

ORIGINAL ARTICLE

부산 구덕산 미세먼지의 금속성분 및 이온성분 농도 특성

전병일*

신라대학교 환경공학과

Characteristics of Metallic and Ionic Elements Concentration in PM₁₀ at Guducsan in Busan

Byung-Il Jeon*

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

Abstract

This study investigates the characteristics of metallic and ionic elements concentration, concentration according to transport path, and factor analysis in PM₁₀ at Guducsan in Busan in the springtime of 2015. PM₁₀ concentration in Guducsan and Gwaebeopdong were $59.5 \pm 9.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $87.5 \pm 20.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Contribution rate of water-soluble ions and secondary ion in PM₁₀ concentration in Guducsan were 37.0% and 27.8% respectively. $[\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}]$ ratio and contribution rate of sea salt of PM₁₀ in Guducsan and Gwaebeopdong were 0.91 and 1.12, 7.0% and 5.3%, respectively. The results of the backward trajectory analysis indicates that PM₁₀ concentration, total inorganic water-soluble ions and total secondary ions were high when the air parcels moved from Sandong region in China than non-Sandong and northern China to Busan area. The results of the factor analysis at Guducsan indicates that factor 1 was anthropogenic source effects such as automobile emissions and industrial combustion processes, factor 2 was marine sources such as sea salts from sea, and factor 3 was soil component sources.

Key words : PM₁₀ concentration, Metallic and ionic elements concentration, Backward trajectory analysis, Factor analysis

1. 서론

입자상 물질은 대기오염, 시정감소, 지구의 기후변화, 인간의 건강을 포함하여 환경문제에 다양한 영향을 미치며, 자연적 오염원인가 인위적 오염원인가에 따라 미세먼지의 배출원은 다양하다. 또한 가스상 물질은 대기 중에서 광화학 반응을 통해 2차 입자로 변환하기도 한다 (Sasaki and Sakamoto, 2005). 부산시는 시민에게 쾌적하고 삶의 질을 높일 수 있는 대기질을 확보하기 위해 청

정연료사용, 저공해 자동차 보급, 도로 물청소 확대, 미세먼지 예/경보제 등을 포함한 많은 시책과 정책을 병행하여 추진하고 있다. 서울시는 자체 오염도뿐만 아니라 외부 유입오염물질에 대한 평가를 통하여 오염도 상승의 원인을 파악하기 위해 서울시 유입 대기오염도(한강을 통한 인천 및 산업단지에서의 유입, 신도시건설에 따른 유입 그리고 고공에서의 오염물질 유입)을 측정할 수 있는 경계 및 상공 대기오염도 측정소를 설치 운영하고 있다 (Yoon et al., 2009). 도시 주변지역에서 배출된 입자

Received 6 March, 2016; Revised 26 March, 2016;

Accepted 28 March, 2016

*Corresponding author : Byung-Il Jeon, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea
Phone : +82-51-999-5056
E-mail : bijeon@silla.ac.kr

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

상물질은 대기경제층에서 수송, 변환, 희석 그리고 소멸된다. 그러므로 입자상물질의 연직 구조를 이해하는 것은 입자상 물질의 고도에 따른 물리적, 화학적 과정을 이해할 뿐만 아니라 도시 지역의 효과적인 미세먼지 관리 대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있다. 또한 도시가 발전함에 따라 생활공간과 근무 지역이 점차 지상에서 상공으로 확장되면서 사람들은 대기오염물질의 연직분포에 많은 관심을 가지게 되었다.

Yoo et al.(2011)은 고도에 따른 대기질 분석을 위하여 해발 200 m 이상의 남산 상층측정망과 북한산 도시배경측정망의 자료와 이들 측정망의 인근에 위치한 일반 도시 대기질 측정망의 측정자료를 비교·분석한 결과, 남산 상층측정망의 PM_{10} 농도는 인근의 용산구 도시 측정망보다 낮지만 큰 차이는 보이지 않았고, 북한산 도시배경측정망의 PM_{10} 농도는 인근의 강북구 도시대기측정망에 비해 $10 \mu g/m^3$ 이상 낮게 나타났다고 하였다. 이는 남산은 도심과 가까이 위치하여 자동차 통행과 산업 활동의 증가 및 남산타워 등 각종 볼거리로 사람의 통행이 빈번하고 활동이 많은 반면, 북한산은 국립공원으로 지정되어 있고, 유원지를 제외하면 주변에 비교적 자연 녹지 조성이 잘 되어 있기 때문이라고 하였다. Jeon(2015a)은 구덕산레이더관측소(518 m)의 PM_{10} 농도와 인근의 광복동, 학장동 그리고 태종대에서 8년간(2006~2013)의 시간별 PM_{10} 농도를 비교한 결과, 구덕산의 PM_{10} 농도는 인근 지역보다 $12.6 \sim 24.5 \mu g/m^3$ 정도 낮은 농도를 나타내었다고 하였다. 이는 구덕산과 인근 관측소 사이의 토지이용(배출원)과 기상학적 차이라고 하였다. 이러한 남산과 북한산 그리고 구덕산에 설치 운영 중인 측정망은 도시대기 측정망과는 달리 주변의 자동차 통행량, 토지 이용, 녹지유무, 고도차 등 여러 요인들로 인해 대기오염 물질 농도에 다른 경향을 나타내고 있으며, 이러한 상공의 미세먼지의 특성에 대한 고찰은 향후 도시 대기질 관리와 개선 대책 수립에 통찰력을 제공할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구덕산 레이더관측소에 황사관측을 위한 β -ray에 의한 자동측정망과 별도로 Mini-volume air sampler를 설치하여 PM_{10} 을 채취하고 그 중의 금속성분과 이온성분을 분석하여 화학적 조성 및 기류분석 그리고 요인분석을 통하여 특성을 고찰하고자 한다.

2. 시료 채취 및 분석 방법

본 연구를 위한 PM_{10} 의 시료채취는 Fig. 1과 같이 부산시 구덕산 정상에 있는 구덕산레이더관측소 노장(518 m)에서 실시하였다. 구덕산 레이더 관측소는 부산광역시 서구와 사상구 그리고 사하구의 경계를 이루는 곳에 있으며, 레이더를 이용하여 영남지방 및 주변해상의 비구름대를 실시간 관측하는 곳으로 β -ray 흡수법을 이용하여 공기 중의 PM_{10} 농도를 측정하며, 기상청의 황사관측소로도 운영되고 있다. 구덕산 미세먼지 농도의 특성을 비교·고찰하기 위해 부산광역시 보건환경연구원에서 운영하는 대기오염자동측정망인 광복동(상업지역)과 학장동(공업지역)에서 측정된 PM_{10} 농도도 사용하였다. 또한 시료채취지점인 구덕산으로부터 북쪽으로 약 6 km 떨어진 괘법동(신라대학교 공학관 옥상)에서 채취한 미세먼지를 채취하여 그 중의 금속성분과 이온성분의 농도를 본 연구에서 채취된 농도와 비교하였다.

본 연구에서의 PM_{10} 의 채취는 2015년 4월과 5월에 실시하였다. 측정일수는 총 14일로서, 주중에 강우가 없는 날을 대상으로 오전 10시에 시작하여 다음날 오전 10시까지 24시간 채취하였다. PM_{10} 의 채취는 Mini-volume air sampler(Air Metrics, Springfield, OR, USA)를 사용하였으며, 흡인유속은 5.0 L/min으로 조정하여 47 mm QMA Filter(Whatman Co.)에 24시간 PM_{10} 시료를 흡인 채취하였다. PM_{10} 의 질량농도를 측정하기 위하여 여과지를 항온(20°C), 항습(50%) 조건하에서 건조장치(automatic dry/up desiccator, SIBATA DUV-12)에 최소 2일간 건조하고, 감도가 0.001 mg인 전자저울(Microbalance, XP26V, Mettler Toledo Co. Switzerland)로 먼지시료 채취 전·후의 무게를 측정한 후의 중량차로서 PM_{10} 의 질량농도를 구하였다. 그리고 PM_{10} 중의 미량 금속 성분을 정량하기 위하여 질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법으로 전처리한 후, syringe filter(PVDF, PALL Co. pore size 0.45 μm , USA)를 이용하여 시료 용액을 여과하고, 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP/OES, Optima 8300, PerkinElmer Co., USA)를 이용하여 Al, Ca, Fe, Mg, K, Na, Si, Sr, Ti, V 그리고 Zn을 분석하였으며, 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS, J200 Tandem, Applied Spectra Co., USA)를 이용하여 Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Ba, Co 그리고 Pb를

정량하였다.

PM₁₀ 중의 수용성 이온성분을 분석하기 위하여 먼지 시료가 채취된 필터를 초순수 20 ml(Direct Q Millipore, 18.2 MΩ)가 담긴 60 ml HDPE bottle(Nalgene Co.)에 넣은 후 밀봉하고, 시료의 변질을 막기 위하여 냉동보관하였다. 보관된 시료는 전처리를 위하여 해동한 다음 초음파세척기에 bottle이 잠기게 한 상태에서 1시간 동안 초음파 추출하였으며, syringe filter(IC Acrodisc 25 mm syringe filter, pore size 0.45 μm, PALL Co., USA)를 이용하여 여과하였다. 여과한 여액은 ICP/OES(iCAP 7400 DUO, ThermoFisher Scientific Co., USA)를 이용하여 양이온인 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺를 정량하였고, 이온크로마토그래피(ICS, ThermoFisher Scientific Co., USA)를 이용하여 양이온인 NH₄⁺과 음이온인 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻를 정량하였다.

시료 채취지점에서 남동쪽으로 약 4 km 떨어진 부산 지방기상청(BRMA : Busan regional meteorological administration)에서 관측한 시료 채취일의 기상요소를 추출하여 살펴본 결과, 기온 16.7°C, 상대습도 52.8%, 풍속 3.4 m/s, 운량 2.9(1/10), 일조시간 10.7시간이었다. 미세먼지 시료 채취일을 강우가 없는 맑은 날로 선택하였기 때문에 풍속이 약하고 운량이 적으며, 일조시간이 비교적 길었다고 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지 농도의 일반적 특성

본 채취지점에서 Mini-volume air sampler를 이용하여 중량분석으로 측정된 PM₁₀농도와 기상청의 황사연구를 위한 미세먼지농도 자동측정망에서 β-ray 흡수법으로 측정된 PM₁₀농도를 비교하는 것은 매우 의미가 있다고 본다. Fig. 2는 본 연구의 채취지점인 구덕산에서 중량법으로 측정된 PM₁₀농도와 β-ray 흡수법으로 측정된 PM₁₀농도를 비교한 것이다. 두 측정법간의 결정계수(r²)는 0.324로 비교적 높지 않은 값을 나타내었다. 구덕산에서 중량법으로 측정된 PM₁₀농도는 β-ray 흡수법으로 측정된 농도보다 높게 나타났다. 이는 β-ray 흡수법으로 미세먼지 농도를 측정하는 경우, 시료 유입구를 가열로 인해 반휘발성(semi-volatile) 물질인 질산암모늄, 반휘발성 유기화합물 등이 손실되는 것도 원인으로 생각할 수 있을 것이다(Allen et al., 1997). Jung et al.(2007)은 일평균 70 μg/m³이상의 고농도일에 대하여 중량법과 베타선 흡수법의 농도를 비교한 결과, 중량법의 농도가 β-ray 흡수법보다 약 4~7% 높게 나타났는데, 이에 대한 원인으로 고농도 발생이 대부분 안개 발생일로서 습도가 높은 날의 수분제어에 관한 문제일 가능성이 높으며, 자료의 부족으로 명확한 결론을 내리기 어렵다고 하였다.

Fig. 3은 Mini-volume air sampler와 β-ray 흡수법에 의해 측정된 구덕산의 PM₁₀ 농도와 부산시 대기오염

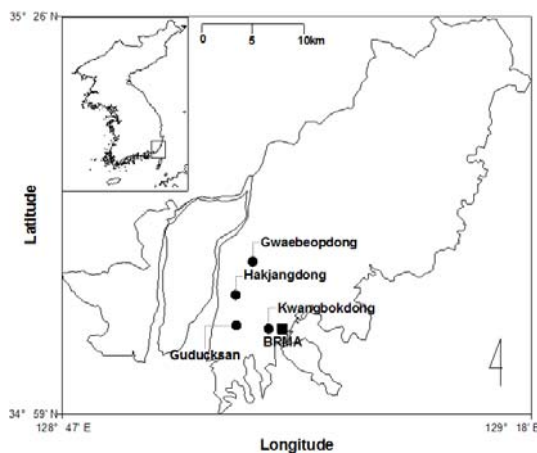


Fig. 1. Automatic air quality monitoring sites(●), Guducksan observatory(●), Gwaebeopdong(●) and Busan regional meteorological administration (BRMA)(■) in Busan(left), mini-voloume air sampler at Guducsan(right).

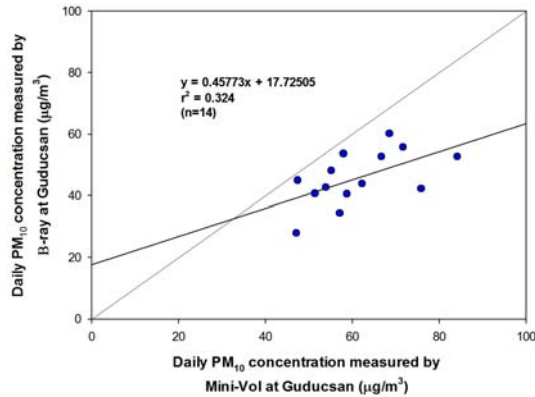


Fig. 2. Comparison of daily PM₁₀ mass concentration measured by Mini-volume air sampler and β -ray attenuation method at Guducsan.

측정망의 광복동과 학장동에서 측정된 일평균 PM₁₀ 농도를 나타낸 것이다. 광복동은 구덕산에서 동쪽으로 5 km 정도 떨어진 상업지역이며, 학장동은 구덕산에서 북쪽으로 약 4 km 떨어진 공업지역이다. β -ray 흡수선법으로 측정된 구덕산이 가장 낮은 농도를 보였고, 중량법으로 측정된 농도가 다음으로 높았으며, 공업지역인 학장동이 가장 높은 농도를 나타내었다. 광복동은 3개의 결측으로 정확한 추세를 볼 수는 없으나, 구덕산보다 높게 나타났다고 할 수 있다. 따라서 고산지대인 구덕산의 PM₁₀ 농도는 인근의 학장동과 광복동보다 낮은 농도를 나타내었다.

Fig. 4는 Mini-volume air sampler로서 동일한 날짜에 구덕산과 괘법동에서 측정된 PM₁₀농도의 변화를 나타낸 것이다. 괘법동은 구덕산으로부터 북동쪽으로 약 15 km 정도 떨어져 있으며, 측정지점의 주변은 북북동에서 남남서로 뻗어있는 백양산으로 둘러싸여 있으며 남서쪽으로 나지막한 작은 계곡이 있다. 측정지점으로부터 남서쪽 약 3 km 떨어진 지역에 사상공업지역이 위치하고 있으나, 많은 공장이 타 지역으로 이주하여 점오염원의 영향이 많이 소멸하였다. 12번 시료를 제외하고 모든 시료에서 괘법동의 PM₁₀농도가 구덕산보다 높게 나타났다. 두 지점의 농도 변화 추이는 비슷하게 나타났으며, PM₁₀중의 금속성분과 이온성분 농도의 특성을 비교하는 데도 문제가 없다고 볼 수 있다.

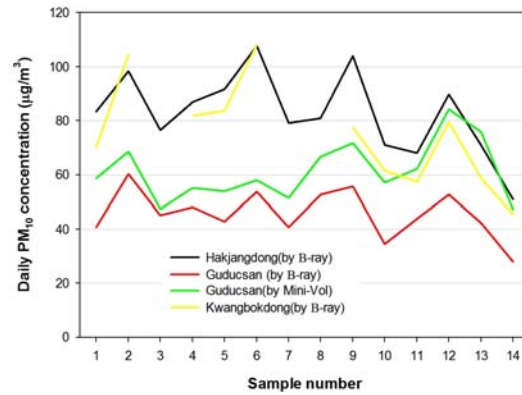


Fig. 3. Variation of daily PM₁₀ mass concentration measured by Mini-volume air sampler at Guducsan, and measured by β -ray attenuation method at Guducsan, Hakjangdong and Kwangbokdong.

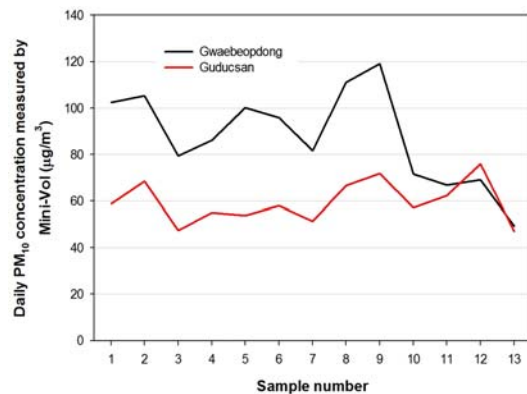


Fig. 4. Variation of daily PM₁₀ mass concentration measured by Mini-volume air sampler at Gwaebepdong(Silla university) and Guducsan.

3.2. 미세먼지의 금속성분 농도 특성

Table 1은 연구 기간 중 구덕산에서 측정된 PM₁₀ 농도와 19개의 금속성분을 분석하여 나타낸 것이다. 그리고 본 연구와의 비교를 위해 동일 기간에 괘법동에서 측정된 자료도 같이 나타내었다. 구덕산의 평균 PM₁₀ 농도는 $59.5 \pm 9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 괘법동의 $87.5 \pm 20.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 32.0% 정도 낮은 농도를 보였다. 이는 구덕산 주변에 오염원이 없고 산악 지형으로 인해 사상보다 낮은 농도를 나타내었다고 판단된다(Jeon, 2015a). 구덕산에서 금속 성분의 PM₁₀에 대한 기여율은 28.3%이었으며,

Table 1. PM₁₀ mass concentration (ug/m³) and mean concentrations (ng/m³) of metallic elements in springtime PM₁₀ at Guducsan and Gwaebeopdong(n=13)

Contents	Guducsan		Gwaebeopdong	
	Mean	S.D. ¹⁾	Mean	S.D. ¹⁾
PM ₁₀ mass	59.5	9.0	87.5	20.2
Al	514.4	149.4	634.0	250.6
Ba	43.9	2.91	58.2	8.83
Ca	2012.9	209.6	2330.6	308.0
Cd	0.98	0.70	1.15	0.73
Co	0.73	0.16	1.18	0.30
Cr	29.7	0.55	27.7	6.40
Cu	14.3	3.87	26.2	5.50
Fe	874.4	163.0	1409.0	373.3
K	918.4	165.0	1140.0	259.3
Mg	398.8	54.5	498.9	88.0
Mn	44.3	11.50	78.6	27.9.
Na	4439.2	205.6	4730.1	502.6
Ni	13.0	3.52	23.4	7.84
Pb	26.5	8.75	34.8	9.67
Si	7295.2	980.3	7539.5	838.4
Sr	5.65	1.51	6.62	1.22
Ti	19.3	3.47	23.9	5.56
V	122.0	2.65	124.1	6.09
Zn	84.3	23.0	147.9	51.7
Contribute rate (%)	28.3		21.5	

¹⁾Standard deviation

괘법동에서의 21.5%보다 높은 기여율을 보였다. PM₁₀에 대한 금속성분의 기여율은 연도와 계절에 따라 다르고 지역특성과 지역용도별로 차이가 크게 나타나는 특성이 있다(Jeon and Hwang, 2014). 구덕산의 금속성분 특성을 보면, 토양 성분 기원인 Si가 가장 높게 나타났고, 두 번째로 해양 기원인 Na가 높았으며, 다음으로 Ca, K, Fe, Al 순이었고, 인위적인 기원인 Co와 Cd 등이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 한편, 괘법동에서도 토양기원인 Si가 가장 높았고, 다음으로 Na, Ca, Fe, K, Al 순이었고, 인위적인 기원인 Co와 Cd 등이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 따라서 구덕산에서 PM₁₀ 중의 금속성분은 Si>Na>Ca>K>Fe----Ni>Sr>Cd>Co 순이었다. 본 연구 지역이 해안과 가까이 있으므로 Na의 농도가 다른 지역

에 비해 높은 농도를 나타낸 것이 특징이다(Jeon and Hwang, 2014).

3.3. 미세먼지의 이온성분농도 특성

Table 2는 본 연구지역인 구덕산과 괘법동에서 측정된 PM₁₀ 중의 이온성분 농도와 비해염 황산염(nss-SO₄²⁻)을 나타낸 것이다. nss-SO₄²⁻은 해염의 지시자인 Na⁺를 이용하여 식 (1)으로 계산할 수 있다(Millero and Sohn, 1992).

$$[nss - SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - 0.251 \times [Na^+] \quad (1)$$

구덕산에서 이온성분의 PM₁₀에 대한 기여율은 36.8%

Table 2. Ionic concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in PM_{10} at Guducsan and Gwaebepdong

Contents	Guducsan		Gwaebepdong	
	Mean	S.D. ¹⁾	Mean	S.D. ¹⁾
PM_{10} mass	59.50	9.04	87.50	20.22
Na^+	2.51	0.19	2.57	0.30
Mg^{2+}	0.25	0.02	0.28	0.03
Ca^{2+}	1.31	0.26	1.37	0.20
K^+	0.29	0.12	0.32	0.12
NH_4^+	3.44	2.11	3.80	1.71
Cl^-	0.39	0.22	0.49	0.21
SO_4^{2-}	7.63	4.32	7.93	3.99
NO_3^-	6.06	2.60	7.74	2.63
nss- SO_4^{2-}	7.00	4.31	7.29	3.99
Contribute rate (%)	36.8		38.0	

¹⁾Standard deviation

이었고, 괘법동의 기여율은 38.0%로 비슷한 값을 나타내었다. 2011년과 2012년의 괘법동에서 PM_{10} 중 이온성분의 평균 기여율 38.6%와 비슷한 값을 나타내었다 (Jeon and Hwang, 2014). 미세먼지의 조성은 이온성분, 탄소성분, 금속성분 그리고 기타 결합수를 포함한 기타 성분으로 구성되어 있다. Park et al.(2012)이 부산시 연산동의 $\text{PM}_{2.5}$ 를 분석한 결과, 이온성분 44.7%, 탄소성분 25.3%, 금속성분 3.5%, 기타 26.5%로 구성되어 있으며, 학장동은 이온성분 53.5%, 탄소성분 19.2%, 금속성분 4.7%, 기타 22.6%로 구성되어 있다고 하였으며, 공업지역의 이온성분 및 금속성분 비율이 도심지역에 비해서 다소 높게 나타났다고 하였다. 본 연구에서는 탄소성분의 분석이 없어 아쉽지만, 이온성분의 기여율이 금속성분보다 큰 것으로 나타났다. 구덕산 PM_{10} 에서 가장 높은 농도를 보인 성분은 SO_4^{2-} 이온으로 $7.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 다음으로 NO_3^- ($6.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$), NH_4^+ ($3.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순이었다. 괘법동에서 가장 높게 나타난 이온성분은 구덕산과 동일하게 SO_4^{2-} 이온으로 $7.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 다음으로 NO_3^- ($7.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$), NH_4^+ ($3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순이었다. 따라서 두 지점 모두 PM_{10} 중의 이온성분은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 순이었다. 황산염은 화석연료의 연소에 의해 대기 중으로 배출된 SO_2 의 일부분이 건성 및 습성침적 이전에 황산염 에어로졸로 산화되어 생성된다(Ho et al., 2003). 구덕산과 괘법동에

서 PM_{10} 중의 SO_4^{2-} 농도는 2011년과 2012년 괘법동에서 측정된 $8.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 낮은 농도를 나타내었다(Jeon and Hwang, 2014). 질산염은 도시대기 에어로졸의 중요한 성분으로 도시지역의 자동차나 산업공장에서 사용하는 화석연료의 연소에 의해 배출된 NO_2 의 광산화에 의해 생성된다(Logan, 1983). 또한 구덕산과 괘법동의 PM_{10} 중의 NO_3^- 농도는 2011년과 2012년 괘법동에서 측정된 $8.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 서도 높은 농도를 나타내었다(Jeon and Hwang, 2014). 먼지 중의 암모늄은 주로 동물농장, 비료 및 유기물 부패 등에 의한 암모늄 증기로부터 생성되며, 염화암모늄이 가장 휘발성이 강한 반면, 황산암모늄은 가장 안정하다(Asman and van Jaarsveld, 1991; Ho et al., 2003). 본 연구 기간 동안 구덕산과 괘법동의 PM_{10} 중의 NH_4^+ 농도는 $3.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2011년과 2012년 괘법동에서 측정된 농도보다 낮게 나타났다(Jeon and Hwang, 2014).

Table 3은 본 연구 지역인 구덕산과 괘법동에서 측정된 총 수용성이온(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})의 PM_{10} 농도에 대한 기여율과 이차생성이온인 nss- SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 PM_{10} 농도에 대한 기여율 그리고 PM_{10} 농도 중 화석연료의 연소에 의하여 배출되는 인위적인 오염원의 정량적인 평가를 위하여 [$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$]의 농도비를 조사하여 나타낸 것이다. 먼저,

Table 3. Contribution rate (%) of total inorganic water-soluble ions, contribution rate (%) of secondary ion and $[SO_4^{2-}/NO_3^-]$ ratio in PM_{10} at Guducsan and Gwaebeopdong

	Guducsan	Gwaebeopdong
Contribution rate (%) of total inorganic water-soluble ions in PM_{10}	37.0±13.6	28.5±7.1
Contribution rate (%) of secondary ion in PM_{10}	27.8±13.4	21.7±6.6
$[NO_3^-/SO_4^{2-}]$ ratio	0.91±0.35	1.12±0.43

총 수용성이온의 PM_{10} 농도에 대한 기여율은 구덕산과 괘법동이 각각 37.0%와 28.5%로서 구덕산이 괘법동보다 높았으며, 2011년과 2012년의 괘법동에서 측정한 평균 43.9%에 비해 두 지점 모두 낮은 값을 나타내었다 (Jeon and Hwang, 2014). 그리고 이차생성이온의 PM_{10} 농도에 대한 기여율은 구덕산과 괘법동이 각각 27.8%와 21.7%로 구덕산이 괘법동보다 높게 나타났다. 이 기여율은 미세먼지로 인해 피해를 입을 가능성이 있는 도시에서는 미세먼지 저감방안을 개발하는데 매우 중요하다 (Park and Lim, 2006). 2011년과 2012년 괘법동에서의 기여율이 평균 27.8%로 구덕산과 비슷한 값을 나타내었다 (Jeon and Hwang, 2014). 마지막으로 구덕산과 괘법동에서 $[SO_4^{2-}/NO_3^-]$ 의 농도비를 보면, 각각 0.91과 1.12를 나타내었다. $[SO_4^{2-}/NO_3^-]$ 비는 대기 중에 배출된 고정오염원과 이동오염원의 상대적인 중요성을 나타내는 지시자로 사용되며, 또한 고정오염원의 연료로 사용되는 중유에 포함된 황은 이동오염원의 연료인 가솔린과 경유에 비해 많이 포함되어 있으므로, 화석연료 중 중유의 기여도를 파악하는데 사용되기도 한다 (Yao et al., 2002). 구덕산은 고정오염원이 이동오염원보다 우세한 영향을 미쳤고, 괘법동은 이동오염원이 고정오염원보다 높은 영향을 미치는 것으로 보인다. 구덕산은 인근의 항구를 운행하는 디젤 기관의 선박에서 배출하는 오염원의 영향이 있다는 것을 간접적으로 보여주고 있다.

Table 4는 연구지역인 구덕산과 괘법동에 측정된 PM_{10} 농도와 해염농도 그리고 해염의 기여율을 나타낸 것이다. 대기 중의 해염입자는 해수에 존재했던 Cl, Na, S, Mg, Ca, K 등의 물질로 구성되어 있으며, Na는 해염입자의 지표원소로 사용된다 (Willison et al., 1989). 미세먼지에 함유된 해염의 농도는 해수성분 이온들의 Na^+ 에 대한 질량농도비에 근거한 다음 식 (2)를 이용하여 계산하였다 (Holland, 1978).

$$\text{sea salt } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 1.47 \times \text{Na}^+ (\mu\text{g}/\text{m}^3) + \text{Cl}^- (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (2)$$

구덕산과 괘법동의 PM_{10} 에 대한 해염의 기여율은 각각 7.0%와 5.3%로, 구덕산이 괘법동보다 높게 나타났다. 구덕산이 비교적 내륙에 위치한 괘법동에 의해 해양의 영향을 많이 받는다는 것을 보여주고 있다. 부산지역 2013년 봄철 주중과 주말의 PM_{10} 에 대한 해염의 기여율은 각각 8.1%와 7.6%로 주중이 주말에 비해 높게 나타났다 (Jeon, 2015b). 부산지역 2011년과 2012년의 13.2%에 비해서는 낮았고 (Jeon and Hwang, 2014), 2007년의 여름철과 가을철의 PM_{10} 에 대한 기여율인 2.8%와 3.1%에 비해 월등히 높은 기여율을 나타내었다 (Jeon et al., 2010). 제주도 해안으로부터 2 km 떨어진 지점에서 PM_{10} 중 해염입자의 기여율은 여름과 가을이 각각 13.1%와 15.2%로 본 연구결과에 비해 매우 높은 기

Table 4. Mean sea salt concentration and contribution rate of sea salt of PM_{10} at Guducsan and Gwaebeopdong

	Mean PM_{10} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean sea salt concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Contribution rate of sea salts (%)
Guducsan	59.50±9.04	4.09±0.48	7.0±1.4
Gwaebeopdong	87.50±20.22	4.26±0.57	5.3±2.2

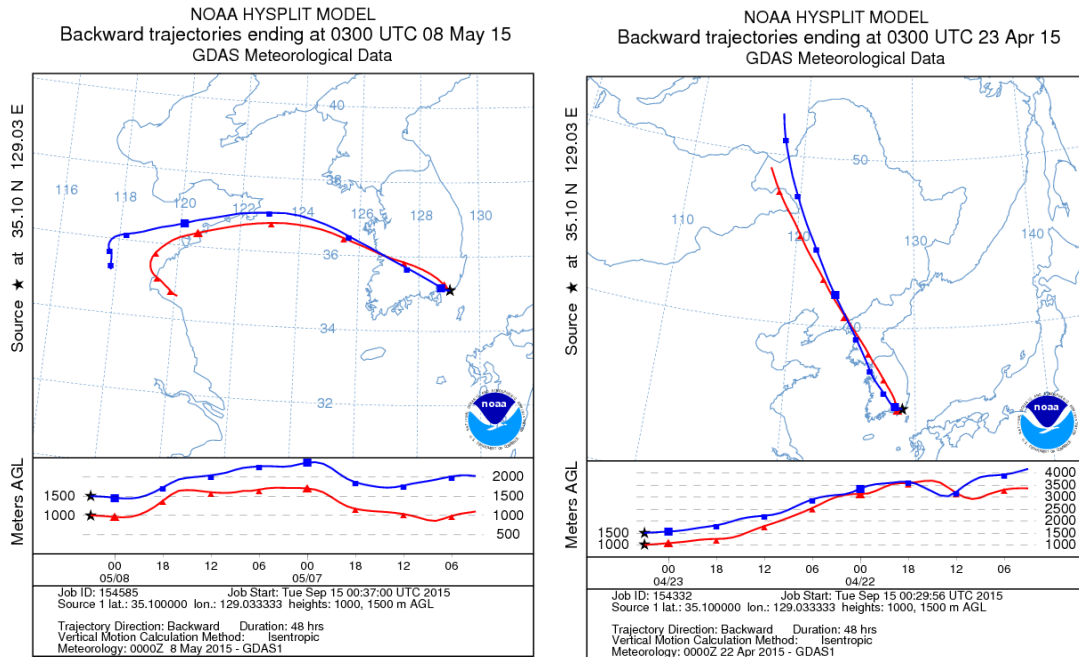


Fig. 5. The 2 days backward trajectory of air masses corresponding to PM₁₀ sampling data at Guducsan site. Sandong passed(left) and Non-Sandong passed(right).

여울을 나타내었다(Kim, 2006). 따라서 부산과 같은 해안지역의 도시 대기질 미세먼지 관리대책을 수립할 때 지형적인 특성에 의해 자연적으로 발생하는 미세먼지의 기여를 고려할 필요가 있다고 사료된다.

3.4. 이동경로별 미세먼지의 특성

본 연구지역에서 측정된 PM₁₀ 농도 및 금속성분 그리고 이온성분 농도가 공기계의 이동과 어떠한 연관성을 가지고 있는가를 조사하기 위하여 본 연구기간의 시료포집일을 대상으로 역궤적 추적 분석(backward trajectory analysis)을 하였다. 대기오염물질의 장거리수송을 연구하기 위해서는 오염물질이 배출되고 수송되는 지역을 대상으로 오염물질의 이동경로를 파악하는 것이 중요하다. 채취일에 대한 공기를 추적하기 위해서 미국의 해양기상청(NOAA: national ocean atmospheric administration)에 의해 개발된 HYSPLIT-4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모형을 사용하여 기류의 이동방향을 추적하였다(Draxler and Rolph, 2013). 또 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의

북반구 FNL (final run at NCEP)자료를 사용하였다. FNL자료의 수평적 거리는 위도와 경도 각각 190.5 km이며, 연직구조는 지표로부터 20 hPa까지 14층으로 구성되어 있다. 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우, 대략 4일 이내에 한반도에 도달하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 부산지역에 영향을 미치는 공기계의 궤적을 알아본다는 차원에서 역궤적의 모사시간을 48시간으로 하고 6시간 간격으로 하였다. 공기계의 착지점의 좌표는 구덕산 레이더 관측소(N35°06', E129°02')로 설정하였으며, 부산지역에 미치는 장거리 오염물질의 영향을 고려하여 공기덩어리의 이동고도는 1,000 m와 1,500 m로 하였다.

Fig. 5는 연구기간 중 구덕산에서 14일의 PM₁₀ 측정일 중에 대표적인 두 개의 경로를 나타낸 것이다. 첫 번째는 중국 화중지방인 산둥반도에서 유래되어 서해와 우리나라 남부지방을 통과하여 부산에 도달하는 경로이고, 두 번째는 중국 북동부 지방에서 유래되어 서해를 거치지 않고 북한지역과 우리나라 내륙을 거쳐 부산에 도달

Table 5. PM₁₀ concentration and related data according to air mass trajectory at Guducsan

	Sandong passed (n=7)	Non-Sandong passed (n=5)	The others (n=2)
PM ₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	67.94±9.93	55.26±8.25	52.92±8.25
Total metallic elemnet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17.15±0.92	17.25±1.54	18.63±0.24
Total inorganic water-soluble ions ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	22.92±7.94	19.79±6.56	21.8±16.37
Total secondary ions ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17.81±7.53	14.28±7.01	16.16±15.62
[NO ₃ /SO ₄ ²⁻] ratio	0.77±0.39	1.07±0.30	0.80±0.07
Sea salt concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.86±0.23	4.04±0.49	4.82±0.37
Contribution rate (%) of sea salt of PM ₁₀	5.77±0.76	7.37±1.05	9.16±0.72

하는 경로로 구분할 수 있었다. 즉, 첫 번째 경우인 중국 북동부와 우리나라 내륙을 거쳐 온 사례는 5일이었고, 중국 산동반도를 거쳐 서해를 통과한 사례는 7일이었으며, 두 경우에 속하지 않는 경우가 2일이었다. 따라서 본 연구에서는 중국 산동반도를 통과한 사례와 그렇지 않는 사례로 나누어 PM₁₀ 농도와 그 중의 금속성분 및 이온성분 농도의 특성을 고찰하였다.

Table 5는 연구지점인 구덕산과 괘법동에서 후방궤적선의 경로에 따라 PM₁₀ 농도, 금속성분, 이온성분, 2차이온, [NO₃/SO₄²⁻]비, 해염농도 그리고 해염농도 기여율을 계산하여 나타낸 것이다. PM₁₀ 농도는 산동반도를 통과한 경우는 67.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 그렇지 않는 경우는 55.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 산동반도를 통과한 경우가 약 23% 높은 농도를 보였다. 이와 같이 구덕산의 경우는 중국의 공업지대를 통과한 공기괴가 도달한 경우에 비교적 높은 농도를 보였다. 2006년부터 2008년까지 3년간 부산시 괘법동에서 이동경로에 따른 농도의 특성 분석에서 북경을 중심으로 산동반도와 발해만 연안지역을 통과한 공기괴와 상해를 중심으로 중국 남부지방과 동지나해를 통과하여 온 공기괴의 PM₁₀ 농도는 다른 경로에 비해 월등히 높은 농도를 나타내었다(Jeon and Hwang, 2010).

금속성분의 농도는 산동반도를 통과한 경우가 17.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 그렇지 않는 경우가 17.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 거의 차이가 없었으며, 이온성분은 산동반도를 통과한 경우가 22.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 그렇지 않는 경우가 19.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서, 산동반도를 통과하여 온 공기괴가 15.8% 높은 농도를 보였다. 이차이온 농도는 산동반도를 통과한 경우가

17.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 그렇지 않는 경우가 14.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 산동반도를 통과한 경우가 24.7% 높은 농도를 나타내었으며, [NO₃/SO₄²⁻]비는 산동반도를 통과한 경우가 0.77 이고, 그렇지 않는 경우가 1.07로서 산동반도를 통과한 경우는 고정오염원에 의해 영향이 컸고, 그렇지 않는 경우는 이동오염원의 영향이 컸다. 해염농도는 산동반도를 통과한 경우가 3.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 그렇지 않는 경우가 4.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거의 차이가 없었으나, PM₁₀ 농도에 대한 해염의 기여율은 산동반도를 통과한 경우가 5.77%이고, 그렇지 않는 경우가 7.37%로서 산동반도를 통과한 경우가 낮게 나타났다. 이는 해염의 농도는 서로 비슷하나 미세먼지의 농도가 산동반도를 통과하는 경우가 높기 때문으로 보이며, 서해안을 통과하는 경우나 우리나라 내륙을 통과하는 경우가 비슷한 것으로 보아 구덕산의 해염농도는 서해의 영향보다 부산 인근의 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 구덕산에서 측정된 자료를 바탕으로 보면, 산동반도와 서해를 거쳐 오는 경우가 중국 북부 그리고 우리나라 내륙을 통과하여 부산으로 오는 경우보다 PM₁₀ 농도, 이온성분, 2차 이온 농도가 높은 것으로 보아, 중국 동부지역에 집중되어 있는 산업시설에서 배출되는 각종 대기오염물질의 영향이 부산 구덕산까지 수송되어 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.5. 미세먼지 성분의 발생 기원

구덕산의 미세먼지 성분의 발생기원 특성을 고찰하기 위해 SPSS 통계프로그램을 이용하여 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 이 방법은 주로 상관성이 큰 유

Table 6. Varimax rotated factor loadings for PM₁₀ components at Guducsan and Gwaebeopdong

Species	Guducsan			Gwaebeopdong		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Na ⁺	0.11	0.97	-0.11	-0.05	-0.90	0.50
Mg ²⁺	0.74	0.07	0.47	0.26	0.09	0.80
K ⁺	0.56	0.34	0.71	0.68	0.60	0.29
NH ₄ ⁺	0.98	-0.04	0.02	0.97	0.07	0.01
Cl ⁻	-0.11	0.95	0.19	-0.18	-0.20	0.85
NO ₃ ⁻	0.86	-0.13	0.12	0.91	0.01	-0.19
nss-SO ₄ ²⁻	0.89	0.13	0.04	0.75	0.10	0.44
nss-Ca ²⁺	0.01	-0.07	0.98	0.07	0.98	0.10
Eigenvalue	3.8	2.0	1.3	3.4	2.2	1.5
Variance (%)	47.4	25.0	16.6	42.7	27.3	18.6
Cumulative (%)	47.4	72.4	89.0	42.7	70.0	88.6

사 변수들을 하나의 요인으로 묶어 많은 변수들을 소수의 요인으로 단순화하기 위한 목적으로 사용되고 있다 (Oravisjarvi et al., 2003). 요인분석 결과에서 인자 적재값이 클수록 변수들 간의 특성이 유사하다고 볼 수 있으며, 대기 에어로졸이나 강수성분의 기원을 분별하고 유추하는데 이 방법을 적용하고 있다(Arsene et al., 2007). 본 연구에서 요인분석은 고유값이 1 이상을 기준으로 미세먼지에 대해 3개의 인자를 추출하였고 배리맥스(Varimax) 회전법을 이용하여 산출하였다. 그리고 이러한 방법으로 실시한 요인분석 결과는 Table 6과 같다.

먼저 구덕산에서의 PM₁₀에 대한 요인분석 결과를 보면, 전체 인자 중 89.0%의 설명력을 보였다. 그리고 첫 번째 인자는 47.4%의 설명력을 보였고, NH₄⁺, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, Mg²⁺ 등이 높은 적재값을 나타내었으며, 이들 성분은 인위적 기원의 성분들로 구성되어 있다고 할 수 있다. 두 번째 인자는 25.0%의 설명력을 보였고, 해염 성분인 Na⁺와 Cl⁻이 높은 적재값을 보였다. 세 번째 인자는 16.6%의 설명력을 보였고, nss-Ca²⁺이 매우 높은 적재값을 나타내어 토양입자에서 유래되었다고 할 수 있다. 부산 지역의 비교적 내륙에 위치한 괘법동의 PM₁₀에 대한 요인분석 결과를 보면, 전체 인자 중 88.6%의 설명력을 보였다. 그리고 첫 번째 인자는 NH₄⁺, NO₃⁻, nss-SO₄²⁻, K⁺ 등이 높은 적재값을 보였으며, 이들 성분은 인위적 기원의 성분들로 구성되어 있다. 두 번째 인자는 27.3%의 설명력을 보였고, nss-Ca²⁺, K⁺ 등의 토양기

원 성분이 높은 적재값을 보였다. 세 번째 인자는 18.6%의 설명력을 보였고, Cl⁻, Mg²⁺, Na⁺ 등이 높은 적재값을 보여 해염성분의 영향을 많이 받은 것으로 나타났다.

이러한 인자분석 결과를 종합해 보면, 구덕산의 미세먼지 성분은 인위적인 영향을 가장 많이 받았으며, 다음으로 해양으로부터의 영향과 토양성분의 영향 순으로 나타났다. 비교적 내륙 지역인 괘법동과 비교할 때 구덕산은 괘법동보다 해양 기원의 해염 영향이 더 높은 것으로 나타났다. Lee et al.(2011)은 제주도 고산 지역의 PM₁₀ 성분의 요인분석 결과, 첫번째 인자는 NH₄⁺, K⁺, nss-Ca²⁺, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, K, S, Mn, Ba, Pb, Cd 등의 인위적 오염기원 성분들이었고, 두 번째 인자는 토양의 주요 성분들인 Al, Fe, Ca, Mg, Ti, Sr, Zn, Cr, Cu, Ni, Co, Mo 등이었으며, 세 번째 인자에는 해염성분인 Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, Na 등으로, 고산지역의 PM₁₀은 인위적인 영향을 주로 받고, 다음으로 토양의 영향과 해양의 영향으로 보았다. Ko et al.(2015)은 배경 지역인 제주 고산 지역에서 초대입자(PM_{10-2.5}) 성분의 요인 분석 결과, 첫 번째 인자는 대표적인 해염기원인 Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻이 32.3%로 가장 높은 적재값을 보였고, 두 번째 인자는 NH₄⁺, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻ 등의 인위적인 성분들이 31.5%이었으며, 세 번째 인자는 토양기원의 nss-Ca²⁺ 성분만이 20.1%의 적재값을 나타내었다고 하였다. Li and Hwang(2015)은 경북 경산 지역의 초미세먼지 시료 중 무기원소, 이온성분과 탄소성분을 이용하여 오염원을 추

정한 결과, 인자 1은 K , K^+ , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 등으로 생체 소각 및 2차 에어로졸로 추정하였고, 인자 2는 Mg , Ca , Si , Al 등으로 토양성분에 의한 자연적인 오염원이었으며, 인자 3은 Cr , Ni , Fe , Cu 등으로 산업관련 오염원이었으며, 인자 4는 Cl^- , EC , OC , Zn 등으로 소각 오염원과 자동차 타이어 마모에 의해 배출된 오염원으로 추정된다고 하였다.

4. 요약 및 결론

2015년 봄철 부산 구덕산에서 Mini-volume air sampler를 이용하여 측정된 PM_{10} 농도의 질량과 금속 성분, 이온성분, 이동경로에 따른 농도 특성 그리고 미세먼지 성분의 기원을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구 기간 중 구덕산에서 측정된 PM_{10} 의 평균 농도는 $59.5 \mu g/m^3$ (표준편차 $9.04 \mu g/m^3$)이었고, 동일한 측정일의 괘법동에서 측정된 PM_{10} 의 평균 농도는 $87.5 \mu g/m^3$ (표준편차 $20.2 \mu g/m^3$)로서 산악지역인 구덕산이 산업지역 및 상업지역과 인접한 곳에 위치한 괘법동보다 32% 낮은 농도를 나타내었다.

2) 구덕산에서 측정된 금속원소 농도는 $Si > Na > Ca > K > Fe > Al > ---Ti > Cu > Ni > Sr > Cd > Co$ 순으로 지각물질인 Si , Ca , K , Fe 등이 높았고, 해안지역의 특징인 해염의 영향으로 Na 이 두 번째로 높았다. 이온성분 농도는 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Cl^- > K^+ > Mg^{2+}$ 순으로 이차 물질인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 이 대부분을 차지하였다.

3) PM_{10} 중에 차지하는 수용성 성분의 기여율과 이차 이온의 기여율은 각각 37.0%와 27.8%이었다. 그리고 대기 중 고정오염원과 이동오염원의 특성을 나타내는 $[NO_3^-/SO_4^{2-}]$ 비는 0.91로 괘법동의 1.12보다 낮은 값을 나타내었다. PM_{10} 중에 해염입자의 기여율은 7.0%로 괘법동의 5.3% 보다 높은 값을 나타내었다.

4) 미국 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT-4 모델을 이용하여 후방궤적선 분석을 한 결과, 중국 동부 공업지대인 산둥반도를 통과하여 온 경우가 그렇지 않은 경우보다 $11.99 \mu g/m^3$ 높은 농도를 나타내었다.

5) 구덕산에서 PM_{10} 에 대한 요인분석 결과를 통해 발생기원을 조사해 본 결과, 인위적 오염원의 영향을 가장

많이 받았으며, 두 번째로 해양에 의한 영향이었으며, 세 번째로 토양기원의 영향을 받은 것으로 나타나, 괘법동보다 해양의 영향이 높은 것으로 나타났다.

6) 향후 대도시 지역 상공에서 미세먼지의 특성을 체계적으로 이해한다면 도시 대기질의 관리와 대책 수립에 통찰력을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Allen, G., Sioutas, C., Koutrakis, P., Reiss, R., Lurmann, F. W., Roberts, P. T., 1997, Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in urban areas, *Air & Waste Manage. Assoc.*, 47, 682-689.
- Arsene, C., Olariu, R. I., Mihalopoulos, N., 2007, Chemical composition of rainwater in the northeastern Romania, Iasi region (2003 - 2006), *Atmos. Environ.*, 41, 9452-9467.
- Asman, W., Jaarsveld, H., 1991, A Variable-resolution transport model applied for NHX in Europe, *Atmos. Environ.*, 24A, 445-464.
- Draxler, R. R., Rolph, G. D., 2013, HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).
- Ho, K. F., Lee, S. C., Chan, C. K., Yu, J. C., Chow, J. C., Yao, X. H., 2003, Characterization of chemical species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 37, 31-39.
- Holland, H. D., 1978, *The Chemistry of the Atmosphere and Ocean*, John Wiley, Hoboken, New Jersey, USA.
- Jeon, B. I., 2015a, Meteorological relations and characteristics of fine particles at Guducksan in Busan, *Sci. Inter.*, 24, 883-892.
- Jeon, B. I., 2015b, Weekday/weekend chemical characteristics of water-soluble components of PM_{10} at Busan in springtime, *Sci. Inter.*, 24, 785-792.
- Jeon, B. I., Hwang, Y. S., 2010, Chemical properties of the metallic composition and the mass concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$ observed in Busan, Korea in springtime of 2006-2008, *Kor. Earth Sci.*, 31(6), 234-245.
- Jeon, B. I., Hwang, Y. S., 2014, Characteristics of metallic and ionic concentration in PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Busan,

- Sci. Inter., 23, 819-827.
- Jeon, B. I., Hwang, Y. S., Oh, K. J., 2010, Characteristics of metallic and ionic concentration in PM₁₀ at inland and seashore in Busan, Environ. Imp. Assess., 19, 323-333.
- Jung, C. H., Cho, Y. S., Hwang, S. M., Jung, Y. G., Ryu, J. C., Shin, D. S., 2007, Analysis of measurement error for PM-10 mass concentration by inter-comparison study, Kor. Atmos. Environ., 23(6), 689-698.
- Kim, K. Y., 2006, The Distribution of atmospheric sea-salt concentration Jeju Island, Master's thesis, Cheju National University, 62.
- Ko, H. J., Lim, E. H., Song, J. M., Kim, W. H., Kang, C. H., Lee, H. Y., Lee, C. K., 2015, Composition variation of atmospheric fine particulate matters in accordance with air mass transport pathways at background site of Korea in 2013, Kor. Atmos. Environ., 31(1), 15-27.
- Lee, S. B., Jung, D. S., Cho, E. K., Kim, H. A., Hwang, E. Y., Kang, C. H., 2011, Composition and pollution characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} particles at Gosan site of Jeju Island in 2008, Anal. Sci. & Tech., 24(4), 310-318.
- Li, K. C., Hwang, I. J., 2015, Characteristics of PM_{2.5} in Gyeongsan using statistical analysis, Kor. Soc. Atmos. Environ., 31(6), 520-529.
- Logan, J. A., 1983, Nitrogen oxides in the troposphere : Global and regional budgets, Geophy. Rese., 88, 10785-10807.
- Millero, F. J., Sohn, M. L., 1992, Chemical Oceanography, CRC Press, Boca Raton FL, 531.
- Oravisjarvi, K., Timonen, K. L., Wiikinkoski, T., Ruuskanen, A. R., Heinanen, K., Ruuskanen, J., 2003, Source contributions to PM_{2.5} particles in the urban air of a town situated close to a steel works, Atmos. Environ., 31(8), 1013-1022.
- Park, G. H., Jeong, J. W., Cho, J. G., 2012, Evaluation of pollution characteristics and chemical composition of PM_{2.5} in the ambient air of Busan(III), The Annual Report of Busan Metro. city Insti. Heal. & Environ., 22(1), 142~159.
- Park, J. Y., Lim, H. J., 2006, Characteristics of water soluble ions in fine particles during the winter and spring in Daegu, Kor. Atmos. Environ., 22(5), 627-641.
- Sasaki, K., Sakamoto, K., 2005, Vertical differences in the composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in the urban atmosphere of Osaka, Japan Atmos. Environ., 39, 7240-7250.
- Willison, M. J., Clarke, A. G., Zeki, E. M., 1989, Chloride aerosols in central northern England, Atmos. Environ., 23(10), 2231-2239.
- Yao, X., Chan, C. K., Fang, M et al., 2002, The Water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China: 1-inorganic ions, Atmos. Environ., 36(26), 4223-4234.
- Yoo, S. S., Jeon, J. S., Jung, K., Shin, E. S., Jung, B. J., Ryu, R. N., Woo, J. H., Sunwoo, Y., 2011, Analysis on air quality characteristics through air quality monitoring stations in urban background and high altitude in 2005~2006 in Seoul, Environ. Impact Assess., 49-59.
- Yoon, H. G., Kim, N. J., Kim, H. J., Jo, S. H., Lee, Y. M., Jeong, G., Kim, J. Y., Kim, M. Y., 2009, Characteristics of air quality at Gwanaksan, Proceeding of the 49th Meeting of KOSAE, 678-679.