



## 안산·시흥 산업단지 지역 PM<sub>2.5</sub> 중 이온, 탄소, 원소성분의 특성 연구

이혜원<sup>1</sup> , 이승현<sup>2</sup> , 전정인<sup>3</sup> , 이정일<sup>4</sup> , 이철민<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>서경대학교 위해성평가연구소, <sup>2</sup>서경대학교 환경화학공학과, <sup>3</sup>서경대학교 나노생명공학과, <sup>4</sup>한국화학융합시험연구원 건축기후대응센터, <sup>5</sup>서경대학교 나노화학생명공학과

### A Study on the Characteristics of Ion, Carbon, and Elemental Components in PM<sub>2.5</sub> at Industrial Complexes in Ansan and Siheung

Hye-Won Lee<sup>1</sup>, Seung-Hyeon Lee<sup>2</sup>, Jeong-In Jeon<sup>3</sup>, Jeong-Il Lee<sup>4</sup>, and Cheol-Min Lee<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Risk Assessment, Seokyeong University, <sup>2</sup>Department of Environmental Chemical Engineering, Seokyeong University, <sup>3</sup>Department of Nano & Biological Engineering, Seokyeong University, <sup>4</sup>Climate Change Action Center, Korea Testing & Research Institute, <sup>5</sup>Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University

#### ABSTRACT

**Background:** The health effects of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) bonded with various harmful chemicals differ based on their composition, so investigating and managing their concentrations and composition is vital for long-term management. As industrial complexes emit considerable quantities of pollutants, higher PM<sub>2.5</sub> concentrations and chemical component effects are expected than in other places.

**Objectives:** We investigated the concentration distribution ratios of PM<sub>2.5</sub> chemical components to provide basic data to inform future major emissions control and PM<sub>2.5</sub> reduction measures in industrial complexes.

**Methods:** We monitored five sites near the Ansan and Siheung industrial complexes from August 2020 to July 2021. Samples were collected and analyzed twice per week in spring/winter and once per week in summer/autumn according to the National Institute of Environmental Research in the Ministry of Environment's Air Pollution Monitoring Network Installation and Operation Guidelines. We investigated and compared composition ratios of 29 ions, carbon, and elemental components in PM<sub>2.5</sub>.

**Results:** The analysis of PM<sub>2.5</sub> components at the five sites revealed that ion components accounted for the greatest total mass at approximately 50% while carbon components and elemental components contributed 23~28% and 8~10%, respectively. Among the ionic components, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> occupies the greatest proportion. OC occupies the greatest proportion of the carbon components and sulphur occupies the greatest proportion of elemental components.

**Conclusions:** This study investigated the concentration distribution ratios of PM<sub>2.5</sub> chemical components in industrial complexes. We believe these results provide basic chemical component concentration ratio data for establishing future air management policies and plans for the Ansan and Siheung industrial complexes.

**Key words:** Chemical composition, emission sources, industrial complexes, PM<sub>2.5</sub>

Received February 21, 2022

Revised April 4, 2022

Accepted April 13, 2022

#### Highlights:

- The concentration of the ion components were the highest among other components of PM<sub>2.5</sub>.
- Among the carbon components of the sampling sites, OC accounted for most.
- The sampling sites had a high contribution from mobile pollutants such as automobile exhaust in common.

#### \*Corresponding author:

Deptment of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, 124 Seogyong-ro, Seonbuk-gu, Seoul 02713, Republic of Korea  
Tel: +82-2-940-2924  
Fax: +82-2-940-7616  
E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

## I. 서 론

대기 중 초미세먼지(particulate matter with an aerodynamic diameter of  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ , PM<sub>2.5</sub>)는 눈에 보이지 않을 만큼 작아 호흡기 및 심혈관 질환에 영향을 주는 등 건강에 치명적이며,

2013년에 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하의 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)가 1급 발암물질로 지정하였다.<sup>1)</sup> WHO 가이드 라인을 초과하는 PM<sub>2.5</sub> 농도에 장기간 노출되면 심폐 및 폐암 사망률이 증가할 수 있기 때문에 고농도 PM<sub>2.5</sub> 노출은 건강에



위협이 된다.<sup>2)</sup>

PM<sub>2.5</sub>의 구성 화학성분들은 Al, K, Ca, Si, Pb 등과 같은 금속성분, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 등과 같은 이온 성분, 그리고 유기탄소(organic carbon, OC)와 무기탄소(elemental carbon, EC)와 같은 탄소 성분으로 구성되며,<sup>3)</sup> 해염, 토양먼지 등과 같은 자연적 배출원과 교통, 연료 연소, 산업활동과 건설 공사 등과 같은 인위적 배출원이 있다.<sup>4)</sup> 예를 들어 알루미늄(Al)과 철(Fe)은 지각 기원 원소로 토양 먼지와,<sup>5)</sup> 니켈(Ni)과 바나듐(V)은 석유 화학 공장과,<sup>6)</sup> 아연(Zn)과 구리(Cu)는 폐기물 소각과 관련이 있으며<sup>7)</sup> 납(Pb)은 자동차 배출의 지시자로 이용된다.<sup>8)</sup>

산업단지 지역의 경우 다른 일반지역에 비해 다량의 오염물질이 배출되어 PM<sub>2.5</sub> 중 화학성분의 농도가 높을 것으로 예상된다. 안산·시흥지역은 반월산업단지, 시화산업단지와 같은 대규모 대기오염물질 배출시설이 위치하고 있어 PM<sub>2.5</sub>에 대한 노출 위험이 다른 지역보다 클 것으로 예상되지만, 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC), 악취 등과 같은 가스상 오염물질에 관한 연구가 주를 이루고 있어<sup>9-11)</sup> PM<sub>2.5</sub> 화학성분에 대한 연구는 미비한 실정이다. PM<sub>2.5</sub>는 질량대비 비표면적이 큰 특성을 가지고 있어 입자 표면에 각종 유해오염물질의 흡착이 용이하고,<sup>12)</sup> 인체에 대한 영향은 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도가 아닌 구성성분에 의한 영향이 더 큰 것으로 알려져 있다.<sup>13)</sup> PM<sub>2.5</sub>의 위해성을 줄이고, 효과적 저감대책을 세우려면 배출원의 영향을 크게 받을 것으로 예상되는 지역에서의 PM<sub>2.5</sub>의 주요 화학성분과 농도를 파악하는 것이 중요하며,<sup>14)</sup> 이에 따른 PM<sub>2.5</sub>의 화학성분과 배출원을 이해하고 건강 영향을 평가하고 통제 조치를 개발하는 것이 필요하다.<sup>13)</sup>

이에 본 연구는 안산·시흥지역에 위치한 국가산업단지 인근 PM<sub>2.5</sub>의 화학적 성분 특성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 2020년 8월부터 2021년 7월까지의 안산·시흥지역 산업단지 인근 5개 지점의 PM<sub>2.5</sub>를 채취하였으며, 이온, 탄소, 원소 성분의 29개 항목을 분석하여 제시함으로써 향후 산업단지 지역의 PM<sub>2.5</sub> 주요 배출원 추정 및 배출원 관리, PM<sub>2.5</sub> 저감 대책 수립 등에 기초적 자료를 제공하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 측정지점

안산시와 시흥시에 위치하는 국가산업단지로는 반월산업단지과 시화산업단지, 시화메카트로닉스(Multi Techno Valley, MTV)가 있다. 본 연구에서는 안산·시흥 지역의 산업단지 특성에 따른 PM<sub>2.5</sub> 화학성분에 미치는 영향을 분석하기 위하여 5개의 대기측정소를 Fig. 1과 같이 선정하였다. B1 (37°19'14.1"N, 126°43'53.7"E), B4 (37°21'27.3"N, 126°43'35.3"E), B5 (37°18'48.7"N, 126°43'40.9"E)지점은 시화산업단지와 시화MTV가 인근에 위치하고 있으며 B2 (37°20'00.4"N, 126°

47'28.3"E), B3 (37°19'08.4"N, 126°47'28.2"E) 지점은 반월산업단지가 인근에 위치하고 있으며, 각 지점의 건물 옥상에서 시료를 채취하였다.

측정을 시작한 2020년 8월 기준 시화산업단지에는 11,303개사, 시화 MTV에는 1,018개사, 반월산업단지에는 7,306사가 입주해 있으며 가동률은 순서대로 96.0%, 94.0%, 96.8%로 조사되었으며 주요 업종은 시화산업단지의 경우 기계(59.9%), 전기전자(15.1%)이며 시화 MTV의 경우 전기전자(38.2%), 기계(35.7%), 반월산업단지의 경우 기계(37.3%), 전기전자(35.3%)로 전체 입주시설의 약 70%를 기계, 전기전자 업종이 차지하고 있는 것으로 조사되었다.<sup>15)</sup>

### 2. 시료채취

PM<sub>2.5</sub> 측정 시 미국 EPA FRM PM<sub>2.5</sub> 측정 방법에 적합하게 설계된 중량농도 방식의 측정 장비(Low volume air sampler, PMS-204, APM Co., Korea)를 사용하여 시료를 채취하였다. 이때 유량은 16.7 L/min으로 24시간 또는 48시간 동안 5개 측정지점에서 동시 측정을 수행하였다. 측정장비의 설치와 시료의 채취 및 운반은 환경부·국립환경과학원 「대기오염측정망 설치·운영지침」에 따라 수행하였다.<sup>16)</sup> 이온 성분 및 미량원소 성분, 탄소 성분을 분석하기 위해 두 대의 시료채취기를 사용하였으며 이들 장비에는 각각 국립환경과학원이 지정한 테프론 필터(PTFE 2.0 μm, 47 mm), 석영 필터(47 mm)를 장착하였다. 테프론 필터는 채취 전·후의 여지는 분석 전까지 멸균된 페트리디쉬에 넣고 파라핀 필름 등으로 밀봉한 후 냉장 보관하였으며 석영 필터는 가열처리 후 사용하였다. 채취된 여지를 이송할 때에는 PM<sub>2.5</sub>를 구성하고 있는 성분들이 휘발 및 반응 등으로 손실되지 않도록 아이스박스에 냉매를 채워 저온으로 유지시킨 상태에서 이송하였으며 이송 중 흔들림이나 충격 등으로

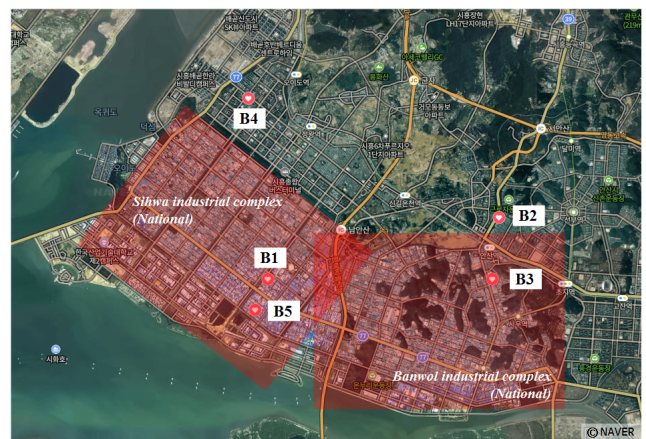


Fig. 1. The sampling sites in the Ansan and Siheung industrial complexes area (B1, B5: Sihwa & Sihwa MTV; B2, B3: Banwol; B4: Sihwa)

여지에 채취된 PM<sub>2.5</sub> 입자의 손실을 막기 위하여 정전기를 방지할 수 있는 재질로 되어있고, 흔들림 등을 방지할 수 있는 완충 이송장치를 사용하였다.

시료채취 기간은 2020년 8월부터 2021년 7월까지 약 1년 동안 시료를 채취하였으며 1주에 1회 또는 2회 수행되었다. 그러나 태풍이나 폭우와 같은 기상조건 또는 PM<sub>2.5</sub> 고농도의 경우 채취 중 펌프에 가해지는 압력으로 인한 장비의 고장으로 일부 시료의 손실이 발생한 경우 채취 시료 수 및 시료 분석에서 제외하였다. 각 지점에서의 시료채취 기간 및 채취된 시료의 수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

### 3. 시료분석

#### 3.1. 질량농도

각 필터는 시료 채취 전·후로 24시간 항온·항습 과정을 거쳐 무게를 측정하였으며, PM<sub>2.5</sub>의 질량농도의 보정을 위하여 실험실 바탕여지(Lab Blank, LAB)와 현장 공여지(Field Blank, FB)를 이용하였다. PM<sub>2.5</sub> 한 묶음의 여지마다 새로운 LAB를 사용하였으며, 시료채취 기간 동안 실험실 내 보관함에 보관하였다가 시료채취 후 정도관리를 점검할 목적으로 다시 무게를 칭량하였다. FB 또한 여지 묶음의 무게를 재는 과정마다 새로운 FB를 사용하였으며 시료채취 장소로 옮겨진 후 채취과정은 거치지 않고 회수되어 정도관리를 위한 목적으로 다시 무게를 칭량하였다. PM<sub>2.5</sub> 질량농도는 아래의 식에 따라 계산되었다.

$$PM_{2.5}(\mu g/m^3) = \frac{(W_f - W_i) - (W_{FBf} - W_{FBi})}{V_a}$$

where,  $W_i$ : Weight of filter paper before sampling PM<sub>2.5</sub> ( $\mu g$ )  
 $W_f$ : Weight of filter paper after sampling PM<sub>2.5</sub> ( $\mu g$ )  
 $W_{FBi}$ : Weight of FB before sampling ( $\mu g$ )  
 $W_{FBf}$ : Weight of FB after sampling ( $\mu g$ )  
 $V_a$ : Volume of aspirated air ( $m^3$ )

#### 3.2. 이온 성분 분석

PM<sub>2.5</sub> 중 이온 성분 분석 대상 항목은 양이온 5종(Na<sup>+</sup>,

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>), 음이온 3종(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>)이다. 분석 시료의 추출 효율을 향상시키기 위하여 필터의 채취면은 비커 바닥면을 바닥에 향하게 한 후 시약용 등급 이상의 에탄올 200  $\mu L$ 를 필터에 가하여 침적시켰다. 여기에 비저항 18 M $\Omega$  이상의 초순수 20 mL를 넣은 후 교반기에 장착시켜 120 rpm으로 120분 동안 교반하여 추출하였다. 교반이 끝난 추출액은 공극(pore size) 0.1  $\mu m$ 인 직경 110 mm의 필터 또는 주사기필터로 여과하여 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, IC)를 사용하여 분석을 수행하였다. 이온 성분 분석을 위해 표준용액을 제조하여 각 표준물질에 대한 검정곡선(calibration curve)를 작성하였으며, 결정계수( $r^2$ )는 모두 0.999 이상으로 나타났다. PM<sub>2.5</sub> 중 이온 성분의 농도는 다음 식에 따라 계산하였다.

$$C = ((X_1 - X_2) \times S) \div F$$

where, C: Concentration of ionic components in the air ( $\mu g/m^3$ )

$X_1$ : Concentration of ionic components of the sampled filter ( $\mu g/mL$ )

$X_2$ : Concentration of ionic components of LAB ( $\mu g/mL$ )

S: Volume of extracted liquid (mL)

F: Total volume of sampled ( $m^3$ )

#### 3.3. 탄소 성분 분석

PM<sub>2.5</sub> 중 탄소 성분 분석을 위해 탄소분석기(Model-5 Semi-Continuous OC/EC Field Analyzer)와 탄소분석기 샘플 시료 자동 주입기(LAB OCEC Auto-Loader)를 사용하여 수행하였다. 채취된 필터는 650°C 이상에서 2시간 이상 구워 유기성분과 같은 불순물을 제거하였으며, 1.5 cm<sup>2</sup> 크기로 잘라 분석용 시료로 사용하였다. 이때 시료 자동주입 장치 이용에 따른 시료 오염을 예방하기 위하여 10개 이상을 연속으로 분석하지 않고 낮은 온도를 유지하도록 하였으며, 습도가 높은 날은 피하여 분석을 수행하였다. PM<sub>2.5</sub> 중 탄소 성분의 농도는 다음 식에 따라 계산하였다.

$$C = ((X_1 - X_2) \times S) \div F$$

where, C: Concentration of carbon components in the air ( $\mu g/m^3$ )

$X_1$ : Concentration of carbon components of punched filter ( $\mu g/cm^2$ )

$X_2$ : Concentration of carbon components of punched blank filter ( $\mu g/cm^2$ )

S: Area of sampled filter (cm<sup>2</sup>)

F: Total volume of sampled ( $m^3$ )

**Table 1.** Sampling periods and the number of samples in each sampling sites

Industrial complex	Site	Sampling periods	PTFE (N)	Quartz (N)
Sihwa & Sihwa MTV	B1	2020.08.12~2021.07.27	101	102
Banwol	B2	2020.08.03~2021.07.27	106	116
Banwol	B3	2020.08.14~2021.07.27	105	103
Sihwa	B4	2020.08.14~2021.07.27	107	112
Sihwa & Sihwa MTV	B5	2020.08.03~2021.07.27	108	106

3.4. 미량원소성분 분석

PM<sub>2.5</sub> 중 중금속 등 미량원소는 환경부·국립환경과학원의 「대기오염측정망 설치·운영지침」에 따라 ED-XRF (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analyzer) 방법을 적용하여 미량 원소 19종(Al, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, P, S, Cr, Si, Cu)을 분석하였다.<sup>16)</sup> 3차원 광학계 구조를 갖는 ED-XRF는 각 원소에서 방출되는 고유한 형광 X-선의 파장 및 세기를 측정하여 정량·정성 분석하는 장비로 대기 중에 극미량으로 함유된 유해성분 측정이 가능한 장비이다. 미량원소 성분 분석을 위해 표준용액을 제조하여 각 표준물질에 대한 검정곡선(calibration curve)을 작성하였으며, 결정계수(*r*<sup>2</sup>)는 모두 0.999 이상으로 나타났다. PM<sub>2.5</sub> 중 미량원소성분의 농도는 0°C, 760 mmHg로 환산한 공기 1 m<sup>3</sup> 중 성분 질량으로 다음 식에 따라 계산하였다.

$$C = \frac{(C_s - C_{bk}) \times Au}{V_s}$$

where, C: Concentration of heavy metals in airborne particles (µg/m<sup>3</sup>)

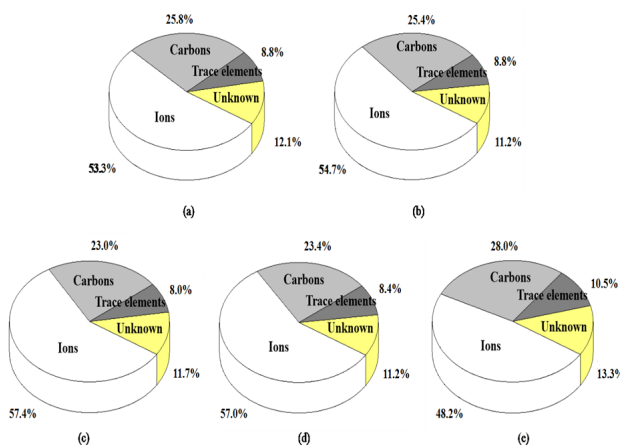


Fig. 2. The chemical compositions of PM<sub>2.5</sub> in each sampling sites; (a) B1 (Sihwa & Sihwa MTV), (b) B2(Banwol), (c) B3(Banwol), (d) B4 (Sihwa), (e) B5(Sihwa & Sihwa MTV)

C<sub>s</sub>: Concentration of heavy metals in the sample (ng/cm<sup>2</sup>)

C<sub>bk</sub>: Concentration of heavy metals in the blank filter (ng/cm<sup>2</sup>)

A<sub>u</sub>: Total area of filter used for sampling (cm<sup>2</sup>)

V<sub>s</sub>: Total volume of aspirated air (m<sup>3</sup>)

III. 결 과

1. PM<sub>2.5</sub> 농도 특성

Table 2와 Fig. 2는 안산·시흥 지역 산업단지 내 측정지점별 조사된 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도분포와 화학성분별 구성비를 나타낸 것이다. 연구기간 동안의 안산·시흥지역의 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도를 살펴보면 평균 농도는 27.8±16.5 µg/m<sup>3</sup> (GM, 23.6 (1.8) µg/m<sup>3</sup>)이며 측정 지점별 PM<sub>2.5</sub> 농도는 B1 지점이 32.0±17.9 µg/m<sup>3</sup> (GM, 27.6 (1.8) µg/m<sup>3</sup>), B2 지점이 25.3±15.9 µg/m<sup>3</sup> (GM, 21.2 (1.8) µg/m<sup>3</sup>), B3 지점이 29.1±16.8 µg/m<sup>3</sup> (GM, 24.9 (1.8) µg/m<sup>3</sup>), B4 지점이 25.6±16.0 µg/m<sup>3</sup> (GM, 21.5 (1.8) µg/m<sup>3</sup>), B5 지점이 27.4±15.4 µg/m<sup>3</sup> (GM, 23.8 (1.7) µg/m<sup>3</sup>)로 B1 지점이 다섯 지점 중 가장 높은 농도를 보여주었다.

다섯 지점 모두 이온 성분이 전체 질량의 약 50%로 대부분을 차지하였으며, 다음으로는 탄소 성분, 아직 연구되지 않아 알 수 없는 성분(Unknown), 미량원소 성분의 순으로 조사되었다.

2. 이온 성분 분포 특성

PM<sub>2.5</sub> 중 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 조사된 이온 성분들중 총 이온 성분의 농도에 대한 각 이온 성분들이 차지하는 조성비를 Fig. 3에 나타내었다.

B1 지점에서 각 이온 성분의 평균 농도와 총 이온 성분의 농도에 대한 각 이온 성분의 조성비는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (6.6±7.0 µg/m<sup>3</sup>, 38.9%)>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (4.1±3.3 µg/m<sup>3</sup>, 24.1%)>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (3.4±2.4 µg/m<sup>3</sup>, 20.2%)>Cl<sup>-</sup> (2.0±1.7 µg/m<sup>3</sup>, 11.8%)>Na<sup>+</sup> (0.3±0.3 µg/m<sup>3</sup>, 1.7%)>K<sup>+</sup> (0.3±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 1.5%)>Ca<sup>2+</sup> (0.2±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 1.0%)>Mg<sup>2+</sup> (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 0.9%)순으로 2차 에어로졸

Table 2. Concentrations and standard deviations(S.D) of PM<sub>2.5</sub> in each sampling sites

PM <sub>2.5</sub>		Concentration (µg/m <sup>3</sup> )				
		B1*	B2†	B3‡	B4‡	B5*
Annual	Mean±SD	32.0±17.9	25.3±15.9	29.1±16.8	25.6±16.0	27.4±15.4
	Min	5.5	3.9	4.4	3.7	7.0
	Max	107.4	102.5	110.1	97.9	98.5

\*Sihwa & Sihwa MTV.

†Banwol.

‡Sihwa.

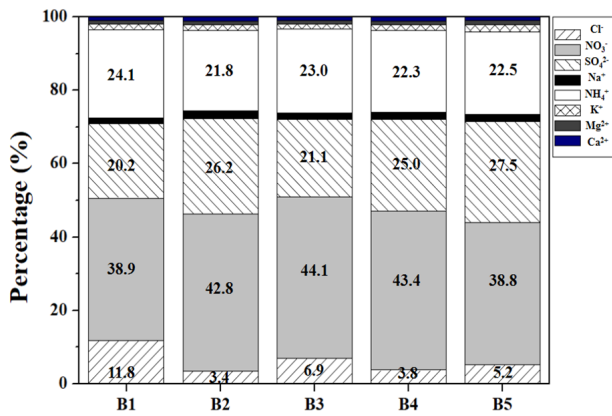


Fig. 3. The composition ratios of ionic species in PM<sub>2.5</sub> in each sampling sites (B1, B5: Sihwa & Sihwa MTV; B2, B3: Banwol; B4: Sihwa)

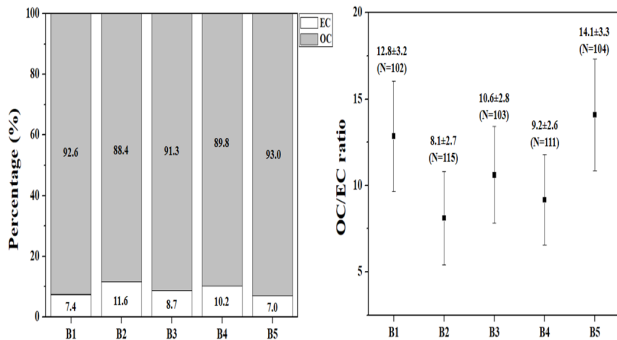


Fig. 4. The composition ratios of carbons in PM<sub>2.5</sub> and OC/EC ratio in each sampling sites (B1, B5: Sihwa & Sihwa MTV; B2, B3: Banwol; B4: Sihwa)

(secondary aerosol)에 해당하는 이온 성분들이 80% 이상을 차지하였다.

B2 지점의 경우는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (5.9 ± 7.0 μg/m<sup>3</sup>, 42.8%) > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (3.6 ± 2.7 μg/m<sup>3</sup>, 26.2%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (3.0 ± 2.9 μg/m<sup>3</sup>, 21.8%) > Cl<sup>-</sup> (0.5 ± 0.5 μg/m<sup>3</sup>, 3.4%) > Na<sup>+</sup> (0.3 ± 0.6 μg/m<sup>3</sup>, 2.1%) > K<sup>+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.7%) > Ca<sup>2+</sup> (0.1 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.0%) = Mg<sup>2+</sup> (0.1 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.0%) 순으로 B1 지점과 마찬가지로 2차 에어로졸 성분들이 대부분을 차지했으며 Cl<sup>-</sup>가 차지하는 비율은 B1 지점보다 작았다.

B3 지점의 PM<sub>2.5</sub> 중 총 이온 성분에 대한 각 이온 성분의 조성비는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (7.4 ± 7.1 μg/m<sup>3</sup>, 44.1%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (3.8 ± 3.0 μg/m<sup>3</sup>, 23.0%) > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (3.5 ± 2.5 μg/m<sup>3</sup>, 21.1%) > Cl<sup>-</sup> (1.2 ± 1.0 μg/m<sup>3</sup>, 6.9%) > Na<sup>+</sup> (0.3 ± 0.4 μg/m<sup>3</sup>, 1.7%) > K<sup>+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.4%) > Ca<sup>2+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.0%) > Mg<sup>2+</sup> (0.1 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 0.9%) 순으로 다른 지점과 마찬가지로 2차 에어로졸의 주요 세 성분(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)이 총 이온 성분의 80% 이상을 차지

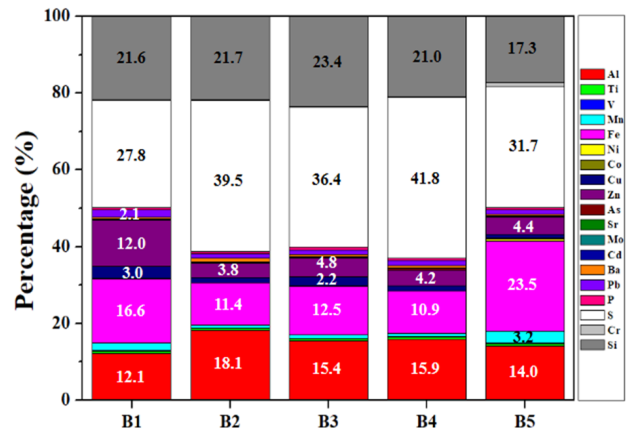


Fig. 5. The composition ratios of elemental components in PM<sub>2.5</sub> in each sampling sites (B1, B5: Sihwa & Sihwa MTV; B2, B3: Banwol; B4: Sihwa)

하는 것으로 조사되었다.

B4 지점 역시 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온이 6.3 ± 7.1 μg/m<sup>3</sup>, 43.4%로 가장 높은 비율을 보였으며, 이어서 또 다른 2차 에어로졸 물질인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (3.7 ± 2.6 μg/m<sup>3</sup>, 25.0%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (3.3 ± 3.0 μg/m<sup>3</sup>, 22.3%) > Cl<sup>-</sup> (0.5 ± 0.6 μg/m<sup>3</sup>, 3.8%) > Na<sup>+</sup> (0.3 ± 0.4 μg/m<sup>3</sup>, 1.9%) > K<sup>+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.6%) > Mg<sup>2+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.1%) > Ca<sup>2+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.0%) 순으로 조사되었다.

마지막으로 PM<sub>2.5</sub> 중 이온 성분이 차지하는 비율이 앞의 네 지점보다 다소 작은 것으로 조사되었던 B5 지점의 총 이온 성분에 대한 각 이온 성분들의 조성비는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (5.1 ± 5.5 μg/m<sup>3</sup>, 38.8%) > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (3.6 ± 2.5 μg/m<sup>3</sup>, 27.5%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (3.0 ± 2.3 μg/m<sup>3</sup>, 22.5%) > Cl<sup>-</sup> (0.7 ± 0.7 μg/m<sup>3</sup>, 5.2%) > Na<sup>+</sup> (0.3 ± 0.3 μg/m<sup>3</sup>, 2.0%) > K<sup>+</sup> (0.2 ± 0.2 μg/m<sup>3</sup>, 1.9%) > Mg<sup>2+</sup> (0.2 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.2%) > Ca<sup>2+</sup> (0.1 ± 0.1 μg/m<sup>3</sup>, 1.0%)로 다른 지점들과 크게 차이가 없는 것으로 조사되었다.

### 3. 탄소 성분 분포 특성

Fig. 4는 측정 지점별 탄소 성분의 평균 농도 비율과 각 지점의 OC/EC ratio를 보여준다.

각 탄소 성분의 평균 농도와 총 탄소 성분 농도에 대한 각 탄소 성분의 조성비는 B1 지점에서 OC (7.5 ± 3.2 μg/m<sup>3</sup>, 92.6%) > EC (0.6 ± 0.3 μg/m<sup>3</sup>, 7.4%), B2 지점에서 OC (5.6 ± 2.6 μg/m<sup>3</sup>, 88.4%) > EC (0.7 ± 0.4 μg/m<sup>3</sup>, 11.6%), B3 지점에서 OC (6.0 ± 2.7 μg/m<sup>3</sup>, 91.3%) > EC (0.6 ± 0.2 μg/m<sup>3</sup>, 8.7%), B4 지점에서 OC (5.4 ± 2.6 μg/m<sup>3</sup>, 89.8%) > EC (0.6 ± 0.3 μg/m<sup>3</sup>, 10.2%), B5 지점에서 OC (6.9 ± 2.9 μg/m<sup>3</sup>, 93.0%) > EC (0.5 ± 0.2 μg/m<sup>3</sup>, 7.0%)로 조사되었다. OC/EC ratio의 경우 B1 지점에서 12.8 ± 3.2, B2 지점에서 8.1 ± 2.7, B3 지점에서 10.6 ± 2.8, B4 지점에서 9.2 ± 2.6, B5 지점에서 14.1 ± 3.3로 조사되

어 안산·시흥지역 내 탄소 성분은 OC 성분이 대부분을 차지하고 있는 것으로 조사되었다.

#### 4. 미량원소성분 분포 특성

이온 성분 및 탄소 성분에 대한 분석과 마찬가지로 총 미량원소성분에 대한 각 원소성분의 조성비를 Fig. 5에 나타내었다.

B1 지점에서 각 미량원소성분의 평균 농도와 총 미량원소성분의 농도에 대한 각 미량원소성분의 조성비는 S (0.8±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 27.8%)>Si (0.6±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 21.6%)>Fe (0.5±0.3 µg/m<sup>3</sup>, 16.6%)>Al (0.3±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 12.1%)>Zn (0.3±0.2 µg/m<sup>3</sup>, 12.0%)>Cu (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 3.0%)>Pb (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 2.1%)>Mn (0.1±0.03 µg/m<sup>3</sup>, 2.0%)>Ti (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.7%)>P (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>Ba (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.4%)>Cr (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.4%)>As (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Ni (0.005±0.003 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Cd (0.003±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Co (0.003±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>V (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Sr (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Mo (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)로 조사되었다.

B2 지점은 S (0.9±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 39.5%)>Si (0.5±0.7 µg/m<sup>3</sup>, 21.7%)>Al (0.4±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 18.1%)>Fe (0.2±0.2 µg/m<sup>3</sup>, 11.4%)>Zn (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 3.8%)>Cu (0.03±0.03 µg/m<sup>3</sup>, 1.2%)>Pb (0.02±0.02 µg/m<sup>3</sup>, 1.1%)>Ba (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.9%)>Mn (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.8%)>Ti (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>P (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>As (0.005±0.006 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Cr (0.004±0.002 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Cd (0.002±0.003 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Ni (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>V (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Co (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Sr (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Mo (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)로 조사되었다.

B3 지점은 S (0.8±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 36.4%)>Si (0.5±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 23.4%)>Al (0.4±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 15.4%)>Fe (0.3±0.2 µg/m<sup>3</sup>, 12.5%)>Zn (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 4.8%)>Cu (0.05±0.07 µg/m<sup>3</sup>, 2.2%)>Pb (0.03±0.02 µg/m<sup>3</sup>, 1.3%)>Mn (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 1.0%)>P (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.7%)>Ti (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>Ba (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.5%)>Cr (0.01±0.005 µg/m<sup>3</sup>, 0.3%)>As (0.005±0.006 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Ni (0.004±0.003 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Cd (0.002±0.003 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Co (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Sr (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Mo (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=V (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%) 순으로 조사되었다.

B4 지점의 경우 S (0.9±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 41.8%)>Si (0.5±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 21.0%)>Al (0.3±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 15.9%)>Fe (0.2±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 10.9%)>Zn (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 4.2%)>Pb (0.03±0.02 µg/m<sup>3</sup>, 1.3%)>Cu (0.03±0.03 µg/m<sup>3</sup>, 1.3%)>Mn (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.9%)>Ba (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.7%)>Ti (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>,

0.6%)>P (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>As (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Cr (0.004±0.002 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Ni (0.002±0.002 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Cd (0.002±0.002 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>V (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Mo (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)=Sr (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Co (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)로 앞의 지점들과 유사한 결과를 보였다.

B5 지점은 미량원소 비율의 크기가 S (0.9±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 31.7%)>Fe (0.7±0.4 µg/m<sup>3</sup>, 23.5%)>Si (0.5±0.6 µg/m<sup>3</sup>, 17.3%)>Al (0.4±0.5 µg/m<sup>3</sup>, 14.0%)>Zn (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 4.4%)>Mn (0.1±0.1 µg/m<sup>3</sup>, 3.2%)>Pb (0.03±0.04 µg/m<sup>3</sup>, 1.1%)>Cu (0.03±0.03 µg/m<sup>3</sup>, 1.1%)>Cr (0.03±0.03 µg/m<sup>3</sup>, 0.9%)>Ti (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.7%)>Ni (0.02±0.02 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>P (0.02±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.6%)>Ba (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.4%)>As (0.01±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.2%)>Cd (0.004±0.01 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Co (0.004±0.002 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Mo (0.003±0.005 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>V (0.002±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%)>Sr (0.001±0.001 µg/m<sup>3</sup>, 0.1%) 순으로 조사되었다.

## IV. 고 찰

미세먼지로 인한 건강영향에 대한 국민들과 언론의 관심이 고조되고 있어, 미세먼지 발생 저감 정책과 더불어 노출 감소를 위한 방안, 공중보건학적 문제 개선 등과 같이 국민 건강의 증진을 위한 미세먼지 체계적 관리정책 수립의 필요성이 증대되고 있다. 특히 국내 고농도 대기오염사태의 공통된 특징은 PM<sub>2.5</sub>의 농도 증가로, 서울시 대기환경 정보를 통한 2014~2018년의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 농도비는 증가하는 경향을 나타내고 있다.<sup>17)</sup> PM<sub>2.5</sub>의 경우 인체에 대한 위해가 PM<sub>10</sub>보다 큰 것으로 알려져 있어<sup>18)</sup> PM<sub>2.5</sub> 노출과 구성 화학성분에 대한 관리가 시급한 실정이다. PM<sub>2.5</sub>의 경우 다양한 유해화학물질(중금속, 이온, 탄소)과 결합하여 그 조성에 따라 건강영향에 차이가 있기 때문에 장기적 관리 차원에서 단순히 농도뿐만 아니라 구성성분에 대한 지속적인 모니터링을 통해 국내 PM<sub>2.5</sub> 성분에 대한 데이터베이스가 구축되어야 할 것으로 판단된다. 특히 다량의 오염물질이 배출되는 산업단지 지역의 경우 다른 일반 지역에 비해 PM<sub>2.5</sub> 중 화학성분의 농도가 높을 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 안산·시흥지역에 위치한 국가산업단지 인근 PM<sub>2.5</sub>의 화학적 성분 특성을 확인하고 산업시설 특성별 PM<sub>2.5</sub> 성분 조사에 대한 기초자료 제공을 위한 선행적 연구의 일환으로 안산·시흥지역의 PM<sub>2.5</sub> 중 이온, 탄소, 원소성분의 29개 항목의 농도 분포 특성을 조사하였으며, 각 성분에 대한 농도비율 현황을 제시함으로써 향후 산업단지 지역의 주요 배출원의 제어방안과 PM<sub>2.5</sub> 저감대책을 수립하는데 있어 기초적 자료를 제공하고자 수행되었다.

연구기간 동안의 안산·시흥지역의 평균 PM<sub>2.5</sub> 질량농도는

27.8±16.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 연평균 기준농도(15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 초과하였으나 일평균 기준농도(35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 미만 수준인 것으로 조사되었다. 본 연구의 결과를 도심지역에서의  $\text{PM}_{2.5}$  농도와 비교해보면 2014~2015년 서울시  $\text{PM}_{2.5}$  평균 농도는 42.6±23.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며,<sup>19)</sup> 2013~2014년 전남광역시  $\text{PM}_{2.5}$  평균 농도는 36.4±23.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며,<sup>20)</sup> 도심지역임에도 불구하고 본 연구에서 관찰된 농도보다 높았다. 총 이온 성분에 대한 개별 이온 성분의 구성 비율을 지점마다 평가하여 다섯 지점의 결과와 타 산업단지에서 측정된 이온 분포와 비교하였다. 본 연구의 다섯 지점 모두 2차 에어로졸 성분인  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ 가 80% 이상인 것으로 조사되었으며, 이는 산업단지 내에서  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ 의 직접적인 배출이  $\text{PM}_{2.5}$ 의 2차 에어로졸 성분 생성에 많이 기여하고 있기 때문인 것으로 판단된다.<sup>21)</sup> 그리고 다섯 지점 모두에서  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 의 질량농도비가 1보다 높게 조사된 반면 Park et al. (2019)<sup>22)</sup>의 울산시 석유화학공단 인근에서 측정된  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 의 질량농도비는 1보다 작게 나타났다.  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 발생원은 상당히 다르기 때문에 일반적으로 이동오염원과 고정오염원을 구분하는 지표로 질량농도비( $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ )가 사용된다.<sup>23)</sup> 질소산화물은 주로 자동차 연료인 경유와 가솔린에 많이 함유되어 있고, 황은 주로 화석연료 중 중유에 함유되어 있어  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  질량농도비가 1보다 큰 경우 이동오염원의 기여가, 1보다 작은 경우 고정오염원의 기여가 우세한 것으로 판단할 수 있다.<sup>24)</sup> 즉, 안산·시흥지역 산업단지 내  $\text{PM}_{2.5}$ 의 이온 성분에 대한 기여는 이동오염원의 기여가, 울산시 석유화학공단 인근  $\text{PM}_{2.5}$ 의 이온 성분에 대한 기여는 고정오염원의 기여가 더 큰 것으로 판단되며, 이에 따른 건강예방 대책이 필요할 것으로 사료된다. B1 지점에서의  $\text{Cl}^-$ 는 총 이온 성분의 11.7%로 다섯 지점 중 가장 높은 비율로 조사되었다.  $\text{Cl}^-$ 의 자연적 발생원은  $\text{Na}^+$ 와 함께 해염으로 알려져 있으며,<sup>25)</sup> 인위적 발생원으로는 바이오매스 연소 또는 폐기물 소각으로 알려져 있다.<sup>26)</sup> 시료를 채취한 다섯 지점 모두 바다와 인접해 있어 해염의 영향이 적지 않을 것으로 판단되지만, B1 지점의  $\text{Cl}^-$  비율이 가장 높게 나타난 것은 인위적 발생원의 영향을 받은 것으로 사료된다.

OC는 일반적으로 자연적 발생원에서 직접 배출되거나 VOCs 및 PAHs 같은 화합물 및 1차 생성에어로졸이  $\text{O}_3$  등과 같은 산화제와의 광·화학적 반응을 통해 2차 유기탄소(Secondary Organic Carbon, SOC)로 변환되며 발생한다.<sup>27)</sup> 반면에 대부분의 EC는 화석 연료와 바이오매스 연소를 통해 연소발생원에서 직접 배출되는 1차 오염물질이다.<sup>28)</sup> 이러한 특성에 의해 OC/EC ratio가 2.5 이상일 때 SOC의 기여가 큰 것으로 알려져 있다.<sup>29)</sup> Park et al. (2007)<sup>30)</sup>은 여름 및 겨울철 광주지역의  $\text{PM}_{2.5}$  중 탄소 성분 농도의 화학적 특성을 조사하였으며 그 결과 광주지역의 일평균 OC/EC ratio는 여름철에 1.5~4.2 (평균 2.4), 겨울철에 1.7~6.0 (평균 3.2)로 본 연구 결과보다 낮게 조사되

었다. Jung et al. (2009)<sup>31)</sup>은 춘천과 서울의  $\text{PM}_{2.5}$  중 탄소 성분을 분석하여 비교하였으며 전체 연구기간(2005~2007) 동안의 춘천과 서울지역의 OC/EC ratio는 각각 3.0, 3.9로 두 지역은 공통적으로 SOC의 기여가 높게 나타났다. 본 연구에서 OC/EC ratio는 작게는 8.1부터 최대 14.1까지 관찰되어  $\text{PM}_{2.5}$  중 탄소 성분의 경우 1차 발생원보다 2차 발생원의 기여가 더 큰 것으로 판단된다.

$\text{PM}_{2.5}$  중 미량원소성분이 차지하는 비율은 높지 않지만, 이들 중 Cr, Cd, Pb, As 등과 같은 중금속 물질들은 적은 양으로도 인체에 유해한 영향을 일으킬 수 있어<sup>32)</sup>  $\text{PM}_{2.5}$  중 농도의 분포를 파악하여야 한다. 성분들의 비율을 파악함으로써 특정 지역에서의 발생원을 유추해 볼 수 있어 총 미량원소성분에 대한 개별 원소성분의 구성 비율을 지점마다 평가하여 결과를 비교하였다. B1 지점의 경우 연료의 연소가 주요 발생원인 S와 지각 기원 성분으로 알려진 Si, Fe, Al이 대부분의 비율을 차지하였으며, Zn이 총 미량원소성분에 기여하는 정도가 다른 지점들에 비해 월등히 높은 것으로 조사되어 폐기물 소각과 같은 인위적 발생원의 영향을 받을 가능성이 있는 것으로 판단된다. B2 지점의 경우 B1 지점과 마찬가지로 연료 연소로 인한 S와 지각 기원 성분으로 알려진 Si, Al, Fe가 50% 이상으로 많은 부분을 차지하는 것으로 조사되었다. 이는 국내 화학물질 배출·이동량 정보(Pollutant release and transfer register, PRTR)에 따른 2019년 기준 시화산업단지 및 시화MTV (B1, B4, B5)의 배출량 조사 결과 Zn (3,259 kg/년)>Al (2,813 kg/년)>Ni (752 kg/년)>Cu (718 kg/년)>Cr (334 kg/년)>Co (327 kg/년)>Ba (249 kg/년)>Pb (93 kg/년)와 반월산업단지(B2, B3)의 배출량 조사 결과 Al (21,410 kg/년)>Cu (5,498 kg/년)>Ni (2,817 kg/년)>Zn (2,347 kg/년)>Pb (554 kg/년)>Cr (491 kg/년)와 일치한다. B5 지점의 경우 Fe의 비율이 다른 지점에 비해 월등히 높게 나타났다. Fe는 토양과 같은 자연적 발생원에 의해 발생할 수 있지만,<sup>33)</sup> 본 연구의 측정지점이 산업단지 인근임을 고려할 때 철강산업과 같은 인위적 발생원에서 기인한 것으로 사료된다.<sup>34)</sup>

본 연구는 산업단지 인근 다섯 지점을 선정하여  $\text{PM}_{2.5}$  시료 채취를 통한 농도 분포 분석 및 화학성분 비율 현황을 평가한 연구로 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 미세먼지는 기상 조건에 따라 대기 중에서 수송, 축적, 제거되며 특히 지리적으로 편서풍대에 위치한 우리나라는 중국의 대기오염물질이 서풍을 타고 날아와 미세먼지 고농도 현상을 일으키나 본 연구에서는 고려하지 못하였다. 둘째, 미량원소성분들이 다양한 입경으로 분포되어 있어  $\text{PM}_{2.5}$ 만 분석할 경우 중금속 성분의 농도가 과소 평가 될 수 있다. 그러나 본 연구는 측정지점 5개소를 동시·연속 측정하였으며  $\text{PM}_{2.5}$  채취 주기를 황사 또는 스모그와 같이 미세먼지가 고농도인 기간에는 각 지점별 주 2회 측정하여 총 539개의 시료를 분석하였기 때문에 산업단지 인근 지역의

PM<sub>2.5</sub> 화학성분 농도 비율을 알 수 있는 근거가 되는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## V. 결 론

본 연구는 안산·시흥지역에 위치한 국가산업단지 인근 PM<sub>2.5</sub>의 화학적 성분 특성을 확인하기 위하여 안산·시흥지역 산업단지 인근 다섯 지점을 선정하여 1년 동안 PM<sub>2.5</sub>를 채취하고 이온 성분 8종, 탄소 성분 2종, 미량원소성분 19종을 분석하였다.

PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도는 27.8 µg/m<sup>3</sup>로 국내 연평균 기준 농도(15 µg/m<sup>3</sup>)는 초과하였으나 일평균 기준농도(35 µg/m<sup>3</sup>)는 초과하지 않았다. 그러나 다섯 지점 모두 고농도 발생 기간에는 100 µg/m<sup>3</sup>를 웃도는 농도가 관측되었으며 이는 안산·시흥지역의 지리적 특성상 겨울철 고농도 미세먼지의 영향을 크게 받아 이와 같은 결과를 보였을 것으로 판단된다.

PM<sub>2.5</sub> 중 화학성분은 다섯 지점 모두에서 이온 성분이 전체 질량의 약 50%를 차지하고 있는 것으로 조사되었으며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 총 이온 성분 중 약 80%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 이동오염원과 고정오염원을 구분하는 지표인 질량농도비(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)가 1보다 높게 조사되었다. 즉, 안산·시흥지역의 PM<sub>2.5</sub> 화학성분 중 이온 성분은 자동차 배기가스와 같은 이동오염원의 영향이 큰 것으로 판단된다.

안산·시흥지역 내 탄소 성분은 다섯 지점 모두에서 OC 성분이 약 90%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이에 따른 OC/EC ratio는 작게는 8.1부터 최대 14.1로 조사되었으며, 타 지역의 선행연구와 비교하여 높은 수준으로 조사되었다. 즉, 안산·시흥지역에서 발생하는 PM<sub>2.5</sub> 중 탄소 성분은 광·화학반응을 통한 SOC의 영향이 큰 것으로 판단된다.

미량원소성분의 경우 다섯 지점 모두 공통적으로 S, Si, Al, Fe 농도가 가장 높게 조사되었다. 총 미량원소성분에 기여하는 원소성분의 비율이 B1 지점의 경우 Zn, B2 지점의 경우 Al이 월등히 높게 조사되었다. 이는 2019년 기준 국내 화학물질 배출·이동량 정보와 일치하였다. B5 지점의 경우 Fe의 비율이 다른 지점에 비해 월등히 높게 나타났으며 이는 본 연구의 측정지점이 산업단지를 고려할 때 철강산업과 같은 인위적 발생원에서 기인한 것으로 사료된다.

본 연구는 안산·시흥지역의 국가산업단지의 특성에 따른 PM<sub>2.5</sub> 중 이온, 탄소, 원소성분의 성분농도를 분석한 연구로, 안산·시흥지역의 배출원 분포에 따른 오염수준과 유해성분에 대한 자료를 확보한 것에 의의가 있다. 이를 바탕으로 안산·시흥 지역의 산업단지 내 작업자 및 인근 주민의 건강보호를 위한 산업단지 주요 배출원의 제어방안과 PM<sub>2.5</sub> 저감대책 수립이 필요할 것으로 판단되며, 다양한 배경농도 지역의 배출원에 대한 연구자료를 축적하고 PM<sub>2.5</sub> 농도의 총량뿐만 아니라, 성분 중심의 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 2021년 환경부 지원과제(과제 번호: 202100390001)의 일환으로 수행되었으며, 2021년도 환경부 주관 「화학물질 안전관리 전문 인력 양성사업」의 화학물질 특성화 대학원 지원 사업을 통한 성과물임을 밝힙니다.

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

- Kim D, Min G, Choe Y, Shin J, Woo J, Kim D, et al. Evaluation of population exposures to PM<sub>2.5</sub> before and after the outbreak of COVID-19. *J Environ Health Sci*. 2021; 47(6): 521-529.
- Kim I, Lee K, Lee S, Kim SD. Characteristics and health effects of PM<sub>2.5</sub> emissions from various sources in Gwangju, South Korea. *Sci Total Environ*. 2019; 696: 133890.
- Byun JY, Cho SH, Kim HW, Han YJ. Long-term characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its metallic components in Chuncheon, Korea. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2018; 34(3): 406-417.
- Kim SM, Kim KS, Hyun SS, Kim JH, Kim MC, Kim BJ, et al. Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Jeju City in 2017. *J Korean Soc Environ Anal*. 2018; 21(2): 61-70.
- Wang Y, Jia C, Tao J, Zhang L, Liang X, Ma J, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China. *Sci Total Environ*. 2016; 573: 1031-1040.
- Luo Y, Zhou X, Zhang J, Xiao Y, Wang Z, Zhou Y, et al. PM<sub>2.5</sub> pollution in a petrochemical industry city of northern China: seasonal variation and source apportionment. *Atmos Res*. 2018; 212: 285-295.
- Hwang IJ, Kim TO. Chemical characteristics of ambient PM<sub>2.5</sub> at industrial complex in Gyeongbuk area. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2019; 35(3): 336-345.
- Park HW, Kim M, Park JS, Yoon SH, Kim MJ, Kim JY, et al. Tracing the source of PM<sub>2.5</sub> using chemical composition and stable isotope analysis. *J Korean Soc Environ Anal*. 2017; 20(4): 266-278.
- Kim DG, Woo JS, Han HS, Kim YJ, Kim WS, Hong SM, et al. Distribution characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in an industrial complex and in affected areas in Siheung and Ansan. *J Environ Health Sci*. 2020; 46(3): 256-266.
- Shin HJ, Kim JS, Kong HC. A study on the odor and volatile organic compound characteristics of chemical blocks in Sihwa industrial complex using a selected ion flow tube mass spectrometers. *J Odor Indoor Environ*. 2020; 19(2): 177-185.
- Byeon SH, Choi HI, Moon HI, Lee JG, Kim JK. Comparison of active and passive sampler for determining temporal and spatial concentration assessment of the main volatile organic compounds



- concentration in Shihwa industrial complex. *J Korean Soc Environ Eng.* 2011; 33(11): 790-796.
12. Lim H, Lee TJ, Kim DS. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> characterization based on mass concentration long-term (1989~2012) database in Yongin-Suwon area. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2015; 31(3): 209-222.
  13. Bae HJ, Lee S, Jung D, Oh GL, Kim S. Assessing the health effects of PM<sub>2.5</sub> constituents for establishing the health risk reduction management plan. *Environ Forum.* 2020; 24(4): 2-18.
  14. Shin J, Kim Y, Park C, Ahn J, Yu H, Kim J, et al. Study on the characteristics of PM<sub>2.5</sub> components from emission sources in Chungcheongnam-do. *J Environ Anal Health Toxicol.* 2021; 24(1): 26-34.
  15. Korea Industrial Complex Corporation. Industrial trend statistics table of major national industrial complexes in August 2020. Available: <https://www.kicox.or.kr/home/gvrn/irsttInfo/irsttStats.jsp> [accessed 31 October 2021].
  16. National Institute of Environmental Research. Air pollution monitoring network installation and operation guidelines 2018. Available: <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5641953> [accessed 13 May 2020].
  17. Yeo MJ, Im YS, Yoo SS, Jeon EM, Kim YP. Long-term trend of PM<sub>2.5</sub> concentration in Seoul. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2019; 35(4): 438-450.
  18. Park JH, Park GH, Suh JM. Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in Jinju. *J Environ Sci Int.* 2014; 23(12): 1963-1970.
  19. Park EH, Heo J, Kim H, Yi SM. Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM<sub>2.5</sub> in Seoul. *Chemosphere.* 2020; 251: 126371.
  20. Yu GH, Park S. Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at an urban site in Gwangju, Korea. *Atmos Pollut Res.* 2021; 12(6): 101092.
  21. Kang BW, Jeong MH, Jeon JM, Lee HS. The characteristics of PM<sub>2.5</sub> and acidic air pollutants in the vicinity of industrial complexes in Gwangyang. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2011; 27(1): 16-29.
  22. Park MK, Kim SJ, Song SA, Kwon HO, Choi SD. Size Distributions of airborne particulate matter associated ions and their pollution sources in Ulsan, Korea. *J Korean Soc Environ Anal.* 2019; 22(1): 1-9.
  23. Ko HJ, Song JM, Cha JW, Kim J, Ryoo SB, Kang CH. Chemical composition characteristics of atmospheric aerosols in relation to haze, Asian dust and mixed haze-Asian dust episodes at Gosan site in 2013. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2016; 32(3): 289-304.
  24. Jeon BI. Weekday/weekend chemical characteristics of water-soluble components of PM<sub>10</sub> at Busan in springtime. *J Environ Sci Int.* 2015; 24(6): 785-792.
  25. Choi JK, Heo JB, Ban SJ, Yi SM, Zoh KD. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at the coastal area in Korea. *Sci Total Environ.* 2013; 447: 370-380.
  26. Moon KJ, Park SM, Park JS, Song IH, Jang SK, Kim JC, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Seoul metropolitan area in 2010. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2011; 27(6): 711-722.
  27. Zhang Q, Sarkar S, Wang X, Zhang J, Mao J, Yang L, et al. Evaluation of factors influencing secondary organic carbon (SOC) estimation by CO and EC tracer methods. *Sci Total Environ.* 2019; 686: 915-930.
  28. Lim SH, Lee MH, Kang KS. Seasonal variations of OC and EC in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1.0</sub> at Gosan superstation on Jeju Island. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2010; 26(5): 567-580.
  29. Ham J, Lee HJ, Cha JW, Ryoo SB. Potential source of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and OC and EC in Seoul during spring 2016. *Atmosphere.* 2017; 27(1): 41-54.
  30. Park SS, Kim YJ, Heo JY, Kim DH. Characteristics of organic carbon species in atmospheric aerosol particles at a Gwangju area during summer and winter. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2007; 23(6): 675-688.
  31. Jung JH, Kim SR, Choi BR, Kim KS, Huh JB, Yi SM, et al. A study on the characteristics of carbonaceous compounds in PM<sub>2.5</sub> measured in Chuncheon and Seoul. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2009; 25(2): 141-153.
  32. Han Y, Wang Z, Zhou J, Che H, Tian M, Wang H, et al. PM<sub>2.5</sub>-bound heavy metals in southwestern China: characterization, sources, and health risks. *Atmosphere.* 2021; 12(7): 929.
  33. Won SR, Shim IK, Kim J, Ji HA, Lee Y, Lee J, et al. PM<sub>2.5</sub> and trace elements in underground shopping districts in the Seoul metropolitan area, Korea. *Int J Environ Res Public Health.* 2021; 18(1): 297.
  34. Ryou HG, Heo J, Kim SY. Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> air pollution, and possible impacts of study characteristics in South Korea. *Environ Pollut.* 2018; 240: 963-972. Erratum in: *Environ Pollut.* 2018; 242(Pt B): 2135.

#### 〈저자정보〉

이혜원(연구원), 이승현(대학원생), 전정인(대학원생), 이정일(센터장), 이철민(교수)