



논문

경북지역 산업단지의 대기 중 PM_{2.5}의 화학적 특성 Chemical Characteristics of Ambient PM_{2.5} at Industrial Complex in Gyeongbuk Area

황인조*, 김태오¹⁾

대구대학교 환경공학과, ¹⁾금오공과대학교 환경공학과

InJo Hwang*, TaeOh Kim¹⁾

Department of Environmental Engineering, Daegu University

¹⁾Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

접수일 2019년 4월 4일

수정일 2019년 5월 3일

채택일 2019년 5월 16일

Received 4 April 2019

Revised 3 May 2019

Accepted 16 May 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)53-850-6695

E-mail : ihwang@daegu.ac.kr

Abstract In this study, the PM_{2.5} samples collected at industrial complex area in Gimcheon from June 2017 to November 2017 were analyzed. Collected samples were analyzed for determining 25 elements and 7 ionic species by inductively coupled plasma and ion chromatography. The objective of this study was to estimate the concentration trends and chemical composition characteristics of PM_{2.5} in industrial complex area, and these results suggest the possible role for establishment and management of efficient and reasonable atmospheric environment policies in sampling area. In the case of Gimcheon air pollution monitoring station PM_{2.5} data, about 27.2% exceeds the ambient air quality standard. The average concentration of the PM_{2.5} in summer was 15.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and average concentration of the PM_{2.5} in Fall was 30.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In the case of Si, S, Na, Pb, Fe, K, and Ca showed high concentrations during the sampling period. Also, in the case of ionic species, SO_4^{2-} in summer and NO_3^- in fall represented the highest concentrations. To determine the location of local sources, enrichment factor analysis were performed and windrose plots were estimated using air pollution monitoring station PM_{2.5} data coupled with the wind direction values. The windrose plot indicated PM_{2.5} emission source located to the northeast, east-southeast in both low and high concentrations.

Key words: PM_{2.5}, Chemical composition, Emission source, Industrial complex

1. 서론

초미세먼지(PM_{2.5})는 공기역학적 직경이 2.5 μm 이하의 입자상물질을 의미한다. 입자상오염물질은 오염원에서 직접 배출되는 1차 입자(primary aerosol)와 가스상 오염물질이 대기 중에서 화학반응에 의해 입자화된 2차 입자(secondary aerosol)로 구분된다. 2차 입자의 경우는 초미세먼지가 대부분이며 경유자동차의 엔진 연소에서 발생하는 검댕, 대기 중 기체상 황산화물(SO_x)이 반응하여 생성되는 황산염 입자(secondary sulfate aerosol) 등이 대표적이다(Seinfeld and

Pandis, 2016). 초미세먼지는 미세먼지와는 다르게 화석연료의 연소과정, 자동차의 배출가스 및 화학물질의 제조과정 등과 같은 인위적 오염원(source)에서 주로 배출되거나 전구물질에 의한 2차 생성에 의해 주로 발생된다. 초미세먼지는 1970년대에는 시정을 악화시키는 오염물질로 인식되어 왔으며(Khanna *et al.*, 2018), 1990년대에 들어서 악성천식, 기침과 호흡장애와 같은 호흡기 질환, 만성 기관지염, 폐기능 손상, 심장과 폐 관련 질환환자의 조기사망 등의 인체위해성이 높다는 사실이 밝혀지면서(Russell and Brunekreef, 2009; Pope and Dockery, 2006), 대기 중 초미세먼지

관리의 필요성이 대두되었다.

우리나라의 경우 최근 대기오염도 저감을 위하여 수차례에 걸친 환경관련 법규의 개정, 각종 환경개선 프로그램의 확대, 정부의 청정연료와 저유황 연료 공급 확대, 저공해 자동차 보급 및 『수도권 대기환경개선에 관한 특별법』 제정 등 각종 대기오염 저감정책에 힘입어 대기환경 규제오염물질(criteria air pollutants) 중 SO₂와 CO 등과 같은 일부 항목은 농도가 개선되는 추세이지만, 국민들이 느끼는 체감 오염도는 꾸준히 증가하고 있어 대기환경에 대한 국민들의 불만이 가중되고 있다. 그로 인하여 대기오염 피해로 인한 건강 및 복지손실을 최소화하고 산업체의 경제적 손실을 최소화하기 위해 합리적인 각종 대기환경 관리기술의 도입 및 개발의 필요성이 대두되었다(Hwang and Kim, 2013).

우리나라는 급격한 경제성장과 함께 포항, 울산, 구미, 여수 등과 같은 대규모 산업단지(이하 산단이라 칭함)가 조성되어 생산활동이 활발히 이루어지고 있다. 산단의 규모는 점차 확대되고 있으며, 이와 더불어 유해한 각종 오염물질의 배출 또한 증가하고 있는 실정이다. 우리나라는 1990년 대기환경보전법이 제정되면서 산단을 비롯한 중대형 배출 사업장에 대한 관리가 본격적으로 시작되었다. 현재 정부 및 지자체에서는 배출허용기준에 따라 각 오염원의 배출을 규제하고 있다. 우리나라는 지속적으로 더욱 강화된 허용기준을 시행하고 있으나, 동시에 지속적으로 강화되는 대기환경기준과 비교하면 배출허용기준은 상대적으로 느슨한 편으로써 설정이 재평가 및 보완되고 조속히 개선되어야 한다(KOSAE, 2016). 경상북도의 경우는 포항과 구미에 대규모 국가산단이 위치해 있어 PM₁₀ 및 PM_{2.5}와 같은 입자상물질과 VOC, 악취, SO₂, O₃ 등과 같은 가스상오염물질을 대량으로 배출하여 다른 지역보다 대기질이 나쁠 가능성이 매우 크다. 산단이 위치한 지역의 주민들은 대기오염으로 인한 환경피해 및 인체 악영향 문제에 노출되어 있어 대기질 관련 민원이 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 이러한 대기질 문제 해결을 위한 노력이 절실

하며, 이러한 노력 중 가장 기본이 되는 것이 대상 지역의 정확한 대기질 자료를 확보하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 경상북도에 위치한 주요 산단지역의 대기오염문제 중 심각한 문제로 대두되고 있는 PM_{2.5}에 대한 농도 현황 및 오염특성 등을 파악하여 지자체 주도의 효율적, 합리적 대기환경 정책수립 및 관리방안 수립과 이를 달성하기 위한 정책 수단의 도입과 시행을 위한 기초자료로 이용하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 경북지역 주요 산단 중 초미세먼지의 화학적 특성을 조사하기 위하여 적절한 시료 채취 장소가 필요하며, 이를 위해 경상북도 도청의 담당자와 협의를 진행하였다. 최종적으로 김천시 공단지역의 초미세먼지 특성에 대한 모니터링 필요성에 의해 김천시 산업단지의 초미세먼지를 측정하기 위해 시료 채취지점을 김천시 평생교육원 옥상으로 선정하였다(그림 1).

PM_{2.5} 시료의 측정기간은 총 2번으로 나뉘어 2017년 7월 24일~2017년 8월 5일(여름철), 2017년 10월 24일~2017년 11월 4일에(가을철) 시료를 채취하였다. PM_{2.5} 시료의 채취는 PMS-103 (APM Korea Co.) 채취기를 이용하였으며, 유량 16.7 L/min, 24시간 기준으로 설정하여 PM_{2.5}를 14일간(2주일) 채취하였다. 무기원소 분석을 위하여 teflon 재질의 여지(Zefflour, pore size 2.0 µm, 47 mm, Pall Science), 양이온 및 음이온 분석을 위한 Nylon 재질의 여지(Nylasorb, pore size 1.0 µm, 47 mm, Pall Science)를 사용하였다. 24시간 기준으로 채취된 여지는 데시케이터에 2~3일간 항량시킨 후 0.01 mg의 감도를 갖는 전자저울(Model CPA-225D, Sartorius, Germany)로 칭량하고, 칭량 전후의 무게 차를 분진의 무게로 간주하였으며, 이를 유량으로 나누어 질량 농도를 계산하였다.

채취된 시료의 무기원소, 이온성분 분석을 위해서는 적절한 전처리가 필요하다. 무기원소 분석을 위한



Fig. 1. Location of the sampling site.

전처리하는 microwave (Mars 230/60, CEM Co., USA)의 PFA liner에 여지를 넣어 유해 중금속 측정용 61% 질산 7 mL와 35% 염산 3 mL를 가하였다. 이후 15분 동안 온도를 175°C로 가온하고, 다시 이 온도에서 5분간 유지시켜 총 20분간 시료를 분해하였다. 약 30분간 방랭한 후 마이크로파 분해를 거친 질산-염산 혼합액을 여과여지를 이용하여 시료의 잔재물을 여과하고 초순수를 가하여 50 mL로 mass up 하였다. 전처리가 끝난 시료는 폴리프로필렌 재질의 50 mL centrifuge tube (Corning Co., USA)에 담아 분석 전까지 냉장 보관 후, ICP-AES (OPTIMA 8300, Perkin elmer, USA)와 ICP-MS (X-Series, Thermoscientific, Germany)을 이용하여 무기원소 Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Pd, S, Sb, Se, Si, Ti, Tl, V, 그리고 Zn 등과 같은 총 25개 무기원소에 대한 분석을 수행하였다.

이온성분의 전처리하는 Nylon 여지를 폴리카보네이트 재질의 추출용기에 넣고, 초순수 30 mL를 넣은 후 초음파 세척기 (5510-DTH, Branson Co, USA)에 넣어 30분간 초음파 추출하였다. 추출이 끝난 용액은 실린지 필터 (Acrodisc, 0.2 μ m, 25 mm, Pall Science)로

여과한 후 여액은 폴리프로필렌 재질의 50 mL centrifuge tube (Corning Co., USA)에 담아 분석 전까지 냉장 보관 후 이온 크로마토그래피 (ICS-1000, Dionex Co., USA)를 이용하여 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ 등과 같은 총 7개 항목에 대한 분석을 수행하였다 (Kim and Hwang, 2016; Jeong and Hwang, 2015).

3. 결과 및 고찰

3.1 연구지역 자동측정망 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 분석

연구지역의 경우 1곳의 자동측정망이 운영 (2017년 9월에 측정소 이동, 10월부터 재가동) 되고 있으며 $\text{PM}_{2.5}$ 는 2015년 6월부터 측정하기 시작하였다. 그림 2에 2015년 6월부터 2017년 12월까지의 $\text{PM}_{2.5}$ 일평균 농도를 나타내었다. 강화된 $\text{PM}_{2.5}$ 24시간 평균 기준 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 적용하였을 경우 약 27.2%가 기준을 초과하는 것으로 조사되었다. 또한 측정망의 1시간 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 자료를 이용하여 각 요일에 대한 시간별 농도 경향, 각 시간별 평균농도 경향, 월별 및 요일별

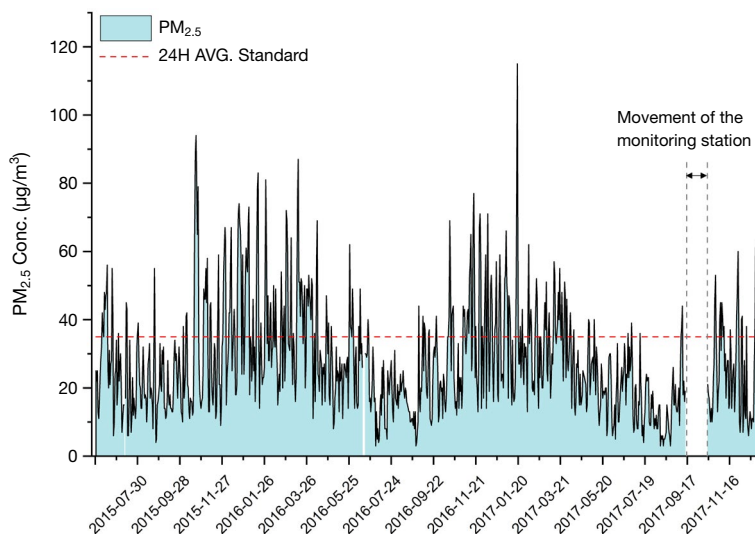


Fig. 2. The trend of $PM_{2.5}$ concentrations in Gimcheon air pollution monitoring station during 2015~2017.

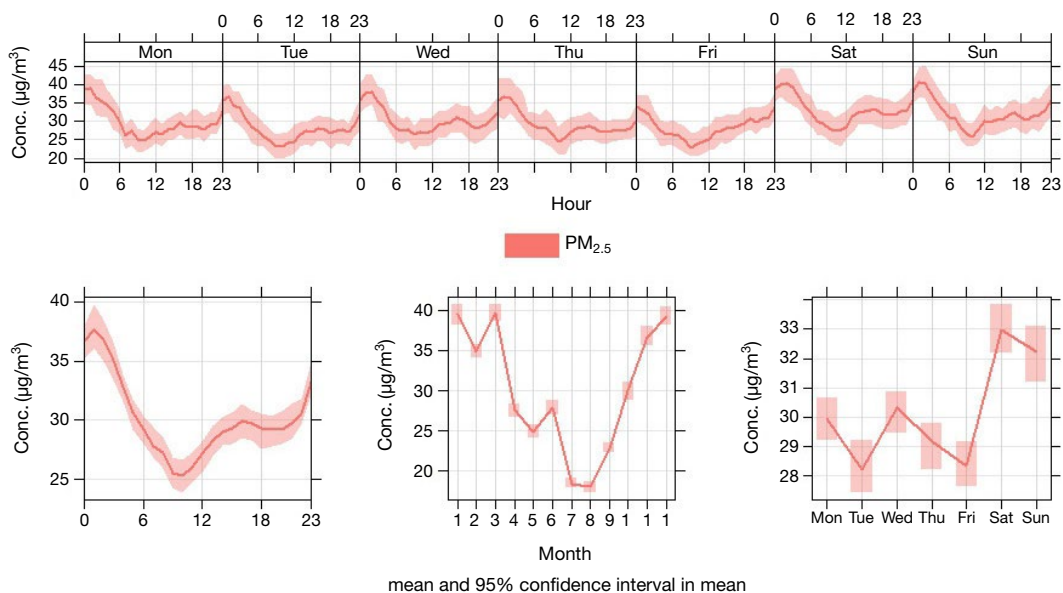


Fig. 3. The time variation plots for hourly average $PM_{2.5}$ concentration in Gimcheon air pollution monitoring station during 2015~2017.

평균농도 경향을 그림 3에 나타내었다. 시간별 농도 경향의 경우 야간시간대에 농도가 증가하여 새벽 12시 및 1시 정도에 가장 높은 농도를 나타내며, 새벽시간대에는 농도가 점점 낮아지는 경향을 나타내는 것

으로 조사되었다. 주간의 생산활동 및 저녁 퇴근시간대의 차량 이동 등에 의해 배출된 $PM_{2.5}$ 는 밤시간대에서 새벽시간대에 주로 발생하는 복사역전에 의해 대기의 정체현상이 발생하여 $PM_{2.5}$ 가 확산되지 못하

Table 1. Statistical summary of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) for Gimcheon air pollution monitoring station during 2015~2017.

		AVG.	S.D ¹⁾	S.E ²⁾	Range		Ratio ³⁾
					Min	Max	
Spring	PM ₁₀	52.85	25.32	2.53	14.00	157.00	0.68
	PM _{2.5}	36.08	14.01	1.40	11.00	87.00	
Summer	PM ₁₀	38.42	15.08	1.53	7.00	83.00	0.65
	PM _{2.5}	24.99	11.14	1.13	5.00	56.00	
Fall	PM ₁₀	34.51	13.84	1.60	12.00	75.00	0.67
	PM _{2.5}	22.96	9.71	1.06	9.00	44.00	
Winter	PM ₁₀	47.18	21.50	2.15	14.00	135.00	0.76
	PM _{2.5}	35.69	20.66	2.07	6.00	111.00	

¹⁾standard deviation, ²⁾standard error, ³⁾PM_{2.5}/PM₁₀

고 축적되어 높은 농도를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 기온이 상대적으로 낮아지는 밤시간대 및 새벽 시간대에는 공기가 혼합되는 높이인 혼합고가 낮아 지기 때문에 일반적으로 새벽시간대에도 오염원에서 배출된 PM_{2.5}가 축적되어 고농도를 나타내는 경우가 발생하는 것으로 알려져 있다(Bathmanabhan and Madanayak, 2010; Chuersuwan *et al.*, 2000). 또한 생산활동 및 자동차 운행 등이 진행되는 낮 시간 때에는 PM_{2.5} 농도가 점차 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다.

월별 계절별 평균농도 경향의 경우, 봄철인 3월, 4월, 5월의 경우는 황사 등의 영향으로 높은 농도를 (36.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 여름철의 경우는 가장 낮은 농도를 나타내었는데 (24.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이는 여름철의 잦은 강수 등과 같은 기상학적인 영향인 것으로 판단된다. 또한, 가을철의 경우는 농도가 점차 증가하기 시작하여 겨울철인 12월, 1월, 2월에는 난방 및 불법 연소 등의 영향으로 다시 농도가 높아지는 경향을 나타내었다 (35.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). PM₁₀ 중 PM_{2.5}가 차지하는 비율은 65%~76% 정도로 겨울철이 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 조사되었다(표 1).

3.2 연구지역의 PM_{2.5} 농도

시료 채취장소에서 여름철(2017년 7월 24일~2017년 8월 5일)과 가을철(2017년 10월 24일~2017년 11월 4일)에 채취한 PM_{2.5} 농도를 대기오염 측정망

PM_{2.5} 농도(여름철의 경우 신음동, 가을철의 경우 문당동으로 이전)와 비교하여 그림 4에 나타내었다. 여름철 PM_{2.5} 평균농도는 15.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 인근의 대기오염 측정망(신음동)의 PM_{2.5} 평균농도(12.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교하였을 경우 조금 더 높은 농도를 나타내었다. 시료 채취장소의 농도가 측정망의 농도보다 대부분 높은 것으로 조사되었는데, 채취장소가 공단에 위치해 있어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다(그림 4a). 여름철 PM_{2.5}의 주중 평균농도는 15.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (측정망의 경우는 11.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 조사되었으며, 주말(7월 29일과 30일) 평균농도의 경우는 17.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (측정망의 경우는 15.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 조사되어, 평생교육원과 신음동이 비슷한 농도값을 나타내었다. 가을철의 경우는 농도가 30.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 여름철보다 약 2배 정도 높은 평균농도값을 나타내었다. 인근 대기오염 측정망의 평균농도는 32.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 가을철 PM_{2.5}의 주중 평균농도는 31.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (측정망의 경우는 32.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 조사되었으며, 주말 평균농도의 경우는 25.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (측정망의 경우는 29.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 조사되었다.

3.3 계절별 무기원소 및 이온성분 농도

연구대상지역 측정 장소(김천시 평생교육원)에서 2017년 7월 24일부터 8월 4일(여름), 2017년 10월 24일부터 11월 04일(가을)까지 계절별로 각각 12개의 PM_{2.5} 시료를 채취하였으며, 적절한 전처리를 수행한

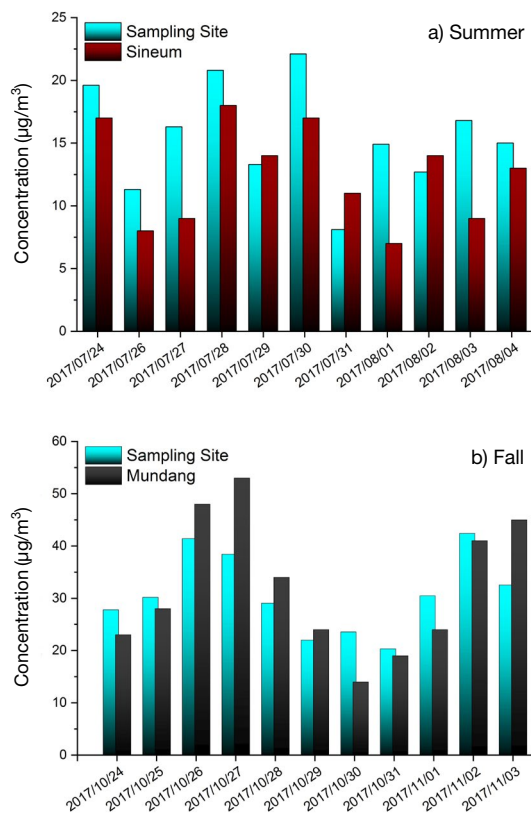


Fig. 4. The summer and fall PM_{2.5} concentrations in sampling site compare with air pollution monitoring station.

후 Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Pd, S, Sb, Si, Ti, Tl, V, Zn 등과 같은 25개 무기원소에 대한 분석을 수행하였다. 또한 양이온 3개 항목(K^+ , Na^+ , NH_4^+)과 음이온 4개 항목(Cl^- , F^- , NO_3^- , SO_4^{2-})에 대한 분석을 수행하였다. 각 무기원소 및 이온성분의 여름철과 가을철 평균농도를 비교하여 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

여름철의 경우 Si ($887.01 \text{ ng}/\text{m}^3$), S ($883.04 \text{ ng}/\text{m}^3$), Na ($205.23 \text{ ng}/\text{m}^3$), Pb ($99.88 \text{ ng}/\text{m}^3$), Fe ($98.03 \text{ ng}/\text{m}^3$), Ca ($96.58 \text{ ng}/\text{m}^3$), K ($95.15 \text{ ng}/\text{m}^3$) 등이 높은 농도를 나타내었다. 반면에 가을철의 경우는 S ($974.84 \text{ ng}/\text{m}^3$), Na ($843.15 \text{ ng}/\text{m}^3$), Fe ($780.36 \text{ ng}/\text{m}^3$), K ($664.57 \text{ ng}/\text{m}^3$), Ca ($466.55 \text{ ng}/\text{m}^3$), Pb ($397.83 \text{ ng}/\text{m}^3$) 등이 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. Si는 토양 오염

원에서 주로 배출되는 것으로 알려져 있지만(Hwang and Hopke, 2007; Chow, 1995) 본 연구의 경우 측정장소 인근의 유리섬유 생산 공장에서 인위적으로 배출되어(US EPA, 1979; Stockham, 1971) 높은 농도값을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 여름 측정기간과 가을 측정기간동안 공통적으로 S의 농도가 각각 $883.04 \text{ ng}/\text{m}^3$, $974.84 \text{ ng}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 농도를 나타내었는데, 이는 측정장소 인근 산단 내의 여러 사업장에서 다량으로 배출되는 황산화물에 의한 것으로 사료된다. 특히, 연구대상지역의 주요 황산화물 배출 오염원은 시료 채취지점 인근의 북쪽 방향과 북서 방향에 주로 위치해 있어 고농도를 나타내는 것으로 사료된다(NIER, 2015).

이온성분의 경우, 여름철에는 SO_4^{2-} ($2.99 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) $>$ NH_4^+ ($2.62 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) $>$ NO_3^- ($2.54 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높은 농도값을 나타내었으며, 가을철에는 NO_3^- ($8.25 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) $>$ NH_4^+ ($4.75 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) $>$ SO_4^{2-} ($3.60 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 여름철 SO_4^{2-} 의 농도가 높은 이유는 일사량이 많은 여름철에 광화학 반응에 의해 SO_2 가 H_2SO_4 로 변환되어 SO_4^{2-} 입자의 생성이 빠르게 진행되어(Christoforou *et al.*, 2000) 다른 계절에 비해 높은 농도값을 나타내는 것으로 사료된다. 또한 SO_4^{2-} 의 경우는 화석연료의 연소 또는 연소과정에서 배출된 SO_2 의 산화과정에서 주로 배출되며(US EPA, 1999), 전술한 바와 같이 산단 내의 여러 사업장에서 다량으로 배출된 SO_2 에 의해 생성된 것으로 판단된다. SO_4^{2-} 를 비롯하여 NH_4^+ 및 Cl^- 는 소각장에서 주로 배출되는 것으로 알려져 있는데(Hopke, 1985) 인근에 위치한 폐기물 소각장에서 배출되어 높은 농도를 나타내는 것으로 사료된다.

3.4 PM_{2.5} 오염원의 정성적 확인

본 연구지역의 경우, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr 등의 농도가 상대적으로 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었는데, 이는 연구대상지역에 위치하는 제조업체(비금속 광물, 1차 금속, 화학물질, 고무 플라스틱 펄프 종이 제조업 등)와 시료 채취장소에서 남동방향으로 약 600

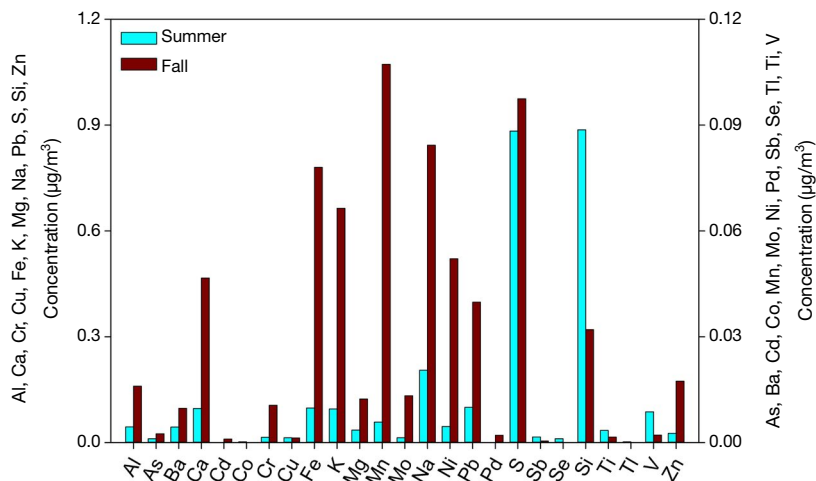


Fig. 5. The average concentration of inorganic species during summer and fall sampling period.

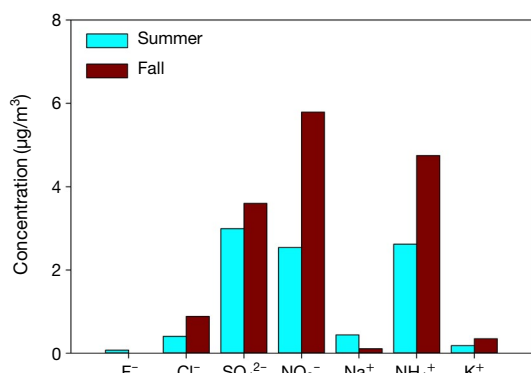


Fig. 6. The average concentration of ionic species during summer and fall sampling period.

m 정도에 위치한 폐기물 소각장에서 배출되는 것으로 판단된다 (NIER, 2015; Hwang and Hopke, 2011; Qin *et al.*, 2002; Chow, 1995; Hopke, 1985).

무기원소 중 주요 성분들에 대한 농축계수 (enrichment factor; EF)를 구하여 그림 7에 나타내었다. EF는 각 성분들의 고유 농도비를 이용하여 각 성분들의 오염원을 정성적으로 추정하는 방법으로서 EF를 구하는 방법 등에 대한 내용은 다음의 문헌을 참고할 수 있다 (Rastogi and Sarin, 2009; Lawson and Winchester, 1979). 만약 EF 값이 1에 가까우면 Al, Fe, Ca, Pb 등과

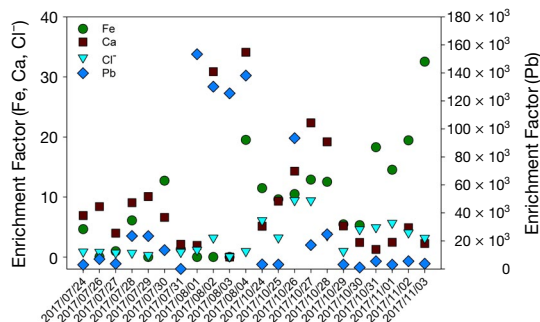


Fig. 7. Variation of enrichment factors for elements (Fe, Ca, Pb, and Cl⁻) suggests elements origin from anthropogenic sources.

같은 성분들은 토양으로부터 기원했을 가능성이 크며, EF 값이 1보다 크면 토양 오염원이 아닌 인위적인 오염원에서 배출되었을 가능성이 크다고 할 수 있다. 각 원소들의 EF 값은 1을 크게 초과하여 (Fe: 10.4, Pb: 37365.6, Ca: 9.2, Cl⁻: 3.1) 자연적인 오염원보다는 인위적인 오염원에서 배출되었을 가능성이 높다.

김천시의 자동측정망 PM_{2.5} 농도자료와 같은 장소에서 관측된 상세 기상관측자료 (AWS)를 결합하여 PM_{2.5}를 배출하는 오염원의 위치를 파악하기 위한 바람장미도 (PM_{2.5}의 농도를 4개의 구간으로 나누어 그에 따른 풍속별 바람장미)를 그림 8에 나타내었다.

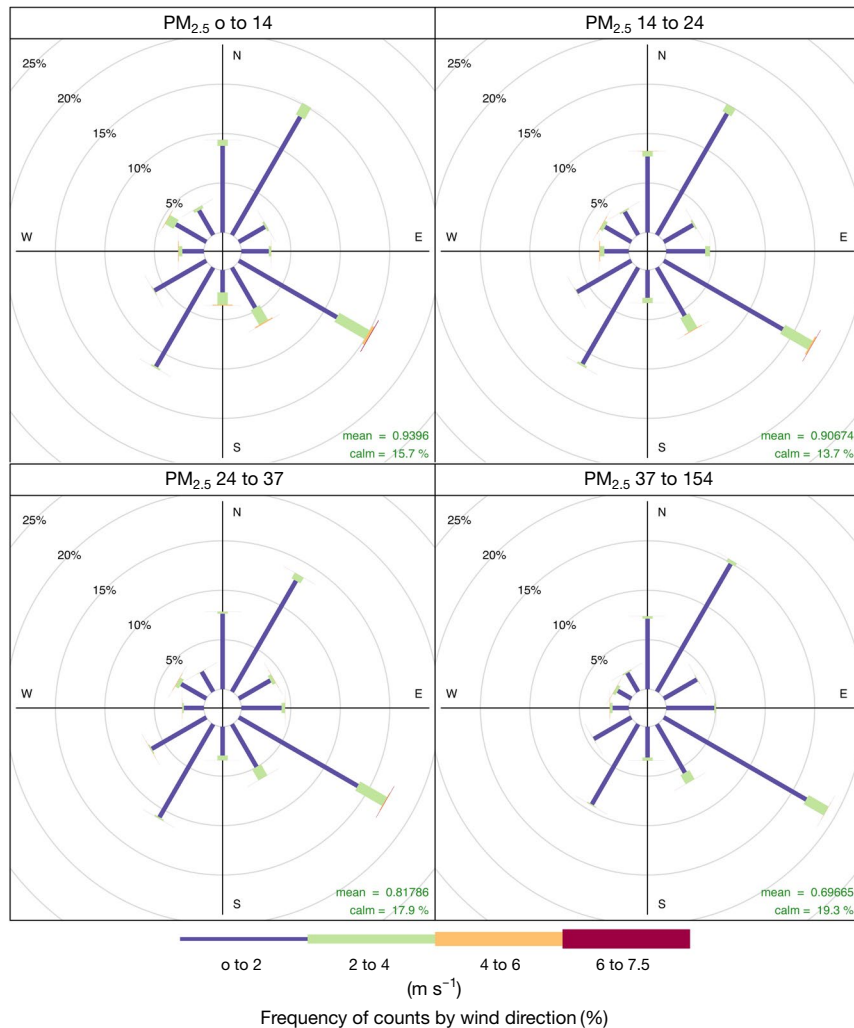


Fig. 8. The windrose plots based on several category of PM_{2.5} concentrations in Gimcheon air pollution monitoring station during 2015~2017.

저농도 구간과 고농도 구간 모두 측정위치를 중심으로 북동방향과 동남동방향에서 배출되었을 가능성이 높은 것을 확인하였다. 자동측정망의 북동방향에는 대규모의 김천 1, 2차 산업단지, 김천 대광농공단지 등이 위치해 있어 PM_{2.5} 오염원의 위치를 정확하게 나타내고 있다. 또한 동남동방향에는 김천시 환경사업소 및 폐기물 소각장, 그리고 소규모의 공장들이 밀집해 있어 PM_{2.5}가 배출되어 이동했을 가능성이 높은 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경상북도에 위치한 주요 산업지역의 대기오염문제 중 심각한 문제로 대두되고 있는 PM_{2.5}에 대한 농도 현황 및 오염특성 등을 파악하기 위하여 2017년 여름철과 가을철에 김천의 산업단지에서 PM_{2.5}를 채취하였으며 무기원소 및 이온성분들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구지역은 1곳의 자동측정망이 운영되고 있는

며 2015년 6월부터 2017년 12월까지 강화된 $PM_{2.5}$ 24 시간 평균 기준을 적용하였을 경우, 약 27.2%가 기준을 초과하는 것으로 조사되었다. 또한 측정망의 시간별 농도 경향은 야간시간대에 농도가 증가하여 새벽 12시 및 1시 정도에 가장 높은 농도를 나타내며, 새벽 시간대에는 농도가 점점 낮아지는 경향을 나타내었다. 계절별 평균농도는 봄철의 경우 황사 등의 영향으로 높은 농도를 ($36.08 \mu g/m^3$), 여름철의 경우는 가장 낮은 농도를 나타내었으며 가을철에 다시 농도가 점차 증가하여 겨울철에는 난방 및 불법 연소 등의 영향으로 다시 농도가 높아지는 경향을 나타내었다. 연구 지역에서 여름철과 가을철에 각각 $PM_{2.5}$ 를 채취하였으며, 여름철 $PM_{2.5}$ 평균농도는 $15.54 \mu g/m^3$ (주중 평균농도: $15.06 \mu g/m^3$, 주말 평균농도: $17.70 \mu g/m^3$), 가을철의 경우는 $30.74 \mu g/m^3$ (주중 평균농도: $31.09 \mu g/m^3$, 주말 평균농도: $25.52 \mu g/m^3$)로 여름철보다 약 2배 정도 높은 평균농도값을 나타내었다. 채취한 $PM_{2.5}$ 시료의 무기원소와 이온성분에 대한 분석을 수행하였으며, 무기원소의 경우는 Si, S, Na, Pb, Fe, K, Ca 등이 높은 농도를 나타내었다. 또한 이온성분의 경우 여름철에는 SO_4^{2-} 가, 가을철에는 NO_3^- 가 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 무기원소 중 주요 성분들에 대한 농축계수(enrichment factor; EF)와 자동측정망 $PM_{2.5}$ 농도자료와 기상관측자료를 결합한 바람장미도를 이용하여 $PM_{2.5}$ 를 배출하는 오염원의 위치는 저농도 구간과 고농도 구간 모두 측정위치를 중심으로 북동방향과 동남동방향에서 배출된 것으로 조사되었다. 이러한 연구결과는 연구대상지역에 대한 $PM_{2.5}$ 대기환경기준 달성을 위한 기초자료 확보, 지자체 주도의 효율적, 합리적 대기환경 정책수립 및 관리방안 수립을 위한 기초자료 확보 및 이를 달성하기 위한 정책 수단의 도입과 시행을 위한 기초자료 확보 측면에서 가치가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년 경북녹색환경지원센터 환경기

술연구개발사업 지원 과제 (과제 번호: 17-2-40-41-5)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bathmanabhan, S., Madanayak, S.N.S. (2010) Analysis and interpretation of particulate matter- PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway, *Atmospheric Pollution Research*, 1, 184-194, DOI: 10.5094/APR.2010.024.
- Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particle, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45, 320-382, DOI: 10.1080/10473289.1995.10467369.
- Christoforou, C.S., Salmon, L.G., Hannigan, M.P., Solomon, P.A., Cass, G.R. (2000) Trends in fine particle concentration and chemical composition in Southern California, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(1), 43-53, DOI: 10.1080/10473289.2000.10463985.
- Chuersuwan, N., Turpin, B.J., Pietarinen, C. (2000) Evaluation of time-resolved $PM_{2.5}$ data in urban/suburban areas of New Jersey, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50, 1780-1789, DOI: 10.1080/10473289.2000.10464214.
- Hopke, P.K. (1985) *Receptor Modeling in Environmental Chemistry*, John Wiley & Sons, New York.
- Hwang, I.J., Kim, D.S. (2013) Research Trends of Receptor Models in Korea and Foreign Countries and Improvement Directions for Air Quality Management, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 459-476. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2013.29.4.459.
- Hwang, I.J., Hopke, P.K. (2007) Estimation of source apportionment and potential source locations of $PM_{2.5}$ at a west coastal IMPROVE site, *Atmospheric Environment*, 41(3), 506-518, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.08.043.
- Hwang, I.J., Hopke, P.K. (2011) Comparison of source apportionment of $PM_{2.5}$ using PMF2 and EPA PMF version 2, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(2), 86-96, DOI: 10.5572/ajae.2011.5.2.086.
- Jeong, Y.J., Hwang, I.J. (2015) Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Gyeongsan using the PMF model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(6), 508-519. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/

- KOSAE.2015.31.6.508.
- Khanna, I., Khare, M., Gargava, P., Khan, A.A. (2018) Effect of PM_{2.5} chemical constituents on atmospheric visibility impairment, *Journal of Air & Waste Management Association*, 68(5), 430-437, DOI: 10.1080/10962247.2018.1425772.
- Kim, J.H., Hwang, I.J. (2016) The characterization of PM, PM₁₀, and PM_{2.5} from stationary sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 603-612. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2016.32.6.603.
- Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE) (2016) *Atmospheric Environment*, DongHwa Technology Publishing Co.
- Lawson, D.R., Winchester, J.W. (1979) A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors, *Atmospheric Environment*, 13, 925-930, DOI: 10.1016/0004-6981(79)90003-9.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) *Stack Emission Management System*, <http://sodac.nier.go.kr/>.
- Pope III, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742, DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
- Qin, Y., Oduyemi, K., Chan, L.Y. (2002) Comparative testing of PMF and CFA models, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 61, 75-87, DOI: 10.1016/S0169-7439(01)00175-7.
- Rastogi, N., Sarin, M.M. (2009) Quantitative chemical composition and characteristics of aerosol over western India: One-year record of temporal variability, *Atmospheric Environment*, 43, 3481-3488, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.030.
- Russell, A.G., Brunekreef, B. (2009) A focus on particulate matter and health, *Environmental Science and Technology*, 43, 4620-4625, DOI: 10.1021/es9005459.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.H. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Stockham, J.D. (1971) The composition of glass furnace emissions, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 21(11), 713-715, DOI: 10.1080/00022470.1971.10469588.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1979) *Summary report on emissions from the glass manufacturing industry*, EPA-600/2-79Oh-101.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999) *Air quality criteria for particulate matter, Volume I*, EPA/600/P-99/002a.

Authors Information

황인조 (대구대학교 환경공학과 교수)
김태오 (금오공과대학교 환경공학과 교수)