

# 한반도 서부유입권역에서 대기 중 에어로졸 성분의 화학적 특성 연구

## I. PM 농도 및 화학 성분 특성

### A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula

#### I. Characteristics of PM Concentration and Chemical Components

최진수 · 김정호<sup>1)</sup> · 이태형<sup>2)</sup> · 최용주<sup>2)</sup> · 박태현<sup>2)</sup> · 오 준 · 박진수\*  
안준영 · 전하은 · 구윤서<sup>3)</sup> · 김신도<sup>4)</sup> · 홍유덕 · 홍지형

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, <sup>1)</sup>에이피엠 엔지니어링(주),

<sup>2)</sup>한국외국어대학교 환경학과, <sup>3)</sup>안양대학교 환경에너지공학과, <sup>4)</sup>서울시립대학교 환경공학과

(2016년 6월 20일 접수, 2016년 7월 27일 수정, 2016년 9월 19일 채택)

Jin-Soo Choi, Jeong-Ho Kim<sup>1)</sup>, Tae-Hyoung Lee<sup>2)</sup>, Yong-Joo Choi<sup>2)</sup>, Tae-Hyun Park<sup>2)</sup>,  
Jun Oh, Jin-Soo Park\*, Joon-Young Ahn, Ha-Eun Jeon, Youn-Seo Koo<sup>3)</sup>,  
Shin-Do Kim<sup>4)</sup>, You-Deog Hong and Ji-Hyung Hong

*Department of Air Quality Research, Climate and Air Quality Research Division,  
National Institute of Environmental Research*

<sup>1)</sup>*APM Engineering Co., Ltd.*

<sup>2)</sup>*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

<sup>3)</sup>*Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University*

<sup>4)</sup>*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

(Received 20 June 2016, revised 27 July 2016, accepted 19 September 2016)

### Abstract

HR-ToF-AMS was applied for a seasonal and size-distributional measurements for inorganic ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) and organic components in Baegryung Island Super Site. The average concentration of  $\text{PM}_{1.0}$  remarks  $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  while  $14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Spring time,  $14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Winter,  $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Summer and  $9.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Autumn. The mass of measured  $\text{PM}_{1.0}$  shows 54.6% of  $\text{PM}_{2.5}$  which is similar to those of Beijing and Lanzhou, China. The highest portion of Chemical composition is  $\text{SO}_4^{2-}$  marking 41.0%, 31.8% by organics, 13.5% by  $\text{NH}_4^+$ , 12.8% by  $\text{NO}_3^-$  and 1% by  $\text{Cl}^-$ . In every seasons, except winter,  $\text{SO}_4^{2-}$  remarks the highest level, organic components take place the highest in winter time. The size-distribution of  $\text{PM}_{1.0}$  components scattered at accumulation mode of 200 nm~800

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7272, E-mail : airchemi@gmail.com

nm which means the influence of primary emission is low. In case of air stream from the industrialized area of Sandung, Shanghai, China, the concentrations of such components were distributed a bit higher.

**Key words :** PM<sub>1.0</sub>, Particle size distribution, HR-ToF-AMS

## 1. 서 론

최근 미세먼지 (PM<sub>10</sub>) 농도는 증가추세에 있는데, 2012년도의 경우 우리나라와 인접한 중국 북동부 지역의 PM<sub>10</sub> 평균 농도는 90 µg/m<sup>3</sup>로 서울지역 평균 농도 41 µg/m<sup>3</sup>보다 2배 이상 높았고, 2013년도에는 중국 북동부 지역이 134 µg/m<sup>3</sup>, 서울지역이 45 µg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, PM<sub>10</sub>과 더불어 PM<sub>2.5</sub>의 고농도 발생 사례가 증가하고 있다(NIER, 2015).

미세먼지는 대기로 직접 배출되는 1차 오염물질과 대기로 배출된 가스상 오염물질(SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>) 및 휘발성유기화합물질(VOCs)의 다양한 반응을 통해 생성된 2차 오염물질이 주요한 기원으로 알려져 있는데, 미세먼지의 구성 성분 중 2차 생성 미세먼지는 약 50% 수준인 데 반하여, Haze와 같은 고농도 사례에는 무려 80%에 이르는 것으로 나타났다(Cho *et al.*, 2013). 특히 중국 베이징의 경우 2013년 1월 기록적인 PM<sub>2.5</sub> 농도를 나타내었는데 이 당시 PM<sub>2.5</sub> 농도는 무려 1000 µg/m<sup>3</sup>에 이른 것으로 나타났으며(Zhang *et al.*, 2014), 이러한 고농도 사례는 인접한 우리나라에도 직·간접적인 영향을 미칠 수 있다.

이러한 현상을 반영하듯 최근 중국에서는 PM<sub>2.5</sub>보다 더 작은 PM<sub>1.0</sub> 입자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 중국에서 연구된 다양한 사례들을 살펴보면 겨울에 농도가 증가하고 여름에는 비교적 낮은 수준을 유지하는데(Sun *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2010), HR-ToF-AMS (High Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer, Aerodyne, USA)를 이용하여 2013년 1월과 2월에 측정된 대기 중의 PM<sub>1.0</sub>은 평균 89.3 µg/m<sup>3</sup>, 최대 423 µg/m<sup>3</sup>로 PM<sub>1.0</sub>의 50% 가량이 Organic 성분으로(Zhang *et al.*, 2014), 산업지역의 경우에는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분의 비율이 증가하는 것으로 나타났다(Hu *et al.*, 2013). HR-ToF-AMS는 실시간으로 에어로졸을 유입시켜 PM<sub>1.0</sub> 이하의 입자에 대한 질량 분석을 통해 화학적 성분과 입경에 따른 화학적 성분을 분석할 수 있어 비단 위에서 언급한 중국의 대도시

및 산업지역뿐만 아니라 2000년대 들어 세계적으로 다양한 지역과 실험실에서 대기 중 유기에어로졸의 형성 및 기원을 밝히기 위한 연구들에 활발히 활용되어 오고 있다(Ng *et al.*, 2011; Jimenez *et al.*, 2009).

우리나라의 경우 중국의 대기오염이 악화되어감에 따라 이에 대한 영향을 파악하고자 황사종합대책의 일환으로 2008년도에는 우리나라 서쪽 끝에 위치한 백령도에 집중관측소를 설립하여 대기오염물질을 측정 및 분석해오고 있으며(NIER, 2015), 백령도를 중심으로 미세먼지에 대한 연구들을 수행해 오고 있다. Lee *et al.*(2010)은 백령도에서 대기오염물질의 농도 및 분포 특성을 파악하였고, Kong *et al.*(2010)은 이러한 미세먼지의 생성원인을 조사하였으며, Lim *et al.*(2013)은 백령도에서 관측한 기류의 유입경로에 따른 오염도를 평가하는 연구를 수행하였다. 하지만 기존의 연구들을 살펴보면 한정된 기간 동안에 측정된 결과를 나타내기 때문에, 백령도 배경지역의 전반적인 특성을 파악하기에는 제한적임을 알 수 있으며, 이를 극복하기 위해서는 장기간에 걸친 측정과 분석이 요구되었다.

그러므로 본 연구에서는 백령도의 미세먼지 특성을 파악하기 위해서, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1.0</sub>의 장기변화 경향을 분석하였으며, 2012년부터 2013년까지 HR-ToF-AMS로 측정된 5분의 시간분해능을 가진 PM<sub>1.0</sub> 질량스펙트럼 결과를 중심으로 화학적 구성성분과 입경에 따른 화학적 성분을 파악하여, 계절과 기류의 유입에 따라 한반도 서해안 배경지역의 미세먼지 특성을 살펴보고자 하였다.

또한 장기간에 걸쳐서 측정된 자료를 분석 목적에 따라 I. PM 농도 및 성분 특성, II. 입자의 산성도 및 산화 특성 등으로 나누어 정리하였다. I 편에서는 2009년부터 2014년까지 Beta-ray 방법으로 측정된 PM<sub>1.0</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 장기변화 추세와 HR-ToF-AMS에 의한 PM<sub>1.0</sub>의 계절별 화학적 성분과 입경에 따른 화학적 성분을 분석하였다.

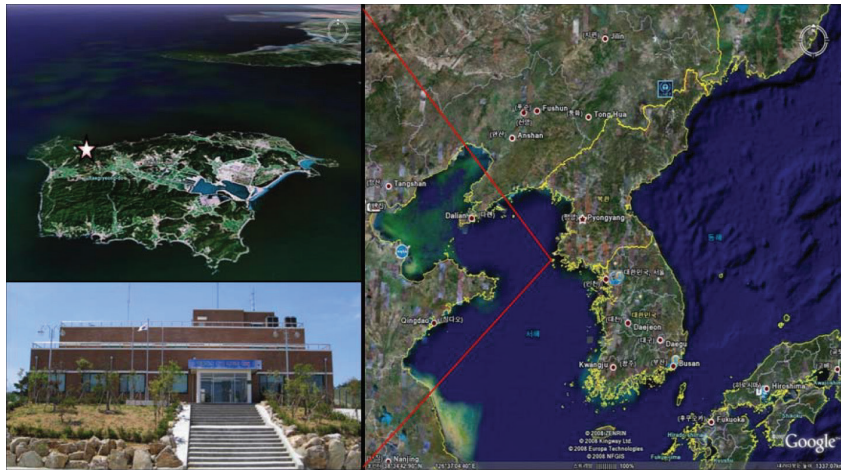


Fig. 1. Location of Baengnyeong super site.

Table 1. Summary of semi-continuous monitoring equipments to measure PM mass and chemical species at Baengnyeong super site.

Item	Species	Time resolution	Instrument	Method
PM <sub>10</sub>	Mass	1 hour	BAM 1020 (MetOne, USA)	β-ray absorption
PM <sub>2.5</sub>	Mass	1 hour	BAM 1020 (MetOne, USA)	β-ray absorption
PM <sub>1.0</sub>	Organic, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5 min.	HR-ToF-AMS (Aerodyne, USA)	Electron Ionization (EI)

## 2. 연구 방법

### 2.1 측정 위치 및 측정 방법

백령도 대기오염집중측정소의 경우 인천에서 북서쪽으로 175 km, 북한 장산곶에서 남쪽으로 14 km, 중국 산둥반도와 185 km가량 떨어져 있으며, 지정학적으로 37°57'N, 124°37'E, 135 m a.s.l. (above mean sea level)에 위치하여 한반도에서 중국과 가장 인접한 곳에 위치한다(그림 1). 평균 기온의 연교차는 25.1°C 정도이며, 최고기온은 내륙보다 2°C~3°C 낮고, 최저기온은 1°C~2°C 높은 해양성 기후의 특성이 약하게 나타난다(Choi *et al.*, 2013).

2012년 1월부터 2013년 12월까지 HR-ToF-AMS를 이용하여 PM<sub>1.0</sub> 에어로졸 성분의 농도분포 및 화학특성을 분석하였다.

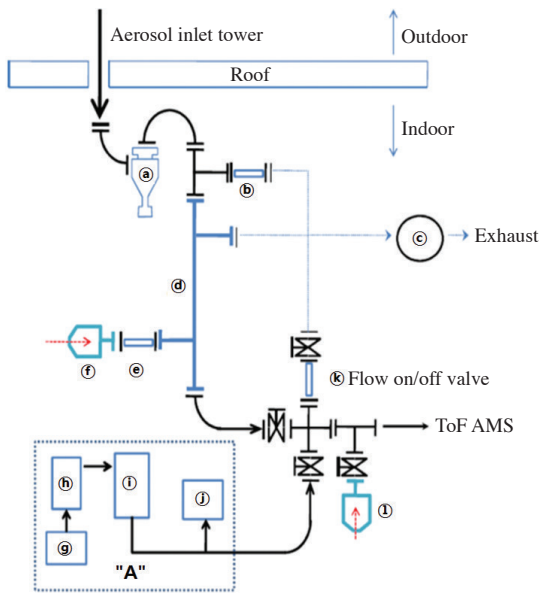
HR-ToF-AMS는 실시간으로 유입되고 있는 에어로졸 입자를 연속적으로 기화 및 이온화시키는 동시에 비행시간질량분석기로 발생된 이온들을 25 kHz로 펄스(pulse)시켰으며, 이때 질량스펙트럼 자료는 5분 간격

으로 누적하여 저장하였다. 이때 PM<sub>1.0</sub> 에어로졸 성분은 질량스펙트럼에서 m/z 200까지를 대상으로 하였으며, 질량스펙트럼을 재구성하여 Organic, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 성분으로 나타내었다. β-ray 흡수 방식의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 질량 농도를 1시간 간격으로 측정하였으며, 측정항목에 대하여 위의 표 1에 나타내었다.

### 2.2 장기 모니터링 HR-ToF-AMS의 구성 및 방법

#### 2.2.1 실험장치의 구성

안정적인 시료채취를 위해 ToF-AMS 전단에 그림 2와 같은 Inlet system을 설치하였다. 먼저 조대 입자의 유입에 의한 HR-ToF-AMS inlet (pin hole, 통과 직경 100 μm)의 막힘 현상을 방지하기 위하여 2.5 μm의 절단 입경을 가지는 ① Cyclone (URG®, USA)을 설치하였으며, 습도가 높은 해양에 인접한 특성상 높은 습도로 인한 물방울 맺힘 현상 및 포집 효율의 변화를 방지하기 위하여 ② Nafion dryer (PERMA PUR®, USA)를



**Fig. 2. Schematic diagram of aerosol pre-sampling inlet system for ToF-AMS (a) PM<sub>2.5</sub> cyclone, (b) Critical orifice, (c) Pump, (d) Nafion dryer, (e) Critical orifice, (f) HEPA filter, (g) Atomizer, (h) Diffusion dryer, (i) SMPS, (j) CPC, (k) Critical orifice, (l) HEPA filter) (Choi et al., 2013).**

설치하여 습도를 40% 이하로 조절하였다(Lee et al., 2015). 또한 (b), (e), (k)의 위치에 1/4 inch 직경의 Critical orifice (O'Keefe controls®, USA)를 설치하여 90 mL/min가 안정적으로 유입되게 하였다. 그림 2의 "A" 부분은 HR-ToF-AMS를 교정하기 위한 시스템으로 표준입자 발생을 위한 Atomizer (TSI®, USA)와 입자의 진공 공기역학적 직경의 분리를 위하여 DMA(Differential Mobility Analyzer)가 장착된 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, TSI®, USA), 입자의 개수 조절을 위한 CPC (Condensation Particle Counter, TSI®, USA)로 구성하였다.

2.2.2 측정 원리

HR-ToF-AMS의 측정 방법 및 원리에 대한 내용들은 여러 연구사례들에서 자세히 소개되었다(Zhang et al., 2014; Jimenez et al., 2003). 본 연구에서 사용한 ToF-AMS의 측정원리는 Inlet을 통해 들어온 에어로졸이 공기역학적 렌즈(Aerodynamic lens)를 통과하여 좁은 빔의 형태로 모이고, 입경 분리부 (Particle drift region)

를 지나 ~600°C로 가열되어 있는 열증발기(Thermal vaporizer)에 충돌된 후 증기화되어 비행시간챔버 질량 분석기(Time of flight mass spectrometer, ToFwerk®, Switzerland)를 지나 MCP(Multi-Channel Plate, Photonic®, USA)에서 분석되는 구조이다(Quan et al., 2014; Sun et al., 2010).

2.2.3 교정 및 자료 분석

교정을 위한 입자의 진공 공기역학적 직경, 입자의 이온화 효율(IE)의 산정은 Drewnick와 Jayne이 사용한 표준 프로토콜에 따라 수행하였다(Drewnick et al., 2005; Jayne et al., 2000). 먼저 에어로졸 입자의 입경에 따른 비행속도를 교정하기 위하여 밀도가 1.05인 구형의 직경을 가진 표준입자(PSL, NIST®, USA)를 증류수에 희석 후 Atomizer를 사용하여 발생시켰으며, 100 nm부터 700 nm의 입자를 일정한 단계별로 발생시켜 이동 시간을 측정하였다(Huang et al., 2010). 진공공기동역학적 직경에 대한 입자의 속도는 아래의 식(1)에 의하여 계산하였다(Kim et al., 2012; Jayne et al., 2000).

$$V = V_L + \frac{V_a - V_L}{1 + \left(\frac{D_{va}}{D^*}\right)^b} \tag{1}$$

- $V_L$  = velocity of gas in the lens (m/s)
- $V_a$  = velocity of gas at the lens (m/s)
- $D_{va}$  = vacuum aerodynamic diameter of PSL (nm)
- $D^*$  = empirical parameter known as scale diameter (nm)
- $b$  = empirical parameter

입자의 이온화 효율(IE, Ionization Efficiency)은 질산암모늄(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) 용액을 이용하여 측정의 시작, 중간 그리고 끝에 교정되었다. Atomizer를 사용하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 입자를 발생시킨 뒤 DMA를 이용하여 각각 300 nm와 350 nm의 입자에 대하여 HR-ToF-AMS에 주입하여 이온화 효율을 측정한 뒤 농도 산정에 사용하였다. 이때 CPC (Condensation Particle Counter, TSI, USA)를 동시에 측정하여 HR-ToF-AMS의 측정값과 질량 농도를 검증하는 데 이용하였다. 주요 화학종의 상대이온화효율(RIE, Relative Ionization Efficiency)은 실험과 경험적으로 증명된 Organic (1.4), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (1.1), Cl<sup>-</sup> (1.3)을 각각 이용하였으며(Alfarra et al., 2004),

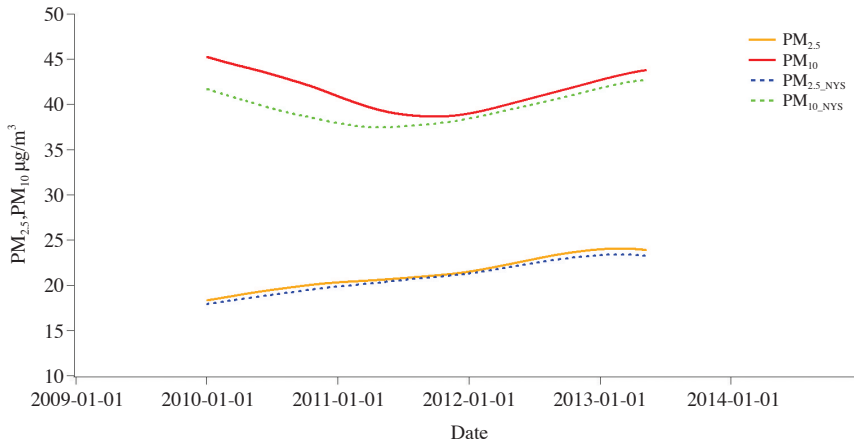


Fig. 3. Long-trend of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> concentrations by KZ filter at Baengnyeong super site.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> RIE는 IE 교정 중에 측정된 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>를 통해 산출된 3.5를 적용하였고, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>는 1.4를 적용하였다 (Setyan *et al.*, 2012). HR-ToF-AMS에서 입자의 포집 효율(CE)은 vaporizer에서 입자의 바운스 효과(bounce effect)로 인한 입자의 불완전한 검출 비율을 의미한다 (Matthew *et al.*, 2008). HR-ToF-AMS 장비를 이용한 다양한 필드 캠페인에서, 모든 종류에 대한 CE 상수는 다른 장비들과 비교를 통해서 검증되기도 하며(Sun *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2010; Aiken *et al.*, 2008; Decarlo *et al.*, 2008), 그 이유로 CE는 화학적 구성성분(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>의 질량비율), 산도(Acidity), 수분함량(Water contents) 그리고 입자의 상(phase)에 따라 증가 또는 감소할 수 있기 때문이다(Kleinman *et al.*, 2008). 우리는 본 연구에서 모든 종에 대하여 CE상수 0.5를 이용하였으며, 그 이유로써 유입시료는 Nafion dryer를 거쳐 충분히 건조된 결과 유입시료의 상대습도를 30% 이하로 유지하였기 때문에 입자의 바운스 효과를 충분히 낮추었기 때문이다. 최근에는 AMS에서 CE와 관련된 불확실성의 요인을 낮추기 위해서 화학적 성분에 따라 CE를 계산하는 분석기법이 개발되었으며, CE=0.5 고정값을 사용하는 것보다 불확실도를 낮출 수 있는 것으로 보고 되었으나(Middlebrook *et al.*, 2012), 개발된 분석기법이 자료처리 소프트웨어로 제공되는 데 시간차가 있어 본 연구에서는 이 기법을 적용하지 못하였으며, CE=0.5 고정값을 적용하여 측정자료를 분석하였고, 이에 따라 본 연구에서 제시하는 HR-ToF-AMS 측정결과

자료에는 CE=0.5 고정사용에 따른 오차 요인을 충분히 내재하고 있음을 밝혀둔다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 백령도 PM 농도의 장기 변동

2009년에서 2014년까지 백령도 측정소의 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 시간자료를 산술평균하여 일평균 값으로 환산하였으며, 장기 변화를 분석하기 위해 사용하는 KZ(Kolmogorov-Zurbenco) 필터를 이용하였다(Hogrefe *et al.*, 2003). 본 연구에서는 Lee *et al.* (2008), Civerolo *et al.* (2003)의 연구에서 사용된 계산법을 이용하여 장기변동 요인을 추출하였으며, 사용된 필터의 차수는 KZ(365, 3)이었다. 또한 단기간 동안 미세먼지 농도에 영향을 미치는 황사일을 포함한 자료(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>)와 제거한 자료(PM<sub>2.5,NYS</sub>, PM<sub>10,NYS</sub>)로 각각 구분하여 그림 3에 나타내었다.

장기 변동 분석결과, 2010년 이후 감소추세에 있던 PM<sub>10</sub>의 질량 농도는 2012년 이후 증가하는 경향을 보였으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우는 2010년부터 2013년까지 꾸준히 증가하고 있음을 나타내었다. 황사기간을 빼고 분석한 결과 그래프의 경우 PM<sub>10</sub>에서는 2011년까지는 비황사기간과 차이가 있음을 보여주고 있으나, 그 이후에는 큰 차이를 보이지 않았다. PM<sub>2.5</sub>의 경우에는 황사기간을 빼고 분석한 자료와 포함한 자료에 있어서



**Table 2. Summary of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentration at Baengnyeong super site from 2009 to 2014.**

(unit: µg/m <sup>3</sup> )					
Year	Item	PM <sub>10</sub>	NYS*-PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NYS-PM <sub>2.5</sub>
2009	Avr.	52.1	48.2	19.0	18.7
		(38.9)	(28.8)	(13.5)	(13.4)
2010	Avr.	44.8	42.1	17.9	17.6
		(33.3)	(29.8)	(13.6)	(13.5)
2011	Avr.	39.0	35.4	19.9	19.4
		(31.3)	(20.4)	(13.7)	(13.4)
2012	Avr.	37.6	37.3	20.0	20.0
		(23.1)	(22.4)	(13.9)	(13.9)
2013	Avr.	43.4	42.8	24.7	24.1
		(27.7)	(26.6)	(20.0)	(19.9)
2014	Avr.	47.0	45.3	23.6	23.0
		(30.7)	(28.0)	(21.8)	(21.3)

mean (± standard deviation)  
 NYS\*: Non Yellow Sand period

큰 차이가 없으며, 이는 황사입자가 대부분 조대영역에 포함되어 있기 때문으로 생각된다. 표 2에는 2009년부터 2014년까지 백령도에서 측정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 농도 값을 요약하여 나타내었다. PM<sub>10</sub>의 연평균 농도는 2009년 52.1 µg/m<sup>3</sup>에서 2012년 37.6 µg/m<sup>3</sup>로 감소한 뒤, 2014년 47.0 µg/m<sup>3</sup>로 증가하였고, 반면 PM<sub>2.5</sub>의 경우 2010년 연평균 17.9 µg/m<sup>3</sup>에서 2013년의 연평균 24.7 µg/m<sup>3</sup>까지 약 6.8 µg/m<sup>3</sup> 증가하였으며, 2014년은 23.6 µg/m<sup>3</sup>로 소폭 감소한 것으로 분석되었다. 종합해보면 미세먼지의 측정 농도는 최근 증가하는 경향을 보이고 있으며, KZ 필터가 적용된 장기 변동 분석결과 또한 이를 잘 반영하고 있는 것으로 파악된다. 특히 PM<sub>10</sub>의 경우 최근 증가 요인에는 황사에 대한 영향이 크지 않으며, 그 원인으로 황사 이외에 다른 인위적인 영향이 고려될 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2 백령도 대기 중 PM<sub>10</sub> 성분의 분포 특성

#### 3.2.1 측정기간의 기상 특성

2012년부터 2013년까지 백령도 기상대의 기상 관측 자료를 이용하여 측정기간 및 계절별로 풍향 및 풍속, 기온, 상대습도를 표 3에 정리하였으며, 풍향 및 풍속의 바람장미를 그림 4에 나타내었다. 전 측정기간 기온은 10.6°C이며, 상대습도(Relative Humidity)는 70.7%,

**Table 3. Summary on the meteorological parameters at Baengnyeong super site during 2012 to 2013.**

Season	Item	Wind direction (degree)	Wind speed (m/s)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)
Total	Avr.	290.9	4.6	10.6	70.7
	Std.	±99.6	±2.4	±10.0	±18.5
	Min.	0.0	0.0	-12.7	9.0
	Max.	360.0	21.0	31.0	100.0
Spring	Avr.	264.2	5.2	7.9	67.3
	Std.	±93.7	±2.4	±6.2	±19.7
	Min.	0.0	0.0	-4.8	16.0
	Max.	360.0	18.1	23.9	99.0
Summer	Avr.	194.8	4.4	22.2	85.5
	Std.	±91.1	±2.4	±3.0	±13.4
	Min.	0.0	0.0	11.8	27.0
	Max.	360.0	21.0	31.0	100.0
Fall	Avr.	299.5	4.4	13.8	67.0
	Std.	±98.8	±2.5	±6.2	±15.9
	Min.	0.0	0.0	-2.7	9.0
	Max.	360.0	19.8	27.3	99.0
Winter	Avr.	320.8	4.3	-1.7	62.8
	Std.	±108.9	±2.1	±3.9	±15.4
	Min.	0.0	0.0	-12.7	17.0
	Max.	360.0	17.1	10.3	96.0

북서풍이 주풍이고, 풍속은 4.6 m/s로 나타나, 백령도 측정지점의 측정결과는 북서풍의 영향을 강하게 받고 있는 것으로 판단된다. 계절에 따른 기상 특성을 살펴보면, 여름의 기온은 22.2°C, 겨울은 -1.7°C로 23.9°C의 차이를 보이며, 상대습도는 여름에 85.5%로 높으며, 다른 계절은 62.8%에서 67.3%로 유사한 수준이었다. 풍속은 봄이 5.2 m/s로 가장 높으며, 타 계절은 4.3 m/s에서 4.4 m/s로 차이를 보이지 않았다. 그림 4의 바람장미에서 전체 기간의 풍향은 서풍에 가까운 북서풍이 우세하였고, 풍속은 4 m/s에서 8 m/s의 범위를 나타내고 북서풍이 출현할 때 풍속도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 가을, 겨울, 봄의 북서풍 발생빈도는 47%와 57%, 35%로 여름의 19%에 비하여 높았으며, 여름은 남서풍이 우세하며 약 31%를 나타내었다.

#### 3.2.2 입자상 물질의 농도 및 화학적 성분 구성

2012년과 2013년의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>10</sub>의 시간에 따른 질량 농도, PM<sub>10</sub>의 성분 농도와 조성비의 백분율을 그림 5(2012년도)와 그림 6(2013년도)에 각각 나타내었다. 전체 PM<sub>10</sub> 평균 농도는 40.2 µg/m<sup>3</sup>였으며

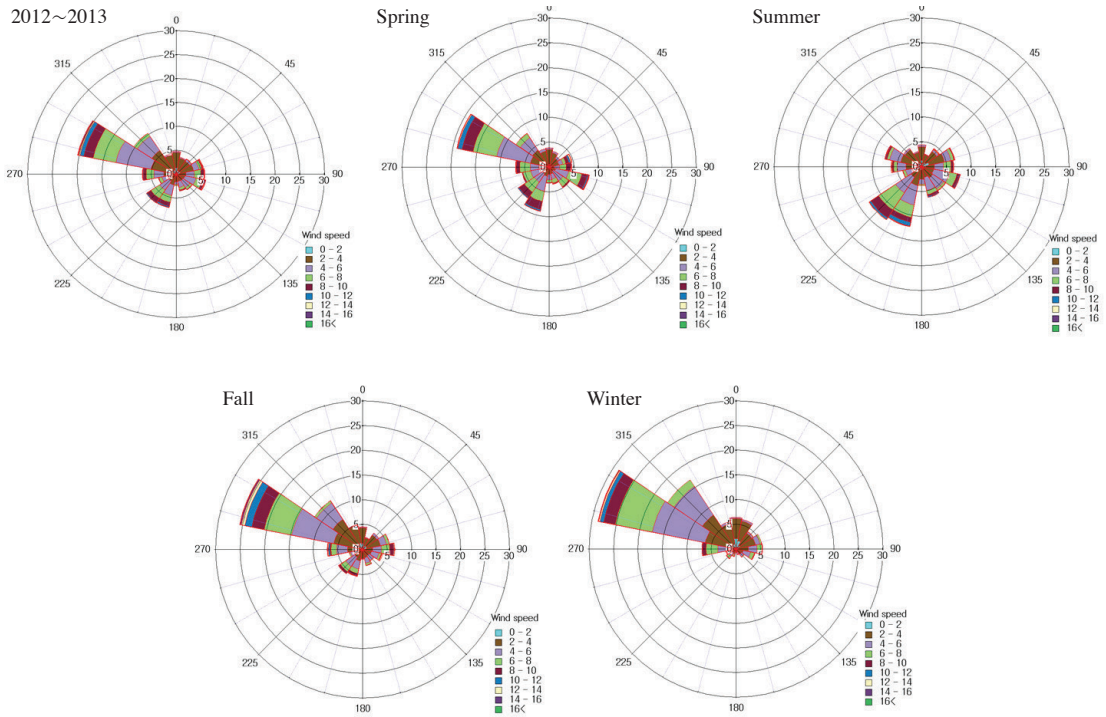


Fig. 4. Wind rose plot at Baengnyeong super site during 2012 to 2013.

PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도는 23.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. HR-ToF-AMS에서 측정된 Organic,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 합으로 계산된 PM<sub>1.0</sub> 농도는 13.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM<sub>1.0</sub> 중 PM<sub>2.5</sub>의 분포비율은 58.8%, PM<sub>1.0</sub>은 32.1%이며, PM<sub>2.5</sub> 중 PM<sub>1.0</sub>은 54.6%로 분석되었다. 중국에서 측정된 자료와 비교해보면, 중국 란저우의 PM<sub>2.5</sub> 중 PM<sub>1.0</sub>은 51% (Xu *et al.*, 2014), 중국 북경은 56% (Zhang *et al.*, 2011)로 백령도의 결과는 중국 대도시의 분포비율과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

PM<sub>1.0</sub>의 화학적 성분을 살펴보면, 2012년의 Organic,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ 의 연평균 농도는 각각 3.41, 4.88, 1.50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었으며, 2013년의 경우는 각각 4.73, 5.79, 1.77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2012년보다 증가된 값을 보여주었다. 그림 5(b)와 그림 6(b)에 나타난 2012년과 2013년도 PM<sub>1.0</sub> 성분 구성 비율을 살펴보면,  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 44%와 41%로 가장 높았으며, 다음으로 Organic이 32%와 37%를 차지하였고,  $\text{NH}_4^+$ 는 13%와 12%를 보였으며,  $\text{NO}_3^-$ 의 경우 평균 10% 수준으로, Organic과  $\text{SO}_4^{2-}$  성분에 비하여 매우 낮은 구성 비율을 나타내었다. 그러

므로 측정기간 동안의 평균자료를 통해 백령도 PM<sub>1.0</sub>의 주요 화학적 성분으로는  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 가장 우세하고, 그 다음으로는 Organic 성분임을 알 수 있다.

백령도에서 측정된 PM<sub>1.0</sub>의 화학적 성분의 수준을 비교하기 위하여 다른 지역(일본과 중국)에서 동일한 측정시스템인 AMS로 연구한 자료들에 대하여 Organic,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 성분들을 표 4에 정리하였으며 백령도의 관측 값과 비교해 보았다. 그 결과 백령도는  $\text{NO}_3^-$ 의 경우 중국 북경과 청도에 비하여 약 7.2배에서 10.2배 낮았으며, 일본 도쿄의 봄과 겨울보다는 낮고 여름과 가을보다는 높았지만 그 차이는 크지 않았다.  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도는 중국 지역보다 약 1.6배에서 3.8배 낮은 수준을 보였으며, 일본의 전 계절 대비 1.3배에서 1.6배 높은 농도로 분포하였다. Organic은 모든 지역 대비 낮은 농도 수준이나 일본과 비교하여 1.4배에서 1.7배 낮아 차이가 크지 않았다. 이를 통해 백령도 지역은 도쿄의 도심보다 Organic 성분은 낮은 수준이나,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 높은 특성을 보이고 있으며, 중국의 베이징과 청도 지역보다는 매우 낮은 수준으로 파악된다. 그러

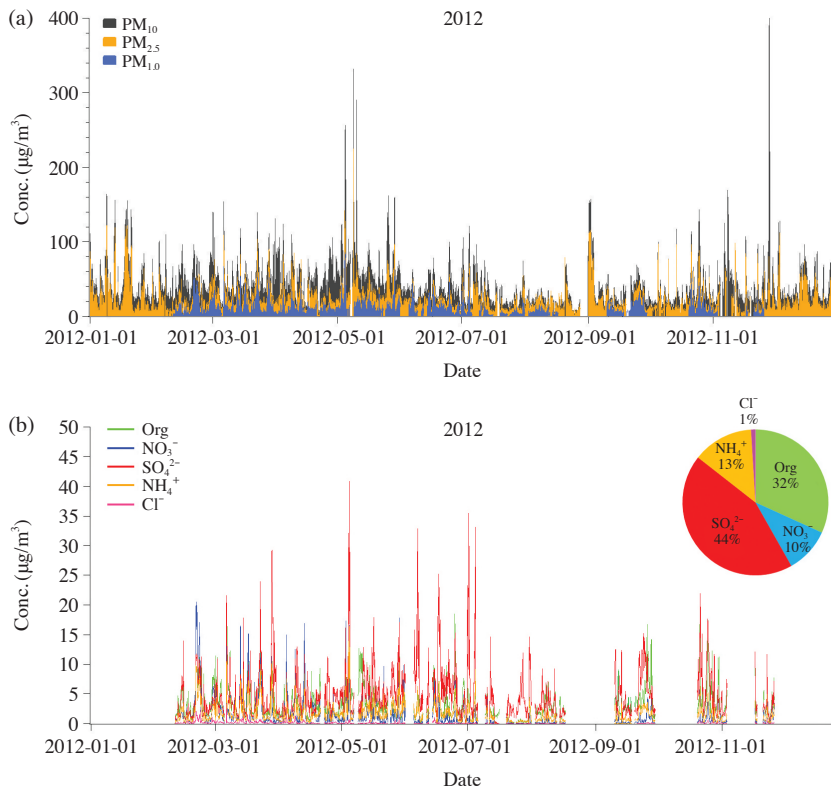


Fig. 5. The time series plot of (a) PM concentrations, (b) PM<sub>1.0</sub> species concentration and PM<sub>1.0</sub> composition (%) in 2012.

나 백령도가 서해상에 위치하며 백령도 내 인위적인 배출을 고려할 만한 배출원이 존재하지 않는 특성을 고려했을 때에 PM<sub>1.0</sub>에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 성분이 가장 많이 차지하고 있는 것은 외부 유입가능성을 배제할 수 없으며, 지리적인 입지를 고려할 경우 편서풍대 기류 상에서 유입될 수 있는 대도시 북경 또는 산둥성과 같은 공업 지역에서 이동하는 대기오염물질의 영향을 받을 수 있을 것으로 생각된다. 이를 좀 더 명확히 파악하기 위해서 3.4절에서는 풍향과 유입기류에 따른 분석을 실시하였다.

3.2.3 무기 및 유기성분의 계절 변화

계절별 PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> 질량 농도 및 PM<sub>1.0</sub>의 성분 농도를 표 5에 나타내었다. PM<sub>10</sub> 질량 농도는 봄철에 48.8 µg/m<sup>3</sup>, 54.2 µg/m<sup>3</sup>로 최고값을 나타내었다. 봄철 다음으로 겨울철이 38.6 µg/m<sup>3</sup>, 52.3 µg/m<sup>3</sup>로 높은 농도를 보였으며, 여름철에는 26.3 µg/m<sup>3</sup>, 32.3 µg/m<sup>3</sup>로

가장 낮은 수준이었다. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1.0</sub>도 PM<sub>10</sub>과 유사한 계절 경향을 보이지만 2013년 여름철 PM<sub>2.5</sub> 농도는 가을철보다 높으며, PM<sub>1.0</sub>의 경우는 17.7 µg/m<sup>3</sup>로 계절 중 가장 높은 농도를 보였다. 2012년부터 2013년까지 PM<sub>1.0</sub> 평균 농도는 봄철이 14.5 µg/m<sup>3</sup>, 여름철이 13.1 µg/m<sup>3</sup>, 가을철이 9.86 µg/m<sup>3</sup>, 겨울철이 14.2 µg/m<sup>3</sup>로 봄철이 가장 높으며, 겨울철과 유사한 농도 수준으로 나타났다. 그리고 여름철이 가을철에 비하여 높은 농도를 나타내었다.

특히 PM<sub>1.0</sub>의 화학적 성분을 살펴보면, 겨울을 제외한 모든 계절에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 성분이 가장 높은 수준으로 평균 농도는 4.02 µg/m<sup>3</sup>부터 7.14 µg/m<sup>3</sup>까지의 범위로 나타났다. 겨울철에만 Organic 성분이 가장 높은 것으로 파악되었다. 1990년대 말부터 2007년도까지 세계 다양한 지역에서 AMS를 이용한 PM<sub>1.0</sub> 측정결과를 정리한 Jimenez *et al.*(2009)의 경우 PM<sub>1.0</sub>의 주요 성분으로 지역에 따라 편차는 있으나 대부분의 지역에서



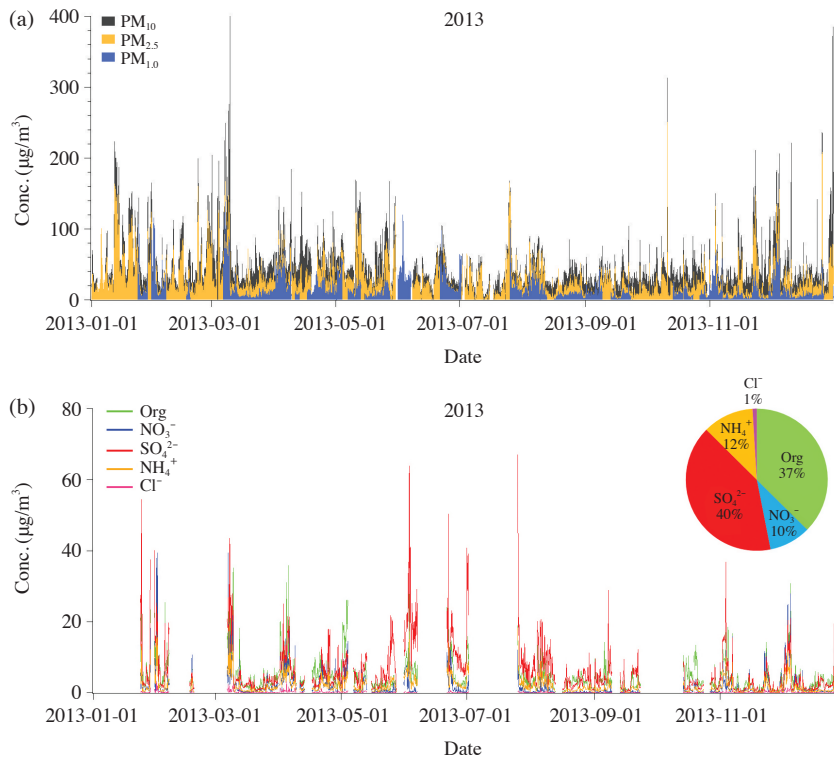


Fig. 6. The time series plot of (a) PM concentrations, (b) PM<sub>1.0</sub> species concentration and PM<sub>1.0</sub> composition (%) in 2013.

Table 4. Comparison of mean chemical species data for ambient filed campaign studies.

(unit: µg/m<sup>3</sup>)

Campaign	Period	Site class (Location)	AMS mean mass concentration (effective size range : 50~1,000 nm)				Reference
			Organic	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
a)IMPACT	2003.01. (winter)	Urban (Univ. of Tokyo)	6.7	2.5	3.1	2.2	Takegawa <i>et al.</i> (2006)
	2003.07.~08. (summer)	Urban (Univ. of Tokyo)	5.7	3.2	1.0	1.8	
	2003.09.~10. (fall)	Urban (Univ. of Tokyo)	7.1	1.8	1.0	1.3	
	2004.01.~02. (winter)	Urban (Univ. of Tokyo)	5.8	1.7	2.8	2.3	
b)CAPTAIN	2011.05.~06. (spring, summer)	Urban (Changdao)	13.4	8.3	12.2	6.5	Hu <i>et al.</i> (2013)
China	2006.07 (summer)	Urban (Beijing)	28.1	20.3	17.3	13.1	Sun <i>et al.</i> (2010)
This Study	2012.01.~2013.12. (spring~summer)	Remote (Baengnyeong)	4.1	5.3	1.7	1.8	-

a)IMPACT: Integrated Measurement Program for Aerosol and oxidant Chemistry in Tokyo

b)CAPTAIN: Campaign of Air Pollution At INshore Areas of Eastern China

Organic 성분이 주도하면서, 공업지역의 경우 화석연료 배출원의 영향으로 인해 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 비율이 상대적으로 증가하고, 도시지역의 경우 자동차와 같은 이동

오염원의 영향을 받아 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>보다는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분의 비율이 높았는데, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 두 물질이 Organic보다 높은 경우는 비교적 드물었다. 그리고 Choi *et al.* (2013)

**Table 5. Concentration of seasonal major chemical species in PM<sub>1.0</sub> by HR-ToF-AMS at the Baengnyeong super site from 2012 to 2013.** (unit: µg/m<sup>3</sup>)

Year	Season	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1.0</sub>	Org.	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
2012~ 2013	Spring	51.4 (32.4)	29.0 (20.5)	14.5 (13.2)	4.56 (4.31)	5.40 (4.89)	2.29 (3.25)	0.17 (0.28)	2.10 (2.03)
	Summer	29.2 (19.9)	18.7 (15.8)	13.1 (13.6)	3.40 (3.38)	7.14 (7.65)	0.71 (1.65)	0.05 (0.10)	1.78 (2.04)
	Fall	34.0 (27.3)	18.6 (18.0)	9.86 (8.46)	3.71 (3.06)	4.02 (3.89)	0.87 (1.46)	0.08 (0.12)	1.18 (1.19)
	Winter	45.3 (35.8)	27.6 (26.7)	14.2 (17.1)	4.87 (4.97)	4.47 (5.68)	2.83 (4.96)	0.22 (0.36)	1.82 (2.48)
	Total	40.2 (30.9)	23.7 (21.4)	13.0 (13.1)	4.13 (3.99)	5.33 (5.68)	1.66 (3.08)	0.13 (0.24)	1.76 (1.97)
2012	Spring	48.8 (29.0)	27.0 (17.6)	13.2 (10.3)	3.77 (2.71)	5.08 (4.14)	2.20 (2.91)	0.16 (0.25)	2.12 (1.83)
	Summer	26.3 (17.2)	16.0 (10.3)	8.16 (7.21)	2.04 (1.89)	4.62 (4.60)	0.40 (0.84)	0.03 (0.07)	1.06 (1.12)
	Fall	34.0 (31.3)	20.1 (19.3)	11.5 (8.25)	4.18 (3.17)	5.11 (3.89)	0.76 (1.07)	0.07 (0.10)	1.37 (1.08)
	Winter	38.6 (25.3)	22.3 (20.2)	12.4 (11.9)	3.80 (2.70)	3.39 (2.91)	3.02 (4.33)	0.27 (0.39)	0.94 (2.17)
	Total	37.1 (27.5)	21.5 (17.7)	11.6 (9.6)	3.44 (2.76)	4.79 (4.13)	1.54 (2.63)	0.12 (0.23)	1.68 (1.66)
2013	Spring	54.2 (35.3)	31.1 (22.9)	16.1 (15.9)	5.52 (5.53)	5.82 (5.64)	2.45 (3.64)	0.19 (0.32)	2.09 (2.24)
	Summer	32.3 (22.0)	21.6 (19.7)	17.7 (16.3)	4.67 (3.93)	9.50 (9.06)	1.01 (2.11)	0.06 (0.11)	2.45 (2.44)
	Fall	34.0 (22.7)	17.2 (16.7)	8.84 (8.43)	3.42 (2.95)	3.33 (3.73)	0.94 (1.66)	0.08 (0.13)	1.06 (1.24)
	Winter	52.3 (43.2)	33.0 (31.1)	15.0 (19.1)	5.38 (5.67)	4.98 (6.53)	2.74 (5.23)	0.19 (0.34)	1.76 (2.62)
	Total	43.4 (33.7)	25.8 (24.3)	14.2 (15.4)	4.72 (4.71)	5.79 (6.69)	1.77 (3.41)	0.13 (0.25)	1.82 (2.20)

mean (± standard deviation)

또한 AMS를 이용한 연구 결과를 비교하면서 도시지역의 경우 유기성분과 nitrate 성분이 주요한 원인 물질들이며, 기류가 화석연료를 사용하는 지역을 통과하는 경우 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 성분이 증가하는 경향을 보이고, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분은 도시지역에 존재하는 자동차와 같은 오염원에서 배출되는 NO<sub>2</sub>의 영향을 받아 급격히 증가할 수 있다고 정리하였다. 이를 종합해 고찰해보면 백령도의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도는 과거에 AMS를 이용하여 측정된 세계 여러 지역에서의 농도 수준보다 비교적 높은 수준으로서, 그리스에서 측정된 사례에서 화석연료 오염원의 영향을 받는 경우 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 PM<sub>1.0</sub> 성분을 주도하기 때문에 (Schneider *et al.*, 2004), 백령도의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 성분의 농도 수준과 PM<sub>1.0</sub>에서의 구성비를 고려하면 외부의 영향을 강하게 받고 있는 것으로 판단할 수 있다. 최근 중국에서 연구된 사례를 살펴보면, 중국 란저우와 동부지역의 경우 여름철 온도와 습도가 높고 일사량이 풍부한 조건에서 대기 중의 SO<sub>2</sub> 성분이 광화학 반응 (Gas-phase photochemical process)과 액상 반응 (Aqueous-phase process)을 통해 AMS로 측정된 입자상 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 성분의 농도 수준에 영향을 미치는 것으로 파악되고 있어 (Xu *et al.*, 2014), 백령도에서 PM<sub>1.0</sub>의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 배경농도를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 추후 가스상 SO<sub>2</sub> 성분과도 비교해 볼 필요가 있다. 백령도 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분의 경우 농도 수준은 여름철에 감소하고 겨울철에 증가하였으며, 계절 변동에 있어서 중국 북경과 청도에서 연구된 사례와

유사한 경향을 취하는 것은, 계절에 따른 온도 변화가 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분의 휘발도에 영향을 미치면서 이로 인하여 겨울철에 농도가 높아지는 것으로 파악된다 (Hu *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2011).

### 3.3 PM<sub>1.0</sub> 성분의 입경 분포

그림 7에는 계절별로 나누어 2012년과 2013년의 성분별 입경분포를 나타내었다. 계절별로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 피크는 여름이 620 nm로 가장 크며 반면 겨울의 입경은 482 nm로 계절 중 가장 작았다. 봄철과 가을철은 563 nm, 548 nm로 유사하였다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>도 여름이 529 nm로 가장 크며, 타 계절은 447 nm에서 494 nm로 유사하였다. 이런 계절 간 입경분포는 Organic도 동일하며, 여름이 479 nm로 가장 크고, 타 계절은 446 nm에서 447 nm로 유사하여 전 성분의 피크가 집적모드 (Accumulation mode)인 200 nm에서 800 nm의 입경범위에 존재하였다.

Sun *et al.* (2010)의 여름철과 Huang *et al.* (2010)의 여름철 및 가을철 중국 북경 대기의 측정결과에서 주요 성분은 Organic으로 검출되었고 유기 및 무기성분의 피크는 약 600 nm에 나타났다. 하지만 Organic의 경우 공통적으로 100 nm 이하까지 농도가 분포하는 특징을 나타내었다. Xu *et al.* (2014)의 중국 란저우 여름 측정 결과에서도 무기성분의 피크는 약 400 nm, Organic은 100 nm에서 500 nm까지 넓게 분포하는 피크를 나타내었다. Lee *et al.* (2002)은 디젤엔진에서 배출되는 입자

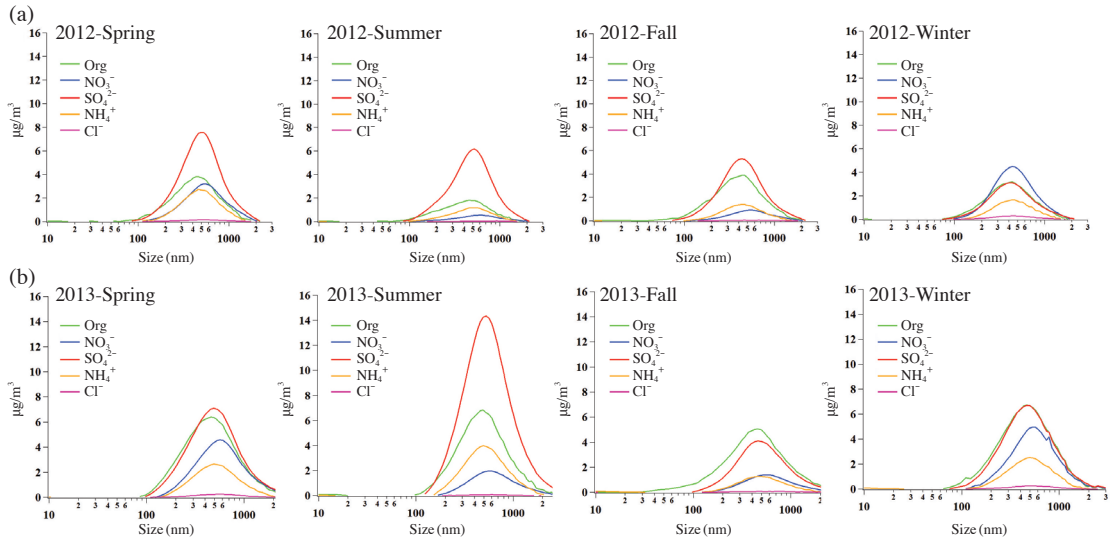


Fig. 7. Size distributions of seasonal major chemical species in PM<sub>1.0</sub> at Baengnyeong super site in 2012 (a) and 2013 (b).

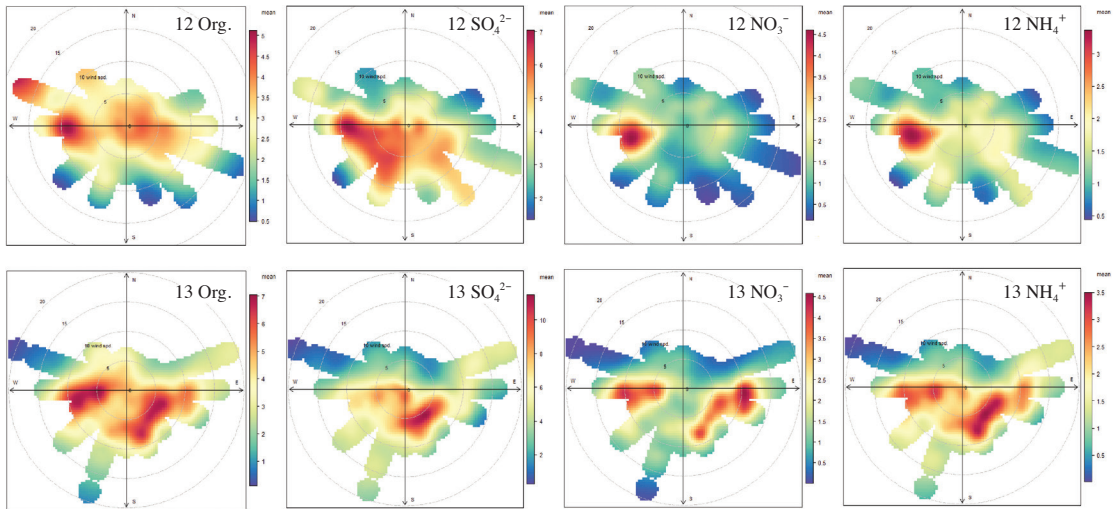


Fig. 8. Chemical component rose plot at the Baengnyeong Super site in 2012 and 2013.

의 특성을 연구하였다. 배출된 주요 입자는 Organic 성분으로 30 nm에서 40 nm의 작은 직경을 가지며, 디젤 엔진과 같은 일차 오염원에서 직접 배출되는 입자는 100 nm 이하의 작은 영역에 존재하는 것으로 보고하였다. 위의 연구사례들을 종합하면 대기 중에서 측정된 입자는 주로 집적모드에 존재하지만 대도시와 같이 일차 배출원이 영향을 받을 시에 Organic 성분은 100 nm 이

하의 작은 영역까지 농도가 분포하는 것을 알 수 있다. 이와 관련하여 본 연구에서 측정된 입자들은 100 nm 이하의 입경에서 검출되지 않아 일차 배출에 의한 영향이 적고 전 계절에서 모든 성분들이 집적모드에 집중되어 있는 것으로 이차 생성 입자 내지 산화된 유기물 형태로 내부에 무기물이 혼합된 입자로 판단할 수 있다(Salcedo *et al.*, 2006).

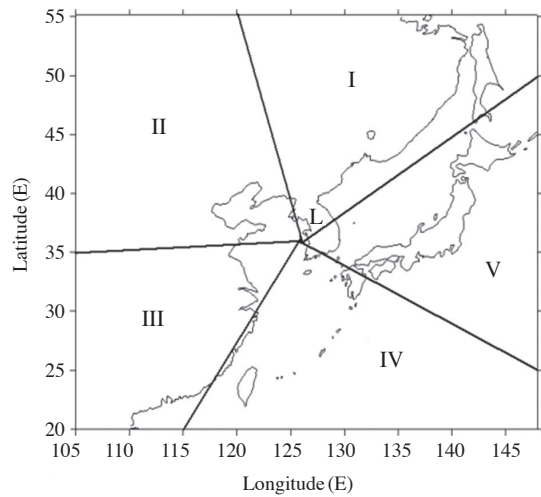
**3.4 풍향과 기류에 따른 농도 분포**

지리적으로 편서풍대에 위치한 한반도의 경우 일반적으로 북서쪽의 중국 대륙으로부터 이동해오는 기류의 영향이 큰 것으로 알려져 있으며(Lim *et al.*, 2013), 이러한 특성을 고려하여 풍향에 따라 PM<sub>1.0</sub> 성분의 농도변화를 파악하기 위하여 그림 8에 풍향에 따라 Organic, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 농도 분포를 나타내었다.

2012년도에는 주로 서풍에서 모든 성분이 높은 농도 수준을 보였다. 특히 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 경우 풍속 5 m/s 이상의 서풍에서 고농도가 출현하였으며, Organic은 서풍과 북서풍, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 경우는 서풍과 남서풍 조건에서 농도가 증가한 것으로 나타났다. 2013년도에도 서풍의 영향을 받는 경우 모든 성분이 높은 농도를 나타내어 2012년도 측정결과와 유사한 경향을 보였으나 한반도 내륙을 거쳐 오는 남동풍의 영향을 받은 경우에도 고농도 현상이 나타나, 남동풍 조건에서는 한반도 내륙에서 발생된 대기오염물질의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 풍향을 각각 NE(0°~90°), SE(90°~180°), SW(180°~270°), NW(270°~360°)의 4개 방향으로 분류하여 발생 빈도수를 분석하면, 각각 NE 19%, SE 16%, SW 25%, NW 39%로 남동풍의 영향을 받은 기간은 다른 사례들에 비해 적은 것으로 파악된다.

그림 8은 각각의 성분에 대한 농도를 백령도 기상대에서 측정된 풍향과 풍속결과를 바탕으로 나타낸 농도

장미 그래프로서 국지적인 영역에 국한되기 때문에, 그림 9에는 백령도를 중심으로 기류의 유입을 광역적으로 파악하기 위해 5개 권역으로 구분하였으며, 역궤적 분석은 하루 간격으로 72시간 동안의 기류의 이동을 살펴보았으며, 분류된 권역에 따른 기류의 발생 횟수와 기류의 이동경로에 따른 Organic과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, PM<sub>1.0</sub>의 평균 농도를 2012년, 2013년으로 나누어 표 6에 정리하였다. I 권역은 중국 북동부와 북



**Fig. 9. Divided regions to classify the pathway of air mass.**

**Table 6. The concentration of Organic, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> and PM<sub>1.0</sub> for inflow area.** (unit: µg/m<sup>3</sup>)

Total	Num.	Organic	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	PM <sub>1.0</sub>
I	117	4.95	1.36	4.37	1.44	0.09	12.2
II	399	4.22	1.99	5.14	1.84	0.15	13.3
III	65	5.18	2.02	8.32	2.65	0.16	18.3
IV	100	2.36	0.76	4.81	1.27	0.07	9.26
V	44	3.60	0.86	7.35	1.84	0.07	13.7
2012	Num.	Organic	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	PM <sub>1.0</sub>
I	60	4.47	1.15	4.63	1.54	0.09	11.9
II	205	3.66	1.91	4.98	1.86	0.16	12.6
III	23	3.28	1.32	5.73	1.88	0.11	12.3
IV	50	1.89	0.69	3.96	1.08	0.06	7.68
V	28	3.05	0.97	3.97	1.35	0.08	9.42
2013	Num.	Organic	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	PM <sub>1.0</sub>
I	57	5.29	1.51	4.18	1.37	0.09	12.4
II	194	4.70	2.06	5.27	1.83	0.15	14.0
III	42	6.42	2.48	10.0	3.15	0.19	22.2
IV	50	3.16	0.89	6.26	1.60	0.09	12.0
V	16	4.54	0.67	13.1	2.66	0.05	21.0

한을 포함한 지역이고, II 권역은 산둥반도와 발해만 연안을 포함한 중국 북부 지역이며, III 권역은 중국 동지나해를 포함한 중국 중·남부 지역이고, IV 권역은 중국과 일본 사이의 제주도를 포함한 남태평양 지역이고, V 권역은 일본을 포함한 북태평양 지역이다(Han *et al.*, 2006).

2012년부터 2013년까지 기류의 이동이 가장 많았던 지역은 산둥반도와 중국 북경 및 발해만 연안을 포함한 II 권역으로 약 55%의 빈도수를 나타내어 절반 이상을 차지하였다. II 권역 다음으로 많은 빈도수를 나타낸 지역은 중국 북동부와 북한을 포함한 I 권역으로 약 16%의 빈도수를 나타내었으며, 제주도를 포함한 남태평양 지역인 IV 권역이 약 14%로 I 권역과 유사한 빈도수를 나타내었다. 반면 중국 동지나해와 중국 중·남부 지역을 포함한 III 권역과, 일본을 포함한 북태평양 지역인 V 권역은 각각 9%와 6%로 낮은 빈도수를 보였다.

분류된 권역에 따른 기류의 발생 횟수와 기류의 유입경로에 따른 농도분포를 표 6에 정리하였다.

전체 측정기간을 대상으로 빈도수는 65회로 높지 않으나 산둥성 및 상해를 포함한 최대 공업지역인 III 권역은 PM<sub>1.0</sub>의 질량 농도가 평균 18.3 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높았고, Organic 5.18 µg/m<sup>3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 8.32 µg/m<sup>3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 2.02 µg/m<sup>3</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 2.65 µg/m<sup>3</sup>로 모든 성분의 농도 또한 가장 높은 것으로 파악되었다. 반면에 주로 해양지역인 IV 권역의 영향을 받은 경우 PM<sub>1.0</sub>은 9.26 µg/m<sup>3</sup>로 가장 낮았고, Organic 2.36 µg/m<sup>3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 4.81 µg/m<sup>3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0.78 µg/m<sup>3</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 1.84 µg/m<sup>3</sup>로 모든 성분의 농도 또한 가장 낮은 것으로 파악되었으며, III 권역과 IV 권역이 명확한 대비를 나타내는 결과를 보여주었다. 빈도수가 가장 많은 399회를 기록했던 II 권역의 경우 전반적으로 III 권역보다 낮은 농도 수준을 보이는 데 반하여 북한을 포함하는 I 권역에 비해 PM<sub>1.0</sub>과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 높은 수준을 보였다. 하지만 Organic 성분은 I 권역이 II 권역에 비해 높았으며, 다른 권역들은 주요 성분이 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>인 것에 반하여 Organic이 4.95 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높은 것으로 파악되었다. 특징적으로 2013년도에는 한반도의 중남부 해안을 포함하는 V 권역의 영향을 받은 경우에는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 평균 농도가 13.1 µg/m<sup>3</sup>로 다른 권역에 비해 가장 높은 농도 수준을 보였으며, 이것은 그림 8의 2013년도 농도장미에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에 대한 결과와 일치하는 것으로 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 III 권역의 중국뿐만 아

니라 V 권역의 한반도 내륙에 대한 영향도 무시할 수 없음을 보여주고 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 서해안 배경농도를 파악할 수 있는 백령도 대기오염측정소에서 2009년부터 2014년까지 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1.0</sub>의 변동 경향을 살펴보았으며, 2012년부터 2013년까지 HR-ToF-AMS를 이용하여 PM<sub>1.0</sub>의 화학적 성분과 계절별 특성을 분석하였다.

2009년부터 2014년까지 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1.0</sub>의 장기변동을 KZ 필터법을 사용하여 분석한 경우 2010년 이후 감소 추세에 있던 PM<sub>1.0</sub>의 질량 농도는 2012년 이후 증가하였다. PM<sub>2.5</sub>는 2010년부터 2013년까지 꾸준히 증가 경향을 보였으며, 2010년 연평균 17.9 µg/m<sup>3</sup>에서 2013년의 연평균 24.7 µg/m<sup>3</sup>까지 약 6.8 µg/m<sup>3</sup> 증가하였다.

2012년부터 2013년까지 PM<sub>1.0</sub> 평균 농도는 40.2 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub>는 23.7 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>1.0</sub>은 13.0 µg/m<sup>3</sup>로 분석되었다. PM<sub>1.0</sub> 중 PM<sub>2.5</sub>의 분포는 58.8%, PM<sub>1.0</sub>은 32.1%로 나타났고, PM<sub>2.5</sub> 중 PM<sub>1.0</sub>은 54.6%로 중국 대도시의 분포비율과 유사하게 분석되었다. PM<sub>1.0</sub> 성분의 분포는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 41.0%로 높으며, Organic이 31.8%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 13.5%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 평균 12.8% 수준으로 낮아 주요 성분은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>였으며, 다음으로 Organic 성분임을 알 수 있다. 계절별 PM<sub>1.0</sub> 농도는 봄철이 14.5 µg/m<sup>3</sup>, 겨울철 14.2 µg/m<sup>3</sup>로 유사하였고, 여름철 13.1 µg/m<sup>3</sup>, 가을철 9.86 µg/m<sup>3</sup>로 여름철이 가을철에 비하여 높은 특성을 나타내었다. 성분 농도는 겨울철을 제외한 모든 계절에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 4.02 µg/m<sup>3</sup>에서 7.14 µg/m<sup>3</sup>로 높으며, 겨울철은 Organic 성분이 4.87 µg/m<sup>3</sup>로 계절 중에 유일하게 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>보다 높은 수준을 보였다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 0.71 µg/m<sup>3</sup>에서 2.83 µg/m<sup>3</sup>로 전 계절에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Organic에 비하여 낮으며, 계절 중 겨울철에 높은 경향으로 계절에 따른 온도 변화가 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 휘발도에 영향을 주는 것으로 판단된다.

계절별로 PM<sub>1.0</sub>의 전 성분의 입경은 집적모드인 200 nm에서 800 nm의 범위에 존재하였다. 타 연구결과에서 대기 중 측정된 입자는 주로 집적 모드에 존재하지만 일차 배출원의 영향을 받을 시 Organic 성분은 100 nm 이하의 영역까지 분포하며, 본 연구결과에서는 검출되지 않아 일차 배출의 영향이 적음을 알 수 있다.



풍향과 기류를 분류하여 분석한 결과 백령도는 서풍의 영향을 지배적으로 받고 있었고, 기류가 산동성 및 상해를 포함하는 공업지역에서 이동할 때 전 성분의 농도 수준이 높은 것으로 분석되었다. 이러한 기상조건은 고농도 현상의 발생과 밀접한 관련이 있는 것으로 파악되어 오염물질이 유입되고 있는 것을 알 수 있었다. 하지만 일부 국내의 기류가 유입된 경우에도  $\text{SO}_4^{2-}$  성분이 높게 관측되어 국내 유입도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

우리나라는 최근 미세먼지의 고농도 사례가 증가하고 있으며, 이에 대한 효과적인 저감대책 마련을 위해서는 우선 발생원을 파악하고 영향을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 그러나 미세먼지는 복잡한 생성 경로와 반응과정 그리고 장거리 이동 등에 의한 영향을 받기 때문에 미세먼지를 정량적으로 파악하기 위해서는 미세먼지뿐만 아니라 이러한 영향인자들에 대한 연구가 광범위하게 수행될 필요가 있다. 본 연구를 통해 제시된 배경지역(백령도)에서의  $\text{PM}_{10}$  미세입자의 농도 수준 및 특성 연구의 결과는 향후 국내 대기질을 평가하고 대기개선 정책의 방향을 수립하는 데 의미 있는 결과를 제공할 것으로 기대되며, 앞으로 지속적인 측정과 분석이 수행되어야 할 것이다.

## References

- Aiken, A.C., P.F. Decarlo, J.H. Kroll, D.R. Worsnop, J.A. Huffman, K.S. Docherty, I.M. Ulbrich, C. Mohr, J.R. Kimmel, D. Sueper, Y.L. Sun, Q. Zhang, A. Trimborn, M. Northway, P.J. Ziemann, M.R. Canagaratna, T.B. Onasch, M.R. Alfarra, A.S.H. Prevot, J. Dommen, J. Duplissy, A. Metzger, U. Baltensperger, and J.L. Jimenez (2008) O/C and OM/OC ratios of primary, secondary, and ambient organic aerosols with high resolution time-of-flight aerosol mass spectrometry, *Environmental Science and Technology*, 42(12), 4478-4485.
- Alfarra, M.R., H. Coe, J.D. Allan, K.N. Bower, H. Boudries, M.R. Canagaratna, J.L. Jimenez, J.T. Jayne, A.A. Garforth, S.M. Li, and D.R. Worsnop (2004) Characterization of urban and rural organic particulate in the lower Fraser valley using two aerodyne aerosol mass spectrometers, *Atmospheric Environment*, 38(34), 5745-5758.
- Cho, C.B., G.U. Park, and B.J. Kim (2013) An effectiveness of simultaneous measurement of  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , and  $\text{PM}_{1.0}$  concentrations in asian dust and haze monitoring, *Journal of Environmental Science International*, 22(6), 651-666.
- Choi, J.S., J.H. Kim, J.Y. Ahn, J.S. Park, Y.S. Koo, G.H. Yoon, and S.D. Kim (2013) A case study on the high mass loading aerosol observed using an aerodyne ToF-AMS in Baegryung Island, May 2011, *Journal of Korean Society of Urban Environment*, 13(1), 19-32. (in Korean with English abstract)
- Civerolo, K., E. Brankov, S.T. Rao, K. Roy, P. Lewis, and P. Galvin (2003) Analysis of ambient, precipitation weighted, and lake sulfate concentrations in the Adirondack region of New York, *Environmental Pollution*, 123(3), 337-345.
- Cross, E.S., T.B. Onasch, M. Canagaratna, J.T. Jayne, J. Kimmel, X.Y. Yu, M.L. Alexander, D.R. Worsnop, and P. Davidovits (2009) Single particle characterization using a light scattering module coupled to a time-of-flight aerosol mass spectrometer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(20), 7769-7793.
- DeCarlo, P.F., E.J. Dunlea, J.R. Kimmel, A.C. Aiken, D. Sueper, J. Crouse, P.O. Wennberg, L. Emmons, Y. Shinozuka, A. Clarke, J. Zhou, J. Tomlinson, D.R. Collins, D. Knapp, A.J. Weinheimer, D.D. Montzka, T. Campos, and J.L. Jimenez (2008) Fast airborne aerosol size and chemistry measurements above Mexico City and Central Mexico during the MILAGRO campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(14), 4027-4048.
- Drewnick, F., S.S. Hings, P. Decarlo, J.T. Jayne, M. Gonin, K. Fuhrer, S. Weimer, J.L. Jimenez, K.L. Demerjian, S. Borrmann, and D.R. Worsnop (2005) A New Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (ToF-AMS)-Instrument Description and First Field Deployment, *Aerosol Science and Technology*, 39(7), 637-658.
- Han, J.S., Y.M. Kim, J.Y. Ahn, B.J. Kong, J.S. Choi, S.U. Lee, and S.J. Lee (2006) Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutants flux during 1997~2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 99-106. (in Korean with English abstract)
- Hogrefe, C., S. Vempaty, S.T. Roa, and P.S. Porter (2003) A comparison of four techniques for separating different time scales on atmospheric variables, *Atmo-*

- spheric Environment, 37(3), 313-325.
- Hu, W.W., M. Hu, B. Yuan, J.L. Jimenez, Q. Tang, J.F. Peng, W. Hu, M. Shao, M. Wang, L.M. Zeng, Y.S. Wu, Z.H. Gong, X.F. Huang, and L.Y. He (2013) Insights on organic aerosol aging and the influence of coal combustion at a regional receptor site of central eastern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(19), 10095-10112.
- Huang, X.F., L.Y. He, M. Hu, M.R. Canagaratna, Y. Sun, Q. Zhang, T. Zhu, L. Xue, L.W. Zeng, X.G. Liu, Y.H. Zhang, J.T. Jayne, N.L. Ng, and D.R. Worsnop (2010) Highly time-resolved chemical characterization of atmospheric submicron particles during 2008 Beijing Olympic Games using an Aerodyne High-Resolution Aerosol Mass Spectrometer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(18), 8933-8945.
- Jayne, J.T., D.C. Leard, X.F. Zhang, P. Davidovits, K.A. Smith, C.E. Kolb, and D.R. Worsnop (2000) Development of an Aerosol Mass Spectrometer for Size and Composition Analysis of Submicron Particles, *Aerosol Science and Technology*, 33(1-2), 49-70.
- Jimenez, J.L., J.T. Jayne, Q. Shi, C.E. Kolb, D.R. Worsnop, I. Yourshaw, J.H. Seinfeld, R.C. Flagan, X. Zhang, K.A. Smith, J.W. Morris, and P. Davidovits (2003) Ambient aerosol sampling using the aerodyne aerosol mass spectrometer, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108(D7), 8425, doi: 10.1029/2001JD001213.
- Jimenez, J.L., M.R. Canagaratna, N.M. Donahue, A.S.H. Prevot, Q. Zhang, J.H. Kroll, P.F. DeCarlo, J.D. Allan, H. Coe, N.L. Ng, A.C. Aiken, K.S. Docherty, I.M. Ulbrich, A.P. Grieshop, A.L. Robinson, J. Duplissy, J.D. Smith, K.R. Wilson, V.A. Lanz, C. Hueglin, Y.L. Sun, J. Tian, A. Laaksonen, T. Raatikainen, J. Rautiainen, P. Vaattovaara, M. Ehn, M. Kulmala, J.M. Tomlinson, D.R. Collins, M.J. Cubison, E.J. Dunlea, J.A. Huffman, T.B. Onasch, M.R. Alfarra, P.I. Williams, K. Bower, Y. Kondo, J. Schneider, F. Drewnick, S. Borrmann, S. Weimer, K. Demerjian, D. Salcedo, L. Cottrell, R. Griffin, A. Takami, T. Miyoshi, S. Hatakeyama, A. Shimono, J.Y. Sun, Y.M. Zhang, K. Dzepina, J.R. Kimmel, D. Sueper, J.T. Jayne, S.C. Herndon, A.M. Trimborn, L.R. Williams, E.C. Wood, A.M. Middlebrook, C.E. Kolb, U. Baltensperger, and D.R. Worsnop (2009) Evolution of organic aerosols in the atmosphere, *Science*, 326(5959), 1525-1529.
- Kim, J.H., T.H. Lee, G.H. Yoon, J.J. Lee, B.R. Seo, J.S. Park, J.Y. Ahn, and S.D. Kim (2012) Study of cigarette smoke aerosol particles in indoor environment using an High Resolution Time of Flight Aerosol Mass Spectrometry (HR-ToF-AMS), *Journal of Korean Society of Urban Environment*, 12(2), 99-106. (in Korean with English abstract)
- Kleinman, L.I., S.R. Springston, P.H. Daum, Y.N. Lee, L.J. Nunnermacker, and G.I. Senum (2008) The time evolution of aerosol composition over the Mexico City plateau, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(6), 1559-1575.
- Kong, B.J., S.K. Kim, J.S. Park, S.D. Lee, J.C. Kim, J.S. Kim, D.W. Lee, and S.J. Lee (2010) The Characteristics of particle composition at the Baengnyeong Island, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 16(2), 97-105. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.Y., B.J. Kong, J.S. Han, and M.D. Lee (2008) Long term analysis of PM<sub>10</sub> concentration in Seoul using KZ filter, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(1), 63-71. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.D., S.K. Kim, J.S. Park, B.J. Kong, J.C. Kim, J.S. Kim, and D.W. Lee (2010) The characteristics of the air pollutants distribution and concentration at the Baengnyeong Island, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 16(1), 25-33. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., D.M. Murphy, D.S. Thomson, and A.M. Middlebrook (2002) Chemical components of single particles measured with Particle Analysis by Laser Mass Spectrometry (PALMS) during the Atlanta Super-Site Project: Focus on organic/sulfur, lead, soot, and mineral particles, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(D1), 4003, doi: 10.1029/2000JD000011.
- Lee, T.H., J.S. Choi, G.W. Lee, J.Y. Ahn, J.S. Park, A.A. Samuel, S.M. Misha, Y.J. Choi, and Y.M. Chung (2015) Characterization of aerosol composition, concentrations, and sources at Baengnyeong Island, Korea using an aerosol mass spectrometer, *Atmospheric Environment*, 120, 297-306.
- Lim, J.H., J.S. Park, J.Y. Ahn, J.S. Choi, J. Oh, K.J. Moon, Y.D. Hong, and J.S. Han (2013) The characteristics of the air pollutants at Baengnyeong Island, a west inflow region of the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society of Urban Environment*, 13(3), 267-276. (in Korean with English abstract)

- Matthew, B.M., A.M. Middlebrook, and T.B. Onasch (2008) Collection Efficiencies in an Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer as a Function of Particle Phase for Laboratory Generated Aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 42(11), 884-898.
- Middlebrook, A.M., R. Rahreini, J.L. Jimenez, and M.R. Canagaratna (2012) Evaluation of Composition-Dependent Collection Efficiencies for the Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer using Field Data, *Aerosol Science and Technology*, 46(3), 258-271.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) Study on the chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> in case of high concentration episode (II), No. 11-1480523-002482-01. (in Korean with English abstract)
- Ng, N.L., M.R. Canagaratna, J.L. Jimenez, P.S. Chhabra, J.H. Seinfeld, and D.R. Worsnop (2011) Changes in organic aerosol composition with aging inferred from aerosol mass spectra, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(13), 6465-6474.
- Quan, J., X. Tie, Q. Zhang, Q. Liu, X. Li, Y. Gao, and D. Zhao (2014) Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 88, 83-89.
- Salcedo, D., T.B. Onasch, K. Dzepina, M.R. Canagaratna, Q. Zhang, J.A. Huffman, P.F. DeCarlo, J.T. Jayne, P. Mortimer, D.R. Worsnop, C.E. Kolb, K.S. Johnson, B. Zuberi, L.C. Marr, R. Volkamer, L.T. Molina, M.J. Molina, B. Cardenas, R.M. Bernabé, C. Márquez, J.S. Gaffney, N.A. Marley, A. Laskin, V. Shutthanandan, Y. Xie, W. Brune, R. Leshner, T. Shirley, and J.L. Jimenez (2006) Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: Results from the CENICA Supersite, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(4), 925-946.
- Schneider, J., S. Borrmann, A.G. Wollny, M. Bläsner, N. Mihalopoulos, K. Oikonomou, J. Sciare, A. Teller, Z. Levin, and D.R. Worsnop (2004) Online mass spectrometric aerosol measurements during the MINOS campaign (Crete, August 2001), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(1), 65-80.
- Setyan, A., Q. Zhang, M. Merkel, W.B. Knighton, Y. Sun, C. Song, J.E. Shilling, T.B. Onasch, S.C. Herndon, D.R. Worsnop, J.D. Fast, R.A. Zaveri, L.K. Berg, A. Wiedensohler, B.A. Flowers, M.K. Dubey, and R. Subramanian (2012) Characterization of submicron particles influenced by mixed biogenic and anthropogenic emissions using high-resolution aerosol mass spectrometry: results from CARES, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(17), 8131-8156.
- Sun, J.Y., Q. Zhang, M.R. Canagaratna, Y.M. Zhang, N.L. Ng, Y.L. Sun, J.T. Jayne, X.C. Zhang, X.Y. Zhang, and D.R. Worsnop (2010) Highly time- and size resolved characterization of submicron aerosol particle in Beijing using an Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer, *Atmospheric Environment*, 44(1), 131-140.
- Sun, Y., Z. Wang, H. Dong, T. Yang, J. Li, X. Pan, P. Chen, and J.T. Jayne (2012) Characterization of summer organic and inorganic aerosols in Beijing, China with an Aerosol Chemical Speciation Monitor, *Atmospheric Environment*, 51, 250-259.
- Sun, Y.L., Q. Zhang, J.J. Schwab, K.L. Demerjian, W.N. Chen, M.S. Bae, H.M. Hung, O. Hogrefe, B. Frank, O.V. Rattigan, and Y.C. Lin (2011) Characterization of the sources and processes of organic and inorganic aerosols in New York city with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(4), 1581-1602.
- Takegawa, N., T. Miyakawa, Y. Kondo, J.L. Jimenez, Q. Zhang, D.R. Worsnop, and M. Fukuda (2006) Seasonal and diurnal variations of submicron organic aerosol in Tokyo observed using the Aerodyne aerosol mass spectrometer, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(D11), D11206, doi: 10.1029/2005JD006515.
- Xu, J., Q. Zhang, M. Chen, X. Ge, J. Ren, and D. Qin (2014) Chemical composition, sources, and processes of urban aerosols during summertime in Northwest China: insights from high resolution aerosol mass spectrometry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 12593-12611.
- Zhang, J.K., Y. Sun, Z.R. Liu, D.S. Ji, B. Hu, Q. Liu, and Y.S. Wang (2014) Characterization of submicron aerosols during a month of serious pollution in Beijing, 2013, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(6), 2887-2903.
- Zhang, Y.M., X.Y. Zhang, J.Y. Sun, W.L. Lin, S.L. Gong, X.J. Shen, and S. Yang (2011) Characterization of new particle and secondary aerosol formation during summertime in Beijing, China, *Tellus B*, 63(3), 382-394.