

ORIGINAL ARTICLE

## 지역별 에어로졸 화학성분 농도 및 광학특성 비교

소윤영 · 송상근\* · 최유나

제주대학교 지구해양학과

### Comparison of the concentration characteristics and optical properties of aerosol chemical components in different regions

Yun–Yeong So, Sang–Keun Song\*, Yu–Na Choi

*Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea*

#### Abstract

The aerosol chemical components in PM<sub>2.5</sub> in several regions (Seoul, Busan, Daejeon, and Jeju Island) were investigated with regard to their concentration characteristics and optical properties. The optical properties of the various aerosol components (e.g., water-soluble, insoluble, Black Carbon (BC), and sea-salt) were estimated using hourly and daily aerosol sampling data from the study area via a modeling approach. Overall, the water-soluble component was predominant over all other components in terms of concentration and impact on optical properties (except for the absorption coefficient of BC). The annual mean concentration and Aerosol Optical Ddepth (AOD) of the water-soluble component were highest in Seoul (at the Gwangjin site) (26 µg/m<sup>3</sup> and 0.29 in 2013, respectively). Further, despite relatively moderate BC concentrations, the annual mean absorption coefficient of BC (21.7 Mm<sup>-1</sup>) was highest in Busan (at the Yeonsan site) in 2013, due to the strong light absorbing ability of BC. In addition, high AODs for the water-soluble component were observed most frequently in spring and/or winter at most of the study sites, while low values were noted in summer and/or early fall. The diurnal variation in the AOD of each component in Seoul (at the Gwangjin site) was slightly high in the morning and low in the afternoon during the study period; however, such distinctions were not apparent in Jeju Island (at the Aweol site), except for a slightly high AOD of the water-soluble component in the morning (08:00 LST). The monthly and diurnal differences in the AOD values for each component could be attributed to the differences in their mass concentrations and Relative Humidities (RH). In a sensitivity test, the AODs estimated under RH conditions of 80 and 90% were factors of 1.2 and 1.7 higher, respectively, than the values estimated using the observed RH.

**Key words** : Aerosol chemical components, Water-soluble component, BC, AOD, Relative humidity, Various regions

#### 1. 서론

대기 중에서 부유하는 에어로졸은 태양 복사광을 산란 또는 흡수하는 직접효과와 구름의 생성, 알베도 증가, 수명 변화에 의한 간접효과를 통해 지구 에너지 균형에

영향을 주며, 이외에 전 지구적 기후 및 지역규모의 기상 변화에도 영향을 미친다(Lee et al., 2006; IPCC, 2007, 2013). 에어로졸(특히, PM<sub>2.5</sub>)의 대기 중 증가는 시정거리를 감소시키기도 하며, 호흡기를 통한 유입으로 호흡기 질환 및 혈관 기능 장애 등을 일으켜 건강과 사망률

Received 4 December, 2018; Revised 27 December, 2018;

Accepted 2 January, 2019

\*Corresponding author: Sang-Keun Song, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea  
Phone: +82-64-754-3431  
E-mail: songsk@jejunu.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.

증가에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Eun et al., 2013; Bae, 2014). 최근 들어, 도시에서는 많은 차량과 인간 활동에 의한 오염물질의 국지배출은 물론 외부로부터의 유입(수송) 등을 통해 에어로졸에 의한 보건학적 피해가 매우 심각한 도시문제 중 하나로 인식되고 있다(Hadei et al., 2017; Maji et al., 2017). 이러한 에어로졸은 온실기체와 달리 대기 중 체류시간이 짧기 때문에 배출지역에 따라 에어로졸의 화학조성이 다른 양상으로 나타난다(Lee et al., 2008). 특히, 유기탄소(Organic Carbon, OC)와 검댕(Black Carbon, BC)의 인위적 발생강도는 도시지역의 많은 배출원으로 인해 배경지역보다 훨씬 크다(Pöschl, 2005). 또한 인위적 오염원이 많은 지역과 자연적 배출원이 많은 지역에 따라 에어로졸의 화학성분별 농도 분포는 서로 차이가 나며, 이러한 농도 차이와 기상조건(상대습도 등)에 따라 에어로졸의 광학 특성, 복사효과, 그리고 미치는 영향도 서로 다르게 나타난다(Lee et al., 2008; Song and Shon, 2014; Park et al., 2015; Park, 2017). 이와 같이 에어로졸의 영향은 화학 조성 및 입자 크기에 따라 매우 다르므로, 에어로졸의 화학성분 분류, 농도 특성, 그리고 에어로졸의 화학적 및 광학적 특성에 관한 상세연구는 지역 대기질의 특성, 나아가 지구복사 수치 및 기후변화를 평가하는데 있어 매우 중요하다(Yoon et al., 2005; Song et al., 2017).

에어로졸 화학성분이 지구복사 수치 및 기후에 미치는 영향이 중요함에 따라 에어로졸의 광학특성과 복사효과 산출에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다(Quinn et al., 2004; Kim et al., 2008; Lee et al., 2009; Ramachandran and Kedia, 2010; Singh et al., 2010; Chubarova et al., 2011; Eun et al., 2013; Park, 2017; Song et al., 2017). 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)는 에어로졸 연직범위를 나타내는 인자로서 대기복사의 특징을 결정하는 중요 변수임을 확인하였다(Eun et al., 2013). 또한 대기 중 황산염(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 질산염(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 등 수용성(water-soluble) 이온이 많은 지역에서 상대습도에 의한 에어로졸의 흡습성장이 활발하게 이루어져 에어로졸 광학변수(AOD, 산란계수 등) 값이 증가했다는 연구결과가 발표된바 있다(Day and Malm, 2001; Park et al., 2015). 한편, 우리나라 국가배경지역인 제주도 고산에서는 상대습도가 증가할수록 AOD가 증가하였으며, 이러한 AOD의 증가는 지표(surface)와

대기상단(top of the atmosphere)에서의 직접적 복사강제력 증가에 크게 기여한 것으로 나타났다(Yoon and Kim, 2006). Park (2017)의 연구에 따르면, 제주도 애월에서 수용성(water-soluble) 성분의 에어로졸은 흡습성장에 의해 상대습도가 증가할 때 AOD가 증가함을 보였다(상대습도 85%일 때의 AOD가 70%일 때보다 약 0.13 증가). 한편 2010년 도시지역(서울) 수용성 에어로졸의 AOD(500 nm) 평균은 0.36~0.42(1월에 최고 0.5)으로 상당히 높게 추정되었으며, 이것은 다른 성분들(불용성, BC 등)에 비해 수배~수십 배 높은 수치였다(Song et al., 2017).

앞서 언급한바와 같이, 과거 오랫동안 에어로졸 특성(예, 광학특성 및 복사효과) 에어로졸 샘플링의 시·공간적 한계로 인해 대부분 에어로졸의 평균된 양 또는 24시간 이상의 샘플링 자료를 이용하여 추정되어 왔으며(Yu et al., 2006; Song and Shon, 2014), 주로 배경농도 또는 청정지역을 대상으로 많은 에어로졸 측정과 다양한 분석이 이루어져 왔다(Kim et al., 2003; Kim et al., 2006; Kim et al., 2011). 일부 도시지역을 대상으로 에어로졸의 광학특성 및 복사강제력 산출에 관한 연구가 수행된 바도 있지만, 여전히 부족한 실정이다(Singh et al., 2010; Song et al., 2017). 또한 대기 중의 에어로졸은 짧은 체류시간(수 시간 내외)으로 인해 시·공간적 변화가 크며, 화학성분(예, 황산염, 질산염 등)에 따라 광학특성과 복사효과는 시·공간적으로 서로 다른 특징을 가진다(Yoon et al., 2005; IPCC, 2007). 그러나 과거 대부분의 에어로졸에 관한 연구들은 한 지점에서 그리고 특정 한 가지 성분에 대해 주로 많이 수행되어 왔다(Park and Lim, 2006; Kang, 2013). 따라서 본 연구에서는 시간별 또는 일별 에어로졸 화학성분 자료를 이용하고 동시에 다양한 지역(배경지역, 시골지역, 인위적 영향이 극대화된 도시지역 등)에서 에어로졸 화학성분에 따른 시·공간 농도 특성을 분석하였다. 또한 환경이 서로 다른 연구지역에서 에어로졸 광학모델을 이용하여 광학특성을 산출하고 지역별로 서로 비교분석하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 대상 지역 및 자료

본 연구에서는 다양한 지역에서 에어로졸 화학성분별

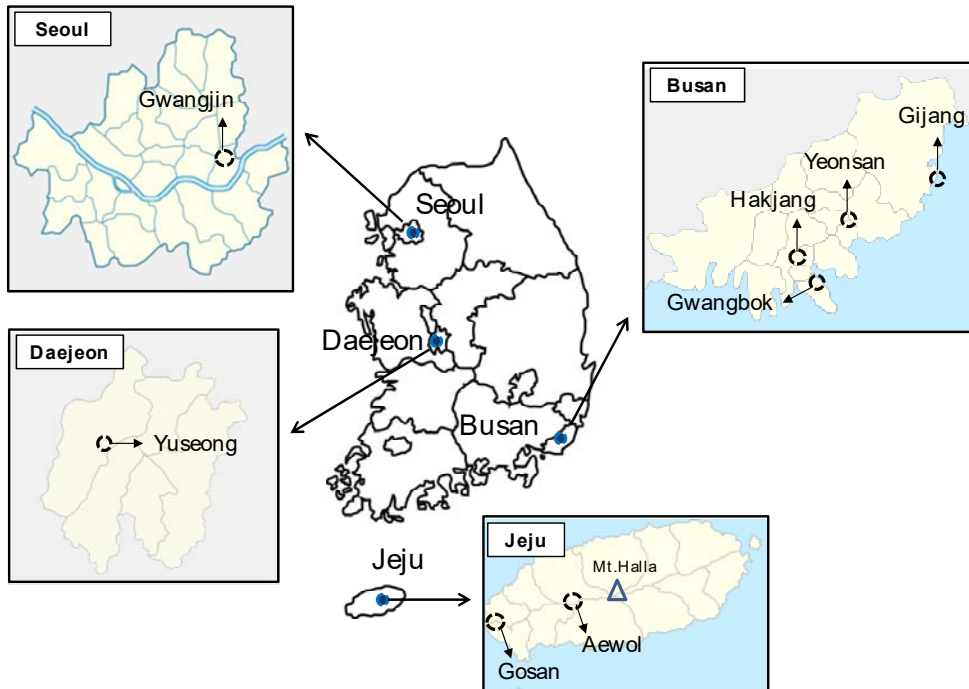


Fig. 1. Geographical locations of the measurement sites for aerosol chemical components in  $PM_{2.5}$  at the 8 different sites of four study regions (Seoul, Busan, Daejeon, and Jeju Island).

시·공간적 특성을 면밀히 살펴보기 위해 8개 지점, 즉 서울(1지점)은 광진구, 부산(4지점)은 광복, 연산, 기장, 학장, 대전(1지점)은 유성구, 제주(2지점)는 애월, 고산의 측정지점을 선정하였다(Fig. 1). 각 측정지점별 일반적인 특징을 요약하면 다음과 같다. 서울의 광진구 측정소는 구의정수사업소에 위치하고 있으며, 주변으로 작은 산과 공원, 주거건물 등이 인접해 있다. 부산 측정소의 경우, 광복지점은 도시 중심에 위치하고(부산 중구) 많은 차량과 상가건물이 밀집된 지역(상업지역), 연산지점은 많은 인구 및 주거 밀집지역(주거지역), 기장지점은 인구는 다소 많으나 주변에 산과 들로 둘러싸여 있는 지역(교외지역), 그리고 학장지점은 주변에 일반산업단지 및 공업단지가 인접해 있다(공업지역). 대전의 측정소는 유성구 한국표준과학연구원에 위치하고 있으며, 주변에 연구단지 및 산업단지가 인접해 있다. 마지막으로, 제주의 애월 대기오염집중측정소는 해발 약 600 m의 산간지대에 있으며, 고산지점은 WMO에서 권고하는 지역급 국가배경지점이며, 제주도 서쪽 해안가에 바로 인접하여(해발 약

72 m) 인위적 오염물질 배출원이 매우 적은 지역이다. 이러한 에어로졸 분석자료 중 서울과 부산의 측정지점 자료는 각 시의 보건환경연구원, 대전의 측정지점 자료는 한국표준과학원, 제주의 측정지점 자료는 국립환경과학원에서 운용·관리되고 있으며, 에어로졸 화학적 분석을 위해 자료의 신뢰성을 평가하는 정도 보증(Quality Assurance, QA) 및 정도 관리(Quality Control, QC)가 수행되고 있다.

본 연구에서는 에어로졸 화학성분 자료의 수집 및 이용에 한계가 있어 각 지점별로 서로 다른 연구기간을 분석에 이용하였다(Table 1). 서울 광진구는 2011~2016년, 부산 연산지점은 2010년, 2012~2016년, 나머지 3지점인 기장, 광복, 학장은 2016년 자료만 수집되었다. 대전의 유성구는 2012년 3월~2013년 3월, 제주의 2지점은 각각 고산의 2010~2014년, 애월의 2013~2014년 자료를 이용하였다. 또한 에어로졸 화학성분 농도도 자료의 측정 및 수집에 한계가 있어 각 지점에 따라 일부 이용된 자료가 다르다. 서울 광진구 지점과 제주 고산

**Table 1.** Summary of measurement sites/locations and periods at the 8 different sites of four study regions

Region	Measurement site	Measurement period
Seoul	Gwangjin (An suburban site)	2011-2016
Busan	Gwangbok (A commercial site)	2016
	Yeonsan (A residential site)	2010, 2012-2016
	Gijang (A suburban or rural site)	2016
	Hakjang (An industrial site)	2016
Daejeon	Yuseong (An suburban site)	March 2012-March 2013
Jeju Island	Aewol (A rural site)	2013-2014
	Gosan (A background site)	2010-2014

지점에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 화학성분 자료는 8개의 이온성분(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>)이며, 각각 시간별과 일별로 측정된 자료를 분석에 이용하였다. 나머지 지점들의(부산, 대전, 제주 애월) 자료는 8개의 이온성분(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>)과 2개의 탄소성분(OC, EC)이며, 부산과 대전 지점은 일별로, 제주 애월지점은 시간별로 측정된 자료가 이용되었다.

## 2.2. 연구 방법

본 연구에서는 여러 측정지점에서 에어로졸의 화학성분별 광학특성(소산계수( $\sigma_{ext}$ ), 산란계수( $\sigma_{sc}$ ), 흡수계수( $\sigma_{ab}$ ), 에어로졸 광학두께(AOD) 등)를 산출하기 위하여 에어로졸 광학모델인 Optical Properties of Aerosol and Clouds (OPAC)을 이용하였다. OPAC 모델은 에어로졸 및 구름 성분의 광학변수를 계산하는 프로그램으로, 6가지의 water clouds, 3가지의 ice clouds, 10가지의 에어로졸 성분(water-soluble, insoluble, soot (또는 BC), sea-salt (2개 mode), mineral dust (4개 mode), sulfate droplets)을 구성하며, 성분별로 각각의 광학특성을 산출할 수 있다(Hess et al., 1998). 그러나 본 연구의 대상지역에서는 에어로졸 성분 중 mineral dust의 주요 성분인 알루미늄(Al), 규소(Si), 철(Fe) 등이 측정되지 않았고 sulfate droplets의 측정자료 부족으로 인해 총 10가지 에어로졸 성분 중에서 4가지 성분, 즉 수용성(water-soluble), 불용성(insoluble), 검댕(BC), 해염(sea-salt) 성분으로 분류하여 각각의 광학특성을 산출하였다. OPAC 모델의 구성과 특징, 파장조건 및 기상요소 입력자료 등에 대한 보다 상세한 내용은 선행연구에 잘

제시되어 있다(Hess et al, 1998).

일반적으로, 에어로졸(특히, 황산염 등과 같은 흡습성)은 상대습도가 증가할수록 대기 중 AOD가 증가하며, 흡습성장을 하면서 산란계수에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Yoon and Kim, 2006; Park et al., 2015). OPAC 모델은 8개의 상대습도(0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99%) 조건하에서 광학특성의 산출이 가능하다. 모델 내에서, water-soluble과 sea-salt 성분은 상대습도 증가 또는 수증기를 흡수하여 입자의 크기를 성장시키는 반면, insoluble과 함께 BC 성분은 물에 용해되지 않기 때문에 상대습도 증가에 따라 에어로졸 입자가 성장하지 않는 것으로 가정한다(Hess et al., 1998). 본 연구에서는 보다 정확한 분석을 위해 기상청 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)과 자동기상관측시스템(Automated Weather Station, AWS)에서 관측된 시간별 상대습도를 이용하여 OPAC 모델링을 수행하였다. ASOS는 대상지역지방 기상청이나 유인 기상대에 설치되어 다양한 기상요소(기온, 상대습도, 강수 등 10 여개 자료)를 관측하므로 주로 대상지역 대표 자료로 활용된다. 서울 광진구, 대전 유성구, 제주 애월 및 고산은 해당지점의 기상관측 자료의 한계로 인해 ASOS 상대습도 자료를 이용하였으며, 부산의 4지점(광복, 연산, 기장, 학장)은 인근 AWS 상대습도 자료를 직접 이용하였다.

에어로졸 화학성분별 OPAC 모델 수행을 위하여 이용된 4가지 화학성분의 구성은 다음과 같으며, 이와 관련한 자세한 설명은 여러 선행연구에 잘 나타나 있다(Hess et al, 1998; Song and Shon, 2014; Song et al., 2017). 요약하면, 먼저 water-soluble 성분은 총 7가지 즉,

non-sea-salt (NSS)-K<sup>+</sup>, NSS-Mg<sup>2+</sup>, NSS-Ca<sup>2+</sup>, NSS-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 그리고 수용성 OC로 구성된다. 4 가지 NSS(비해염) 이온성분인 NSS-K<sup>+</sup>, NSS-Mg<sup>2+</sup>, NSS-Ca<sup>2+</sup>, NSS-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 질량농도는 [ion]<sub>obs</sub>-[Na]<sup>+</sup> (Na<sup>+</sup>에 대한 각 이온의 질량비) 관계식에 의해 계산되며, 여기서 Na<sup>+</sup>에 대한 각 이온성분의 비율은 0.036, 0.121, 0.041, 0.252를 적용하였다(Pilson, 1998). 이외에도, 본 연구지역에서는 수용성 OC의 측정이 이루어지지 않은 관계로 OC를 수용성 OC로 가정하여 분석하였다. 도시지역 OC에 대한 수용성 OC의 비중은 70~90% 정도로 높게 차지한다는 연구결과가 이미 발표된 바 있다(Park et al., 2014). 두 번째, insoluble 성분은 OC에 대한 유기물질(Organic Material, OM)의 비를 적용하였는데, 계절별로 OM/OC 비율을 각각 다르게 적용하였다(여름: 2.06, 겨울: 1.48, 봄과 가을: 두 비율의 평균 값 1.77, Bae, 2011). 세 번째, BC 성분은 대상지역에서 측정이 이루어지지 않은 관계로 측정된 EC 성분으로 대신하였는데, 일반적으로 EC는 탄소질 종류 간의 광학적 차이를 분석할 때 BC로 특징지어지기도 한다(Venkatachari et al., 2006). 마지막으로 sea-salt(해염)은 수용성 성분에서 분리된 [Cl<sup>-</sup>]와 1.47[Na<sup>+</sup>]의 합으로 계산하였다(Quinn et al., 2004). 다음은 총 4가지 에어로졸 화학성분의 구성에 관한 식을 요약한 것이다.

$$\begin{aligned} [\text{Water-soluble}] &= [\text{NSS-K}^+] + [\text{NSS-Mg}^{2+}] \\ &+ [\text{NSS-Ca}^{2+}] + [\text{NSS-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{NH}_4^+] \\ &+ [\text{OC}]_{\text{water-soluble}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$[\text{Insoluble}] = \{[\text{OC}] \times [\text{OM}] / [\text{OC}]\} - [\text{OC}]_{\text{water-soluble}} \quad (2)$$

$$[\text{BC}] = [\text{EC}] \quad (3)$$

$$[\text{Sea-salt}] = [\text{Cl}^-] + 1.47[\text{Na}^+] \quad (4)$$

여기서, OPAC 모델의 입력자료인 성분별 수농도(number density)는 단일 입자의 질량농도를 이용하여 4 가지 성분에 대해 각각 계산되었다(Hess et al., 1998). 또한 광학특성을 분석함에 있어, 구름관련 에어로졸 간 접효과 모의에 필요한 입력자료(예, 구름의 수농도, 입자 크기 등) 수집의 한계로 인해 에어로졸의 직접효과만을 고려하여 OPAC 모델을 수행하였다. 즉, 서울 광진구와 제주 애월(시간별 자료 이용)은 기상청 ASOS에서 측정

된 시간별 전운량이 100%(전부 구름)인 경우에는 분석에서 제외하였고, 나머지 운량에 대해서는 구름이 없는 맑은 하늘(전운량 0%)로 가정하여 계산하였다(Kim et al., 2010; Singh et al., 2010; Song et al., 2017). 나머지 지점들(부산의 4지점, 대전 1지점, 제주 고산지점)은 에어로졸 자료가 일별이므로 시간별 전운량 자료를 일평균하여 일치시켰으며, 위의 두 지점(서울 광진구, 제주 애월)과 마찬가지로 전운량 100%는 제외하고 나머지는 맑은 하늘(전운량 0%)로 가정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 에어로졸 화학성분 농도의 시·공간적 특성

본 연구에서는 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성을 살펴보기에 앞서, 각 지점별 에어로졸 화학성분 농도의 연평균(Table 2), 월변화(Fig. 2), 일중 변화(Fig. 3)를 분석하였다. 먼저 연평균 농도를 보면(Table 2), 연구기간동안 대부분 지점에서 4가지 화학성분 중 water-soluble 성분 농도가 가장 높았으며, 다음으로 insoluble, BC 또는 sea-salt 순으로 나타났다. 여기서, 대전의 유성구 지점은 관측기간이 2012년 3월~2013년 3월이므로 에어로졸의 연평균 분석에서 제외하였다. 전체 연구기간을 평균한 water-soluble 농도는 서울지역이 19.1 µg/m<sup>3</sup>으로 가장 높고, 부산과 제주지역은 각각 14.7 µg/m<sup>3</sup>와 11.6 µg/m<sup>3</sup>이었으며, sea-salt의 전체 평균농도는 부산지역이 0.99 µg/m<sup>3</sup>, 제주지역이 0.81 µg/m<sup>3</sup>, 서울지역이 0.79 µg/m<sup>3</sup>으로 나타나 큰 차이는 아니었다(Table 2). 그러나 측정지점별로 연구기간이 서로 다르므로 보다 명확하게 해석하기 위하여 지점별 공통 연도인 2013년과 2014년에 대해 비교하였다. 두 연도의 water-soluble 농도는 서울 광진구에서 가장 높고(각각 25.5 µg/m<sup>3</sup>, 25.2 µg/m<sup>3</sup>), 다음으로 부산 연산지점(14.9 µg/m<sup>3</sup>, 14.2 µg/m<sup>3</sup>), 제주 고산(10.7 µg/m<sup>3</sup>, 11.8 µg/m<sup>3</sup>), 마지막으로 제주 애월(9.6 µg/m<sup>3</sup>, 10.3 µg/m<sup>3</sup>) 순으로 나타났다. Sea-salt 농도는 제주 애월이 가장 높게 나타났으며(2013년 1.5 µg/m<sup>3</sup>), 부산의 내륙에 위치하고 주거 밀집지역인 연산지점에서 가장 낮게 나타났었다(2014년 0.28 µg/m<sup>3</sup>).

연구기간동안 가장 높은 농도가 나타난 water-soluble 성분의 경우, 서울 광진구 지점의 농도가 대부분 부산

**Table 2.** Annual mean concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of aerosol components in  $\text{PM}_{2.5}$  at 8 different sites during the study period

Aerosol component			Water-soluble	Insoluble	EC (or BC)	Sea-salt	
Region	Site	Period					
Seoul	Gwangjin	2011	16.87±12.56 <sup>a</sup>	- <sup>b</sup>	-	0.78±1.55	
		2012	17.44±12.44	-	-	0.75±0.62	
		2013	25.46±13.35	-	-	1.11±0.86	
		2014	25.15±12.99	-	-	0.79±0.58	
		2015	14.99±10.81	-	-	0.61±0.75	
		2016	14.63±11.60	-	-	0.70±0.63	
		All	19.09±12.77	-	-	0.79±1.24	
Busan	Yeonsan	2010	13.53±6.42	1.51±2.14	1.36±0.58	1.51±1.00	
		2012	13.25±9.77	0.99±1.17	0.99±0.79	0.99±0.90	
		2013	14.86±3.51	0.74±0.75	2.46±5.61	0.74±0.64	
		2014	14.19±4.86	0.28±1.34	1.52±0.71	0.28±0.12	
		2015	14.02±5.18	0.34±0.98	1.82±0.69	0.34±0.18	
		2016	15.56±7.73	1.33±1.49	1.22±0.77	1.33±1.51	
		Gijang	2016	11.66±5.76	2.59±1.57	0.95±0.56	1.11±1.54
		Gwangbok	2016	17.51±9.25	2.89±1.16	1.39±0.8	1.02±0.67
		Hakjang	2016	17.72±8.56	3.30±1.64	1.42±0.87	1.57±1.53
		All	14.70±7.86	1.55±1.64	1.46±1.35	0.99±1.25	
Jeju Island	Aewol	2013	9.58±8.96	1.78±1.43	0.77±0.66	1.47±1.11	
		2014	10.25±9.05	2.11±1.25	0.89±0.79	0.70±0.50	
	Gosan	2010	10.34±8.02	-	-	1.16±1.39	
		2011	12.25±8.15	-	-	0.65±0.49	
		2012	13.38±10.48	-	-	1.15±0.75	
		2013	10.71±10.17	-	-	0.60±0.68	
		2014	11.83±9.37	-	-	0.65±0.46	
		All	11.58±9.01	1.94±1.39	0.83±0.70	0.81±1.04	

<sup>a</sup> Mean±σ.<sup>b</sup> Not measured.

(2016년 연산, 광복, 학장지점 제외) 및 제주지역의 다른 측정지점에 비해 높은 수준이었다(특히 2013년과 2014년). 이것은 서울이 우리나라에서 가장 인구밀집 지역이고 차량 또한 다른 지역에 비해 매우 많으므로, 이로 인해 야기되는 water-soluble 성분 중 질산염( $\text{NO}_3^-$ )과 황산염( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 농도가 높기 때문인 것으로 사료된다(Seinfeld and Pandis, 2016; Song et al., 2017). 또한 서울지역의 2013년과 2014년의 연무 발생일(각각 135일과 157일)은 서울의 다른 연도(105일~127일)는 물론 다른 지역(부산 40일~95일, 대전 102일~103일, 제주 16일~28일)

과 비교하여 상대적으로 높게 나타났는데(Korea Meteorological Administration (KMA), 2010-2016), 이러한 높은 연무 에어로졸(주로 황산염, 질산염, 암모늄염 등의 water-soluble 성분 구성)의 발생빈도가 이 지역의 water-soluble 농도 증가에 영향을 준 것으로 사료된다. Water-soluble 성분과 달리, 대상지역의 sea-salt는 연도별로 평균농도가 서로 달라서 뚜렷한 연변화를 찾기가 어려웠다. 한편, insoluble과 BC 성분은 측정값이 없는 곳이 많아 정확한 비교분석은 어려웠지만, BC의 경우 이런 점을 감안하더라도 주로 인구/주거 밀집지역

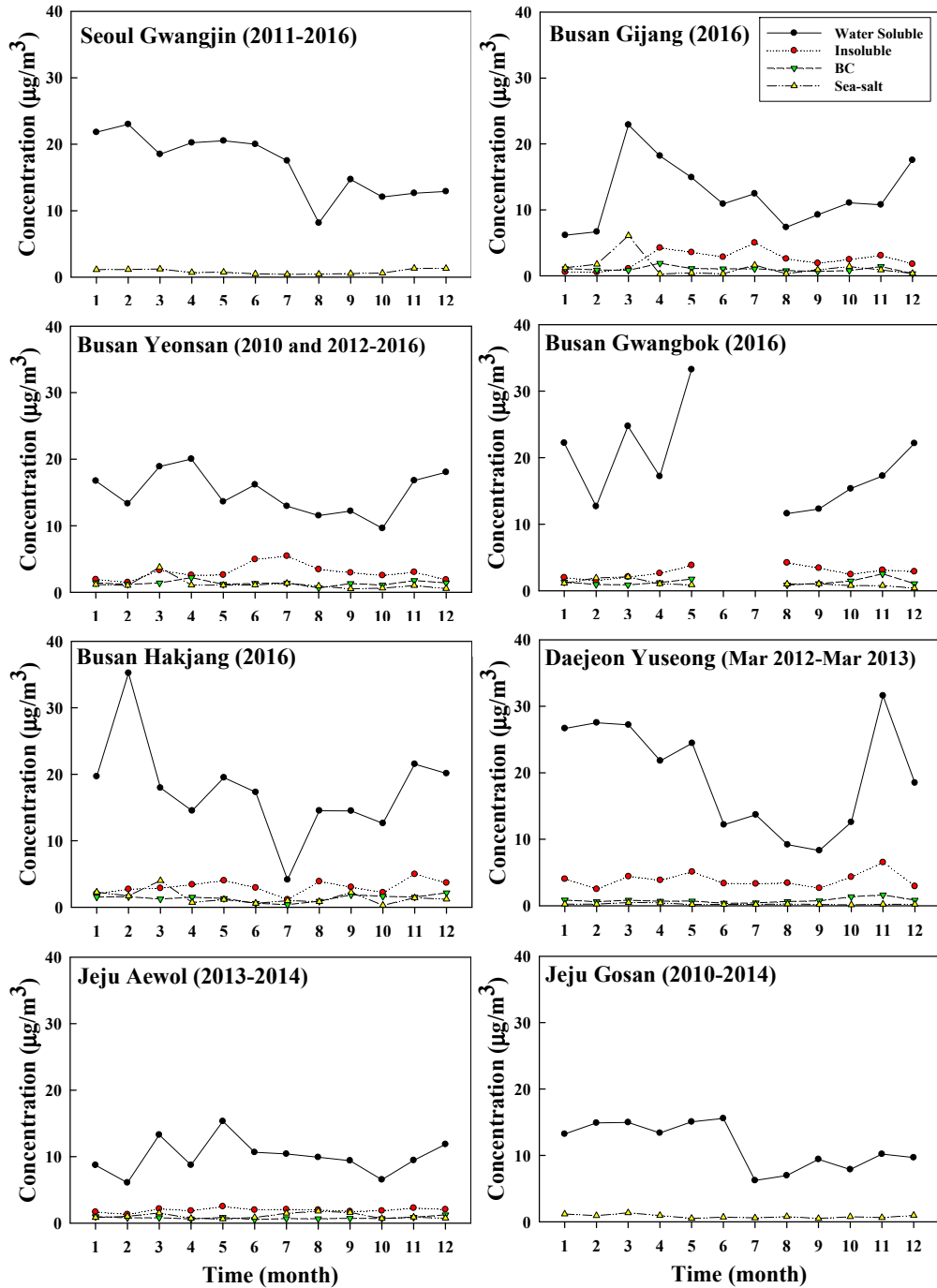


Fig. 2. Monthly variations of the concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of aerosol components in  $\text{PM}_{2.5}$  at the 8 different sites of four study regions during the study period. The concentrations of aerosol components in  $\text{PM}_{2.5}$  at Gwangbok site, Busan during June-July were excluded in analysis due to no measurements.

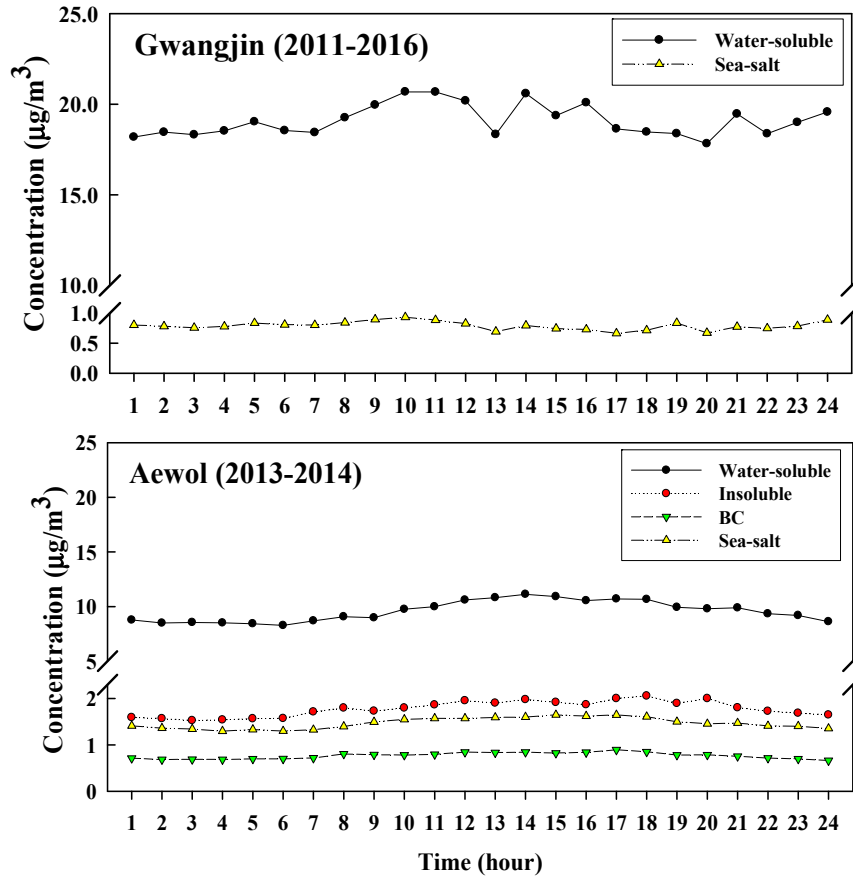


Fig. 3. Diurnal variations of the concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of aerosol components in  $\text{PM}_{2.5}$  at Gwangjin site, Seoul and Aweol site, Jeju Island during the study period.

(부산의 연산)과 상업 및 공업지역(부산의 광복 및 학장)이 시골 전원지역(제주 애월, 부산 기장)에 비해 상대적으로 높은 농도(약 2~3배)가 관측되었다. 예를 들어, BC 농도는 부산 연산지점에서 2013년에 약  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났고, 같은 연도 제주 애월지점에서 약  $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 나타났다. 이것은 BC 성분이 주로 화석연료의 불완전연소에 의해 발생하므로 도시 인위적 배출강도가 배경 및 전원(또는 시골)지역에 비해 높았기 때문인 것으로 사료된다(Pöschl, 2005; Zhang et al., 2007).

Fig 2는 대상지역(서울, 대전, 부산, 제주) 8곳의 측정 지점에서 관측한 에어로졸 화학성분 농도의 월변화를 나타낸다. 연구기간동안 대부분 지점에서 water-soluble과

BC 성분의 평균농도는 늦가을, 겨울 및 봄철에 높고 여름과 이른 가을에 상대적으로 낮게 관측되었다. Insoluble 성분은 water-soluble과 유사하게 겨울 및 봄철에 높은 농도를 보였으며, 또한 여름철(6~7월)에도 일부 지점(부산의 기장, 연산, 학장 등)에서는 다소 높은 농도가 관측되었다. 한편 sea-salt 농도는 계절에 상관없이 매우 낮았으며, 월 및 계절별로 큰 폭의 차이가 나타나지 않았다. 일반적으로 봄철에 높은 에어로졸 농도는 주로 봄철 및 늦겨울에 중국 북부의 사막지역에서 우리나라로 유입되는 황사의 영향이 크게 작용한 것으로 추정된다(Chun et al., 2000; Choi et al., 2002; Park et al., 2006; Kim et al., 2016). 지점별로 상세히 보면, 서울 광진구, 대전 유성구, 부산(연산, 학장 등) 등 도시지역은



배경/시골지역(예, 제주)에 비해 겨울철(또는 일부 봄철) 상당히 높은 water-soluble 농도가 관측되었다(특히, 2월 부산 학장지점에서  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 일반적으로 도심지는 인구가 많고 대기오염 배출원(차량, 산업시설 등)이 많으므로 시골지역에 비해 상대적으로 연무 발생빈도가 높으며(제주에 비해 약 2배~10배) (KMA, 2010-2016), 또한 겨울철 난방에 의한 연료 사용량 증가로 인해 주로 겨울철 연무의 빈도가 높기 때문에 도시지역 water-soluble 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다(Kim et al., 2007; Park et al., 2013; Shon et al., 2013). 이외에도, 대전 유성구 지점에서는 sea-salt를 제외한 대부분 성분이 11월에 매우 높은 농도(약  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 보였다. 한편, 제주의 애월과 고산 지점의 water-soluble 농도는 대체로 봄철과 겨울철에 조금 높은 편이었지만 큰 증가 폭은 나타나지 않았으며(약  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하), 이 지점들의 나머지 성분은 뚜렷한 월 및 계절적 변화가 나타나지 않았다.

Fig. 3은 에어로졸의 시간별 농도 자료가 있는 서울 광진구와 제주 애월 지점에 대해서 화학성분별 농도의 일중변화를 나타낸다. 두 지점의 에어로졸 측정기간이 달라 직접적으로 비교하기는 어렵지만, 전반적으로 두 지점 모두 water-soluble을 제외한 나머지 성분의 농도는 큰 폭의 차이가 나타나지 않았다. 또한 서울 광진구의 water-soluble 성분 농도( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  내외)는 애월지점에 비해 약 2배 정도 높게 나타났는데, 이것은 애월지점이 넓은 초지의 산간지대에 위치하고 있어 화석연료 연소 등 대기오염물질 배출원의 영향이 비교적 적게 미친 것으로 볼 수 있다. 시간대별로 자세히 보면, 서울 광진구에서는 에어로졸 성분(특히, water-soluble) 농도가 하루 중 대체로 아침(8시)부터 증가하다가 정오 및 오후시간대(12시~14시)에 가장 높게 나타났으며, 야간과 새벽 시간대에 농도가 감소하는 특징을 볼 수 있다. 이것은 오전보다는 오후시간대에 광화학 반응이 활발하게 일어나기 때문으로 사료된다. 예를 들어, water-soluble 성분(예,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )은 주로 광화학 반응이 활발한 오후 시간대에 이들의 전구물질인  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ 의 기체와 입자사이 전환과정(gas-to-particle conversion process)을 통해 생성되므로, 상대적으로 오후에 농도가 증가한 것으로 사료된다(Shon et al., 2013; Song et al., 2017). 한편, 제주 애월지점은 서울 광진구에 비해 water

-soluble의 농도는 미미한 반면, sea-salt의 농도는 오히려 약간 높게 나타났으며(4면이 바다로 둘러싸인 지리·지형적 특성 때문), 일중변화 중 오후시간대(약 12~16시)에 약간 증가하는 패턴은 비슷한 것으로 사료된다.

### 3.2. 에어로졸 성분별 광학특성 및 상대습도 민감도 분석

본 연구에서는 에어로졸 광학모델인 OPAC 모델을 통해 화학성분별 광학특성(소산계수  $\sigma_{\text{ext}}$ , 산란계수  $\sigma_{\text{sc}}$ , 흡수계수  $\sigma_{\text{ab}}$ , AOD)을 산출하였으며, Table 3에서 각 성분별 연평균 광학특성을 서로 비교하였다. 전반적으로 연구기간동안 에어로졸 광학특성에 대해 가장 크게 영향을 주는 성분은 측정지점에 관계없이 water-soluble 성분으로 나타났다(BC의 흡수계수  $\sigma_{\text{ab}}$  제외). 예를 들어, 2013년과 2014년 서울 광진구의 water-soluble 성분에 의한 광학변수는 다른 지역에 비해 매우 높은 수치였으며(소산계수 각각  $143 \text{ Mm}^{-1}$ 과  $154 \text{ Mm}^{-1}$ , 산란계수 각각  $140 \text{ Mm}^{-1}$ 과  $151 \text{ Mm}^{-1}$ ), 이는 같은 연도에 나타난 높은 water-soluble 농도에 기인한 것으로 사료된다(Table 2). BC 성분에 의한 광학변수 값은 대체로 작게 나타났지만, 흡수계수의 경우는 2013년 부산 연산지점에서 BC 농도가 water-soluble보다 작음에도 불구하고 오히려 전체에서 가장 높게( $21.7 \text{ Mm}^{-1}$ ) 나타났다. 또한 2013년과 2014년 제주 애월지점의 BC 농도는 화학성분 중 가장 낮게 나타났지만(각각  $0.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 같은 연도 같은 지역 BC의 흡수계수( $\sigma_{\text{ab}}$ )는 오히려 가장 높게 나타났다(각각  $5.6 \text{ Mm}^{-1}$ 과  $6.7 \text{ Mm}^{-1}$ ). 이것은 BC 성분이 태양복사의 가시광선과 근적외선을 잘 흡수하는 성질이 있어 흡수능력이 크기 때문이다(Song et al., 2014). 한편, 모든 지점에서 sea-salt 성분에 의한 흡수계수는 매우 작게 나타났다( $<0.001 \text{ Mm}^{-1}$ ). 이외에도, 광학특성 중 AOD는 에어로졸에 의한 태양복사의 산란 또는 흡수 정도를 나타내는 지표로, 태양복사의 영향을 볼 수 있는 변수이다. 다른 광학특성과 마찬가지로 water-soluble 성분의 AOD가 가장 높게 나타났으며, 특히 2013년 서울 광진구의 AOD는 다른 지점에 비해 훨씬 높은 수치(0.29)를 보였다.

Fig. 4는 연구기간동안 대상지역의 에어로졸 화학성분에 따른 AOD의 월변화를 나타낸다. 자료 측정 및 수집의 한계로 인해 부산의 기장지점 2월과 4월, 학장지점 5~7월, 광복지점 6~7월에 대한 분석은 본 연구에서 제외

**Table 3.** Annual mean values of the optical properties of aerosol components (a wavelength of 550 nm) estimated by OPAC model at 8 different sites during the study period

Region	Site	Period	Optical property <sup>a</sup>			
			$\sigma_{\text{ext}}$ ( $\text{Mm}^{-1}$ )	$\sigma_{\text{sc}}$ ( $\text{Mm}^{-1}$ )	$\sigma_{\text{ab}}$ ( $\text{Mm}^{-1}$ )	AOD
Seoul	Gwangjin	2011	102/-/-/3.1 <sup>b</sup>	101/-/-/3.1	2.0/-/-/<0.001	0.20/-/-/0.024
		2012	97.3/-/-/2.8	95.3/-/-/2.8	2.0/-/-/<0.001	0.19/-/-/0.023
		2013	143/-/-/4.0	140/-/-/4.0	2.9/-/-/<0.001	0.27/-/-/0.025
		2014	154/-/-/3.2	151/-/-/3.2	2.9/-/-/<0.001	0.29/-/-/0.024
		2015	89.9/-/-/2.3	88.3/-/-/2.3	1.6/-/-/<0.001	0.18/-/-/0.022
		2016	83.9/-/-/2.5	82.3/-/-/2.5	1.7/-/-/<0.001	0.17/-/-/0.023
Busan	Gijang	2016	74.0/1.0/8.7/4.7	72.5/0.7/1.8/4.7	1.4/0.3/6.9/<0.001	0.15/0.020/0.033/0.026
		Yeonsan	2010	73.5/1.5/11.7/5.6	72.1/1.1/2.4/5.6	1.4/0.4/9.2/<0.001
	Gijang	2012	67.7/0.9/8.7/3.2	66.3/0.7/1.8/3.2	1.4/0.2/6.9/<0.001	0.14/0.020/0.033/0.024
		2013	73.2/0.5/27.5/2.3	71.5/0.4/5.7/2.3	1.7/0.1/21.7/<0.001	0.15/0.019/0.067/0.022
		2014	72.5/1.3/14.1/1.0	70.9/1.0/2.9/1.0	1.6/0.4/11.1/<0.001	0.15/0.020/0.043/0.020
		2015	71.9/0.9/16.8/1.1	70.3/0.7/3.5/1.1	1.5/0.3/13.3/<0.001	0.15/0.020/0.048/0.020
		2016	88.8/1.0/11.2/4.6	87.1/0.7/2.3/4.6	1.7/0.3/8.9/<0.001	0.18/0.020/0.038/0.026
	Gwangbok	2016	102/1.1/13.3/3.8	100/0.8/2.8/3.8	2.0/0.3/10.5/<0.001	0.20/0.020/0.042/0.025
		Hakjang	2016	103/1.3/14.4/6.2	101/0.9/3.0/6.2	2.1/0.3/11.4/<0.001
	Jeju	Aewol	2013	66.3/0.6/7.1/6.4	65.2/0.5/1.5/6.4	1.1/0.2/5.6/<0.001
2014			65.8/0.8/8.5/2.7	65.1/0.6/1.8/2.7	1.7/0.2/6.7/<0.001	0.14/0.020/0.034/0.024
Gosan		2010	64.2/-/-/4.6	63.1/-/-/4.6	1.2/-/-/<0.001	0.13/-/-/0.026
		2011	80.0/-/-/2.6	78.6/-/-/2.6	1.4/-/-/<0.001	0.16/-/-/0.023
		2012	78.4/-/-/4.8	76.9/-/-/4.8	1.5/-/-/<0.001	0.16/-/-/0.027
		2013	80.7/-/-/2.7	79.6/-/-/2.7	1.2/-/-/<0.001	0.16/-/-/0.023
		2014	88.0/-/-/3.0	87.0/-/-/3.0	1.3/-/-/<0.001	0.17/-/-/0.023

<sup>a</sup>  $\sigma_{\text{ext}}$ : extinction coefficient,  $\sigma_{\text{sc}}$ : scattering coefficient,  $\sigma_{\text{ab}}$ : absorption coefficient, AOD: aerosol optical depth.

<sup>b</sup> Water-soluble/insoluble/BC/sea-salt.

되었다. 전반적으로, 지역에 관계없이 4개의 화학성분 중 가장 높은 농도가 관측되었던 water-soluble 성분의 AOD가 가장 높게 추정되었다. 서울 광진구에서 water-soluble 성분의 AOD는 겨울철 2월에 가장 높게 (0.29), 여름철 8월에 가장 낮게 나타났다(0.10). 반면, sea-salt에 의한 AOD는 water-soluble 성분과 달리 매우 작은 값으로 월/계절 변화가 뚜렷하지 않았다. 부산의 경우, 4지점(기장, 연산, 광복, 학장)에서 추정된 월/계절 별 AOD는 지점에 따라 서로 다른 특징을 보였다. 먼저, 기장지점에서는 모든 화학성분의 AOD가 이른 봄(3월)에 가장 높게 나타났으며, 대체로 여름철 8월에 가장 낮게 나타났다. 광복지점은 water-soluble과 BC 성분의

AOD가 5월에 가장 높게(특히, water-soluble의 최고 0.3) 나타났으며, 연산지점은 대체로 월/계절 변화가 뚜렷하지 않게 나타났다. 그러나 학장지점의 경우, 2016년 2월 water-soluble의 평균농도는  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 높지만(Fig. 2), 같은 월의 AOD는 다른 월에 비해 그다지 높은 편이 아니었다. 이것은 이 지점의 2월 상대습도(37%)가 겨울철(54%) 및 1년 전체 평균 상대습도(58%)에 비해 매우 낮기 때문에 AOD가 감소한 것으로 사료된다(Lee et al., 2008; Park et al., 2015). 대전의 유성구 지점은 water-soluble에 의한 AOD가 11월에 가장 높게 나타났는데(0.46, 전체 대상지역 중에서 가장 높음), 이것은 이 지점의 11월에 높은 농도(약  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Fig. 2)

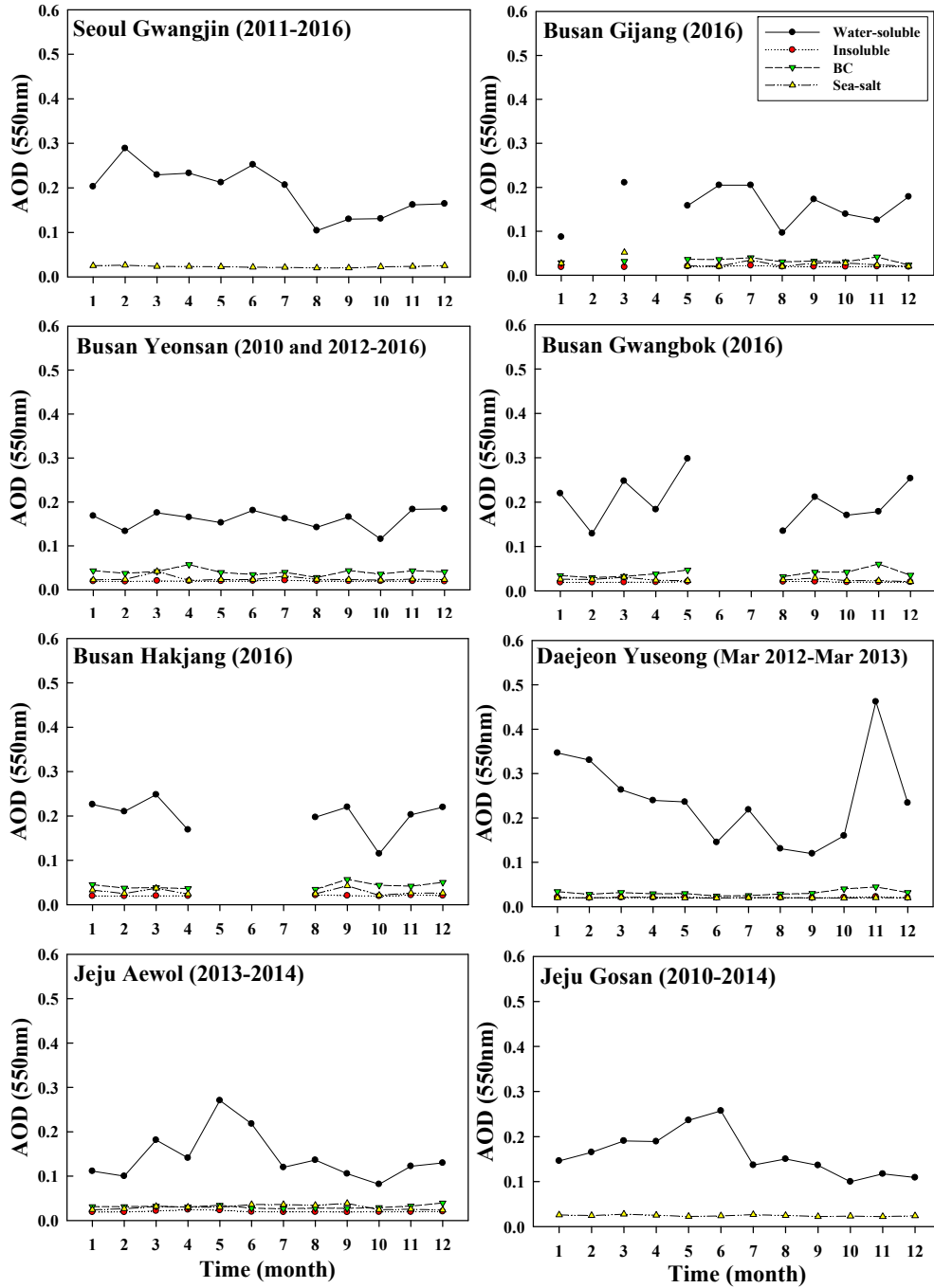


Fig. 4. Same as Fig. 2 but for the monthly variations of Aerosol Optical Depth (AOD). AOD values at Gijang in February and April, Hakjang during May-July, and Gwangbok sites in June-July were excluded in analysis due to data unavailability.

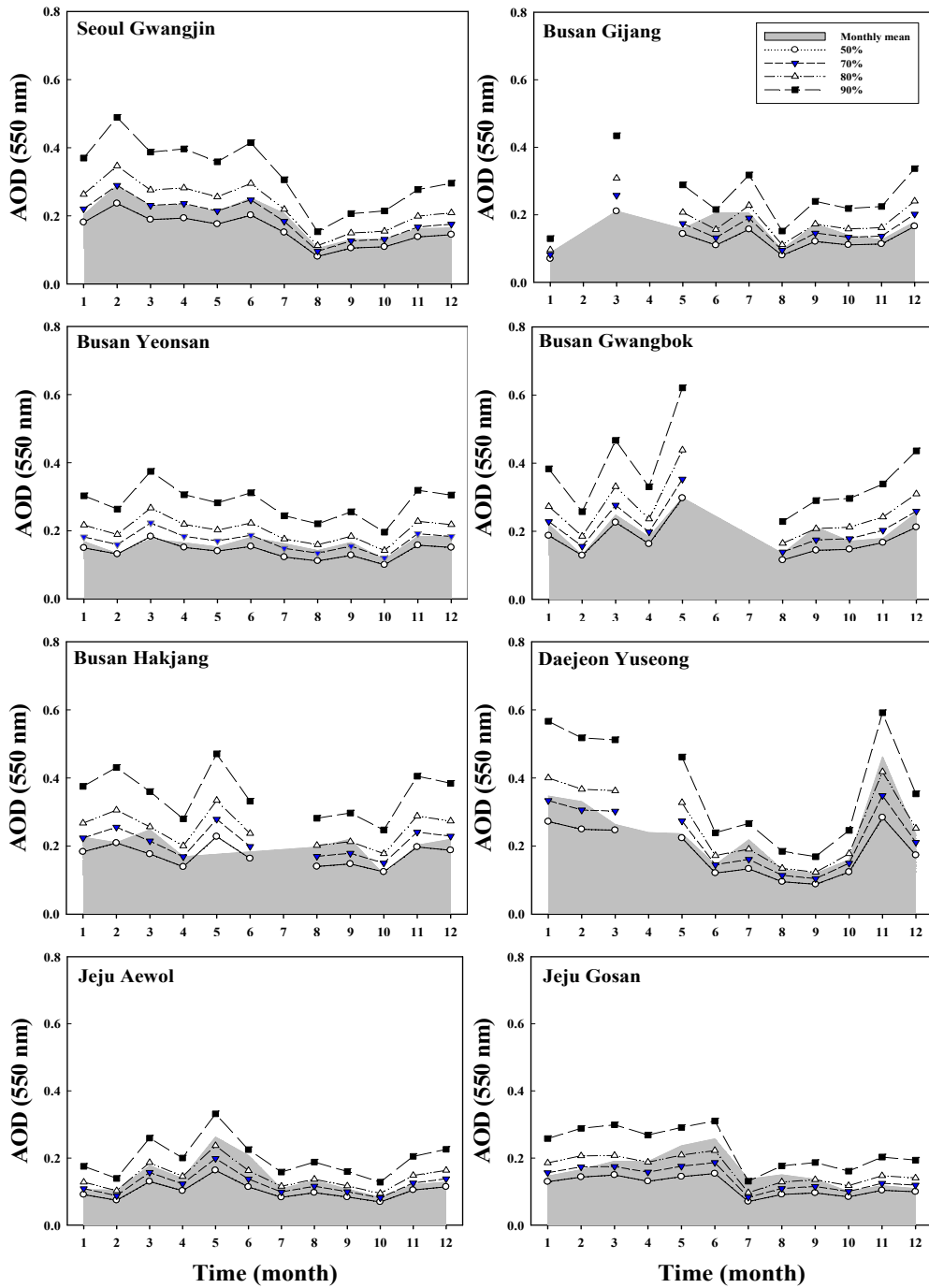


Fig. 5. Sensitivity of relative humidity (50%, 70%, 80%, and 90%) to the monthly AOD of water-soluble component in  $PM_{2.5}$  at the 8 different sites of four study regions.

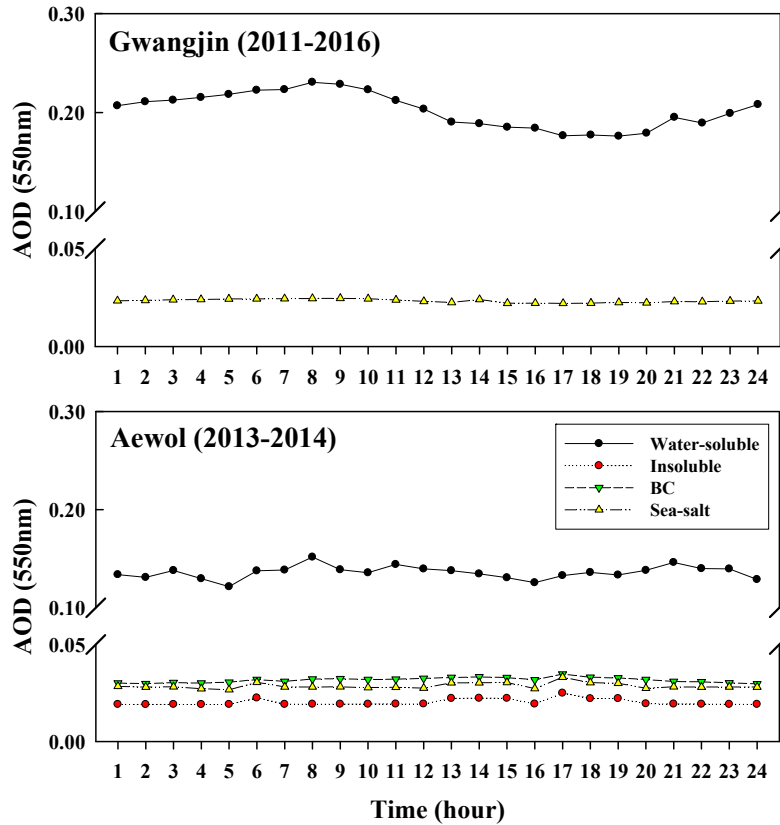


Fig. 6. Same as Fig. 3 but for the diurnal variations of Aerosol Optical Depth (AOD).

와 비교적 높은 상대습도(74%)로 인한 water-soluble 성분의 흡습성장에 의해 복합적으로 영향을 미친 것으로 사료된다(Park et al., 2015). 아울러 이것은 OPAC 모델 수행시 구름관련 에어로졸 간접효과를 배제하기 위해 적용한 가정(전운량 100% 제외, 나머지 운량은 맑은 하늘로 가정)도 일부 영향을 준 것으로 추정할 수 있다. 이외에도, 제주의 두 지점(애월과 고산)은 모두 water-soluble 성분에 의한 AOD가 늦은 봄(5월) 또는 초여름(6월)에 가장 높게 나타났으며, 특히 애월 지점에서 sea-salt에 의한 AOD가 여름철에 높았는데 이것은 여름철 높은 sea-salt 농도에 기인한 것으로 사료된다(Fig. 2).

일반적으로, 대기에서 상대습도가 증가하고 수증기가 많으면 에어로졸의 입자 크기를 성장시켜 에어로졸의 광학특성 즉 AOD 증가에 매우 민감한 영향을 미친다 (McInnes et al., 1998; Lee et al., 2008; Park et al.,

2015). 또한 위에서 언급한 바와 같이, 부산 확장지점 2월의 비교적 낮은 AOD와 대전 유성구 지점 11월의 매우 높은 AOD는 에어로졸 성분 농도뿐만 아니라 일부 상대습도에 의한 영향으로 나타났다. 이와 같이 에어로졸 화학성분 농도와 추정된 AOD의 패턴이 다소 차이가 나는 원인을 살펴보기 위해, 본 연구에서는 water-soluble 성분의 AOD에 대한 상대습도의 민감도를 분석하였다 (Fig. 5). 그림에서의 회색음영은 Fig. 4에 제시된 각 지점의 ASOS 상대습도 관측값을 적용한 water-soluble의 월별 AOD를 의미하며, 이들은 총 4개의 상대습도 조건 하에서(50%, 70%, 80%, 90%) 서로 비교하였다. 전반적으로 상대습도 관측값을 적용한 water-soluble의 AOD를 기준으로, 상대습도를 80%와 90%로 가정하여 계산된 AOD는 각각 약 1.2배와 1.7배 높게 나타났으며, 반대로 상대습도를 50%로 낮춘 AOD는 약 0.8배 낮게

추정되었다. 한편, sea-salt 성분의 AOD에 대한 상대습도 민감도 크기는 water-soluble의 경우와 비교하여 상대적으로 훨씬(약 4배) 작게 나타났다(그림 제외). 따라서 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성(예, AOD)은 각 성분의 농도뿐 아니라 상대습도의 변화에도 상당한 영향을 받는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 서울 광진구와 제주 애월 지점의 각 화학성분에 따른 AOD의 일중변화를 나타낸다. 앞서 언급하였듯이, 본 연구에서는 서울 광진구와 제주 애월 지점에 대해서만 시간별 에어로졸 자료를 확보할 수 있었기 때문에 이 두 지점에 대한 AOD의 일중변화를 분석하였다. 전체적으로, 서울 광진구 지점은 대도시 주거 및 인구밀집 지역에 위치하고 있어 시골지역인 제주 애월에 비해 일중 AOD 값(water-soluble 및 sea-salt 성분 모두)이 크게 나타났다(애월의 약 2배 이상). 이외에도, 광진구 지점의 water-soluble에 의한 AOD는 대체로 아침 일찍 출근시간대부터 증가하여 오전 8시에 값이 가장 크게 나타났다(0.23), 오후시간대(14시~16시)는 water-soluble 농도 패턴과 약간 달리(Fig. 3) 다소 낮은 AOD가 나타났는데(0.2 미만), 이것은 오후 14~16시의 상대습도(약 57%)가 오전시간대(약 68%)에 비해 낮았기 때문인 것으로 추정된다. 제주 애월지점의 경우, BC 성분을 제외한 대부분의 화학성분 농도는 오전 보다 오후에 약간 높게 나타났는데, 오히려 water-soluble 성분의 AOD는 오전(8시경)에 peak(정점)를 보이다가 다시 약간 감소하는 패턴이었으며, 나머지 성분들의 AOD는 일중 큰 변화가 없었다(Figs. 3과 6). 오전 8시경 water-soluble의 농도가 다소 낮음에도 불구하고 이 시간대의 상대습도(75%)가 오후(약 67%) 및 하루 전체 평균(72%)보다 다소 높아 AOD가 증가한 것으로 추정된다. 또한 이러한 특징은 AOD 월변화와 마찬가지로 전운량 가정(전운량 100% 제외, 나머지 운량은 맑은 하늘로 가정)에 의한 영향도 일부 미친 것으로 추정된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 지역(서울, 부산, 대전, 제주)에서의 에어로졸 화학성분 자료(시간별, 일별)를 이용하여 에어로졸 성분별 시·공간적 농도 특성(연평균, 월/계절 변화, 일중변화)과 화학성분에 따른 광학특성(산란계수,

흡수계수, AOD)을 비교분석하였다. 전반적으로 에어로졸 화학성분 중 water-soluble 성분의 농도가 모든 지점에 걸쳐 가장 높게 관측되었다(특히, 서울 광진구). 반면, sea-salt 성분은 섬지역인 제주 애월에서 가장 높게 나타났으나, 대부분 지점에서 연도별로 농도가 서로 달라 뚜렷한 특징을 찾을 수가 없었다. Insoluble과 BC 성분은 측정값이 없는 곳이 많아 정확한 비교분석은 어려웠지만, 주로 인구가 많고 대기오염 배출원이 많은 도시지역의 BC 농도가 시골 및 전원지역에 비해 상대적으로 높게(약 2~3배) 나타났다. 이외에도, 모든 측정지점에서 대부분(sea-salt 제외) 화학성분의 농도는 대체로 겨울과 봄철 또는 늦가을에 높고 여름과 이른 가을에 낮았으며, 일중변화는 서울 광진구와 제주 애월 모두 이른 오전 보다는 광화학 반응이 활발한 오후시간대에 좀 더 높은 농도가 나타났다.

에어로졸 화학성분별 광학특성을 보면, 전반적으로 농도가 가장 높았던 water-soluble 성분의 광학변수(BC의 흡수계수 제외) 값이 대부분의 측정지점(특히 서울)에서 가장 높게 나타났다. BC 성분의 경우 대부분 측정지점에서 농도는 다소 낮아도 광학변수 중 흡수계수 값은 전체에서 가장 높게 나타났는데, 이것은 BC 성분의 태양 복사(가시광선과 근적외선) 흡수 능력이 크기 때문인 것으로 사료된다. 또한 water-soluble 성분의 AOD는 서울(대도시) 광진구 지점이 다른 지점에 비해 훨씬 높게(2013년 0.29) 추정되었다. 이외에도, 대부분 측정지점에서 화학성분별 광학특성의 시간적 변화(연평균, 월변화, 일중변화)는 대체로 각 성분 농도의 변화패턴과 유사하였다. 그러나 부산 학장지점(2월)과 대전 유성구(11월)의 AOD는 화학성분 농도뿐 아니라 일부 상대습도 및 전운량 가정에 의한 영향도 미친 것으로 추정되며, 이러한 복합적인 영향은 서울 광진구와 제주 애월의 일중변화에서도 부분적으로 나타났다. 아울러 이러한 특징은 water-soluble 성분의 AOD에 대한 상대습도 민감도 분석을 통해서도 확인할 수 있었다(상대습도 80%와 90%로 가정했을 때 AOD는 1.2배와 1.7배 높게, 50%로 줄었을 경우 0.8배 낮게 추정).

본 연구는 우리나라 여러 지역에서 측정한 에어로졸의 화학성분 자료를 이용하여 화학조성에 따른 시·공간 농도 분포와 에어로졸 광학특성을 분석하였다. 이러한 분석에 있어 좀 더 많은 에어로졸 화학성분 자료(특히

시간별 농도 자료)를 이용하여 결과의 객관성을 높이고 싶었으나, 측정자료 수집의 한계로 인해 전반적인 에어로졸의 광학특성을 이해하는데 다소 어려움이 있었다. 따라서 향후 보다 정확하고 객관적인 분석·평가를 위해서는 전국 대기오염집중측정소, PM<sub>2.5</sub> 측정소 등 다양한 관측망 자료의 활용이 요구되며, 특히 고농도 미세먼지 또는 황사 발생과 같은 특이 조건에 대한 비교연구가 수행될 필요가 있다. 나아가 대기 중 에어로졸에 따른 광학 특성 및 복사효과를 입체적, 공간적으로 이해하기 위해서는 고해상도의 3차원 수치예측모델을 통한 상세연구가 필요하다고 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1A2B2003616). 또한 이 연구는 기상청 <기상-지진Sec-At기술개발연구>(KMI2018-07610)의 지원으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

- Bae, H. J., 2014, Effects of short-term exposure to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on mortality in Seoul, Korean J. Environ. Health Soc., 40(5), 346-354.
- Bae, M. S., 2011, Seasonal estimation of organic mass to organic carbon (OM/OC ratio), Proceedings of 49<sup>th</sup> meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, 182-182.
- Choi, J. C., Cha, J. W., Bang, S. Y., Youn, Y. H., 2002, Study on physical and chemical characteristics of yellow sand at Anmyeon-do, Chungnam, J. Korean Meteorol. Soc., 38(2), 105-117.
- Chubarova, N. Y., Sviridenkow, M. A., Smirnov, A., Holben, B. N., 2011, Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects, Atmos. Measure. Tech., 4, 367-378.
- Chun, Y. S., Kim, J. Y., Boo, K. O., Kim, N. O., 2000, The features associated with the yellow sand phenomenon observed in Korea in wintertime, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 16(5), 487-497.
- Day, D. E., Malm, W. C., 2001, Aerosol light scattering measurement as a function of relative humidity: A Composition between measurement made at three different sites, Atmos. Environ., 35, 5169-5176.
- Eun, S. H., Nam, H. G., Kim, B. G., Park, J. S., Ahn, J. Y., Lee, S. J., 2013, An Analysis of the characteristics of aerosol light scattering coefficients at Seoul and Baengnyeongdo, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29(3), 264-274.
- Hadei, M., Nazari, S. S. H., Eslami, A., Khosravi, A., Yarahmadi, M., Naghdali, Z., Shahsavani, A., 2017, Distribution and number of Ischemic Heart Disease (IHD) and stroke deaths due to chronic exposure to PM<sub>2.5</sub> in 10 cities of Iran (2013-2015); an AirQ+ modelling, J. Air Pollut. Health, 2(3), 129-136.
- Hess, M., Koepke, P., Schulz, I., 1998, Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, Bull. Am. Meteorol. Soc., 79(5), 831-844.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, IPCC Fourth Assessment Report - Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, IPCC Fifth Assessment Report - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Kang, G. E., 2013, Seasonal deposition characteristics of Water-soluble ion species in ambient aerosol in Iksan City, J. Environ Health Sci., 39(1), 56-70.
- Kim, B. G., Kim, Y. J., Eun, S. H., 2008, An Analysis of aerosol optical properties around Korea using AERONET, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24(6), 629-640.
- Kim, J. A., Jin, H. A., Kim, C. H., 2007, Characteristics of time variation of PM<sub>10</sub> concentrations in Busan and interesting its generation mechanism using meteorological variables, J. Environ. Sci., 16(10), 1157-1167, 2007.
- Kim, J. Y., Yoon, S. C., Kim, S. W., Brechtel, F., Jefferson, A., Dutton, E. G., Bower, K. N., Cliff, S., Schauer, J. J., 2006, Chemical apportionment of shortwave direct aerosol radiative forcing at the Gosan super-site, Korea during ACE-Asia, Atmos. Environ., 40, 6718-6729.
- Kim, N. K., Kim, Y. P., Kang, C. H., 2011, Long-term

- trend of aerosol composition and direct radiative forcing due to aerosols over Gosan: TSP, PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub> data between 1992 and 2008, *Atmos. Environ.*, 45, 6107-6115.
- Kim, S., Song, S. K., Han, S. B., 2016, A Study on the outbreak and transport processes of the severe Asian dust event observed in March 2010, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 32(3), 256-271.
- Kim, S. W., Choi, I. J., Yoon, S. C., 2010, A Multi-year analysis of clear-sky aerosol optical properties and direct radiative forcing at Gosan, Korea (2001 - 2008), *Atmos. Res.*, 95, 279-287.
- Kim, W. H., Kang, C. H., Shin, C. S., Ko, S. Y., Hong, M. S., 2003, Compositions and characteristics of atmospheric aerosols collected at the 1100 Site in Mt. Halla, Jeju, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19(2), 145-156.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2010-2016. Annual Climatological Report 2010~2016.
- Lee, D. H., Lee, K. H., Kim, Y. J., 2006, Application of MODIS aerosol data for aerosol type classification, *Korean J. Remote Sens.*, 22(6), 495-505.
- Lee, S., Ghim, Y. S., Kim, S. W., Yoon, S. C., 2008, Seasonal variations of chemical composition and optical properties of aerosols at Seoul and Gosan, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(4), 470-482.
- Lee, S., Ghim, Y. S., Kim, S. W., Yoon, S. C., 2009, Seasonal characteristics of chemically apportioned optical properties at Seoul and Gosan, Korea, *Atmos. Environ.*, 43, 1320-1328.
- Maji, K. J., Dikshit, A. K., Deshpande, A., 2017, Assessment of city level human health impact and corresponding monetary cost burden due to air pollution in India taking Agra as a model city, *Aerosol Air Qual. Res.*, 17, 831-842.
- Melnes, L., Bergin, M., Ogren, J., Schwartz, S., 1998, Apportionment of light scattering and hygroscopic growth to aerosol composition, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 513-516.
- Park, D. J., Ahn, J. Y., Shin, H. J., Bae, M. S., 2014, Characteristics of PM<sub>2.5</sub> carbonaceous aerosol using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30, 461-476.
- Park, J. S., Park, S. M., Song, I. H., Shin, H. J., Hong, Y. D., 2015, Characteristics of visibility impairment by semi-continuous optical and chemical property monitoring of aerosols in Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 32(4), 319-329.
- Park, J. Y., Lim, H. J., 2006, Characteristics of Water Soluble ions in fine particles during the winter and spring in Daegu, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(5), 627-641.
- Park, S. S., Kim, S. J., Gong, B. J., Lee, K. H., Cho, S. Y., Kim, J. C., Lee, S. J., 2013, Investigation on a haze episode of fine particulate matter using semicontinuous chemical composition data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(5), 642-655.
- Park, Y. H., 2017, Temporal and spatial variations in aerosol concentrations and the impact of different aerosol chemical components on direct radiative forcing in Jeju Area, Master's Dissertation, Jeju national university, Jeju, 64.
- Pilson, M. E. Q., 1998, *An Introduction to the Chemistry Of the Sea*. 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, 431.
- Pöschl, U., 2005, Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44(46), 7520 - 7540.
- Quinn, P. K., Coffman, D. J., Bates, T. S., Welton, E. J., Covert, D. S., Miller, T. L., Johnson, J. E., Maria, S., Russell, L., Arimoto, R., Carrico, C. M., Rood, M. J., Anderson, J., 2004, Aerosol optical properties measured on board the *Ronald H. Brown* during ACE-Asia as a function of aerosol chemical composition and source region, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S01, doi:10.1029/2003JD004010.
- Ramachandran, S., Kedia, S., 2010, Black carbon aerosols over an urban region: Radiative forcing and climate impact, *J. Geophys. Res.*, 115, D10202, doi:10.1029/2009JD013560.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2016, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, third edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- Shon, Z. H., Ghosh, S., Kim, K. H., Song, S. K., Jung, K., Kim, N. J., 2013, Analysis of water-soluble ions and their precursor gases over diurnal cycle, *Atmos. Res.*, 132-133, 309-321.
- Singh, S., Soni, K., Bano, T., Ranwar, R. S., Nath, S., Arya, B. C., 2010, Clear-sky direct aerosol radiative forcing variations over mega-city Delhi, *Annales*



- Geophysicae., 28, 1157-1666.
- Song, S. K., Shon, Z. H., 2014, Temporal variations in optical properties and direct radiative forcing of different aerosol chemical components in Seoul using hourly aerosol sampling, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(1), 1-17.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Park, Y. H., 2017, Diurnal and seasonal characteristics of the optical properties and direct radiative forcing of different aerosol components in Seoul megacity, *Sci. Total Environ.*, 599-600, 400-412.
- Venkatachari, P., Zhou, L., Hopke, P. K., Felton, D., Rattigan, O. V., Schwab, J. J., Demerjian, K. L., 2006, Spatial and temporal variability of black carbon in New York City, *J. Geophys. Res.*, 111(D10), D10S05.
- Yoon, S. C., Kim, J. Y., 2006, Influences of relative humidity on aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during ACE-Asia, *Atmos. Environ.*, 40(23), 4328-4338.
- Yoon, S. C., Won, J. G., Omar, A. H., Kim, S. W., Sohn, B. J., 2005, Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 39(35), 6620-6630.
- Yu, H., Kaufman, Y. J., Chin, M., Feingold, G., Remer, L. A., Anderson, T. L., Balkanski, Y., Bellouin, N., Boucher, O., Christopher, S., DeCola, P., Kahn, R., Koch, D., Loeb, N., Reddy, M. S., Schulz, M., Takemura, T., Zhou, M., 2006, A Review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 613-666.
- Zhang, Q., Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Allan, J. D., Coe, H., Ulbrich, I., Alfarra, M. R., Takami, A., Middlebrook, A. M., Sun, Y. L., Dzepina, K., Dunlea, E., Docherty, K., DeCarlo, P. F., Salcedo, D., Onasch, T., Jayne, J. T., Miyoshi, T., Shimojo, A., Hatakeyama, S., Takegawa, N., Kondo, Y., Schneider, J., Drewnick, F., Borrmann, S., Weimer, S., Demerjian, K., Williams, P., Bower, K., Bahreini, R., Cottrell, L., Griffin, R. J., Rautiainen, J., Sun, J. Y., Zhang, Y. M., Worsnop, D. R., 2007, Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13801, doi:10.1029/2007GLO29979.

- 
- 소윤영, 제주대학교 지구해양과학과 대학원생  
syy3434@jejunu.ac.kr
  - 송상근, 제주대학교 지구해양과학과 교수  
songsk@jejunu.ac.kr
  - 최유나, 제주대학교 지구해양과학과 대학원생  
ocean5@jejunu.ac.kr