Environmental Pollution*, 238, 39-51.
- Park, H.-Y., Oh, G.-Y., Park, H.-S., Kim, H.-R., Lee, B.-R., Park, C.-O., Lim, H.-S., Park, G.-H., Park, J., Bae, M.-S. (2021) Assessment of Regional Source Contribution of PM<sub>2.5</sub> in the Gwangyang Bay Area, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 24(2), 62-74. <https://doi.org/10.36278/jeaht.24.2.62>
- Pathak, R.K., Yao, X., Chan, C.K. (2004) Sampling artifacts of acidity and ionic species in PM<sub>2.5</sub>, *Environmental Science & Technology*, 38(1), 254-259. <https://doi.org/10.1021/es0342244>
- Sarwar, M.T., Maqbool, A. (2019) Causes and control measures of urban air pollution in China, *Environment & Ecosystem Science (EES)*, 3(1), 35-36.
- Song, M., Park, J., Lim, Y., Oh, S.-H., Lee, J.Y., Lee, K.-H., Bae, M.-S. (2022) Long-range transport impacts from biomass burning and secondary pollutant sources based on receptor models during KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 276, 119060. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119060>
- Steinfeld, J.I. (1998) Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 40(7), 26-26.
- Tao, Y., Yin, Z., Ye, X., Ma, Z., Chen, J. (2014) Size distribution of water-soluble inorganic ions in urban aerosols in Shanghai, *Atmospheric Pollution Research*, 5, 639-647. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.073>
- Wu, W., Zhao, B., Wang, S., Hao, J. (2017) Ozone and secondary organic aerosol formation potential from anthropo-

- genic volatile organic compounds emissions in China, *Journal of Environmental Sciences*, 53, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.025>
- Xiu, G., Zhang, D., Chen, J., Huang, X., Chen, Z., Guo, H., Pan, J. (2004) Characterization of major water-soluble inorganic ions in size-fractionated particulate matters in Shanghai campus ambient air, *Atmospheric Environment*, 38, 227-236. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.053>
- Yang, H.-H., Gupta, S.K., Dhital, N.B. (2020a) Emission factor, relative ozone formation potential and relative carcinogenic risk assessment of VOCs emitted from manufacturing industries, *Sustainable Environment Research*, 30(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00068-2>
- Yang, H.-H., Gupta, S.K., Dhital, N.B., Wang, L.-C., Elumalai, S.P. (2020b) Comparative investigation of coal- and oil-fired boilers based on emission factors, ozone and secondary organic aerosol formation potentials of VOCs, *Journal of Environmental Sciences*, 92, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.02.024>
- Yuan, B., Shao, M., Lu, S., Wang, B. (2010) Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 44(15), 1919-1926. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.02.014>
- Zhang, Y., Yang, L., Bie, S., Zhao, T., Huang, Q., Li, J., Wang, P., Wang, Y., Wang, W. (2021) Chemical compositions and the impact of sea salt in atmospheric PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the coastal area, *Atmospheric Research*, 250, 105323. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105323>
- Zhang, Z., Yan, X., Gao, F., Thai, P., Wang, H., Chen, D., Wang, B. (2018) Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China, *Environmental Pollution*, 238, 452-461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.054>
- Zheng, J., Yu, Y., Mo, Z., Zhang, Z., Wang, X., Yin, S., Cai, H. (2013) Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China, *Science of The Total Environment*, 456-457, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.055>

### Authors Information

최서영 (국립목포대학교 환경공학과 석사연구원)

(s184221@365.mokpo.ac.kr)

오세호 (국립목포대학교 환경공학과 박사연구원)

(d17418202@365.mokpo.ac.kr)

송명기 (국립목포대학교 환경공학과 학술연구교수)

(msong@mnu.ac.kr)

전하정 (국립목포대학교 환경공학과 학부연구원)

(hajeong1115@365.mokpo.ac.kr)

유근혜 (국립목포대학교 환경공학과 연구교수)

(fanygh89@mnu.ac.kr)

배민석 (국립목포대학교 환경공학과 교수)

(minsbae@mnu.ac.kr)