

통계분석을 이용한 경산 지역의 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 특성 파악

Characteristics of PM_{2.5} in Gyeongsan Using Statistical Analysis

이 개 초 · 황 인 조*

대구대학교 환경공학과

(2015년 8월 26일 접수, 2015년 10월 26일 수정, 2015년 11월 27일 채택)

Kai Chao Li and InJo Hwang*

Department of Environmental Engineering, Daegu University

(Received 26 August 2015, revised 26 October 2015, accepted 27 November 2015)

Abstract

The ambient PM_{2.5} samples were collected by PM_{2.5} sampler from September 2010 to December 2012 at Daegu University, Gyeongsan. A total of 260 samples were collected and 27 species were analyzed by inductively coupled plasma, ion chromatography, and thermal optical reflectance methods. Factor analysis identified four sources such as biomass burning source/secondary aerosol source, soil source, industry source, and incinerator source/mobile source. Also, backward trajectories were calculated using HYSPLIT 4 (Hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) model and PSCF (Potential source contribution function) model was applied to identify the possible source locations of carbonaceous species and water soluble ions species. PSCF results showed that the possible source locations of most chemical constituents measured in Gyeongsan were the industrial areas in the eastern coast of China, northeast regions of China, the Gobi Desert, and east sea of Korea.

Key words : PM_{2.5}, Factor analysis, HYSPLIT, PSCF

1. 서 론

대기질 악화에 따른 인간의 대기질 개선을 위한 노력은 계속되고 있지만 각종 활동에 의하여 발생하는 여러 가지 대기오염물질은 사람이 일상생활 중 접하며 살고 있는 대기의 질을 지속적으로 악화시키고 있다. 또한, 다양한 오염원에서 배출된 입자상물질은 다양한

대기오염물질과 수많은 화학물질이 함유되어 있다. 다양한 오염원으로부터 배출된 대기오염물질은 가시광선 산란에 의한 시정악화(visibility impairment), 산성 침착(acidic deposition), 스모그(smog) 현상 등과 같은 지역규모(regional scale)의 대기오염문제와 오존층 파괴, 온실효과 등과 같은 지구규모(global scale)의 대기오염문제를 유발시킬 수 있다. 또한, 최근에는 중국의 급속한 산업발전과 석탄 사용량 증가에 따라 대량의 황산화물과 질소산화물 등 오염물질이 스모그 현상을 많이 발생시킨다. 중국 산둥반도의 주요도시 웨이하이와 서울과의 거리는 약 400~500 km이고, 북경 주위의

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-850-6695, E-mail : ihwang@daegu.ac.kr

도시와는 약 900 km 정도 떨어져 있다. 따라서 중국에서 배출된 오염물질이 편서풍의 영향을 받고 동북아 지역으로 이동하면서 한국에 유입되어 악영향을 미치고 있다(Xiao *et al.*, 2014; Kim, 2010). 대기 중 PM_{2.5}의 약 60% 정도를 차지하는 것으로 알려진 주요 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 등)은 중국에서 한국으로 유입되는 오염물질의 농도, 지역적 특성, 계절 특성 등에 따라 다양한 농도 경향을 나타내고 있다(Park *et al.*, 2013a, b). 다양한 오염원에서 배출된 오염물질은 인간의 건강과 복지에도 심각한 악영향을 미치고 있는 실정이며, 많은 악영향 문제를 해결하기 위한 기술적, 경제적, 시간적, 행정적으로 투자를 많이 하여야 최종적으로 맑고 깨끗한 대기환경을 유지할 수 있다(Hwang and Kim, 2003). 즉, 이러한 대기질 악화로 인한 인간의 건강과 재산상의 피해를 최소화하기 위해서는 먼저 대기오염 물질에 대한 물리, 화학적 특성 분석이 선행되어야 하며, 이러한 자료를 바탕으로 합리적이고 효율적인 대기 오염 제어기술 및 관리방안이 개발하여야 한다.

본 연구에서는 2010년 9월부터 2012년 12월까지 PM_{2.5} 채취기를 이용하여 총 260개의 시료를 확보하였다. 채취된 PM_{2.5}의 무기원소 성분, 이온성분, 탄소성분을 분석하였으며, 다양한 통계분석과 역궤적 분석 등을 통하여 장거리 이동 오염물질의 오염원을 추정하였다. 또한, PSCF (Potential source contribution function) 모델을 이용하여 장거리 이동하는 PM_{2.5} 및 각 화학성분의 잠재적 오염원 위치를 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법 및 내용

2.1 연구 대상 지역 및 연구 기간

PM_{2.5} 시료는 2010년 9월부터 2012년 12월까지 지상으로 부터 약 21 m 높이의 대구대학교 공과대학 6호관 옥상에 1.5 m 높이의 PM_{2.5} 채취기를 이용하여 총 260개의 시료를 채취하였다(그림 1). 본 지역은 경상북도 경산시와 영천시의 경계 지역에 위치하고 있으며(위도: 35.90, 경도: 128.86) 해발고도 약 75 m 정도이며, 채취위치의 남서쪽으로는 진량산업단지, 문천지 저수지, 남쪽으로는 경부고속도로, 북서쪽으로는 하양읍과 접해 있으며, 동쪽은 영천시와 인접해 있다.

본 연구 지역의 대기질에 영향을 미치는 오염원은

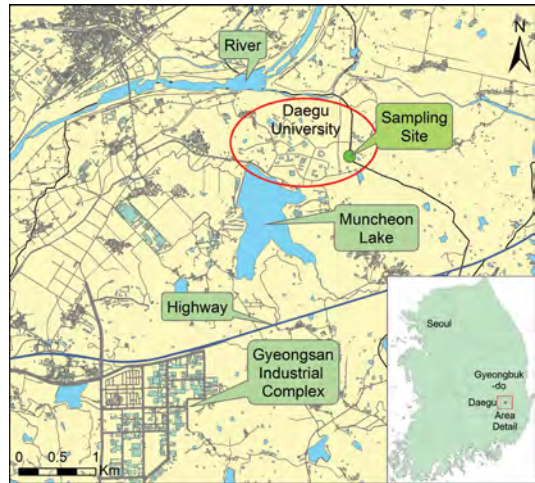


Fig. 1. The location of the sampling site.

일반 도로, 고속도로 등을 통행하는 차량에 의한 선 오염원과 산업단지내의 공장, 제조업체 등에서 사용하는 연료, 그리고 주거지역의 취사 및 난방연료 사용에 따른 형성된 점·면 오염원이 있다. 또한, 폐기물 소각, 공사현장 등에서 나타내는 불특정 오염원 (fugitive source) 등으로 생각할 수 있다.

2.2 시료채취 및 분석 방법

시료 채취를 위하여 PM_{2.5} 채취기를 이용하여 16.7 L/min의 유량으로 24시간 동안 채취하였다. 시료가 유입되는 입구에는 Teflon으로 코팅된 알루미늄 재질의 PM_{2.5} 싸이클론(URG Co., URG-2000-30 EH)이 설치되어 있어 2.5 μm보다 큰 입자상 물질들은 제거하였다. PM_{2.5} 채취기의 구조는 총 3개의 모듈로 구성되어 있으며, Teflon 여지(Pall Co., pore size 2.0 μm, 47 mm)는 질량농도 및 무기원소 분석용으로 수행하였다. Nylon 여지(Pall Co., pore size 1.0 μm, 47 mm)는 이온 성분 분석용으로 수행하였으며, 시료 중 HNO₃을 제거하기 위하여 filter pack 앞에 디누더(URG Co., URG-2000-30×150-3CSS)를 설치하였다. Quartz 여지(Whatman Co., QMA filter 47 mm)는 탄소분석용으로 수행하였다.

여지는 시료 채취전후로 3일간 항온, 항습상태의 전자 데시케이터(Sanplatec Co., Model Oyin 09678BN) 내에 보관하여 항량을 시킨 후 0.01 mg의 감도를 갖는 전자저울(Sartorius, Germany, Model CPA-225D)로 칭

량하였다. 칭량전후의 무게차를 $PM_{2.5}$ 의 무게로 간주하였으며 이를 유량으로 나누어 $PM_{2.5}$ 질량농도를 계산하였다.

무기원소 분석을 위한 전처리방법은 미국 EPA에서 1992년 고시한 CWA (Clean Water Act)의 microwave 전처리법을 사용하였다(USA EPA, 2011). 전처리가 끝난 시료는 ICP-AES (PerkinElmer CO., Model-Optima 7300DV) 분석법을 이용하여 Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn 등 총 17개 항목을 분석하였다. 각 항목들에 대한 검출한계는 시료채취에 사용한 여지의 바탕시험(blank test)에 대한 3σ 방법으로 산출하였으며 Al 0.0022, Ba 0.0014, Ca 0.0106, Cd 0.0002, Cr 0.0042, Cu 0.0014, Fe 0.0724, K 0.0371, Mg 0.0049, Mn 0.0014, Na 0.0715, Ni 0.0341, Pb 0.1165, Si 0.0070, Ti 0.0003, V 0.0015, Zn 0.0104 mg/L로 조사되었다. 시료에 대한 자세한 전처리 방법과 분석방법은 다음의 참고문헌에 제시하였다(Jeong and Hwang, 2015).

이온성분 분석을 위한 여지를 추출용기(Nalgene Co., USA)에 넣고, 증류수 30 mL를 넣은 후 초음파 추출기로 추출하였다. 분석 시 컬럼의 막힘 현상을 방지하기 위하여 실린지 필터(syringe filter, Pall Co., pore size 0.45 μ m)를 이용하여 여과를 하고 50 mL centrifuge tube (Corning Co., USA)에 담아 분석 전까지 냉장보관하였다. 전처리가 끝난 시료는 IC (Ion chromatography, Model Dionex Co., Model DX-120)를 사용하여 이온성분을 분석하였다. IC 분석을 통하여 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 등 총 8개 항목을 분석하였다. 각 이온성분들의 검출한계는 Cl^- 0.197, NO_3^- 0.179, SO_4^{2-} 0.020, Na^+ 0.069, NH_4^+ 0.017, K^+ 0.013, Mg^{2+} 0.012, Ca^{2+} 0.016 mg/L로 조사되었다.

탄소분석을 위하여 IMPROVE (Interagency monitoring of protected visual environments) 탄소분석법인 TOR (Thermal optical reflectance) 분석법(DRI Model 2001 Thermal/optical Carbon Analyzer, Atmoslytic Inc., Calabasas, CA)을 이용하여 온도의 단계별 승온 조건에 따라 8개 탄소성분 분석(검출한계 OC1 0.010, OC2 0.068, OC3 0.251, OC4 0.104, OP 0.031, EC1 0.035, EC2 0.026, EC3 0.004 mg/L)에 대한 분석을 수행하였다. 탄소성분의 자세한 분석방법은 다음의 문헌을 참고할 수 있다(Jeong, 2015).

2.3 인자분석

$PM_{2.5}$ 시료 중 무기원소, 이온성분과 탄소성분을 이용하여 $PM_{2.5}$ 의 오염원을 추정하기 위하여 다변량 통계분석 기법 중 인자분석(factor analysis, SPSS Version 20.0)을 이용하였다.

인자분석은 상관관계가 깊은 여러 변인들 간의 밀바탕에 깔려있는 공통인자(common factor)를 발견하는데 사용하는 통계방법이다. 인자분석 방법은 변인들 간의 인과관계를 분석하는 것이 아니라 공통인자를 찾아내는 방법이기 때문에 변인들 간의 독립변인과 종속변인의 구분이 없다. 인자분석 방법에서 사용하는 변인들의 수는 두 개 이상 여러 개가 있어야 하고, 측정은 등간척도(또는 비율척도)이어야 한다(Kim and Kim, 2008).

인자분석의 기본적인 논리는 상관계수에서부터 출발한다. 각 상관계수의 제곱값을 구하여 1차로 공통인자를 구하고 이 공통인자를 기초로 다시 2차 공통인자를 구한다. 이러한 과정을 반복함으로써 최적의 상태에 이르게 되면 반복의 과정을 멈추고 공통인자가 구해진다. 인자의 개수를 고정시킨 상태에서 초기 인자패턴행렬을 인자에 대한 해석이 쉬운 단순한 구조로 변경시키기 위해서 인자의 회전(rotation)단계를 거쳐야 한다(Hwang and Kim, 1998). 회전 방식 중 Kaiser에 의해 제안된 varimax방식이 가장 많이 이용되며, 인자분석의 목적이 각 변수들의 분산구조보다 각 인자의 특성을 알고자 할 때 유용하다(Ju and Hwang, 2012).

2.4 HYSPLIT 모델

본 연구에서는 경산 지역에 유입된 $PM_{2.5}$ 의 궤적을 파악하기 위한 역궤적 분석을 실행하였다. 역궤적 분석을 위해 미국해양대기청(NOAA: National oceanic and atmospheric administration)에서 개발된 HYSPLIT 4 (Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory) 모델을 이용하여 궤적을 계산하였다. 또한, HYSPLIT 모델을 수행하기 위해서는 수평, 수직 바람장, 온도, 고도, 압력, 해면기압 등의 기상자료가 요구되어지며, 여기서 필요한 기상자료는 NOAA/ARL에서 제공하는 GDAS (Global data assimilation system) 자료를 이용하였다. End point height는 500 m, 1000 m, 1500 m 등 다양한 고도에 대하여 역궤적 분석을 수행하였으며, 이중 가장 합리적인 결과를 나타낸 고도인 1000 m를 고

도로 설정하여 측정지점 상층 1000m에 도달하는 공기의 추적을 수행하였으며, 역궤적 분석을 위한 추적시간은 3일(72시간) 6(0, 6, 12, 18)시간 간격으로 설정하였고, 72시간은 거의 모든 궤적이 동북아시아에서의 주요 오염원들로부터 측정지점까지 도달하는 형태를 반영하는데 충분한 것으로 나타나 72시간을 역궤적 추적시간으로 설정하였다(Lee *et al.*, 2008; Lee and Hopke, 2006).

2.5 PSCF 모델

PSCF 모델은 수용점에서 측정된 자료와 역궤적 자료를 이용하여 수용점에 영향을 주는 오염원에 대한 위치 정보를 파악하는 하이브리드 모델이다(Han, 2006). PSCF 모델의 원리는 현재 수용점으로 이동하는 공기의 이동 궤적상에 오염원이 존재하면, 오염원에서 배출된 오염물질이 공기의 이동 궤적을 따라 수용점에 영향을 주게 되고, 이때 측정농도는 오염원에서 배출된 오염물질이 포함되어 있으므로 고농도 값을 보일 것이라는 가정에서 시작된다. 수용점에서 측정된 결과를 분석하면 사용자의 기준에 의해 고농도와 저농도로 구분할 수 있다. 또한 해당 측정기간 동안의 역궤적 자료도 고농도 기간의 역궤적 자료와 저농도 기간의 역궤적 자료로 구분할 수 있다. PSCF 값은 다음의 식에 의해 계산된다(식 1).

$$PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \tag{1}$$

여기서 n_{ij}는 i번째 행과 j번째 열의 cell(격자)을 지나 는 총 end point의 수를 의미하며, m_{ij}는 i번째 행과 j번째 열의 cell(격자)을 지나 는 고농도(특정 기준치) end point의 수를 의미한다. PSCF 모델의 적용에 대한 자세한 내용은 다음의 문헌을 참고할 수 있다(Hwang and Hopke, 2007).

본 연구에서는 HYSPLIT 모델이 수용점에 도달한 72시간 동안, 1000 m 높이의 공기 역궤적을 구하기 위해서 사용되었으며, 분석을 위해 대상 지역 내의 격자 크기는 1×1°로 설정하여, 총 4366개의 격자에 대해서 PSCF 모델을 적용하였다. 또한, 오류를 줄이기 위해서 가중치 W(n_{ij})를 사용하였고(Heo *et al.*, 2013; Hwang and Hopke, 2007; Polissar *et al.*, 2001), 계산방법은 식 2와 같다.

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00 & 5 < n_{ij} \\ 0.75 & 3 < n_{ij} \leq 5 \\ 0.50 & 1 < n_{ij} \leq 3 \\ 0.15 & 0 < n_{ij} \leq 1 \end{cases} \tag{2}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 PM_{2.5}와 각 성분들의 농도분포

연구기간 동안에 채취된 PM_{2.5} 중 24시간 대기환경 기준을 초과한 횟수는 총 23회(2010년 8회, 2011년 8회, 2012년 7회)로서 전체시료의 약 9% 정도를 차지하는 것으로 조사되었다. 연도별로는 2010년 29.9 μg/m³, 2011년 25.2 μg/m³, 2012년 23.8 μg/m³으로 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 계절별 농도 경향은 겨울(34.09 μg/m³) > 봄(24.58 μg/m³) > 가을(24.57 μg/m³) > 여름(16.62 μg/m³)의 순으로 조사되었다. 도심지역의 농도 경향과는 약간의 차이가 있으며, 본 연구 지역의 경우 겨울철에는 난방용 화석연료의 사용 급증 등으로 인해 높은 농도를 나타내는 것으로 사료된다.

무기원소의 경우 총 17개 항목을 분석하였으며, 이 중 Al(0.21 μg/m³), Ca(0.23 μg/m³), Fe(0.38 μg/m³), K(0.34 μg/m³), Na(0.27 μg/m³), Pb(0.17 μg/m³), Si(0.21 μg/m³), 그리고 Zn(0.11 μg/m³) 등이 다른 항목에 비해 높은 농도를 나타내었다. 또한 PM_{2.5}의 평균농도 중 무기원소들이 차지하는 농도는 약 8.4%로 조사되었다(표 1). 이온성분의 경우에는 PM_{2.5}의 평균농도 중 약 59.6%를 차지하는 것으로 조사되었다. 특히, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺의 평균농도는 각각 5.62 μg/m³, 4.74 μg/m³, 2.86 μg/m³으로 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다(표 1). 탄소성분의 평균농도는 5.56 μg/m³(OC 4.29 μg/m³, EC 1.27 μg/m³)으로 조사되었으며, 이는 PM_{2.5}의 평균농도 중 약 22.0%를 차지하는 것이다. OC의 농도는 겨울철(5.23 μg/m³) > 가을철(5.07 μg/m³) > 봄철(3.44 μg/m³) > 여름철(2.90 μg/m³)의 순으로 조사되었으며, EC의 경우 역시 겨울철(1.67 μg/m³) > 가을철(1.65 μg/m³) > 봄철(0.89 μg/m³) > 여름철(0.62 μg/m³)의 순으로 조사되었다(표 1).

3.2 인자분석 결과

연구기간 동안 채취한 PM_{2.5} 시료 중 각 항목들 사이

Table 1. Seasonal average concentration (ng/m³) of PM_{2.5}, elements, ionic species, OC, and EC during the sampling periods.

	Spring	Summer	Fall	Winter	AVG.	No. of BDL(%)
*PM _{2.5}	24.580	16.620	24.570	34.090	25.230	—
Al	272.6	49.6	157.7	374.3	213.8	17 (8.2)
Ba	7.1	0.3	26.2	19.0	14.7	71 (34.1)
Ca	463.6	136.8	151.7	205.6	231.4	27 (13.0)
Cd	1.0	0.8	3.4	8.0	3.5	71 (34.1)
Cr	22.7	12.2	33.1	49.2	30.3	90 (43.3)
Cu	2.7	8.2	7.9	5.7	6.3	161 (61.9)
Fe	424.7	207.3	399.7	472.7	382.5	27 (13.0)
K	300.8	419.7	284.0	382.0	340.6	65 (25.0)
Mg	117.9	47.5	65.0	69.8	74.3	21 (10.1)
Mn	23.1	15.9	28.0	31.1	25.1	12 (5.8)
Na	186.9	536.4	196.5	197.3	266.5	130 (50.0)
Ni	7.0	9.3	11.5	38.5	16.7	246 (94.6)
Pb	96.0	108.4	244.8	189.4	169.1	211 (81.2)
Si	351.7	52.7	197.5	222.1	207.3	15 (7.2)
Ti	18.5	3.4	8.0	30.4	14.9	53 (25.5)
V	3.6	16.3	24.4	31.4	19.8	146 (56.2)
Zn	117.3	97.7	105.0	119.5	109.8	22 (10.6)
Cl ⁻	474.9	929.0	925.2	1171.3	886.1	41 (19.7)
NO ₃ ⁻	4610.5	3701.3	5326.4	8569.4	5621.2	0 (0.0)
SO ₄ ²⁻	5114.3	5702.1	4159.8	4343.0	4744.1	0 (0.0)
Na ⁺	361.7	363.3	327.4	351.9	348.7	16 (7.7)
NH ₄ ⁺	2993.3	2430.3	2338.3	3768.1	2855.8	6 (2.9)
K ⁺	277.1	281.8	321.3	404.6	323.6	5 (2.4)
Mg ²⁺	73.1	40.9	61.1	97.3	68.4	16 (6.2)
Ca ²⁺	296.1	111.8	230.3	145.2	199.0	11 (4.2)
OC	3439.5	2896.3	5073.0	5233.8	4287.7	0 (0.0)
EC	887.3	620.9	1651.6	1671.0	1267.9	0 (0.0)

*Unit: µg/m³

의 상관성을 파악하고 원소 간의 변화성(common variability)을 갖는 변수들을 군집화하여 본 연구 지역의 주요 오염원 패턴을 분류하기 위하여 인자분석을 수행하였다. 인자분석 수행 시 연구 대상 지역의 오염원 특성을 가장 잘 설명해 주는 인자분석 결과를 도출하기 위하여 인자분석 시 제외할 수 있는 항목들은 제외하고 인자분석을 수행하였다. 최적의 인자 수를 결정하기 위하여 고유치(eigenvalue) 1.0 이상, 누적 기여율이 60% 이상에서 최적 인자수를 4개로 결정하였다. 인자분석의 적합성을 확인하기 위하여 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 값을 사용하였으며, 0.66로 나타나 적합한 분석으로 확인되었다(Hwang and Kim, 1998). 그 결과를 표 2에 나타내었다. 각 인자들은 오염원에서 배출된 오염물질의 생성 특성을 반영하는 것으로, 특정 오염원의 영향을 대변할 수 있다.

인자 1의 경우 K, K⁺, SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ 등이 높게

나타났고, 이는 생체 소각(K, K⁺) 및 2차 에어로졸(SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻)로 추정된다(Hwang, 2010; Reff *et al.*, 2009). 인자 2는 Mg, Ca, Si, Al의 항목으로 대표적인 토양원소로만 이루어져 있다. 따라서 토양성분(Mg, Ca, Si, Al)에 의한 자연적인 오염원에 의한 것으로 판단된다(Lestari and Mauliadi, 2009). 인자 3의 경우 Cr, Ni, Fe, Cu의 항목으로 이루어져 있는데, 이는 산업관련 오염원으로 판단된다(Waston *et al.*, 1999). 인자 4는 Cl⁻, EC, OC, Zn의 항목으로 이루어져 있다. 이 항목들은 소각 오염원(Cl⁻, EC, OC)으로 분류하였으며, Zn는 자동차 타이어 마모에 의해 배출된 오염원으로 추정된다(Han *et al.*, 2011; Vega *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 1988a, b, c).

3.3 역궤적 군집분석

방향과 궤적의 이동 속도에 따른 K- 평균군집화(k-

Table 2. Results of factor analysis (varimax rotation).

Element	Factor			
	1	2	3	4
K ⁺	.843	.024	.107	.251
NH ₄ ⁺	.816	.108	.101	.247
NO ₃ ⁻	.720	.047	.083	.334
SO ₄ ²⁻	.708	.029	.002	-.005
K	.686	.126	.069	-.232
Mg	.097	.908	.033	.047
Ca	.001	.791	.172	-.110
Si	.361	.730	.086	.170
Al	.217	.556	-.126	-.060
Cr	-.074	.185	.896	.080
Ni	-.001	.028	.814	.092
Fe	.120	.408	.786	.289
Cu	.147	-.059	.487	-.230
Cl ⁻	.004	-.057	-.027	.710
EC	.619	.029	.091	.662
OC	.646	.062	.076	.660
Zn	.084	.443	.171	.558
Eigenvalues	5.50	2.70	1.70	1.36
% of Variance	24.50	14.53	14.52	12.80
Cumulative%	24.50	39.03	53.45	66.25
Source	Biomass burning/ secondary aerosol	Soil	Industry	Incinerator/ Mobile
KMO	0.766			

means clustering algorithm)를 이용한 총 6개 군집으로 분류하였다(Liu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2010). 본 연구의 주된 목적이 장거리 이동 오염물질의 오염원을 추정하는 것이기 때문에 각 군집에 대한 고찰에서 주로 장거리 이동에 관련하여 고찰을 수행하였다. 국내 오염원에 대한 고찰은 다음의 문헌을 참고할 수 있다 (Jeong and Hwang, 2015).

군집 1은 일본 오키나와 부근 바다에서 유입되어 제주도 지역을 통과하는 경로이며, 군집 2는 중국 지린성으로부터 유입되어 북한 함경북도를 통과하는 경로이다. 군집 3은 중국 내몽골 사막지역 근처에서 라오닝성 공업지역을 거쳐 유입되는 경로이고, 군집 4는 중국 내몽골 고비사막에서 유입되고 허베이성과 산둥성 공업지역을 거쳐 유입되는 경로이다. 군집 5는 러시아 부랴트 공화국에서 유입되고 몽골, 중국 내몽골 사막지역과 러오닝 공업지역을 거쳐 유입되는 경로이며, 군집 6은 태평양에서 유입되고 일본 세토우치 공업지역을 통과하여 유입되는 사례이다(그림 2).

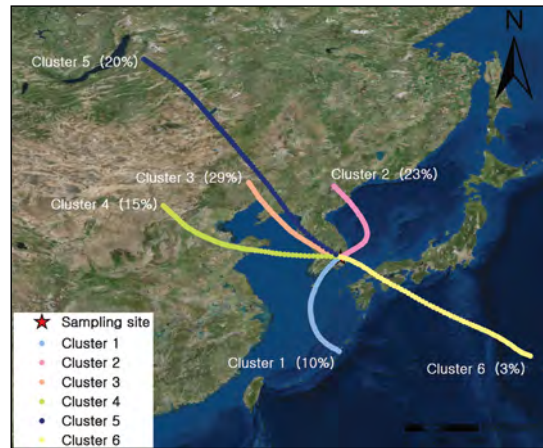


Fig. 2. Cluster analysis of back-trajectories calculated by the HYSPLIT model.

Table 3. The trends of PM_{2.5} and species concentrations for each cluster. (Unit: µg/m³)

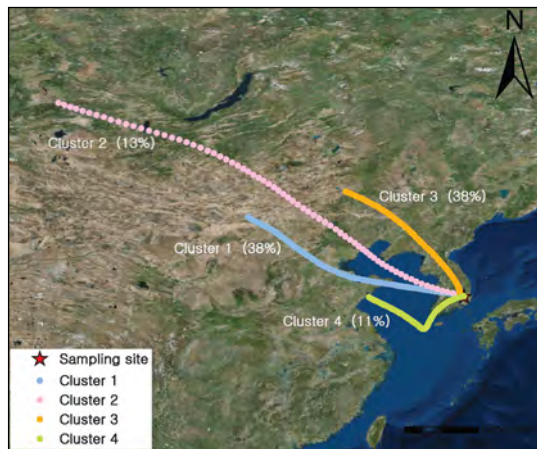
	Elements	Ionic species	TC (OC + EC)	PM _{2.5}	Percent (%)
Cluster 1	1.85	12.38	4.77	22.55	10.0
Cluster 2	1.71	12.56	5.47	23.94	23.0
Cluster 3	2.30	16.91	1.61	32.06	29.0
Cluster 4	2.82	18.03	5.98	34.15	15.0
Cluster 5	2.60	12.39	5.54	27.09	20.0
Cluster 6	1.08	6.19	2.14	11.32	3.0

군집별 특징을 살펴보면(표 3) 군집 3은 PM_{2.5}의 농도가 32.06 µg/m³으로 조사되었고 궤적별 발생비율은 29%로 가장 많이 차지하는 것으로 조사되었다. 군집 4의 경우 PM_{2.5} 농도가 34.15 µg/m³로 가장 높게 나타내었다. 그리고 군집 4와 군집 5의 경우 모두 고비사막을 통해서 유입되는 경로로 조사되었으며, 각 군집의 성분을 살펴보면 이들 군집의 특성은 무기원소 중 지각 원소로 알려진 Al, Ca, Fe, Si 등의 농도가 다른 군집에 비해 높은 것으로 조사되었다(표 4). 또한, 군집 3과 군집 4는 공업단지가 집중된 중국 동해안을 통해 유입되는 경로로 나타났고, 군집의 이온 성분을 살펴보면 2차 에어로졸 성분 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺가 높은 농도로 조사되었다.

PM_{2.5} 질량농도가 50 µg/m³를 초과한 결과는 총 23개를 조사되었으며, 선정된 고농도 사례에 대한 역궤적 분석을 실행하였다. 그림 3에 50 µg/m³를 초과한 사

Table 4. The elements and ionic species concentration of each cluster. (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Al	Ca	Fe	Si	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+
Cluster 1	0.13	0.23	0.37	0.13	3.39	4.74	2.47
Cluster 2	0.12	0.16	0.41	0.13	4.12	4.28	2.54
Cluster 3	0.23	0.23	0.42	0.23	5.82	5.50	3.77
Cluster 4	0.36	0.33	0.46	0.38	6.14	5.97	3.81
Cluster 5	0.39	0.25	0.46	0.35	4.45	3.61	2.49
Cluster 6	0.03	0.16	0.14	0.03	1.48	3.05	1.04
Mean	0.24	0.26	0.40	0.22	5.62	4.74	2.98

**Fig. 3. Backward trajectories calculated high concentration in study area.**

례에 대한 총 4 군집으로 분류되었으며, 군집 1, 3은 중국 내몽골 고비사막을 기원으로 유입되는 경로이고, 군집 2는 러시아에서 유입되고 몽골, 중국 내몽골 지역의 고비사막을 거쳐 유입되는 경로이고, 군집 4는 중국 산둥성 청도의 황도 공업지역에서 한국으로 유입되는 경로로 조사되었다.

3. 4 PSCF 모델 결과

본 연구에서는 좀 더 합리적인 PSCF 모델링 결과를 얻기 위하여 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도에 따른 상위 33.3% ($46.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 중위 33.3% ($23.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 하위 33.3% ($13.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 세 군집으로 나누었고, 모델링 입력 자료는 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도에 따른 중위권 부분의 장거리 이동 항목 중 수용성 이온(Cl^- , K^+ , Na^+), 탄소성분(OC, EC), 2차입자들(NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-})과 상위권 중 $\text{PM}_{2.5}$ 질량

농도에 대하여 모델을 실행하였다(Perrone *et al.*, 2013; Kukkonen *et al.*, 2008).

PSCF 결과(그림 4) 중 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 주로 몽골, 중국 내몽골, 안휘성, 강소성, 하난성 지역이 큰 영향을 주는 배출원으로 나타났으며, 몽골, 중국 내몽골은 사막지역이 존재하고, 안휘성, 강소성, 하난성 지역은 공업단지가 많이 있는 것으로 조사되었다. Cl^- 와 Na^+ 은 주로 동해의 영향이 큰 것으로 조사되었다. EC, OC, K^+ 의 경우는 백두산 산림 화재, 가을철 동북 지역 불법소각과 내몽골 초원 화재, 산림 화재로 조사되었다(Chinanews, 2012; Nocutnews, 2012). NH_4^+ 는 중국의 저장성 그리고 상해 지역 등에서 배출되어 장거리 이동하여 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 중국 저장성의 경우는 중국에서 대표적인 농업지역으로서 모델링 결과와 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 그러나 동해의 경우는 trailing effect일 가능성도 있으므로 이에 대한 연구가 추후 진행되어야 할 것으로 사료된다. NO_3^- 의 잠재적 오염원은 중국 내몽골 지역과 동북 지역으로 조사되었고, 내몽골 지역은 산업과 발전시설이 위치하고 있었으며, 동북 지역의 경우는 NO_3^- 오염원에 대한 확실한 정보가 없어 추후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. SO_4^{2-} 은 중국 동해안 지역이 가장 영향이 큰 배출원으로 나타났으며, 이는 백여 개의 화력발전소와 겨울철에 수많은 석탄용 난방시설이 있기 때문에 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경산 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 특성 파악을 위하여 대구대학교 공과대학 6호관 옥상에서 $\text{PM}_{2.5}$ 채취기를 이용하여 2010년 9월부터 2012년 12월까지 총 260개의 시료를 확보하였다. 측정된 초미세먼지의 질량농도, 무기원소, 이온성분, 탄소성분을 이용하여 인자분석, 역궤적 군집분석과 PSCF 모델을 이용한 잠재적 오염원 위치를 추정하고자 하였다. 즉, 인자분석의 수행에서는 연구 지역의 오염원을 정성적으로 추정하였으며, 역궤적 분석 및 PSCF 모델링 수행의 주된 목적은 장거리 이동물질에 대한 잠재적 오염원의 파악이다.

인자분석을 수행한 결과 본 연구 지역의 경우 생체

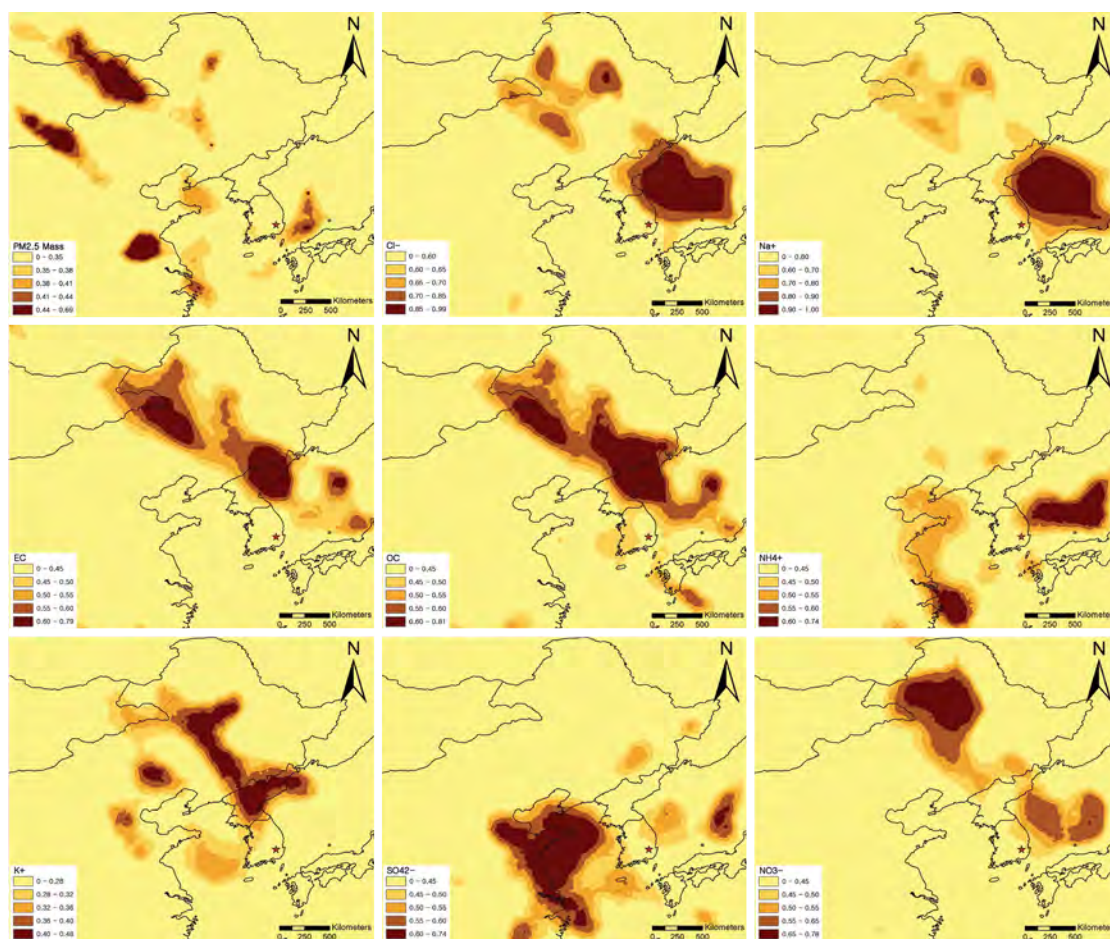


Fig. 4. Potential source locations each elements using the PSCF model.

소각 오염원 및 2차 에어로졸, 토양 오염원, 산업관련 오염원, 불법소각 및 자동차 오염원으로 조사되었다. HYSPLIT 모델을 통한 역궤적 군집분석을 수행하였으며, 총 6개의 군집으로 분류하였다. 궤적의 유입 경로는 대부분 중국으로부터 유입되거나 중국을 거쳐서 한국으로 유입되는 것으로 조사되었다. PM_{2.5} 질량농도가 50 µg/m³ 이상일 때 약 89%의 유입경로는 고비사막을 거쳐서 유입되거나 고비사막으로부터 유입되는 것으로 조사되었다. 측정 분석된 자료를 이용한 PSCF 모델로 잠재적 오염원의 위치를 파악하였다. 대부분의 경우 중국 화북 공업지역, 화동 공업지역, 동북 지역과 몽골 사막지역으로부터 장거리 이동되어 국내에 영향을 미치고 있는 것으로 파악되었다.

References

- Chinanews (2012) <http://www.chinanews.com/gn/2013/05-08/4797346.shtml>
- Han, S., J.S. Youn, and Y.W. Jung (2011) Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology, *Atmos. Environ.*, 45(20), 3343-3351.
- Han, Y.J. (2006) Source Identification of Gaseous Mercury Measured in New York State Using Hybrid Receptor Modeling, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(2), 179-189. (in Korean with English abstract)
- Heo, J.B., J.E. McGinnis, B. Foy, and J.J. Schauer (2013) Identification of potential source areas for elevated PM_{2.5}, nitrate and sulfate concentrations, *Atmos. Environ.*,

- 71, 187-197.
- Hwang, I.J. (2010) Source Identification and Estimation of Source Apportionment of Ambient $PM_{2.5}$ at Western National Park Site in USA, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(1), 21-33. (in Korean with English abstract)
- Hwang, I.J. and D.S. Kim (1998) Studies on the chemical compositions and distributions of ambient submicron aerosols, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 14(1), 11-23. (in Korean with English abstract)
- Hwang, I.J. and D.S. Kim (2003) Source Identification of Ambient PM_{10} Using the PMF Model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19(6), 701-717. (in Korean with English abstract)
- Hwang, I.J. and P.K. Hopke (2007) Estimation of source apportionment and potential source locations of $PM_{2.5}$ at a west coastal IMPROVE site, *Atmos. Environ.*, 41(3), 506-518.
- Jeong, Y.J. (2015) A study on source apportionment of $PM_{2.5}$ in Gyeongsan using positive matrix factorization, thesis of master of engineering, Daegu University.
- Jeong, Y.J. and I.J. Hwang (2015) Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Gyeongsan using the PMF model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, (submitted).
- Ju, J.H. and I.J. Hwang (2012) A Statistical Analysis and Spatial Distribution Analysis for Deposition Characteristics of Fall-out Particles, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(3), 294-305.
- Kim, I.S. and C.H. Kim (2008) A Factor Analysis on the SME Growth in Ansan Industrial Complex : Bussiness Size, R&D Ability and Digitalization, *Korean Economic and Bussiness association*, 26(1), 117-140.
- Kim, Y.J. (2010) A study on Characteristics of Long-range Transport Aerosol by Transport Patterns in North-east Asia, Ph. D. Thesis, Konkuk University.
- Kukkonen, J., R. Sokhi, L. Luhana, J. Harkonen, T. Salmi, M. Sofiev, and A. Karppinen (2008) Evaluation and application of a statistical model for assessment of long-range transported proportion of $PM_{2.5}$ in the United Kingdom and in Finland, *Atmos. Environ.*, 42(17), 3980-3991.
- Lee, H.L., S.S. Park, K.W. Kim, and Y.J. Kim (2008) Source identification of $PM_{2.5}$ particles measured in Gwangju, Korea, *Atmospheric Research*, 88, 199-211.
- Lee, J.H. and P.K. Hopke (2006) Apportioning sources of $PM_{2.5}$ in St. Louis, MO using speciation trends network data, *Atmos. Environ.*, 40, 360-377.
- Lestari, P. and Y.D. Mauliadi (2009) Source apportionment of particulate matter at urban mixed site in Indonesia using PMF, *Atmos. Environ.*, 43(10), 1760-1770.
- Liu, N., Y. Yu, J.J. He, and S.P. Zhao (2013) Integrated modeling of urban scale pollutant transport: application in a semi - arid urban valley, Northwestern China, *Atmospheric Pollut. Res.*, 4(3), 306-314.
- Nocutnews (2012) <http://www.nocutnews.co.kr/news/941395>
- Park, S.S., S.J. Kim, B.J. Gong, K.H. Lee, S.Y. Cho, J.C. Kim, and S.J. Lee (2013a) Investigation on a Haze Episode of Fine Particulate Matter using Semi-continuous Chemical Composition Data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(5), 642-655. (in Korean with English abstract)
- Park, S.S., S.A. Jung, B.J. Gong, S.Y. Cho, and S.J. Lee (2013b) Characteristics of $PM_{2.5}$ Haze Episodes Revealed by Highly Time-resolved Measurements at an Air Pollution Monitoring Supersite in Korea, *Aerosol Air Quality Research*, 13(3), 957-976.
- Perrone, M.R., S. Becagli, Z.A. Garcia Orza, R. Vecchi, A. Dinoi, R. Udisti, and M. Cabello (2013) The impact of long-range-transport on PM_{10} and $PM_{2.5}$ at a Central Mediterranean site, *Atmos. Environ.*, 71, 176-186.
- Polissar, A.V., P.K. Hopke, and J.M. Harris (2001) Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska, *Environ. Sci. Technol.*, 35(21), 4214-4226.
- Reff, A., P.V. Bhave, H. Simon, T.G. Pace, G.A. Pouliot, D.J. Mobley, and M. Houyoux (2009) Emission inventory of $PM_{2.5}$ Trace Elements across the United States, U.S. Environment Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711.
- U.S. EPA (2011) Federal Register Part III, 40 CFR Part 136, Guidelines establishing test procedures for the analysis of pollutants.
- Vega, E., E. Reyes, H. Ruiz, J. Garcia, G. Sanchez, G. Martinez-Villa, U. Gonzalez, J.C. Chow, and J.G. Watson (2004). Analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the atmosphere of Mexico City during 2000-2002, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 54, 786-798.
- Wang, F., D.S. Chen, S.Y. Cheng, J.B. Li, M.J. Li, and Z.H. Ren (2010) Identification of regional atmospheric PM_{10} transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis, *Environmental Modelling and Software*, 25(8), 927-934.
- Watson, J.H., J.C. Chow, S.D. Kohl, H. Kuhns, N.F. Robinson, C.A. Frazier, and V. Etyemezian (1999) Annual report for the Robbins particulate study, Prepared for Versar Inc., Lombard, IL, by Desert Research

- Institute, Reno, NV.
- Watson, J.G., J.C. Chow, L.W. Richards, S.R. Andersen, J.E. Houck, and D.L. Dietrich (1988a) The 1987-88 Metro Denver Brown Cloud Air Pollution Study, Volume II : Measurements. Report No. 8810.1F2. Prepared for 1987-88 Metro Denver Brown Cloud Study, Inc. Greater Denver Chamber of Commerce, Denver, CO, by Desert Research Institute, Reno, NV.
- Watson, J.G., J.C. Chow, L.W. Richards, S.R. Andersen, J.E. Houck, and D.L. Dietrich (1988b) The 1987-88 Metro Denver Brown Cloud Air Pollution Study, Volume I : Program plan. Report No. 8810.1F1. Prepared for 1987-88 Metro Denver Brown Cloud Study, Inc.; Greater Denver Chamber of Commerce, Denver, CO, by Desert Research Institute, Reno, NV.
- Watson, J.G., J.C. Chow, L.W. Richards, S.R. Andersen, J.E. Houck, and D.L. Dietrich (1988c) The 1987-88 Metro Denver Brown Cloud Air Pollution Study, Volume III : Data interpretation. Report No. DRI 8810.1. Prepared for 1987-88 Metro Denver Brown Cloud Study, Inc., Greater Denver Chamber of Commerce, Denver, CO, by Desert Research Institute, Reno, NV.
- Xiao, S., Q.Y. Wang, J.J. Cao, R.J. Huang, W.D. Chen, Y.M. Han, H.M. Xu, S.X. Liu, Y.Q. Zhou, P. Wang, J.Q. Zhang, and C.L. Zhan (2014) Long-term trends in visibility and impacts of aerosol composition on visibility impairment in Baoji, China, Atmospheric Research, 149, 88-95.