

충주시 미세먼지 (PM_{2.5}) 농도특성에 대한 사례 연구 Analysis of PM_{2.5} Case Study Burden at Chungju City

이성희 · 강병욱 · 연익준 · 최준락 · 박현필 · 박상찬 · 이학성¹⁾ · 조병렬*

한국교통대학교 환경공학과, ¹⁾서원대학교 환경건설정보학과

(2012년 7월 11일 접수, 2012년 9월 19일 수정, 2012년 9월 27일 채택)

Sung-Hee Lee, Byung-Wook Kang, Ik-Jun Yeon, Jun-Rack Choi,
Hyun-Pill Park, Sang-Chan Park, Hak Sung Lee¹⁾ and Byung-Yeol Cho*

Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation

¹⁾Department of Environmental, Civil and Information System, Seowon University

(Received 11 July 2012, revised 19 September 2012, accepted 27 September 2012)

Abstract

Fine particles (PM_{2.5}) were collected and analyzed from April 2010 through January 2011 in Chungju to investigate the characteristics of PM_{2.5} and its ionic species. The annual mean concentrations of PM_{2.5}, SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ in the particulate phase were 40.84, 7.61, 7.14 and 3.74 μg/m³, respectively. PM_{2.5} concentrations were higher in fall and spring than in winter and summer. The elevated concentrations episodes are the main factor that enhanced the PM_{2.5} concentrations in the fall. Among the major ionic species SO₄²⁻ showed the highest concentration, followed by NO₃⁻ and NH₄⁺, NO₃⁻ exhibited higher concentrations during the winter, but SO₄²⁻ and NH₄⁺ were not showed seasonal variation. The high correlations were found among PM_{2.5}, SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ during all seasons except for spring. The evaluation of backward trajectories and meteorological records show that the highest PM_{2.5} concentration levels occurred during W-NW weather conditions, which influenced by the emission sources of China area. The low pollution levels generally occurred during E-S weather conditions, which influenced by the East Sea and south of the Yellow Sea. The elevated PM_{2.5} mass concentrations arouse the concentration of NO₃⁻, but no effects on SO₄²⁻ and NH₄⁺.

Key words : PM_{2.5}, Inland area, High concentration, Regional source, Backward trajectory, Seasonal variation, Ionic species

1. 서 론

최근 국가적으로 지속적인 배출규제정책의 시행으

로 대기 중의 총부유먼지의 중량농도는 현저히 감소하고 있으나 인체에 대한 유해성과 시정악화에 크게 영향을 주는 미세먼지의 오염도는 감소되지 않고 있는 실정이다.

입자상 물질 중 2.5 μm 이상의 조대입자는 대기 중 체류시간이 짧고 호흡기 비강에서 걸러지기 때문

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)43-841-5356, E-mail : bycho@ut.ac.kr

에 인체에 대한 피해는 상대적으로 적은 편이다. 그러나 입자 크기가 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 미세입자는 체류시간이 길어 장거리 이동이 가능하며 넓은 지역에 심각한 환경문제를 야기할 뿐만 아니라 인체에 호흡기 및 심혈관계 질환에 의한 일별 및 연 사망률 증가를 초래하는 것으로 알려져 있다 (Klemm *et al.*, 2000; Lighty *et al.*, 2000; Libaca *et al.*, 1999; Schwartz, 1996; Dockery and Pope, 1994; Dockery *et al.*, 1993, 1992). 이와 같은 미세입자의 주요 배출원으로는 연소과정에서 직접 배출되거나 배출된 후 대기 중에서 응집, 휘발성 물질의 응축, 가스에서 입자로의 전환 등에 의해서 생성되는 이차 입자상 물질이 대부분이다. 미세입자의 주요 화학적 성분을 보면 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 등의 수용성 이온성분, 유기탄소(organic carbon, OC), 원소탄소(elemental carbon, EC) 등 탄소 성분 그리고 Pb, Cr 등을 비롯한 중금속 성분이 주로 발견된다. 특히, 산성 가스상 오염물질의 농도가 높은 도시의 경우, $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세입자 중 이차 입자상 물질의 기여도가 높게 나타난다. 따라서 미세입자의 연구를 위해서는 이차 입자상 물질에 대한 고려가 필수적이며, 이차 입자상 물질의 대부분은 SO_x , NO_x , NH_3 등의 가스상 물질에 의해 대기 중에서 생성된 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 등의 수용성 이온성분이 대부분을 차지하고 있다.

미국 EPA에서는 1997년부터 $\text{PM}_{2.5}$ 기준치(연평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 설정하여 규제하고 있으며, 현재 PM_{10} 에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 경우 폐질환 및 심혈관계 질환의 증가로 인한 국민의 건강 피해를 최소화하기 위하여 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 환경기준을 신설하고 2015년부터 적용할 예정이며, 환경기준은 연평균 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 규정하고 있다.

본 연구의 대상지역인 충주시는 우리나라의 중앙부와 동북부에 위치하며 동북으로 제천시, 서쪽으로 음성군, 남쪽으로 괴산군과 경상북도, 북쪽으로 경기도와 강원도가 경계를 이루는 내륙 분지에 위치하고 있다. 충주시는 인구가 20만명 정도의 소규모 도시지역으로 지역 내에 위치한 대기오염물질 배출시설은 대부분이 규모가 작은 4층, 5층으로 자체적인 오염물질 배출량이 많지 않음에도 불구하고 2000년 이후 충주시 PM_{10} 농도는 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘어서고 있으며 O_3 농도 또한 증가하는 경향을 보이고 있다 (Park *et al.*,

2008).

미세입자는 작은 크기를 가지기 때문에 배출원로부터 먼 거리까지 이동할 수 있으며 따라서 중·장거리 이동에 의한 기여도가 중요할 수 있다. 국내·외 지역에서 이루어진 연구에 의하면 대도시의 오염물질의 중·장거리 이동에 의하여 대도시 지역의 풍하 측에 위치한 교외지역에서 고농도의 episode가 발생한 사례를 찾아 볼 수 있다 (Jung and Han, 2008; Gomiscek *et al.*, 2004).

본 연구에서는 지역 내 뚜렷한 배출원이 없는 중부 내륙에 위치한 충주시의 미세입자 계절별 농도 특성과 더불어 저농도 및 고농도 episode 사례 시 역 추적 분석을 통하여 대기 질에 영향을 미치는 배출원 특성을 분석하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 시료 채취 및 분석 방법

2.1 시료 채취 지점 및 기간

본 연구의 시료 채취 지점은 주위에 장애물이 없고 주택과 상가들이 밀집되어 있어서 충주시의 대기 질을 대표할 수 있는 위치인 충주의료원 옥상(지상에서 약 15m 높이)을 시료 채취 지점으로 선정하였다. 시료 채취 지점의 개략적인 위치는 그림 1과 같다.

본 연구는 2010년 4월 16일부터 2011년 1월 24일까지 기상조건을 고려하여 각 계절을 대표할 수 있는 기간을 선정하여 미세입자($\text{PM}_{2.5}$) 시료를 채취하였다. 봄철 측정 기간은 2010년 4월 16일부터 4월 29일까지, 여름철은 2010년 7월 6일부터 7월 21일까지, 가을철은 2010년 10월 30일부터 11월 10일까지, 겨울철은 2011년 1월 14일부터 1월 24일까지 총 41회에 걸쳐서 이루어졌으며, 봄과 가을, 겨울에 각 10회씩, 그리고 여름에 11회 시료를 채취하였다. 측정은 당일 오전 10시부터 다음날 10시까지 24시간 동안 $16.7\text{L}/\text{min}$ 으로 채취하였다.

2.2 시료 채취 및 분석 방법

미세입자의 시료 채취 장치는 디누더 측정기(Annular Denuder System, URG)를 이용하여 시료를 포집하였다. 시료 채취는 $16.7\text{L}/\text{min}$ 의 유량으로 테프론 여과지(Gelman Science, R2PJ047, U.S.A.)를 이

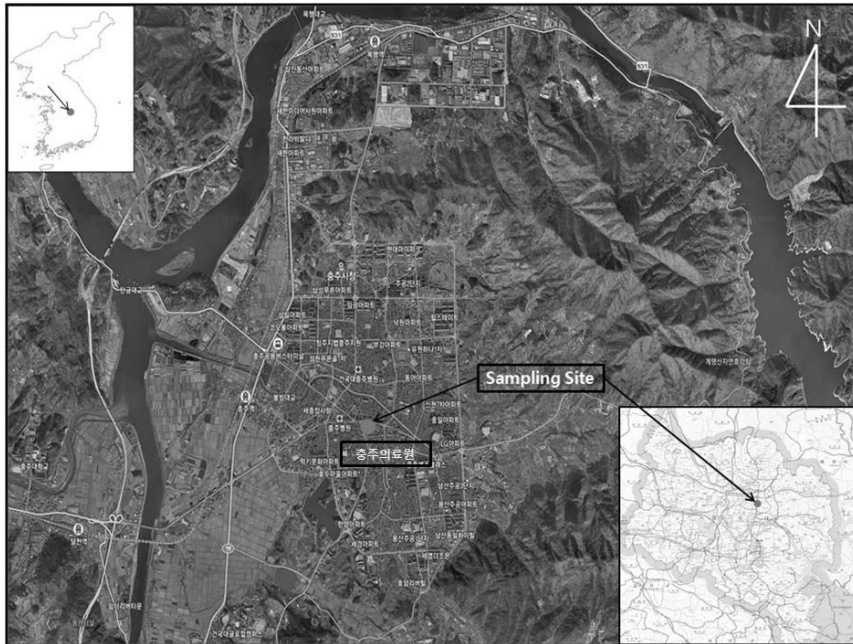


Fig. 1. Map of sampling site.

용하여 2.5 μm 이하의 미세먼지 (dp ≤ 2.5 μm)를 포집하였고, 여과지 팩의 2번째 단계에는 테프론 여과지에서 기화된 입자상 NO₃⁻를 포집하도록 나일론 여과지 (Gelman Science, 66509, U.S.A.)를 설치하였다. 시료 채취 기간 중 펌프의 유량은 측정 시와 종료 시에 측정하였고, 각 시료 채취 장치에 사용되는 펌프의 유량은 계절별 시료채취 전에 교정 (mass flow meter, AALBORG)하였으며 전체 유량을 측정하기 위하여 적산유량계 (DC-1, SHINAGAWA)를 사용하였다.

시료채취를 위한 디누더의 코팅과 분석은 미국 EPA방법을 이용하였다 (U.S. EPA, 1989). 디누더 측정기의 특성, 시료 정량을 위한 전처리 방법 및 이온 분석방법에 대하여는 Kang *et al.* (1997)에 상세히 기술하였다.

가스상 산성오염물질을 흡착하기 위하여 코팅된 디누더는 마개를 막은 상태로 현장으로 이동하여 현장에서 시료 채취 장치에 장착하였다. 테프론 여과지와 나일론 여과지도 페트리디쉬에 밀봉하여 현장까지 이동하여 현장에서 필터 팩에 장착하였다.

테프론 및 나일론 여과지에 포집된 미세먼지는 초

순수 10 mL을 이용하여 추출하였으며, 추출한 용액은 이온크로마토그래프 (ICS-1000, DIONEX, USA)를 이용하여 각 수용성 이온성분을 분석하였다. 분석 시 표준액은 시판되는 음이온과 양이온 표준용액 (Combined seven anion standard II, Combined six cation standard II, Dionex)을 이용하여 검량선을 작성하였다.

2.3 역궤적 모델

본 연구에서 오염물질의 장거리이동을 수반하는 공기 덩어리의 역궤적을 구하기 위해 사용한 모델은 미국 해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectories, version 4.0)을 사용하였다. 역궤적 분석은 오염물질의 장거리 이동을 계산하는 것 이외에 공기의 흐름패턴을 이해하는 데 또한 도움을 줄 수 있다. 역궤적 모델에 사용한 기상자료는 NCEP의 GDAS (global data assimilation system)에서 6시간 단위의 FNL (final run) 기상자료를 이용하였다. 역궤적은 시료 채취 지점 (36.58°N, 127.55°E)에서 500, 1000, 1500 m 고도에 대하여 3일 간의 공기가 지나온 경로를 역추적하였다.

Table 1. Summary of data.

Season	PM _{2.5}	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Temp. ^a	RH ^b	Precipitation (mm)
Spring	48.7 (21.8~71.9)	7.93 (3.50~14.35)	6.21 (2.91~10.75)	3.43 (2.02~5.09)	11.0 (7.2~17.6)	58.2 (37.8~77.8)	29.5
Summer	21.9 (9.0~48.0)	2.69 (0.44~7.57)	6.13 (1.64~14.88)	2.47 (0.81~5.46)	26.0 (23.4~29.3)	68.9 (59.4~75.4)	11.6
Fall	61.2 (15.2~157.7)	11.82 (1.80~35.78)	12.88 (1.54~46.35)	5.31 (1.23~15.79)	6.8 (2.5~10.2)	69.6 (49.1~85.6)	0
Winter	33.4 (18.94~46.17)	6.57 (2.22~10.61)	5.38 (3.05~7.87)	3.87 (1.78~5.19)	-8.9 (-14.2~-5.8)	57.1 (38.6~71.3)	0.3
Annual	40.84 (9.01~157.7)	7.14 (0.41~35.78)	7.61 (1.54~46.35)	3.74 (0.81~15.79)	9.19 (-14.2~29.3)	63.58 (37.8~85.6)	-

^aTemperature (°C), ^bRelative Humidity (%)

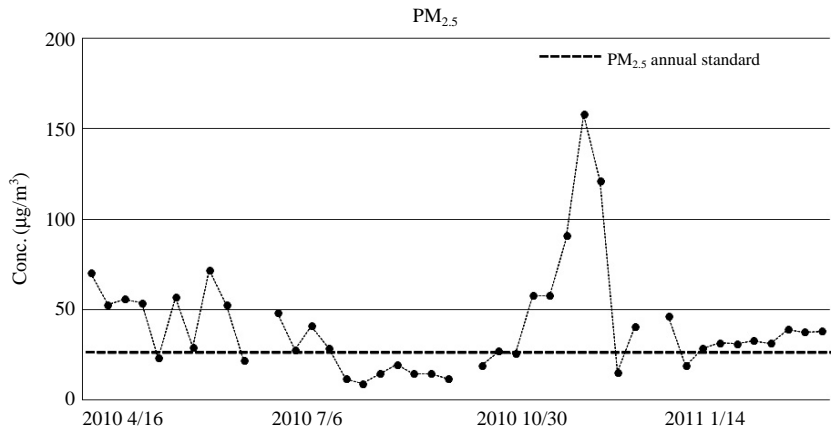


Fig. 2. The daily PM_{2.5} concentrations during the whole sampling period.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세먼지 농도특성

본 연구를 통하여 얻어진 미세먼지농도, 입자상 수용성 성분인 SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ 등에 대한 농도자료를 계절별로 요약하여 표 1에 나타내었다. 기상자료는 충주시 기상측정소 자료를 사용하였으며 측정 기간 중 봄철과 가을철에는 서풍과 동풍이 주요 풍향이였으며 동풍의 빈도가 높았으나 풍속이 약한 것이 특징이고 반면에 서풍의 경우 풍속이 큰 것이 특징이었다. 여름철의 경우 동풍이 주풍이었으나 풍속이 약하였으며 겨울철은 남풍이 주요 풍향으로 나타났다. 봄, 여름, 가을, 겨울의 평균 풍속은 계절별로 각

각 1.89, 1.59, 1.30, 1.71 m/s이었으며, 연평균 온도와 상대습도는 각각 9.19°C, 63.5%를 나타내었다.

연구 기간 동안 분석된 총 41개 시료의 24시간 평균농도는 40.8 µg/m³ (9.01~157.7)이며, 신설된 우리나라 PM_{2.5} 연평균 기준 농도인 25 µg/m³를 1.6배 초과하였다(그림 2).

본 연구에서 측정된 미세먼지 및 주요 수용성성분 농도를 비교하기 위하여 국내·외에서 수행된 자료를 대도시지역, 도시지역, 해안지역 등과 같이 지역별 특성에 따라서 표 2에 비교하여 나타내었다.

표 2에서 국내·외의 대도시 지역에서 수행된 연구결과를 살펴보면 국내의 경우 서울지역 미세먼지 농도는 48.5 µg/m³으로 본 연구에서 측정된 농도보

Table 2. Data comparison with other studies in different locations.

Classification	Location	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				References
		PM _{2.5}	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	
Metropolitan	Seoul	48.5	7.59	6.46	3.26	Kang <i>et al.</i> (2006)
	Mexico	94.4	5.3	11.8		Barbiaux <i>et al.</i> (1992)
	New York	16.1		4.28		Bari <i>et al.</i> (2003)
	Beijing	115	10.3	14.47	6.22	He <i>et al.</i> (2001)
	Chicago	23.3	4.21	5.55	2.74	Lee <i>et al.</i> (1993)
City	Hamilton	19.0	1.05	6.83	2.52	Brook <i>et al.</i> (1997)
	Chongju	44.2	3.63	8.22	2.84	Kang <i>et al.</i> (1997)
	Chuncheon	36.8	3.38	5.48	3.97	Jung and Han (2008)
	Incheon	65.8				Park and Kim (2005)
	Suwon	46.3	4.35	6.69	2.78	Lee <i>et al.</i> (2009)
	Chungju	40.8	7.14	7.61	3.74	This study
Seaside and Island	Gosan, Jeju	19.8				Kang <i>et al.</i> (2003)
	Kanghwa	25.6	1.76	5.93	2.54	Choi <i>et al.</i> (2000)
	Ieodo, Jeju	21.5		5.43	2.39	Hwang <i>et al.</i> (2008)

다는 높은 농도의 결과를 나타내고 있다. 외국의 연구결과와 비교해 보면 오염이 심한 멕시코와 중국의 베이징의 94.4, 115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구지역뿐만 아니라 타 대도시지역에 비하여 매우 높은 농도를 보이고 있으나 반면에 뉴욕과 시카고 지역의 농도는 각각 16.1, 23.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구의 결과보다 오히려 낮은 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 국내·외의 일반적인 도시지역에 대한 연구결과와 비교해 보면 Hamilton의 경우 19.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구지역에 비하여 낮은 농도를 나타내었으나, 도시의 규모가 본 연구지역에 비하여 큰 국내의 인천과 수원에서 측정된 미세먼지의 농도는 각각 65.8, 46.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구지역에 비하여 높은 농도를 나타낸 반면에 이보다 적은 도시지역인 청주와 춘천에서의 미세먼지 농도는 각각 44.2, 36.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구결과와 농도 차이가 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 해안 지역이나 섬 등에서 측정된 미세먼지 농도는 19.8~29.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구결과와 비교하여 매우 낮은 농도를 나타내었다. 위에서 살펴본 바와 같이 국내 도시지역의 미세먼지 농도 특성은 도시규모의 크기에 따라서 미세먼지 농도가 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

미세입자의 계절별 농도 특성을 파악하기 위하여 봄, 여름, 가을, 겨울로 구분하여 평균 농도를 살펴보면 각각 48.7, 21.9, 61.2, 33.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 계절별 농도 변화를 통계학적 방법으로 비교할 수 있는 일원

분산분석에 의하여 분석한 결과, PM_{2.5} (p=0.009)는 통계적으로 유의한 계절변동을 나타내었다. 미세먼지의 농도는 봄과 가을에 농도가 높게 나타났으며 여름과 겨울에 낮은 농도가 나타났다. 미세먼지 농도의 계절 변동에서 특징적인 것은 가장 높은 농도가 가을에 나타났다는 점으로 이는 일반적으로 도시지역의 경우 겨울철에 가장 높은 농도를 나타내는 경향과는 다른 점이다. 이와 같이 가을철 평균 농도가 높게 나타난 원인은 전체 10회의 측정결과 중 2010년 11월 3일~11월 7일까지 5회의 미세먼지 측정농도가 각각 57.6, 57.6, 90.6, 157.7, 121.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고농도 현상이 다수 발생하여 나타난 결과이다(그림 2). 가을철 고농도 현상 시 미세먼지 중 SO₄²⁻의 기여도는 가을철 평균이 16%인 것에 비하여 고농도 시기에는 22~46%로 두 배 이상 높은 비율로 크게 증가하였으며 NO₃⁻ 기여도의 경우에도 가을철 평균 16%에 비하여 높은 21~36%로 나타난 것이 큰 특징이며, 이와 같은 특성은 인위적인 배출원에서의 기여도가 미세먼지 농도 증가에 주요 원인이라는 것을 나타내는 것이다. 미세먼지 중의 계절별 미세먼지 농도 변화를 box plot으로 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 미세먼지 농도의 일변화는 가을철에 변동이 가장 크게 나타났으며 다음으로 봄철에 일변화가 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 미세먼지 농도의 일변화는 겨울철에 가장 작은 것으로 나타났다.

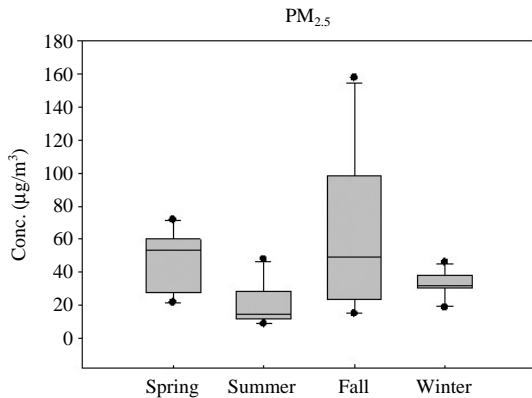


Fig. 3. Seasonal variation of PM_{2.5}.

3. 2 수용성 이온성분 농도 특성

미세입자의 주요 이온성분으로는 SO₄²⁻, NO₃⁻와 NH₄⁺ 등의 이온을 들 수 있다. 측정된 이온성분 중 산성물질인 SO₄²⁻와 NO₃⁻의 평균 농도는 각각 평균 7.61 (1.54 ~ 46.35), 7.14 (0.44 ~ 35.78) µg/m³이었다. 알칼리 이온성분인 NH₄⁺의 평균 농도는 3.74 (0.81 ~ 15.79) µg/m³으로 나타났다. 각 이온성분의 최소와 최대농도의 차이는 NO₃⁻가 82배로 가장 컸으며, SO₄²⁻와 NH₄⁺가 각각 30, 19배로 나타나 이온성분 농도의 변화가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

미세입자에 대한 수용성 이온성분의 기여도는 SO₄²⁻, NO₃⁻와 NH₄⁺이 각각 평균 18.6%, 17.5%, 9.2%로 나타났으며, 미세입자에 기여하는 전체 이온성분의 연평균 비율은 45.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 미세입자에 대한 주요 이온성분의 연평균 기여도는 그림 4와 같다.

대표적인 산성오염물질인 SO₄²⁻와 NO₃⁻의 농도수준을 타 지역의 농도와 비교해 보면, 2006년 서울의 SO₄²⁻ 연평균 농도는 6.46 µg/m³으로 (Kang *et al.*, 2006), 본 연구의 SO₄²⁻ 농도가 더 높게 나타났다(표 2, 그림 5). 또한 수원과 춘천지역에서 측정된 연평균 SO₄²⁻ 농도는 각각 6.69, 5.48 µg/m³으로 본 연구지역의 SO₄²⁻ 농도가 상당히 높은 농도수준을 나타내고 있음을 알 수 있다(Lee *et al.*, 2009; Jung and Han, 2008). NO₃⁻ 농도는 연평균 7.14 µg/m³으로 대도시지역인 2006년 서울지역에서의 측정결과 7.59 µg/m³과 비슷한 수준을 나타내었고, 수원과 춘천지역에서 측정된 연평균 NO₃⁻ 농도는 각각 4.35, 3.38 µg/m³으로

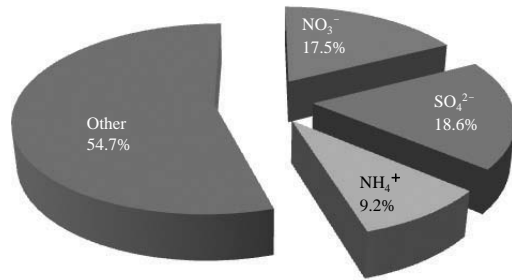


Fig. 4. Composition of major ionic species of PM_{2.5}.

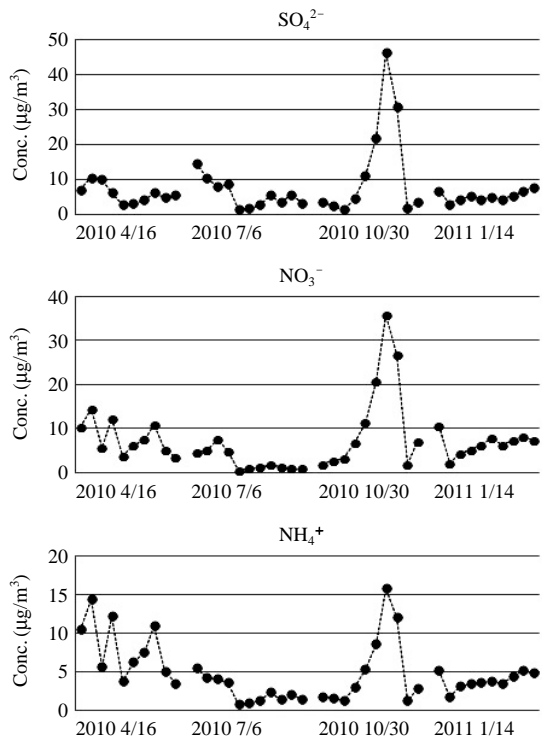


Fig. 5. Seasonal variation of major ionic species.

본 연구지역의 NO₃⁻ 농도가 2배 정도 높게 나타났다 (Lee *et al.*, 2009; Jung and Han, 2008). 이와 같이 본 연구지역의 SO₄²⁻와 NO₃⁻ 농도수준이 오염이 심한 서울과 비슷한 수준으로 나타난 것은 측정지역의 오염물질의 배출량과 자동차 등록대수 등을 고려할 때 연구지역내에서 발생한 오염물질의 기여에 의한 결과로 보기에 너무 높은 농도를 나타내었으며 외부에서 오염물질이 중·장거리 이송을 통하여 영향을

주었기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

수용성 이온성분의 계절별 농도를 보면, SO₄²⁻는 각각 6.21, 6.13, 12.88, 5.38 μg/m³, NO₃⁻는 각각 7.93, 2.69, 11.82, 6.57 μg/m³, 그리고 NH₄⁺는 각각 3.43, 2.47, 5.31, 3.87 μg/m³이었다. 각 계절별 농도변화를 통계학적 방법으로 비교할 수 있는 일원분산분석에 의하여 살펴본 결과, NO₃⁻ (p=0.021)는 계절변동을 나타내었고, SO₄²⁻ (p=0.142)와 NH₄⁺ (p=0.145)은 계절변동을 나타내지 않았다.

NO₃⁻ 농도는 가을철 (11.82 μg/m³)과 겨울철 (6.57 μg/m³)이 여름철 (2.69 μg/m³)보다 2.5~4.5배 높은 농도를 나타내었는데 이는 NO₃⁻의 계절 변동 특성이 대기 온도에 따라서 가스-입자 간의 상변화에 따라서 가을과 겨울철에 최대농도를 나타내고, 여름철에 최소농도를 나타내는 일반적인 경향과 일치하는 결과를 나타내었다.

SO₄²⁻ 농도는 봄철 (6.21 μg/m³)과 여름철 (6.13 μg/m³)에 비슷한 농도를 나타내었으며, 겨울철 (5.38 μg/m³)은 다소 낮은 농도를 나타내었고, 가을철 (12.88 μg/m³)에 가장 높은 농도를 나타내어 기존의 연구결과와 다른 경향을 보였다. 또한 NH₄⁺은 가을철 (5.31 μg/m³) > 겨울철 (3.87 μg/m³) > 봄철 (3.43 μg/m³) > 여름철 (2.47 μg/m³)의 순으로 계절에 따른 농도결과를 보였으나 통계적으로 유의한 계절 변동을 나타내지는 않았다. 수용성 이온성분 농도의 일변화는 그림 2의 미세먼지 농도의 일변화와 매우 유사한 경향을 나타내고 있으며 이는 수용성 이온성분이 미세먼지의 주요 구성성분이라는 것을 보여주고 있다. 수용성 이온성분 농도의 일변화를 그림 6에 나타내었다.

미세입자와 수용성 이온성분과의 회귀분석을 통하여 미세먼지와 주요 성분 간의 관련성을 살펴보았다.

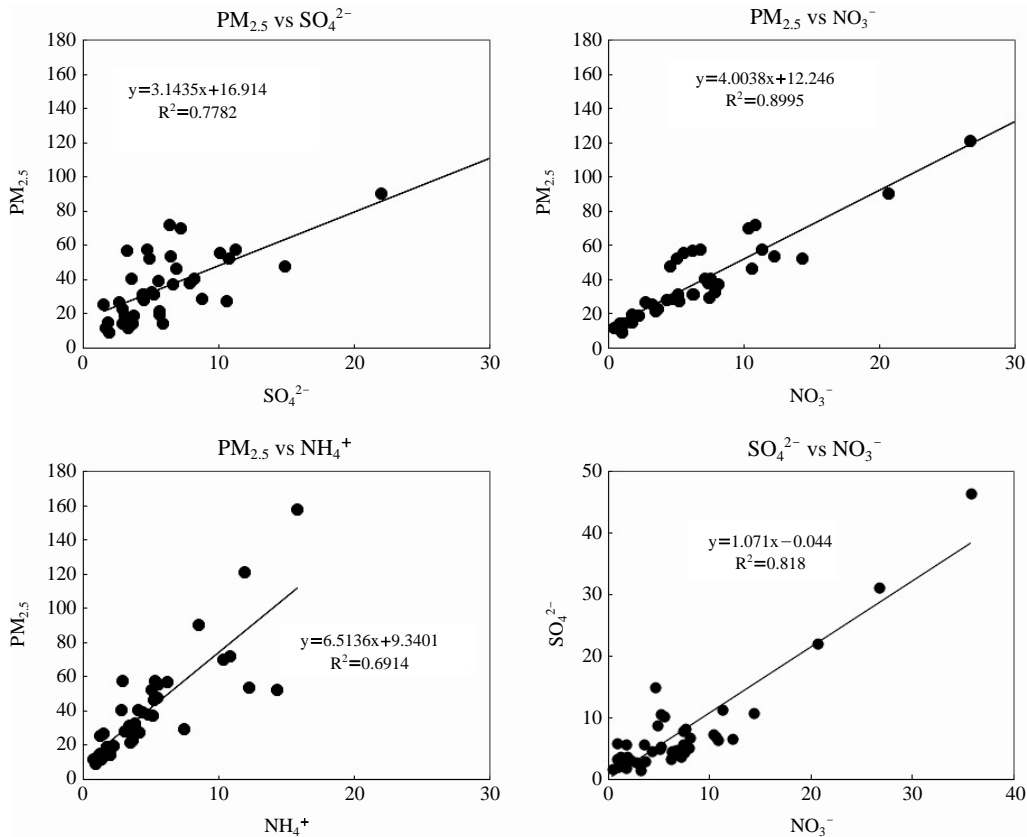


Fig. 6. Correlation of PM_{2.5} and major ionic species.

본 연구에서 미세입자와 수용성 성분인 NO_3^- , SO_4^{2-} 그리고 NH_4^+ 의 상관계수를 계절별로 살펴보면 가을철의 경우 각각 0.99, 0.98, 0.99로 높은 상관관계를 나타내었으며, 여름철의 경우 0.87, 0.91, 0.96이었고, 겨울철에는 각각 0.94, 0.86, 0.95로 가을철보다는 약간 낮은 상관관계를 나타내고 있기는 하지만, 여름철과 겨울철에도 높은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 봄철의 경우 타 계절과 달리 상관계수가 각각 0.59, 0.42, 0.68로 비교적 낮게 나타났다. 미세입자와 NO_3^- , SO_4^{2-} 그리고 NH_4^+ 의 결정계수는 각각 0.90, 0.78, 0.69으로 비교적 높은 값을 나타내어 NO_3^- , SO_4^{2-} 그리고 NH_4^+ 이 미세입자의 주요 구성성분이라는 것을 알 수 있다. 미세입자와 수용성 이온성분간의 상관관계를 그림 6에 나타내었다.

3.3 고농도 미세입자 episode 특성 분석

전체 측정기간 중 미세입자의 일평균기준치인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 고농도의 경우는 봄철 5회, 가을철 5회로 전체 측정기간 동안 총 10회 발생하였다. 특히, 미세입자의 농도가 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 고농도의 경우도 봄철 2회, 가을철 3회 등 총 5회에 걸쳐서 발생하였다.

본 연구에서 역궤적 분석을 통한 공기 이송 특성 및 화학적 성분분석을 위하여 5회의 고농도 사례에 대하여 분석을 수행하였다. 고농도 사례에 대한 배출원 분석을 위하여 공기의 기원 및 이동경로를 파악하기 위하여 역궤적 분석을 수행하였다. 고농도 사례일의 대표적인 역궤적 분석결과는 봄, 가을에 대하여 각각 그림 7과 8에 나타내었다.

가을철 측정기간 중 미세입자 농도가 가장 높았던 2010년 11월 5일~11월 7일 3일간의 미세입자 농도는 각각 $90.6, 157.7, 121.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 높은 농도가 지속된 사례이다. 역궤적 분석결과 측정지점의 공기 궤는 11월 5일과 6일의 경우 중국 동북부의 텐진 공업지역을 통과하여 서해를 거쳐서 본 연구지역으로 이동한 것으로 나타났고, 7일의 경우 중국 동부공업지역인 산둥반도 아래쪽을 통과하여 서해를 거쳐 본 연구지역으로 이동한 것으로 나타났다. 고농도 사례에 대한 분석결과 본 연구대상지역의 미세입자 농도가 고농도를 나타내는 경우는 크게 두 가지 경우로 하나는 중국의 북쪽 공업지역을 통과하여 서해안과 수도권을 거쳐서 공기가 이동하는 경우이고, 두 번째

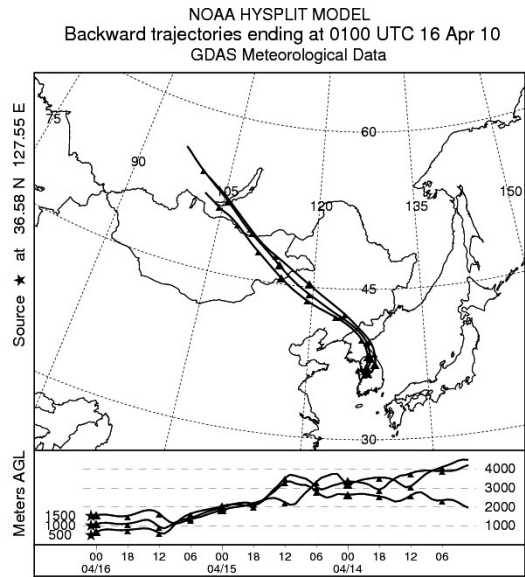


Fig. 7. Air trajectories during spring episode.

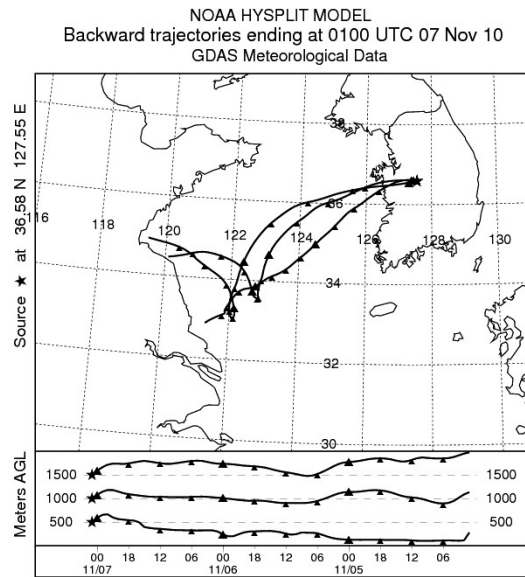


Fig. 8. Air trajectories during fall episode.

로는 중국 산둥반도 아래쪽 중국 내륙으로부터 중국의 해안 공업지역을 거쳐서 서해안을 통과하여 이동하는 경우 고농도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

미세입자의 농도가 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 저농도 사례

의 경우는 여름철에 6회 발생하여 일반적인 대기오염물질 계절 변동 특성을 나타내었다. 저농도 사례 분석을 위하여 5회의 저농도 사례에 대하여 공기 궤의 기원 및 이동경로를 파악하기 위하여 역궤적 분석을 수행하였으며 대표적인 공기 이동 경로는 그림 9와 같다.

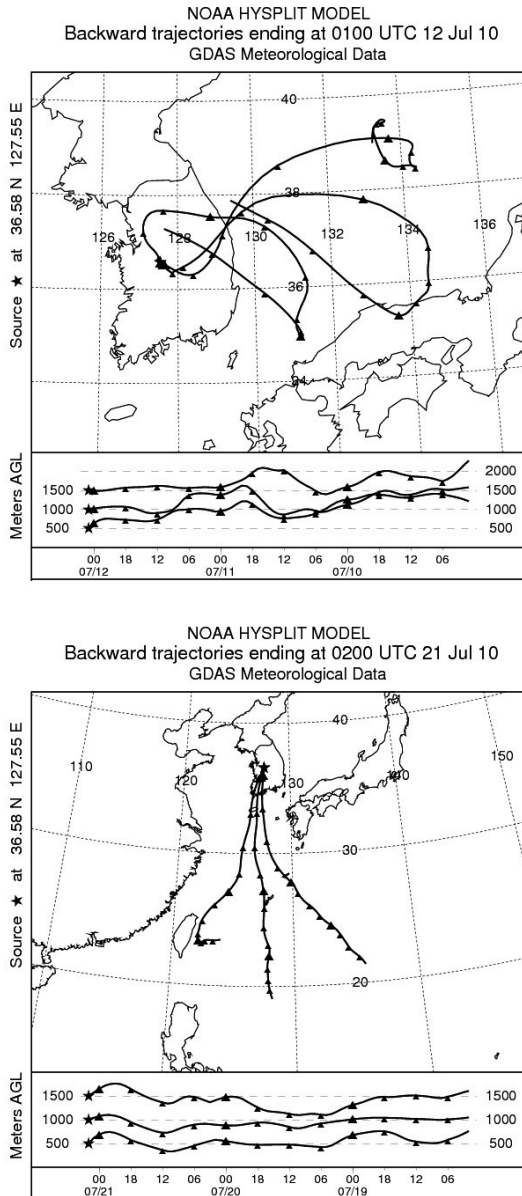


Fig. 9. Air trajectories during summer.

그림 9에서 여름철 측정기간 중 대표적 역궤적 분석결과 측정지점의 공기 궤는 동해 바다에서 동해안을 거쳐 본 연구지역으로 이동하는 것으로 나타났다. 두 번째 경우에는 서해 남쪽바다에서 남해안을 거쳐서 본 연구지역으로 이동되는 것으로 나타났다. 이와 같이 저농도 사례일 경우에는 오염물질 배출이 없는 동해와 서해 남부 해양지역의 공기가 각각 동해안과 남해안을 거쳐서 이동하는 두 가지 경로를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

고농도와 저농도 사례에 대한 화학적 특성을 분석하기 위하여 수용성 이온성분의 농도와 미세먼지 중 성분 비율을 표 3과 4에 나타내었다.

표 3과 4에서 각 수용성 성분농도의 절대치는 고농도 사례일이 저농도 사례일의 경우에 비하여 높게 나타났다. SO₄²⁻의 미세먼지 중 비율은 고농도 사례

Table 3. Concentrations of PM_{2.5} and major ionic species during "high" episodes.

Episodes	PM _{2.5} (μg/m ³)	Concentration (μg/m ³)		
		SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
10/4/16	70.3	7.21 (10)	4.65 (7)	10.37 (15)
10/4/25	71.9	6.39 (9)	4.00 (6)	10.85 (15)
10/11/5	90.6	22.01 (24)	8.54 (9)	20.71 (23)
10/11/6	157.7	46.35 (29)	15.79 (10)	35.78 (23)
10/11/7	121.1	31.04 (26)	11.94 (10)	26.74 (22)

() : Percent to PM_{2.5}

Table 4. Concentrations of PM_{2.5} and major ionic species during "low" episodes.

Episodes	PM _{2.5} (μg/m ³)	Concentration (μg/m ³)		
		SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
10/7/12	11.5	1.64 (14)	0.81 (7)	0.43 (4)
10/7/13	9.0	1.92 (21)	0.90 (10)	1.01 (11)
10/7/14	14.5	2.88 (20)	1.22 (8)	1.16 (8)
10/7/20	14.5	5.86 (40)	2.04 (14)	0.88 (6)
10/7/21	11.8	3.31 (28)	1.34 (11)	0.89 (8)

() : Percent to PM_{2.5}

의 경우 평균 20% (9~29)이었고 저농도 사례일의 경우 평균 25% (14~40)로 저농도 사례일의 경우에 SO_4^{2-} 의 비율이 높아졌으나 큰 차이를 나타내지는 않았다. NH_4^+ 의 비율은 고농도 사례의 경우 평균 8% (6~10)이었고 저농도 사례의 경우 평균 10% (7~14)로 저농도 사례일에 SO_4^{2-} 와 마찬가지로 약간 비율이 높아졌으나 큰 차이를 나타내지는 않았다. 그러나 NO_3^- 의 경우 고농도 사례의 경우 평균 19% (15~23)이었으나 저농도 사례의 경우 평균 7% (4~11)로 미세입자 중 NO_3^- 의 비율이 큰 차이를 나타내었다. 가을철 고농도 사례일의 경우 특히 SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 의 비율이 높은 비율을 나타내었는데 이는 가을철 측정 기간에 강수량이 전혀 없었기 때문에 대기 중의 가스상 물질이 이차 입자로 전환될 수 있는 조건을 갖추었기 때문에 이로 인한 영향이 클 것으로 보여진다.

4. 결 론

한반도 중부지역에 위치한 충주시 미세입자의 미세입자 계절별 농도 특성과 더불어 저농도 및 고농도 episode 사례 시 영향을 미치는 배출원 특성을 분석하기 위하여 2010년 4월부터 2011년 1월까지 1년 동안 41회에 걸쳐서 측정한 연구결과는 다음과 같다.

미세입자의 연평균 농도는 $40.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 계절별 미세입자의 농도는 가을>봄>겨울>여름의 순으로 나타났으며 가을철 고농도 episode에 의하여 가을철 농도가 가장 높은 농도를 나타내었다.

수용성 이온성분의 농도는 SO_4^{2-} (7.61)> NO_3^- (7.14)> NH_4^+ (3.74)의 순으로 나타났으며, SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 농도가 다른 도시지역에 비하여 매우 높은 농도를 보였으며 이 결과는 타 지역 오염물질의 중·장거리 이동에 의한 결과로 판단된다.

미세입자와 NO_3^- 는 각각 가을과 겨울에 높아지는 계절 변동 특성을 나타내었으나, SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 은 계절변동을 나타내지 않았다. 또한 미세입자와 SO_4^{2-} , NO_3^- 그리고 NH_4^+ 간의 상관관계는 봄철을 제외한다면 나머지 계절에 대하여 매우 높은 상관관계를 나타내었다.

미세입자 고농도 사례에 대한 역계적 분석 결과

중국의 북쪽 공업지대와 산둥반도에서 이동한 공기의 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 저농도 사례에 대한 분석 결과 동해와 서해 남쪽 바다에서 이동한 공기가 영향을 미칠 때 나타나고 있음을 알 수 있다.

고농도 사례일의 경우 저농도 사례일에 비하여 NO_3^- 의 미세입자에 대한 비율이 크게 높아지는 특성을 나타내었으나, 반면에 SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 의 미세입자에 대한 비율은 변화가 크지 않았다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

참 고 문 헌

- Barblaux, M., P.A. Scheff, and L.R. Babcock (1992) Characterization of respirable particulate matter in Mexico city, Mexico, Presentation at the 9th World Clean Air Congress and Exhibition, Montreal, Canada, August 30-September 4, IU-7.07.
- Bari, A., V.A. Dutkiewicz, C.D. Judd, L.R. Wilson, D. Luttinger, and L. Husain (2003) Regional sources of particulate sulfate, SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, HCl, and HNO_3 in New York, NY, Atmospheric Environment, 37, 2837-2844.
- Brook, J.R., A.H. Wiebe, S.A. Woodhouse, C.V. Audette, T.F. Dann, S. Callaghan, M. Piechowski, E. Dabek-Zlotorzynska, and J.F. Dlouhy (1997) Temporal and spatial relationships in fine particle strong acidity, sulfhate, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ across multiple Canadian locations, Atmospheric Environment, 31(24), 4223-4236.
- Choi, M.-K., H.-G. Yeo, J.E. Lim, K.-C. Cho, and H.-K. Kim (2000) Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Kangwha, J. KOSAE, 16(6), 573-583. (in Korean with English abstract)
- Dockery, D.W. and C.A. Pope III (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution, Annu. Rev. Public. Health, 15, 107-132.
- Dockery, D.W., C.A. Pope III, X. Xu, J.D. Spengler, J.H. Ware, and M.E. Fay (1993) An association between air pollution and mortality in six U.S. Cities, N. Engl. J. Med., 329, 1753-1759.

- Dockery, D.W., J. Schwartz, and J.D. Spengler (1992) Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols, *Environ. Res.*, 59, 362-373.
- Gomiscek, B., A. Frank, H. Puxbaum, S. Stopper, O. Preining, and H. Hauck (2004) Case study analysis of PM burden at an urban and a rural site during the AUPHEP project, *Atmos. Environ.*, 38, 3935-3948.
- He, K., F. Yang, Y. Ma, Q. Zhang, X. Yao, C.K. Chan, S. Cadle, T. Chan, and P. Mulawa (2001) The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China, *Atmos. Environ.*, 35, 4959-4970.
- Hwang, G.-Y., M.-H. Lee, B.-C. Shin, G.-W. Lee, J.-H. Lee, and J.-S. Shim (2008) Mass concentration and ionic composition of PM_{2.5} observed at Iodo ocean research station, *J. KOSAE*, 24(5), 501-511. (in Korean with English abstract)
- Jung, J.-H. and Y.-J. Han (2008) Study on characteristics of PM_{2.5} and its ionic constituents in Chuncheon, Korea, *J. KOSAE*, 24(6), 682-692. (in Korean with English abstract)
- Kang, B.-W., H.S. Lee, and H.-K. Kim (1997) A seasonal variation of acidic gases and fine particle species in Chongju area, *J. KOSAE*, 13(5), 333-343. (in Korean with English abstract)
- Kang, C.-H., W.-H. Kim, J.-S. Han, Y. Sunwoo, and K.-C. Moon (2003) Pollution characteristics of PM_{2.5} fine particles collected at Gosan site in Jeju island during 1997 ~ 2001, *J. KOSAE*, 19(3), 263-273. (in Korean with English abstract)
- Kang, C.-M., B.-W. Kang, and H.S. Lee (2006) Source identification and trends in concentrations of gaseous and fine particulate principal species in Seoul, South Korea, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 56, 911-921.
- Klemm, R.J., R.M. Mason Jr., C.M. Heilig, L.M. Neas, and D.W. Dockery (2000) Is daily mortality associated specifically with fine particles? Data reconstruction and replication of analyses, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 50, 1215-1222.
- Lee, H.S., R.A. Wadden, and P.A. Scheff (1993) Measurement and evaluation of acid air pollutants in Chicago using an annular denuder system, *Atmos. Environ.*, 27A(4), 543-553.
- Lee, H.W., T.-J. Lee, and D.-S. Kim (2009) Identifying ambient PM_{2.5} sources and estimating their contributions by using PMF: separation of gasoline and diesel automobile sources by analyzing ECs and OCs, *J. KOSAE*, 25(1), 75-89. (in Korean with English abstract)
- Liabaca, M., I. Olaeta, E. Campos, J. Villaire, M. Tellez-Rojo, and I. Romieu (1999) Association between levels of fine particulate and emergency visits for pneumonia and other respiratory illnesses among children in Santiago, Chile, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 49, 154-163.
- Lighty, J.S., J.M. Veranth, and A.F. Sarofim (2000) Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 50, 1565-1618.
- Park, J.-S. and S.-D. Kim (2005) The characteristics of secondary carbonaceous species within PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul and Incheon area, *J. KOSAE*, 21(1), 131-140. (in Korean with English abstract)
- Park, S.-C., I.-J. Yeon, B.-R. Cho, J.-S. Cho, and B.-W. Kang (2008) A study on the atmospheric environmental capacity in Chungju area, *J. KOSAE*, 24(1), 122-127. (in Korean with English abstract)
- Schwartz, J. (1996) Air pollution and hospital admissions for respiratory disease, *Epidemiology*, 7, 20-28.
- U.S. EPA (1989) Determination of reactive acidic and basic gases and particulate matter in indoor air, U.S. Environmental Protection Agency Compendium Chapter IP-9, Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory, Research Triangle Park, NC.