



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

도시 및 배경지역의 에어로졸
화학성분별 광학특성과 직접적
복사강제력 추정 연구

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

蘇潤映

2020年 2月



석사학위논문

도시 및 배경지역의 에어로졸
화학성분별 광학특성과 직접적
복사강제력 추정 연구

제주대학교 대학원

지구해양과학과

소 윤 영

2020년 2월

도시 및 배경지역의 에어로졸 화학성분별 광학특성과 직접적 복사강제력 추정 연구

지도교수 송상근

소윤영

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2019年 12月

소윤영의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	_____	김태훈
위 원	_____	문재홍
위 원	_____	송상근



제주대학교 대학원

Estimation of optical properties and direct radiative
forcing of aerosol chemical components in urban and
background areas

Yun-yeong So
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Science

2020. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	4
2.1. 대상지역 및 자료	4
2.2. 연구방법	7
2.2.1. 에어로졸 광학모델	7
2.2.2. 대기복사전달 모델	10
제 3 장 결과 및 고찰	12
3.1. 에어로졸 화학성분별 농도분포 및 광학특성	12
3.1.1 에어로졸 화학성분 농도의 시·공간 분포특성	12
3.1.2 에어로졸 성분별 광학특성	21
3.2. 에어로졸 화학성분별 직접적 복사강제력 산출	27
3.2.1 지역별 직접적 복사강제력 산출	27
3.2.2 연무 사례일의 직접적 복사강제력 특성	37
제 4 장 요약 및 결론	43
참 고 문 헌	46
Abstract	50

List of Figures

- Fig. 1. Geographical locations of the measurement sites for aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ at the 8 different sites of the study region. 6
- Fig. 2. Monthly variations of the concentration ($\mu g/m^3$) of aerosol components in $PM_{2.5}$ at each study site during the study period. The concentrations of aerosol components in $PM_{2.5}$ at Gwangbok site, Busan during June-July were excluded in analysis due to no measurements. 16
- Fig. 3. Weekday and weekend variations in the mean concentration ($\mu g/m^3$) of aerosol chemical components at the study sites. Dajeon site was excluded in analysis due to no measurements. 18
- Fig. 4. Diurnal variations of the concentrations ($\mu g/m^3$) of aerosol components at Gwangjin and Aewol sites during the study period. 20
- Fig. 5. Monthly variations of aerosol optical depth (AOD). AOD values at Gijang in February and April, Hakjang during May-July, and Gwangbok site during Jun-July were excluded in analysis due to data unavailability. 24
- Fig. 6. Diurnal variations of aerosol optical depth (AOD) at Gwangjin and Aewol sites. 26
- Fig. 7. Monthly variations of Direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at surface (SFC) for each aerosol chemical component at each study site during the study period. Gwangjin and Aewol sites were calculated by the SBDART model during the day (07:00-18:00 LST for spring, 06:00-19:00 LST for summer, 07:00-18:00 LST for fall, and 08:00-17:00 LST for winter) 32
- Fig. 8. Same as Fig 7 but for Direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at top of

the atmosphere (TOA).	33
Fig. 9. Diurnal variations of direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the SFC and TOA for each aerosol chemical components at Seoul Gwangjin site during study period.	35
Fig. 10. Same as Fig 9 but for Jeju Aewol site.	36
Fig. 11. Concentration of each aerosol component at the 6 different study sites (sites have 4 aerosol chemical components) during haze and non-event periods.	38
Fig. 12. Same as Fig 11 but for AOD.	39
Fig. 13. Direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the surface (SFC) for each aerosol component at the 8 different study sites during haze and non-event periods.	41
Fig. 14. Same as Fig 13 but for DRF at the top of atmosphere (TOA).	42

List of Tables

Table 1. Annual mean concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of aerosol chemical components in $\text{PM}_{2.5}$ at 8 different sites during the study period.	14
Table 2. 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.	22
Table 3. Annual mean of direct radiative forcing (DRF, W/m^2) of each aerosol chemical component at the 8 different sites during the study period.	29

1. 서론

대기 중의 에어로졸은 직접효과(태양 복사광을 산란 또는 흡수)와 간접효과(구름의 생성과 수명 변화 등)를 통하여 지구 에너지 균형(예, 복사강제력)을 직·간접적으로 변형시키며 지역규모의 기상변화를 살펴보는데 중요하게 여겨지고 있다(Lee et al., 2006; IPCC, 2013). 또한 입경이 작은 미세에어로졸 일수록 환경과 건강에 미치는 위해성이 강조되면서 먼지의 발생원, 에어로졸의 화학성분 구성 및 미세먼지 중 가장 많은 부분을 차지하는 수용성 이온성분의 조성연구가 중요하게 여겨지고 있다(Park and Lee, 2015). 또한 PM_{2.5} 성분 중 이온성분은 약 35~60%를 차지하고 있으며(Jung and Han, 2008), 주요 이온성분은 황산염(Sulfate, SO₄²⁻), 질산염(Nitrate, NO₃⁻), 암모늄염(Ammonium, NH₄⁺) 등이다. 따라서 음이온(SO₄²⁻, NO₃⁻)과 양이온(NH₄⁺)의 결합으로 이루어진 에어로졸의 대기 중 농도와 거동을 파악하는 것은 2차 입자성 물질에 대한 대기오염 문제를 파악하는데 있어 기본조건 이라고 할 수 있다(Park and Lee, 2015).

에어로졸의 기후에 대한 영향으로는, 지구 온난화를 일으키는 온실기체와 달리 지표면에 도달하는 태양복사에너지를 산란 및 반사시킴으로 지표면 냉각화에 영향을 주며(Kim et al., 2013), 일부 지구복사를 흡수함으로 온도 구조를 변형시켜 지구온난화에 영향을 준다. 예를 들어, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻ 과 같은 수용성 에어로졸은 태양복사를 산란시켜 음의 복사강제력(Radiative forcing, RF)을 통해 지구 냉각에 일부 기여하며, 검댕(Black carbon, BC)은 태양복사를 흡수하여 온난화 효과를 일으킨다(IPCC, 2007; Song et al., 2014). 또한 대기 중 체류시간이 짧기 때문에 배출지역에 따라 에어로졸의 화학조성이 다른 양상으로 나타난다(Lee et al., 2008). 예를 들어, 유기탄소(Organic Carbon, OC)와 검댕(Black Carbon, BC)의 인위적 발생빈도는 배경지역보다 도시지역에서 훨씬 크게 나타난다. 인위적 오염원과 자연적 배출원이 많은 도시 및 배경지역에 따라 에어로졸의 화학성분별 농도분포에 차이가 나며, 이로 인해 에어로졸의 광학특성과 복사효과의 영향 또한 지역에 따라 서로 다르게 나타난다. 따라서 다양한 도시 및 배경지역에서의 에어

로졸 화학성분 분류, 농도특성, 광학특성 및 복사효과에 대한 연구는 지역 대기 질 및 지구복사 수지와 기후변화를 평가함에 있어서 매우 중요하다고 볼 수 있다(Yoon et al., 2005; Song et al., 2017).

에어로졸의 화학성분에 따라 지구복사 수지 및 기후변화에 미치는 영향이 중요함에 따라 에어로졸에 의한 광학특성과 복사효과 산출에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다(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 광학특성 중 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)는 에어로졸의 연직범위를 일컫는 말이며, 대기 중의 에어로졸에 의한 복사의 감쇠 정도를 나타내는 지표로 대기복사의 특징을 결정하는 중요 변수이다(Eun et al., 2013). Day and Malm(2001)과 Park 등(2015)에 의하면, 대기 중 SO_4^{2-} 과 NO_3^- 등 수용성(Water-soluble) 에어로졸 이온이 많은 지역의 경우 상대습도로 인한 에어로졸의 흡습성장이 활성화되어 에어로졸 광학변수(AOD, 흡수계수 등) 값이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 과거 연구에서 배경지역인 제주도 애월에서 수용성(water-soluble) 성분의 에어로졸은 상대습도가 증가함에 따라 흡습성장으로 인해 상대습도 85%일 때의 AOD가 70% 일 때에 비해 평균 약 0.13 증가함을 보였다(Park, 2017). 이외에도 2010년 도시지역인 서울에서 수용성 에어로졸의 AOD 평균이 다른 성분들(불용성, BC 등)에 비해 수배~수십 배 높게 추정되었다(Song et al., 2017).

에어로졸은 화학성분에 따라 달라지는 복사강제력(Radiative forcing, RF)을 통해 기후변화 시스템의 지구-대기 에너지 평형을 변화시킨다. 이에 대한 영향력은 기후 모델 및 복사전달모델을 통한 결과를 분석해 추정할 수 있다. 복사강제력이란 에어로졸 화학성분에 따른 에너지의 평형을 변화시키는 영향의 정도를 정량화 한 수치이며, 기후 변동 메커니즘의 잠재적인 중요 지표로 볼 수 있다. 복사강제력의 단위는 단위면적 당 와트(W/m^2)로 나타내고, 복사강제력 값이 양수로 추정되면 온난화 효과를 나타내며 음수일 경우에는 냉각 효과로 볼 수 있다. 따라서 에어로졸의 화학성분에 따른 복사강제력 수치의 정량적 추정 연구는 기후변화의 불확실성을 규명하기 위한 기초자료로서 중요하다고 볼 수 있다.

에어로졸의 복사강제력에 영향을 주는 기상현상 중 연무는 습도가 75% 이하로

낮을 때 대기 중에 연기, 먼지 등의 입자로 인해 시정을 감소시키는 특징이 있다 (Lim et al., 2004). 황사와 같이 1차 입자상 물질을 제외하고 대체로 고농도 미세 먼지는 연무의 형태를 띠며, 이러한 현상은 지역별 특성(산업·인구밀집 등)에 따라 영향을 미치는 정도가 달라질 수 있다. 도시나 공업 지역에서는 공장과 자동차 배기가스 등의 인위적 오염원에 의해 발생한다. 예를 들어, 서울지역은 인구 밀도가 매우 높고 다양한 오염원(자동차, 산업시설 등)으로부터의 대기오염물질에 의해 연무현상이 더욱 심해질 수 있는 반면, 청정지역인 제주도(고산지역)는 오염물질의 국지배출에 의해서 대기오염현상은 물론 연무 발생에 미치는 영향도 매우 미미하게 나타났다(Lim et al., 2004). 연무 현상과 관련해서는 1998년부터 2002년까지의 연무현상과 황사현상에 따른 대기 중 에어로졸의 특성이 분석된 바 있다(Chun et al., 2003). 대기 중의 PM_{2.5} 에어로졸은 화학구성에 따라 물리화학적 특성과 계절적 특성에 차이가 있으며, 따라서 기상인자에 따라 에어로졸의 화학조성을 분류하고 그 특성을 상호 비교분석 하는 것은 중요하다고 볼 수 있다(Ko et al., 2016).

본 연구에서는 다양한 지역(배경지역, 도시지역)의 시간별 및 일별 에어로졸 화학성분 자료를 이용하여 에어로졸 화학성분에 따른 시·공간적 농도 특성을 분석하였다. 또한 에어로졸 광학모델과 대기복사전달 모델을 이용하여 서로 다른 지역에서의 광학특성과 복사강제력을 각각 추정하였다. 또한 연구 지역에서 관측된 연무 사례일을 중심으로, 시간별/일별 에어로졸 화학성분 자료를 이용하여 연무와 비연무 사례일 때의 직접적 복사강제력을 산출하고, 연무현상이 복사강제력에 미치는 영향을 정량화하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 지역 및 자료

본 연구에서는 도시 및 배경지역에서 에어로졸 화학성분에 따른 시·공간적 농도 변화와 광학특성 및 복사효과를 분석하기 위하여 도시지역으로는 서울(1지점) 광진구, 부산(4지점) 광복, 학장, 연산, 기장, 대전(1지점) 유성구 지점, 배경지역으로는 제주(2지점) 애월과 고산 지점을 선정하였다(Fig. 1). 각 지점별 대기질 측정소의 일반적인 특징은 다음과 같다. 서울 광진구 측정소는 구의정수사업소에 위치하고 있으며, 주변으로 작은 산과 주거건물이 인접해 있다. 부산 측정소의 경우, 광복지점(부산 중구)은 도시 중심에 위치하며 많은 차량과 상가건물이 밀집된 지역이고(상업지역), 학장지점은 주변에 일반산업단지 및 공업단지가 인접해 있다(공업지역), 연산지점은 주거 밀집지역(주거지역), 그리고 기장지점은 인구는 다소 많으나 주변에 산과 들로 둘러싸여 있는 지역이다(교외지역). 대전의 측정소는 유성구 한국표준과학연구원에 위치하고 있으며, 연구단지 및 산업단지가 인접하여 있다. 마지막으로, 제주의 애월 대기오염집중측정소는 해발 약 600 m의 산간지대에 있으며, 고산지점은 WMO에서 권고하는 지역급 국가배경지점이고 제주도 서쪽 해안가에 바로 인접하여 인위적 오염물질 배출이 매우 적은 지역이다(해발 약 72 m). 각 지점의 에어로졸 분석 자료는 서울과 부산의 측정지점 자료는 각 시의 보건환경연구원, 대전은 한국표준과학원, 제주는 국립환경과학원에서 운용·관리되고 있으며, 에어로졸 화학적 성분 분석을 위한 자료의 신뢰성 평가를 위해 정도 보증(Quality Assurance, QA) 및 정도 관리(Quality Control, QC) 과정을 거쳤다.

각 대기질 측정지점 8곳에서의 에어로졸 화학성분별 자료는 관측을 시작한 시점이 모두 다르므로 본 연구에서 이용된 연구기간은 측정지점별로 다르다. 서울 광진구는 2011~2016년, 부산 연산지점은 2010년, 2012~2016년, 나머지 3개 지점인 광복, 학장, 기장은 2016년 자료만 수집되었다. 대전의 유성구 지점은

2012년 3월~2013년 3월, 제주의 2지점은 고산 2010~2014년, 애월 2013~2014년 자료를 이용하였다. 또한 에어로졸 화학성분별 농도 자료의 측정 및 수집의 한계로 인해 각 지점에 따라 이용된 자료가 일부 다르다. 서울 광진구 지점과 제주 고산지점에서 측정된 $PM_{2.5}$ 화학성분 자료는 8개의 이온성분(NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^-)이며, 각각 시간별과 일별 측정 자료를 분석에 이용하였다. 나머지 지점들의(부산, 대전, 제주 애월) 자료는 8개의 이온성분(NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^-)과 2개의 탄소성분(OC, EC)이며, 부산과 대전지점은 일별로, 제주 애월 지점은 시간별로 측정된 자료를 이용하였다.

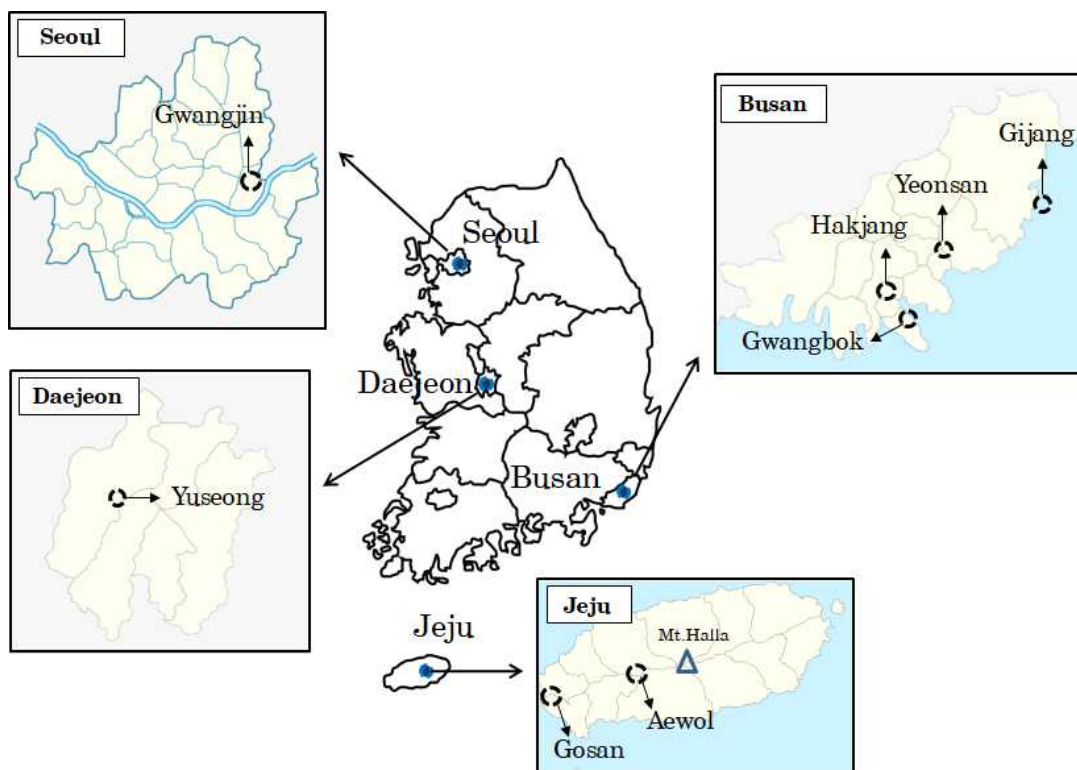


Fig. 1. Geographical locations of the measurement sites for aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ at the 8 different sites of study regions.

2.2 연구방법

2.2.1 에어로졸 광학 모델

본 연구에서는 에어로졸 광학모델인 Optical Properties of Aerosol and Clouds (OPAC)을 이용하여 에어로졸 화학성분별 광학특성(소산계수(σ_{ext}), 산란계수(σ_{sc}), 흡수계수(σ_{ab}), 에어로졸 광학두께(AOD) 등)을 산출하였다. OPAC 모델은 주어진 파장과 상대습도의 조건하에서 에어로졸 및 구름 성분의 광학변수를 산출하는 프로그램으로, 에어로졸 성분에 따라서 대륙, 도시, 해양, 북극, 남극 에어로졸, 6개의 water cluds 및 3개의 ice clouds 유형으로 선택하여 수행할 수 있다. 또한 10가지의 에어로졸 성분 (water-soluble, insoluble, BC (black carbon), sea-salt 2개 mode, mineral dust 4개 mode, sulfate droplets)에 대하여 혼합 또는 각각의 광학특성을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 측정 자료의 부족으로 인해 총 10개의 에어로졸 성분 가운데 4가지 성분, 즉 수용성(water-soluble), 불용성(insoluble), 검댕(BC), 해염(sea-salt) 성분으로 분류하여 화학성분별 광학특성을 산출하였다. OPAC 모델 내의 상대습도는 총 8개 카테고리(0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99%)가 있으며, 각 상대습도 조건하에서 광학변수를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 지점별로 보다 현실적이고 정확한 분석을 위해 자동기상관측시스템(Automated Weather Station, AWS)과 기상청 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)에서 관측된 시간별 상대습도를 연구기간동안 적용하여 OPAC 모델링을 수행하였다. ASOS는 주로 대상지역 지방청과 기상대에 설치되어 다양한 기상상태(기압, 기온, 풍향 등)를 관측하며, AWS는 자동기상관측 기상관측소가 없는 곳에 설치되어 국지적인 기상현상을 실시간으로 관측하는 시스템이다. 서울 광진구, 대전 유성구, 제주 애월 및 고산은 해당지점에서 기상관측이 수행되지 않아 지점별로 가장 가까이 위치하고 있는 ASOS 지점의 상대습도 자료를 이용하였으며, 부산의 4지점(광복, 연산, 기장, 학장)은 해당지점의 AWS 상대습도 자료를 이용하였다. OPAC 모델내의 파장범위는 단파장 영역대인 $0.3\mu\text{m}$ - $4.0\mu\text{m}$ 범위로 총 24개 파장을 적용하였다.

앞 단락에서 언급한 것처럼, 본 연구에서는 4가지 에어로졸 화학성분에 대해 OPAC 모델을 수행하였는데, 화학 성분별 상세 설명은 다음과 같이 요약된다.

먼저 water-soluble 에어로졸은 총 7가지 성분, 즉 일부는 비해염(non-sea-salt (NSS)) 이온인 NSS-SO_4^{2-} , NSS-K^+ , NSS-Mg^{2+} , NSS-Ca^{2+} 성분과, NO_3^- , NH_4^+ 와 같은 무기이온 성분, 수용성 OC로 구성되어 있다. 본 연구에서는 수용성 OC 성분이 측정되지 않아 OC를 수용성 OC로 가정하였다. 4가지 NSS 성분인 NSS-SO_4^{2-} , NSS-K^+ , NSS-Mg^{2+} , NSS-Ca^{2+} 에 대해 자세히 보면, 이들의 질량농도는 다음의 관계식, $[\text{ion}]_{\text{obs}} - [\text{NA}] \times (\text{Na}^+ \text{에 대한 이온의 질량비})$ 에 의해서 계산되었으며, Na^+ 에 대한 각 이온성분(SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})의 비율은 Pilon(1998)에 의해 제시된 0.252, 0.036, 0.121, 0.041을 각각 적용하였다. 다음으로 BC성분은 대상지역의 관측자료 부재로 인해 EC성분으로 대신하였으며, Venkatachari 등(2006)에 의하면 EC는 탄소질 종류 간의 광학적 차이를 분석할 때 BC로 특정되어질 수 있다. 세 번째로 insoluble 성분은 OC에 대한 유기물질(Organic Material, OM)의 비를 이용하여 결정하였는데, 이러한 OM/OC의 비율은 계절에 따라 다르게 적용하였다(여름과 겨울에는 각각 2.06과 1.48, 봄과 가을에는 두 비율의 평균값인 1.77, Bae, 2011). 마지막으로 sea-salt 성분은 $[\text{Cl}^-]$ 와 $1.47[\text{Na}^+]$ 의 합으로 계산되었다(Quinn et al., 2004). 다음은 총 4가지 화학성분 구성에 대한 식을 정리한 것이다.

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

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

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

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

본 연구에서는, 구름의 에어로졸 간접효과 모의에 필요한 입력자료(예, 구름의 입자크기, 수농도 등) 수집의 한계로 인하여 에어로졸의 직접효과에 대한 광학특성을 분석하였다. 즉, 서울 광진구와 제주 애월(에어로졸 시간별 자료 이용)은 기상청 ASOS에서 측정된 시간별 전운량이 100%(전부 구름)인 경우 분석에서 제외하였으며 나머지 운량에 대해서는 맑은 하늘(전운량 0%)로 가정하여 계산하였다(Kim et al., 2010; Singh et al., 2010; Song et al., 2017). 나머지 부산 4지점, 대

전 지점과 제주 고산 지점은 일별 에어로졸 자료를 사용하였기 때문에 시간별 전운량 자료를 일평균 하여, 위의 두 지점(서울 광진구, 제주 애월)과 마찬가지로 전운량 100%를 제외하고 나머지를 맑은 하늘(전운량 0%)로 가정하였다. 이외에도, OPAC 모델의 입력 자료로 이용된 에어로졸 화학성분별 수농도(number density)는 단일 입자의 질량농도를 이용하여 4가지 성분에 대해 각각 계산되었다(Hess et al., 1998).

2.2.2 대기복사전달 모델

본 연구에서는 도시 및 배경지역에서 에어로졸 화학성분이 직접적 복사강제력(direct radiative forcing, DRF)에 미치는 영향을 분석하기 위해 캘리포니아대학교-Santa Barbara 에서 개발한 대기복사전달 모델인 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 모델을 이용하였다(Ricchiazzi et al., 1998). SBDART 모델은 DISORT(Discrete-ordinate-method)를 기반으로 하여 단파(0.25~4.0 μm), 장파(4.0~100 μm), 전 파장영역(0.25~100 μm)에 대해서 맑은 또는 흐린 하늘 조건에서 지구 대기 내부와 표면의 평행 - 평면 복사 전달(예, 복사 강제력)을 계산하는 모델이다. 모델 수행을 위한 주요 매개변수는 AOD, SSA, ASYM, phase function, 지표 알베도, 대기 프로파일(기온, 기압 등), 태양 천정각(solar zenith angle, SZA)이다(Ricchiazzi et al., 1998). 광학변수(AOD, SSA 등) 값은 OPAC 모델 산출결과를 이용하였으며, 고층 기상요소의 부재로 모델에서 제공하는 US62 대기프로파일과 초목환경의 지표알베도 값을 이용하였다(Hess et al., 1998). 태양 천정각은 SBDART 모델 내의 namelist 파일에서 특정 날짜(Julian day), 시간(UTC)과 위도 및 경도를 지정하여 계산된다(Ricchiazzi et al., 1998).

일반적으로, 에어로졸 화학성분에 따른 지표(surface, SFC)와 대기상단(Top of the atmosphere, TOA)의 직접적 복사강제력(DRF_{SFC} , DRF_{TOA})은 에어로졸이 있는 경우의 복사속(F)과 없는 경우(F_{wo})로 구분하여 둘의 차로 계산이 되며, 각 복사 강제력은 '하향플럭스(downward flux) - 상향플럭스(upward flux)' 즉 net flux로 계산된다 (식(5)). 또한, 대기 중(atmosphere, ATM) 복사강제력(DRF_{ATM})은 DRF_{TOA} 와 DRF_{SFC} 의 차이로 계산된다(식 (6)). 다음은 SFC, TOA, ATM에서의 에어로졸 직접적 복사강제력의 추정식을 나타낸다.

$$\text{DRF}_{\text{TOA,SFC}} = (F^{\downarrow} - F^{\uparrow})_{\text{TOA,SFC}} - (F_{\text{wo}}^{\downarrow} - F_{\text{wo}}^{\uparrow})_{\text{TOA,SFC}} \quad (5)$$

$$\text{DRF}_{\text{ATM}} = \text{DRF}_{\text{TOA}} - \text{DRF}_{\text{SFC}} \quad (6)$$

본 연구에서는 단파장 영역에 속하는 0.3~4.0 μm 파장영역에서 SFC, TOA, ATM

의 직접적 복사강제력을 산출하였다. SBDART 모델링에 있어서 시간별 자료를 이용한 지점(서울 광진구와 제주 애월)의 경우 24시간과 주간(daytime)에 대하여 각각 수행되었으며, 본 연구에서는 주로 주간을 대상으로 모의된 직접적 복사강제력에 대하여 살펴보았다. 주간의 시간대는 계절별로 일출과 일몰 시간을 고려하여 봄철과 가을철에는 07~18시, 여름철에는 06~19시, 겨울철에는 08~17시로 분류하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에어로졸 화학성분별 농도분포 및 광학특성

3.1.1 에어로졸 화학성분 농도의 시·공간 분포특성

본 연구에서는 에어로졸 화학성분에 따른 각 지점별 농도 및 광학특성을 각각 일별자료(부산 광복, 학장, 연산, 기장, 대전, 제주 고산)와 시간별 자료(서울 광진구, 제주 애월)를 이용한 지점으로 나누어 연평균(Table 1), 월변화(Fig. 2), 주중/주말(Fig. 3) 및 일중변화(Fig. 4)를 분석하였다. 대전 유성구 지점의 경우 관측기간이 2012년 3월 ~ 2013년 3월 이므로 에어로졸 연평균 분석에서 제외하였다.

대전을 제외한 일별자료를 이용한 지점의 연평균 농도를 살펴보면(Table 1), 연구기간동안 전 지점에서 공통적으로 water-soluble 성분 농도가 가장 높게 나타났다. 그 다음으로 insoluble, BC 또는 sea-salt 순으로 나타났다. 전체 연구기간동안의 농도를 평균한 water-soluble 농도는 학장지점이 $17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며, 그 다음으로 광복지점이 $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높았다. sea-salt의 전체 평균 농도는 부산 4지점 평균이 $0.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 제주 고산 평균이 $0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지역별 큰 차이가 안 나타났다. 한편, 연구기간동안 가장 높은 농도가 나타난 water-soluble 성분의 경우 부산 4지점 전체 평균 약 $14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 제주 고산 지점 평균 $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 높은 수준이다. 이것은 부산 지점이 고산지점에 비해 인구밀집과 차량이 많기 때문에, 이로 인해 야기되는 water-soluble 성분을 구성하는 질산염(NO_3^-)과 황산염(SO_4^{2-}) 농도가 높아짐에 따른 것으로 사료된다 (Seinfeld and Pandis, 2016; Song et al., 2017). 고산 지점은 insoluble과 BC 성분의 측정값이 없기 때문에 비교분석이 어려웠지만, 부산 지점의 BC 성분 농도를 분석해보면 주로 인구 밀집지역(연산지점) 및 산업/공업지역(광복, 학장지점)이 전원지역(기장지점)에 비해 상대적으로 높은 농도(약 1.5배 내외)가 관측되었다.

BC 성분은 주로 화석연료의 불완전 연소를 통하여 발생하므로, 배출강도가 높은 도시지역(연산, 광복, 학장)이 전원지역(기장)보다 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다(Pöschl, 2005; Zhang et al., 2007). 측정 지점별로 보다 구체적으로 해석하기 위하여 부산 연산과 제주 고산지점의 공통 연도인 2012년 ~ 2014년에 대해 비교하였다. water-soluble 농도는 연산지점이 평균 $14.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고산지점 보다 높게 나타났다(평균 $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 반면, sea-salt 성분의 경우 고산지점이 평균 $0.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 연산지점(평균 $0.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높게 나타났으며 이는 4면이 바다로 둘러싸인 지리·지형적 특징 때문으로 보여 진다.

다음으로 시간별 자료를 이용한 서울 광진구 지점과 제주 애월 지점의 화학성분별 연평균 농도 특징을 살펴보면(Table 1), 두 지점 모두 공통적으로 water-soluble 성분의 농도가 가장 크게 관측된 반면 sea-salt 성분의 경우 애월 지점이 서울지점에 비해 높게 나타났는데(특히 2013년 약 1.3배), 이는 해양에서 발생하는 해염입자의 특성상 바다에 인접한 애월지점의 지리·지형 특성에 기인한 것으로 사료된다. 공통연도인 2013 ~ 2014년에 대해 비교해보면 서울지점(평균 $25.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 애월 지점(평균 $9.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 약 2.6배 높게 나타났다. 이것은 서울지점이 애월 지점에 비해 높은 인위적 배출원에 의한 영향으로 질산염(NO_3^-)과 황산염(SO_4^{2-})의 농도가 높아지는 것 이외에도, 서울지역의 2013년과 2014년의 연무발생일(평균 146일)이 제주지점(평균 19일)과 비교하여 상대적으로 높게 나타났다(Korea Meteorological Administration (KMA), 2013-2014). 이로 인한 연무 에어로졸(주로 water-soluble의 주요성분인 황산염, 질산염, 암모늄염 등)의 빈번한 발생빈도가 서울지역의 water-soluble 성분의 농도 증가에 영향을 준 것으로 사료된다.

Table 1. Annual mean concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of aerosol chemical 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 ^a	- ^b	-	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±0.80	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	

^a Mean±1 σ

^b Not measured

Fig. 2는 지점별(서울, 대전, 부산, 제주) 8곳의 에어로졸 화학성분에 따른 농도의 월변화를 나타낸다. 연구기간동안 대부분 지점에서 water-soluble 성분평균농도의 경우 여름철(6~8월)에 가장 낮게 나타났으며, water-soluble과 BC 성분의 평균농도는 늦가을부터 겨울철(12~2월)과 봄철(3~5월)에 걸쳐 높게 나타났다. Insoluble 성분의 경우 앞의 두 성분과 비슷하게 겨울철과 봄철에 높게 나타났으며, 부산의 기장, 연산, 학장 지점에서는 여름철에 다소 높게 관측되었다. sea-salt 성분의 농도는 계절에 관계없이 매우 낮게 나타났으며, 월별로 큰 폭의 차이가 보이지 않았다. 봄철과 겨울철의 높은 에어로졸 농도는 일반적으로 해당 계절에 중국 북부의 사막지역으로부터 발생하여 유입되는 황사의 일부 영향과 겨울철 난방 등의 영향이 크게 작용하는 것으로 사료된다(Chun et al., 2000; Kim et al., 2016).

일별 자료를 이용한 지역(부산 4지점, 대전, 제주 고산)의 에어로졸 화학성분별 월변화를 살펴보면(Fig. 2(a)), 세 지점 모두 대체적으로 봄철과 늦가을부터 겨울철 기간 동안 water-soluble 농도가 높게 나타났으며 특히 학장지점과 광복지점이 각각 2월과 5월에 $35.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $33.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고, 대전지점이 11월에 $31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났다. 반면 sea-salt 성분의 경우 6개 지점 모두 3월에 가장 높았으며 특히 기장지점에서 $6.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났다. 또한 지점별로 보면 대전 유성구 지점에서는 11월에 sea-salt 성분을 제외한 대부분 성분이 매우 높은 농도를 보였다. 한편, 시간별 자료를 이용한 지역(서울 광진구, 제주 애월)의 월변화를 살펴보면(Fig. 2(b)), 다른 지점들과 마찬가지로 전체적인 에어로졸 평균농도는 여름철을 제외하고 봄철, 늦가을 및 겨울철에 높게 나타나며, water-soluble을 제외한 나머지 성분들은 계절별로 큰 변화 차가 나타나지 않았다. 상대적으로 도시지역인 서울 광진구는 배경지역인 제주에 비해 겨울철(또는 일부 봄철) 높은 water-soluble 농도가 관측되었다(특히, 2월 서울 지점에서 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 일반적으로 인구 밀집도가 높고 산업시설과 차량 등 대기오염 배출원이 많은 도심지가 시골지역에 비해 상대적으로 연무 발생빈도가 높으며(제주에 비해 약 5배 이상)(KMA, 2011-2016), 또한 겨울철 난방의 연료 사용량이 증가하고 이로 인해 겨울철 연무의 빈도가 높아짐에 따라 도시지역 water-soluble 성분의 농도가 높게 나타나는 것으로 사료된다(Park et al., 2013; Shon et al., 2013).

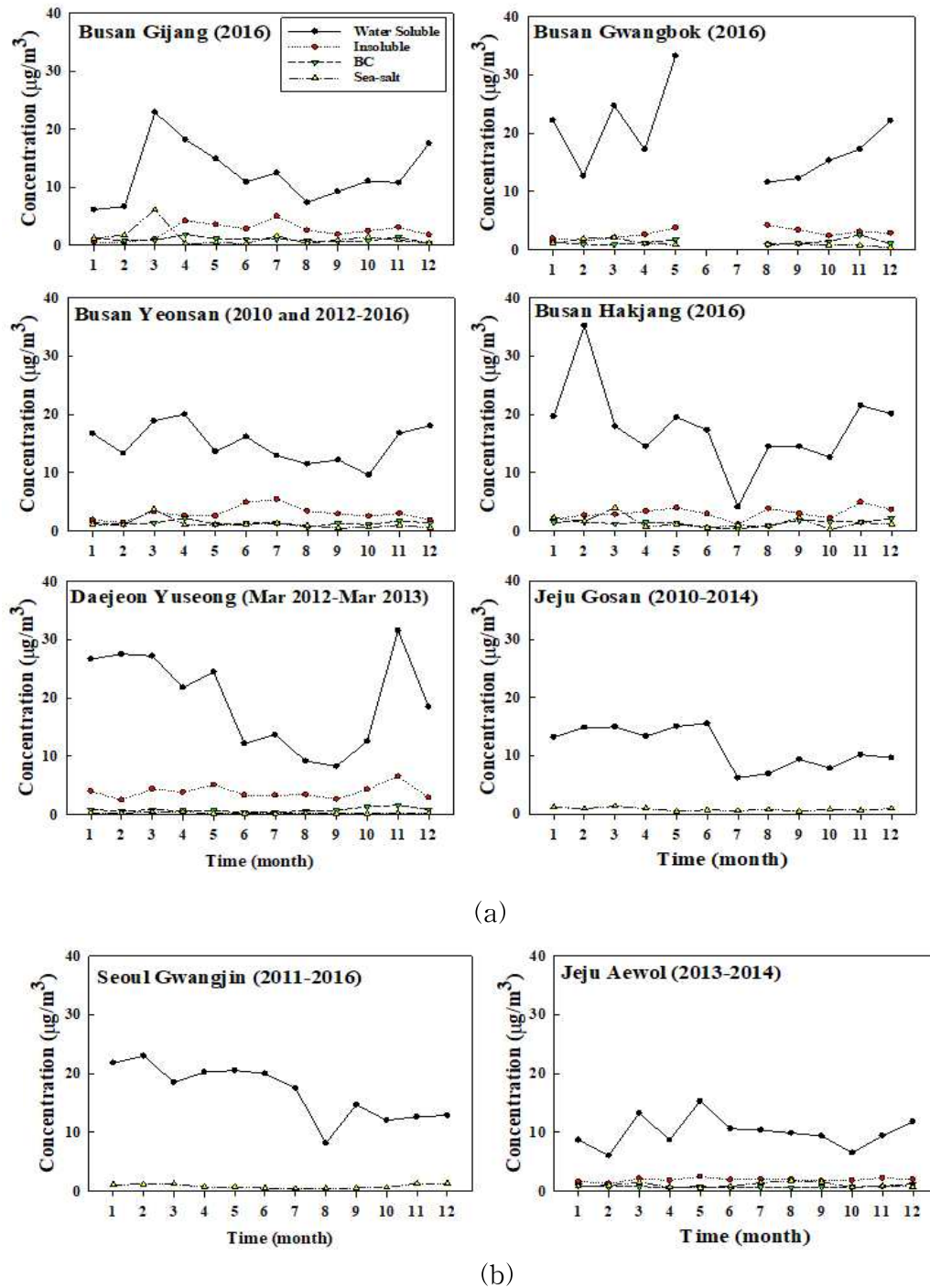


Fig. 2. Monthly variations of the concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of aerosol components in $\text{PM}_{2.5}$ at each study site during the study period. The concentrations of aerosol components in $\text{PM}_{2.5}$ at Gwangbok site, Busan during June–July were excluded in analysis due to no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

Fig. 3은 지점별(서울, 부산 4지점, 제주 2지점) 에어로졸 화학성분 농도의 주중/주말 변화를 나타내며, 각 지점에 따라 농도 패턴이 서로 다르게 나타났다. 대전 지점의 경우 주말 관측 데이터 결측으로 인해 분석에서 제외하였다. 전체적으로 water-soluble을 제외한 나머지 성분들은 상대적으로 주중/주말의 큰 차이가 없었다. 지점별로 살펴보면, 서울 광진구 지점의 경우 주중/주말의 농도 차이가 큰 변화가 없으며, 부산 연산 지점의 경우 water-soluble과 BC 성분이 주말에 비해 주중에 더 높게 나타났다. 이것은 연산 지점이 인구밀집 지역으로서 주중에 많은 차량으로 인한 연료연소에 의해 발생하는 것으로 추정된다. 부산지역에서 연산을 제외한 나머지 3지점(기장, 광복, 학장)에 대해 살펴보면, 광복과 학장지점은 water-soluble 성분이 주말에 높게 관측되었으며, insoluble 성분은 3개 지점 모두 주말에 높게 나타났다. 또한 BC 성분은 광복을 제외한 기장, 학장 지점에서 주말에 높고, sea-salt 성분은 큰 차이가 없었지만 모든 지점에서 주중에 더 높게 나타났다. 제주 애월 지점의 경우, 미비하지만 sea-salt 성분을 제외하고 주중과 주말의 농도가 매우 유사하게 나타났다. 이것은 인위적 배출원의 영향이 적기 때문에 농도변화가 크지 않은 배경지역의 특성으로 사료된다. 반면 제주 고산지점은 애월 지점과 다르게 water-soluble 의 주중 농도가 주말에 비해 높게 나타났다. 특히 전체 연구기간(2010~2014)중, 최근의 연구기간인 2012~2014년에 주중의 농도가 주말보다 평균 약 1.4배 정도 높게 나타났으며 이는 고산 지점의 주중 관광객 증가로 인한 차량 등의 화석연료 연소로 증가하였을 가능성이 있다(Park, 2017).

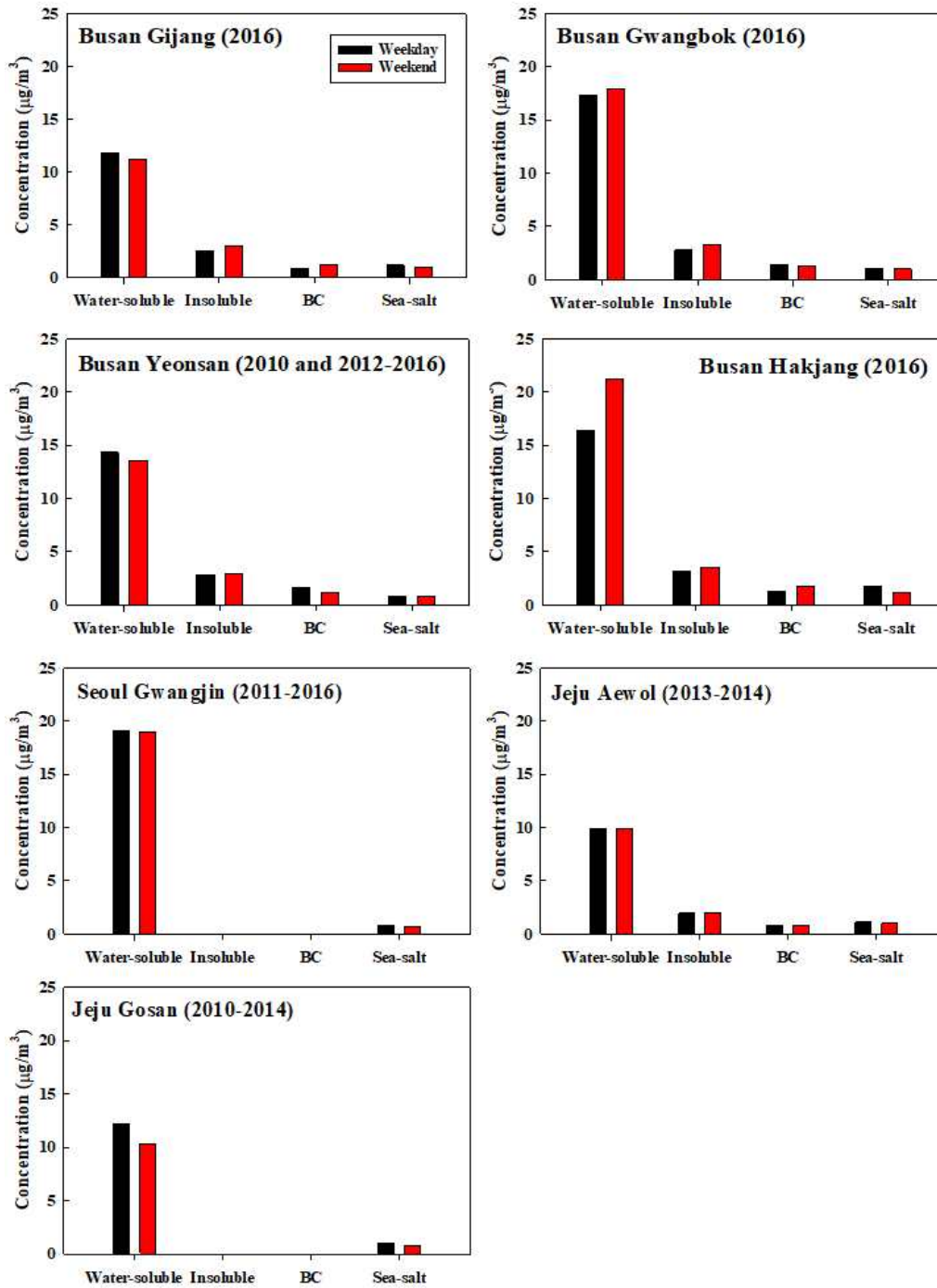


Fig. 3. Weekday and weekend variations in the mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of aerosol chemical components at the study sites. Dajeon site was excluded in analysis due to no measurements in weekend.

Fig. 4는 시간별 농도 자료를 사용한 서울 광진구와 제주 애월 지점의 화학성분별 일중변화를 나타낸다. 두 지점의 에어로졸 측정기간이 다르기 때문에 직접적으로 비교하기 어렵지만, 전반적으로 두 지점 모두 water-soluble을 제외한 나머지 성분에서 일중 농도 변화의 폭이 크지 않았다. 또한, 서울 광진구의 평균 water-soluble 농도 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외)는 애월 지점에 비해 약 2배 정도 높게 나타났다. 이것은 애월지점이 산간지대에 위치하고 있어 차량 등의 화석연료로 인한 인위적 오염배출원의 영향을 비교적 적게 받은 것으로 볼 수 있으며, 화학성분별 농도의 시간변화 폭이 크지 않았다. 한편, 서울 광진구 지점에서는 Water-soluble 성분 농도가 대체로 하루 중 아침(8시)부터 증가하여 정오 및 오후시간대(12시~16시)에 가장 높게 나타났는데(평균 $19.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 이는 오후시간대에 광화학 반응이 활발하게 일어남에 따라 높은 농도를 보인 것으로 사료된다. water-soluble의 주요성분인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 은 이들의 전구물질인 SO_2 , HNO_3 , NH_3 과 광화학 반응으로 기체와 입자사이 전환과정(gas-to-particle conversion process)을 통해 생성되므로, 상대적으로 오후시간대에 농도가 증가한 것으로 사료된다(Shon et al., 2013; Song et al., 2017). 제주 애월 지점은 서울 광진구에 비해 water-soluble 의 농도는 미비했지만, 4면이 바다로 둘러싸인 지리·지형적 특징으로 인해 sea-salt 성분의 농도는 약간 높게 나타났다. 일중 변화의 폭이 크지 않았지만 대체적으로 하루 중 낮 시간(12시~14시)에 증가하는 패턴은 비슷하게 나타났다.

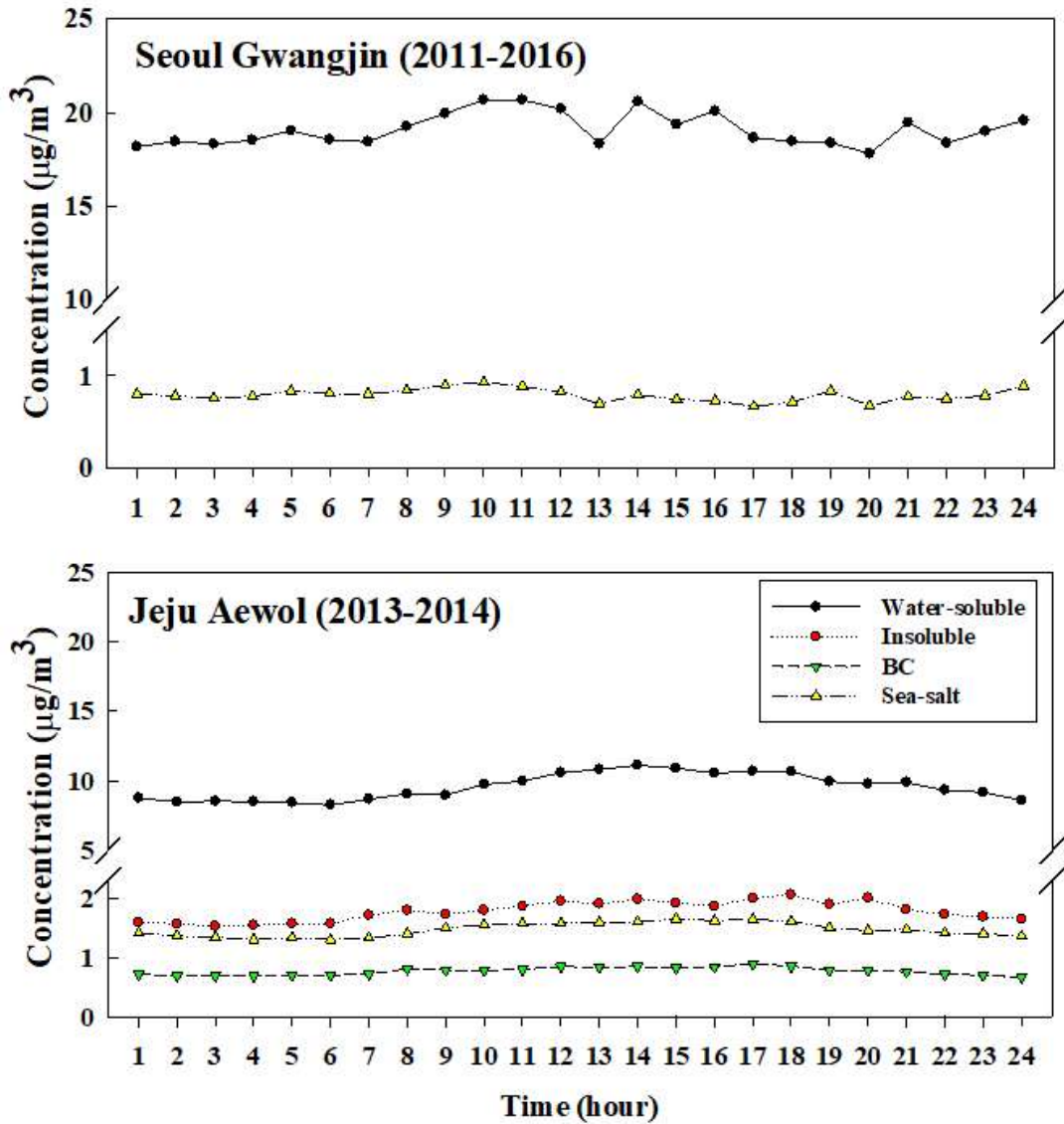


Fig. 4. Diurnal variations of the concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of aerosol components at Gwangjin and Aewol sites during the study period.

3.1.2 에어로졸 성분별 광학특성

본 연구에서는 에어로졸 화학성분별 광학특성을 분석하기 위하여 에어로졸 광학모델인 OPAC을 통해 도시(서울, 부산 4지점, 대전) 및 배경지역(제주 애월, 고산)의 광학특성(흡수계수 σ_{ab} , 산란계수 σ_{sc} , 소산계수 σ_{ex} , AOD)을 산출하였다. 에어로졸 광학특성 중 AOD는 대기중 에어로졸에 의한 태양복사의 산란 또는 흡수(감쇠)의 정도를 나타내는 지표로서, 일반적으로 태양복사영향을 정량화하여 볼 수 있는 변수이다.

지점별 에어로졸 화학성분별 광학특성의 연변화를 살펴보면(Table 2), 대체적으로 화학성분별 농도의 특징과 비슷하게 도시지역이 배경지역에 비해 광학특성 값이 높게 나타났다. 화학성분별로 전체 광학특성을 보면, 지점에 상관없이 전체 연구기간동안 water-soluble 성분이 가장 높게(특히 산란계수)나타났다(BC의 흡수계수 제외). 특히, 서울 광진구 지점의 광학변수 수치가 다른 지역에 비해 대체적으로 높게 나타났으며 2013년과 2014년에 소산계수(각각 143 Mm^{-1} , 154 Mm^{-1})와 산란계수(각각 140 Mm^{-1} , 151 Mm^{-1})가 매우 높은 수치로 나타났다. 이는 해당 년도의 높은 농도에 의한 것으로 보여 진다(2013년 $25.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2014년 $25.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 일반적으로 BC 성분은 태양복사의 가시광선과 적외선을 흡수하는 성질로 인해 흡수능력이 크기 때문에 낮은 농도에 비해 흡수계수 값이 높게 나타난다(Song et al., 2014). 예를 들어, 2013년과 2015년도 연산지점에서 화학성분별 농도를 보았을 때 BC농도(각각 $2.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 water-soluble 농도(각각 $14.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $14.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮음에도 불구하고, 흡수계수 값은 전체 지점에서 가장 높게(각각 21.7 Mm^{-1} , 13.3 Mm^{-1}) 나타났다. Sea-salt 성분의 경우 모든 지점에서 변화의 차가 크지 않았으며, 특히 흡수계수 값이 매우 작게 나타났다($<0.001 \text{ Mm}^{-1}$). AOD의 경우 다른 광학특성과 같이 water-soluble 성분의 값이 가장 높았으며 특히 서울지역에서 2013년에 가장 높게 나타났다(0.29).

Table 2. 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 ^a			
			σ_{ext} (Mm ⁻¹)	σ_{sc} (Mm ⁻¹)	σ_{ab} (Mm ⁻¹)	AOD
Seoul	Gwangjin	2011	102/-/-/3.1 ^b	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	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	0.15/0.021/0.039/0.028
		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
	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
	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	0.20/0.020/0.044/0.029	
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	0.14/0.019/0.031/0.029
		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

^a σ_{ext} : extinction coefficient, σ_{sc} : scattering coefficient, σ_{ab} : absorption coefficient, AOD: aerosol optical depth.

^b Water-soluble/Insoluble/BC/Sea-salt.

지점별 연구기간동안의 AOD (550 nm) 수치를 좀 더 자세히 보기 위해 월변화를 살펴보았다(Fig. 5). 자료 수집의 한계로 인해 부산 기장지점 2월과 4월, 광복지점 6~7월, 학장지점 5~7월에 대한 분석이 제외되었다. 지점별 AOD 수치는 전체적으로 농도의 패턴과 유사하게 나타났다. 일별자료를 이용한 지역(부산 4지점, 대전, 제주 고산)의 에어로졸 화학성분별 AOD 월변화를 살펴보면(Fig. 5(a)), 부산 4지점 중 기장지점에서는 모든 화학성분의 AOD가 봄철(3월)에 가장 높게 나타났으며, 여름철(8월)에 가장 낮게 나타났다. 광복 지점은 5월에 water-soluble과 BC 성분의 AOD가 가장 높게 나타났다. 학장 지점의 경우, 에어로졸 농도패턴과 다르게 2월 water-soluble성분의 높은 농도(평균 35 mg/m³)와 다르게 AOD는 0.21로 농도에 비해 낮게 추정되었다. 이것은 2월 평균 상대습도(37%)가 겨울철 전체 평균(54%)과 1년 전체 평균 상대습도(58%)에 비해 매우 낮기 때문에 AOD가 감소하여 낮게 추정된 것으로 사료된다(So, 2019). 대전 유성구 지점은 다른 지점과 유사한 계절패턴을 보이며 대체적으로 여름철(6~8월)에 낮은 수치를 보였다. 반면, 11월 water-soluble 성분의 AOD가 전체지역 중에서 가장 높게 나타났다(0.46). 이것은 11월에 관측된 water-soluble 성분의 높은 농도(약 32 μg/m³)에 기인한 것으로 볼 수 있다(Fig. 2). 고산지점의 경우 농도패턴과 매우 유사하게 나타났으며, 미비한 수치이지만 sea-salt 성분의 AOD가 겨울철에 높은 값을 나타냈다.

시간별 자료를 이용한 지역(서울 광진구, 제주 애월)의 에어로졸 화학성분별 월변화를 살펴보면(Fig. 5(b)), 서울 광진구 지점의 경우 water-soluble 성분의 AOD가 가장 높게 나타났으며 특히 겨울철(2월)에 0.29로 가장 높고, 여름철(8월)에 0.10으로 낮게 나타났다. sea-salt 성분의 경우 농도패턴과 유사하게 월별 차이의 폭이 크지 않았다. 제주 애월 지점은 sea-salt 성분을 제외한 모든 성분이 봄철에 높게 나타났으며, 특히 water-soluble 성분의 AOD 값이 5월에 0.27로 추정되었다. sea-salt 성분에 의한 AOD 값은 미비하지만 여름철에 높게 나타났으며, 여름철 높은 농도와 유사한 패턴을 보였다.

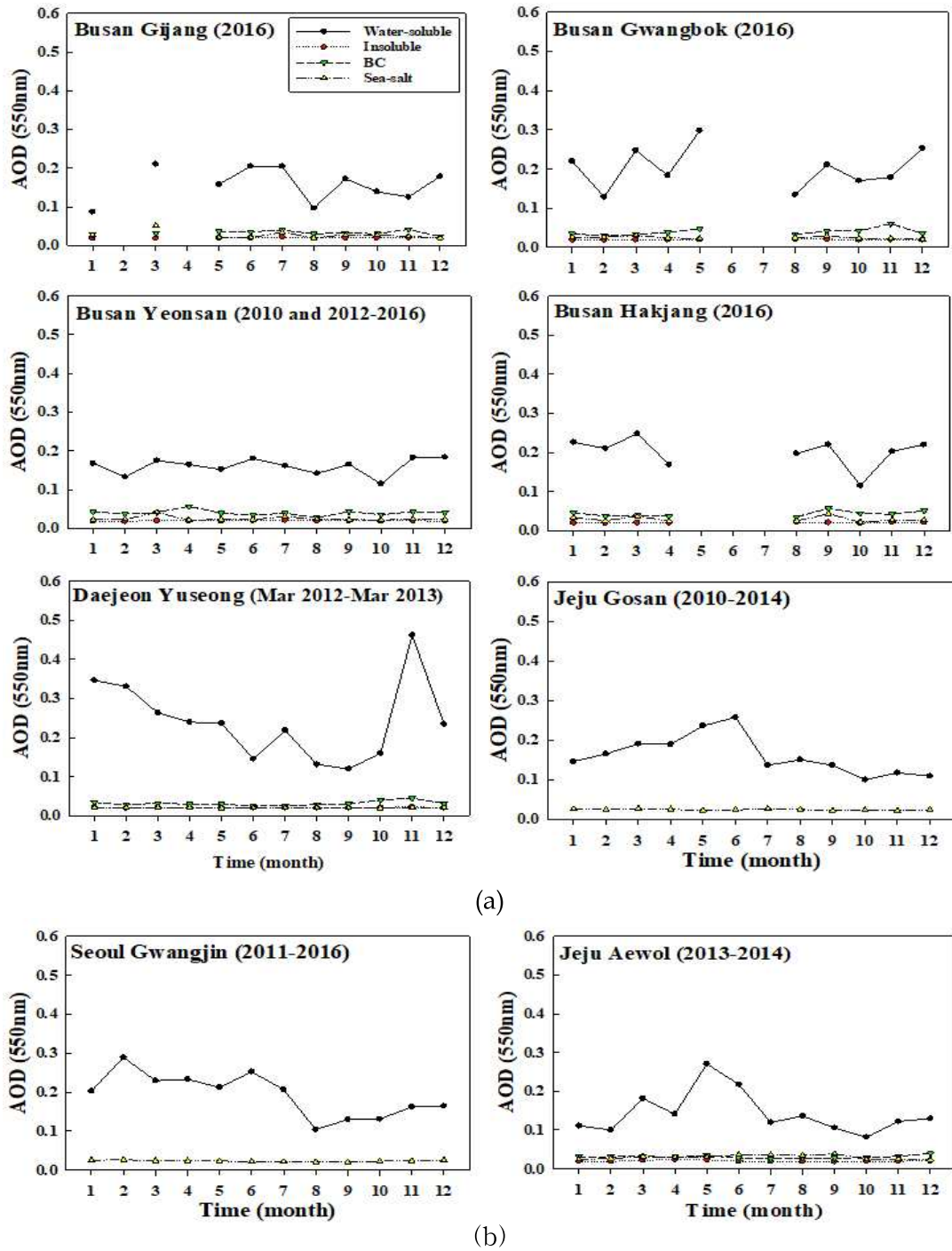


Fig. 5. Monthly variations of aerosol optical depth (AOD). AOD values at Gijang in February and April, Hakjang during May–July, and Gwangbok site during Jun–July were excluded in analysis due to data unavailability.

Fig. 6은 시간별 자료를 이용한 서울 광진구와 제주 애월 지점의 에어로졸 각 화학성분별 AOD의 일중변화를 나타낸다. 전체적으로, 배경지역인 제주 애월에 비해 서울 광진구 지점의 water-soluble 성분의 AOD 값 수치가 약 2배 이상 높게 나타났다. 지점별로 살펴보면, 서울 광진구 지점의 일중변화 패턴은 이른 아침(6시)부터 증가하여 오전 8시~9시에 값이 가장 크게 나타났다(평균 0.23). 반면 오후시간대(14시~16시)에 water-soluble 성분의 농도 패턴과는 다르게 다소 감소하는 경향을 보였는데, 이것은 오전시간대(68%)에 비해 오후시간대(46%)의 상대습도가 낮았기 때문에 AOD 수치가 감소한 것으로 추정된다. 다음으로 제주 애월지점의 경우, 대부분의 화학성분 농도는 오전 8시부터 증가하기 시작하여 오후 시간대로 갈수록 증가하는 경향을 보인 반면, water-soluble 성분의 AOD는 오전 8시에 정점(0.15)을 보이다가 오후 시간대에 감소하는 경향을 보였다. 오후 시간대에 비해 상대적으로 낮은 농도에도 불구하고 오전(8시)의 높은 AOD 값은 광진구 지점과 마찬가지로 상대습도에 의한 것으로 추정하였다. 오전 8시의 상대습도는 약 74%로, 오후 시간대(66%)와 전체 하루 평균(71%)보다 높게 나타나 AOD가 증가한 것으로 추정된다.

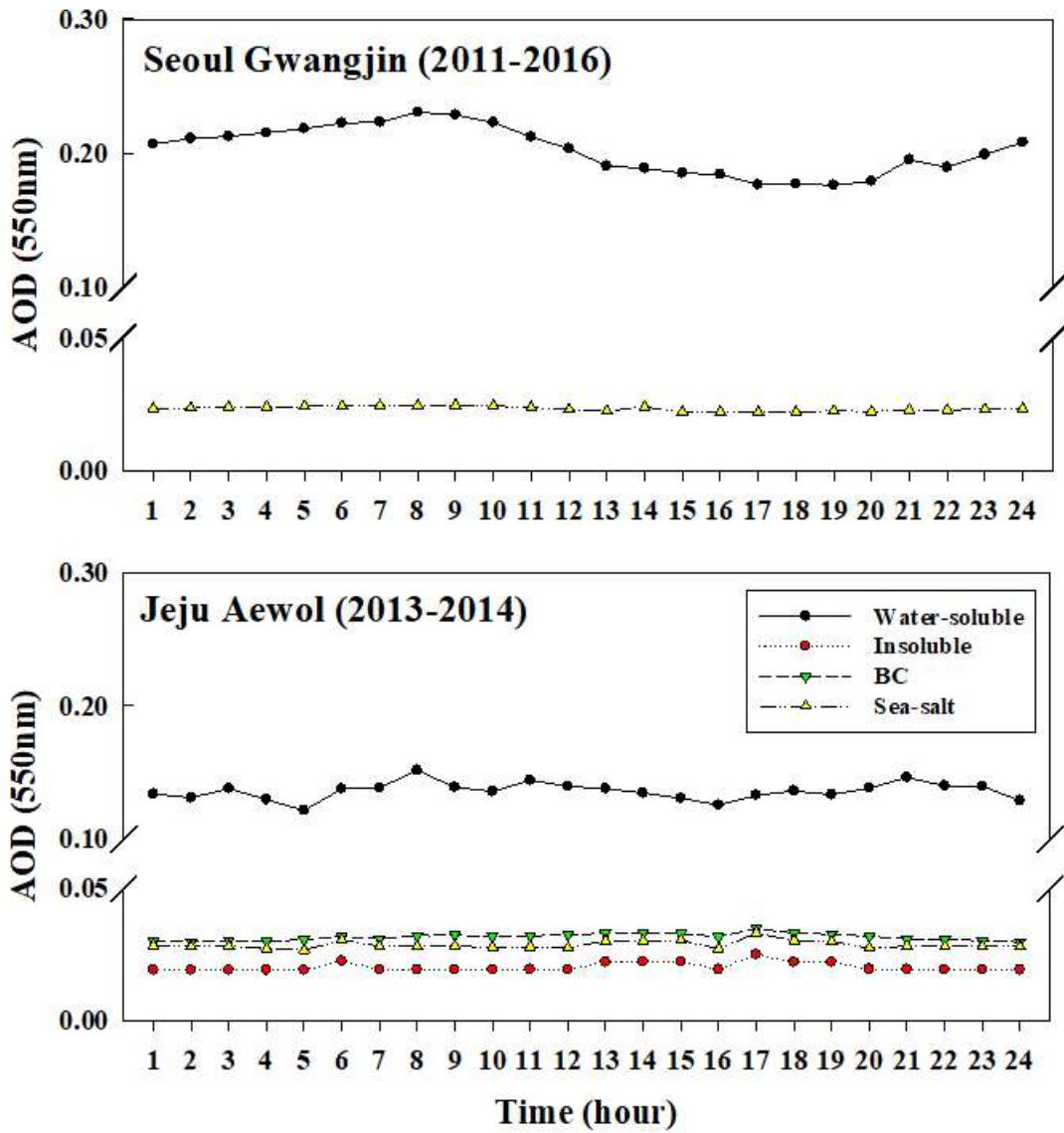


Fig. 6. Diurnal variations of aerosol optical depth (AOD) at Gwangjin and Aewol sites.

3.2 에어로졸 화학성분별 직접적 복사강제력 산출

3.2.1 지역별 직접적 복사강제력 산출

본 연구에서는 도시 및 배경지역에서의 연구기간별 PM_{2.5} 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성 자료를 이용하여 지표(SFC), 대기상단(TOA), 대기중(ATM)에서의 화학성분별 직접적 복사강제력(DRF)의 시간변화(연변화, 월변화, 일중변화)를 분석하였다. 전체적으로 SFC와 TOA에서 water-soluble에 의한 음의 복사강제력이 가장 높았으며 그 다음으로 BC (TOA에서는 양의 DRF), insoluble 그리고 sea-salt 순으로 나타났다.

Table 3은 각 지점별 연구기간동안의 에어로졸 화학성분에 의한 직접적 복사강제력의 연평균을 나타낸다. 대전 유성구 지점은 관측기간이 2012년 3월 13일 ~ 2013년 3월 이므로 연평균 분석에서 제외하였다. 지점별 TOA에서 연평균 복사강제력의 크기를 살펴보면, 전 지점에서 공통적으로 water-soluble 성분의 음의 복사강제력이 가장 높았으며, 다음으로 insoluble 및 sea-salt 성분의 음의 복사강제력 순으로 나타났으며, BC 성분은 양의 복사강제력이 나타났다.

일별 자료를 이용한 지점(부산 4지점, 제주 고산)의 연평균 복사강제력 크기를 살펴보면(Table 3), 연구기간동안 지점별 water-soluble 성분의 복사강제력은 2016년 부산 학장지점에서 DRF_{SFC}, DRF_{TOA}, DRF_{ATM}이 각각 -58.0, -45.2, +12.8 W/m²로 가장 높게 추정되었고, 다음으로 같은 연도 부산 광복지점에서 -56.4, -44.0, +12.4 W/m²로 높게 나타났다. 이것은 water-soluble 연평균 농도와 같은 패턴이었다(Table 1). Sea-salt 성분의 DRF_{SFC}, DRF_{TOA}, DRF_{ATM}는 부산 4지점 평균이 각각 -7.03, -6.57, +0.45 W/m²로 나타났으며 제주 고산이 평균 -7.03, -6.56, +0.45 W/m²로 추정되어 지역별 거의 유사하였다. 측정 지점별로 자세히 살펴보기 위하여 부산 연산지점과 제주 고산지점의 공통 연도인 2010년과 2012~2014년에 대해 살펴보면(water-soluble과 sea-salt 성분에 대해), 먼저 water-soluble 의 평균 DRF_{SFC}, DRF_{TOA}, DRF_{ATM}는 연산지점에서 약 -42.5, -33.0, +9.4 W/m²으로 고산지점(평균 약 -41.3, -33.1, +8.1 W/m²)에 비해 비

교적 높게 나타났다. 반면, sea-salt 성분은 고산이 연산에 비해 높게 추정되었는데(고산: -7.1, -6.6, +0.34 W/m², 연산: -6.7, -6.3, +0.42 W/m²), 이는 두 지점의 sea-salt 농도의 연평균 변화패턴과 유사하게 나타났으며 제주 고산지점의 지리·지형적 특성 때문인 것으로 사료된다. BC 성분의 경우 부산 4지점을 비교 분석 해보면, 주로 공업지역인 학장지점과 인구밀집도가 높은 연산지점에서 높게 추정되었으며, 특히 학장지점의 BC 성분의 DRF_{ATM}은 +46.7 W/m²로 부산 4개 지점 중 가장 높게 나타났다.

다음으로 시간별 자료를 이용한 서울 광진구와 제주 애월 지점에 대해 살펴보았다. 두 지점 모두 water-soluble 성분의 DRF_{SFC}, DRF_{TOA}가 가장 높게 나타났으며, 애월 지점의 경우 BC, insoluble 그리고 sea-salt 순으로 높았다. 공통연도인 2013~2014년에 대해 살펴보면, 두 지점 모두 가장 높게 나타났던 water-soluble 성분의 DRF_{SFC}, DRF_{TOA}, DRF_{ATM} 크기는 광진구 지점이 평균 약 -54.6, -42.1, +11.7 W/m²이었으며, 애월 지점은 평균 약 -30.2, -24.1, +4.9 W/m²로 광진구 지점이 애월 지점 보다 약 2배 내외로 높게 나타났다. 반면, sea-salt의 DRF_{SFC}, DRF_{TOA}, DRF_{ATM} 는 2013~2014년에 애월 지점이 평균 약 -6.4, -6.1, +0.37 W/m² 이었으며, 같은 기간 광진구 지점이 평균 -6.2, -5.9, +0.24 W/m² 으로 애월 지점이 약 1.2배 높게 나타났다. 참고로 야간을 포함한 모든 시간대(24 시간)의 전체 화학성분을 합한 총 복사강제력은 두 지점 모두 주간(daytime) 복사강제력에 비해 약 50% 작게 추정되었다.

Table 3. Annual mean of direct radiative forcing (DRF, W/m²) of each aerosol chemical component at the 8 different sites during the study period

Region	Site	Period	Direct radiative forcing ^a											
			Water-soluble			Insoluble			BC			Sea-salt		
			SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM
Seoul	Gwangjin	2011	-41.07	-32.04	8.63	-	-	-	-	-	-	-5.73	-5.43	0.30
		2012	-41.58	-32.46	8.76	-	-	-	-	-	-	-5.79	-5.47	0.94
		2013	-50.77	-39.74	10.05	-	-	-	-	-	-	-6.32	-5.97	0.13
		2014	-58.33	-44.51	13.34	-	-	-	-	-	-	-6.15	-5.81	1.67
		2015	-37.60	-29.44	7.84	-	-	-	-	-	-	-5.65	-5.34	0.83
		2016	-35.47	-27.92	7.51	-	-	-	-	-	-	-5.41	-5.15	1.27
		All	-44.14	-34.35	9.36	-	-	-	-	-	-	-5.84	-5.53	0.86
Busan	Yeonsan	2010	-42.01	-33.08	8.57	-10.66	-1.20	8.20	-33.19	11.22	39.78	-7.25	-6.71	0.50
		2012	-35.82	-28.21	7.61	-10.33	-1.45	9.07	-26.26	8.08	33.75	-6.66	-6.24	0.41
		2013	-46.68	-35.88	10.79	-10.24	-1.63	8.61	-29.26	9.05	38.31	-6.79	-6.36	0.40
		2014	-45.36	-34.76	10.60	-10.71	-1.21	8.20	-37.53	12.66	48.22	-6.14	-5.77	0.37
		2015	-44.72	-35.22	9.50	-10.26	-1.86	7.77	-36.60	10.01	44.37	-6.38	-6.02	0.36
		2016	-46.48	-36.62	9.60	-10.36	-1.51	8.13	-29.90	9.47	36.02	-6.98	-6.53	0.43
	Gijang Gwangbok Hakjang	2016	-45.56	-36.09	9.47	-10.34	-1.63	8.71	-28.29	8.60	36.89	-7.55	-7.03	0.53
		2016	-56.44	-44.00	12.44	-10.38	-1.74	8.64	-34.83	10.11	44.94	-7.31	-6.82	0.49
		2016	-58.02	-45.24	12.77	-10.51	-1.79	8.72	-36.31	10.43	46.74	-8.24	-7.65	0.59
		All	-46.79	-36.57	10.15	-10.42	-1.56	8.45	-32.46	9.96	41.00	-7.03	-6.57	0.45
Jeju	Aewol	2013	-29.89	-23.66	4.69	-8.22	-1.65	6.46	-20.16	5.56	25.10	-7.02	-6.57	0.42
		2014	-30.54	-24.52	5.14	-8.36	-1.70	6.46	-21.37	5.83	26.30	-5.85	-5.52	0.32
	Gosan	2010	-36.49	-29.68	7.29	-	-	-	-	-	-	-7.22	-6.70	0.47
		2011	-45.43	-35.54	8.49	-	-	-	-	-	-	-6.85	-6.37	0.43
		2012	-44.23	-35.62	8.65	-	-	-	-	-	-	-7.44	-6.92	0.50
		2013	-40.44	-31.76	7.88	-	-	-	-	-	-	-6.77	-6.38	0.42
		2014	-44.03	-35.22	8.55	-	-	-	-	-	-	-6.87	-6.42	0.45
		All	-38.72	-30.86	7.24	-8.29	-1.68	6.46	-20.77	5.70	25.70	-6.86	-4.83	0.43

지점별 SFC와 TOA에서 화학성분에 따른 직접적 복사강제력의 월변화에 대해 살펴보았다(각각 Fig. 7과 Fig. 8), 먼저 일별자료를 사용한 부산 4개 지점(연산, 기장, 광복, 학장지점)에서 전체(모든 화학성분 총합) 음의 DRF_{SFC} 는(Fig. 7(a)), 대체적으로 여름을 제외한 늦가을, 겨울, 초봄에 가장 높게 추정되었으며, 4개의 화학성분 중에서 water-soluble 성분이 가장 높게 나타났다(특히, 5월에 광복지점 -85 W/m^2). 반면 sea-salt 성분은 4개 화학성분 중 가장 낮게 추정되었으며, 특히 기장지점에서 초여름(6월)에 -6.1 W/m^2 로 낮게 나타났다. DRF_{TOA} 의 경우(Fig. 8(a)), 대체적으로 water-soluble 다음으로 BC (양의 DRF), sea-salt 그리고 insoluble 성분의 음의 복사강제력 순으로 추정되었으며, DRF_{SFC} 와 마찬가지로 겨울철과 봄철에 높게 나타났다. 특히 water-soluble 성분의 DRF_{TOA} 는 광복지점에서 5월에 가장 높게 나타났으며(-61 W/m^2), BC 성분의 DRF_{TOA} 는 대체적으로 봄철에 높은 양의 복사강제력 값이 추정되었다. 이외에도, 대전 유성구 지점의 경우 전체 (모든 화학성분 총합) DRF_{SFC} 는 겨울철 1월에 -117.7 W/m^2 로 가장 높게 추정되었으며, 화학성분별로 보면 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} 모두 water-soluble은 1월에 높게 나타났으며(각각 -74.8 W/m^2 , -65.9 W/m^2) 그 다음으로 BC성분이 11월에 각각 -37.3 W/m^2 , 12.3 W/m^2 로 높게 추정되었다. 반면, 여름철(6~8월)에 모든 성분의 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} 가 전체적으로 가장 낮았다. DRF_{SFC} 에서 가장 낮게 추정된 sea-salt 성분은 겨울철(1월)에 -6.4 W/m^2 로 가장 높게 나타났으며, 가을철(10월)에 -5.9 W/m^2 로 가장 낮았다. 전체적으로, 각 성분별 AOD 패턴과 일부 유사하게 나타났음을 확인 할 수 있었다(Fig. 5(a)). 대체적으로 높게 나타난 겨울철 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} 중 특히 1월 부산학장(-120.7 W/m^2 , -51.4 W/m^2)과 대전 유성구 지점(-117.7 W/m^2 , -66.5 W/m^2)이 일별 자료를 사용한 지점 중 가장 높게 추정되었다. 마지막으로 고산지점의 DRF_{SFC} 는 water-soluble 성분이 초여름 6월에 약 -64 W/m^2 로 가장 높게 추정되었으며, 초가을 10월에 약 -31 W/m^2 로 가장 낮게 나타났다. Sea-salt 성분의 음의 DRF_{SFC} 는 $-6.5 \sim -7.7 \text{ W/m}^2$ 로 water-soluble 성분에 비해 매우 낮았으며 월변화 또한 뚜렷하지 않았다.

시간별 자료를 사용한 서울 광진구 지점의 경우(Fig. 7(b)), SFC, TOA 복사강제력은 모두 겨울철에 가장 높았으며 특히 2월 water-soluble 성분의 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} 가 각각 -54.87 W/m^2 와 -42.37 W/m^2 로 높게 추정되었다. Sea-salt

성분의 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} 는 월변화가 크지 않았지만, water-soluble과 마찬가지로 2월에 높게 나타났다(각각 -6.67 W/m^2 와 -6.31 W/m^2). 반면 제주 애월 지점의 SFC와 TOA에서의 DRF는 둘 다 봄철에 가장 높고, 다음으로 여름철이었으며, 겨울철에 가장 낮았다. 이러한 DRF의 월변화는 광진구와 애월 두 지점에서의 AOD 월변화 패턴과 유사하였다(Fig. (b)). 화학성분별로 자세히 보면, water-soluble 성분에 의한 DRF_{SFC} 가 5월에 -52.2 W/m^2 로 가장 높았으며 광진구 지점에서 6월에(-23.3 W/m^2), 애월 지점에서 10월에(-20.2 W/m^2) 가장 낮았다. BC 성분의 경우, 제주 애월 지점에서 $+5.7 \text{ W/m}^2$ 내외의 양의 DRF_{TOA} 가 추정되었으며, 대체로 봄철에 가장 높은 특징을 보였다. 한편, 애월 지점에서 나머지 두 성분(특히 insoluble)의 DRF는 매우 낮게 추정되었으며, 뚜렷한 월 또는 계절 변화를 찾기가 어려웠다.

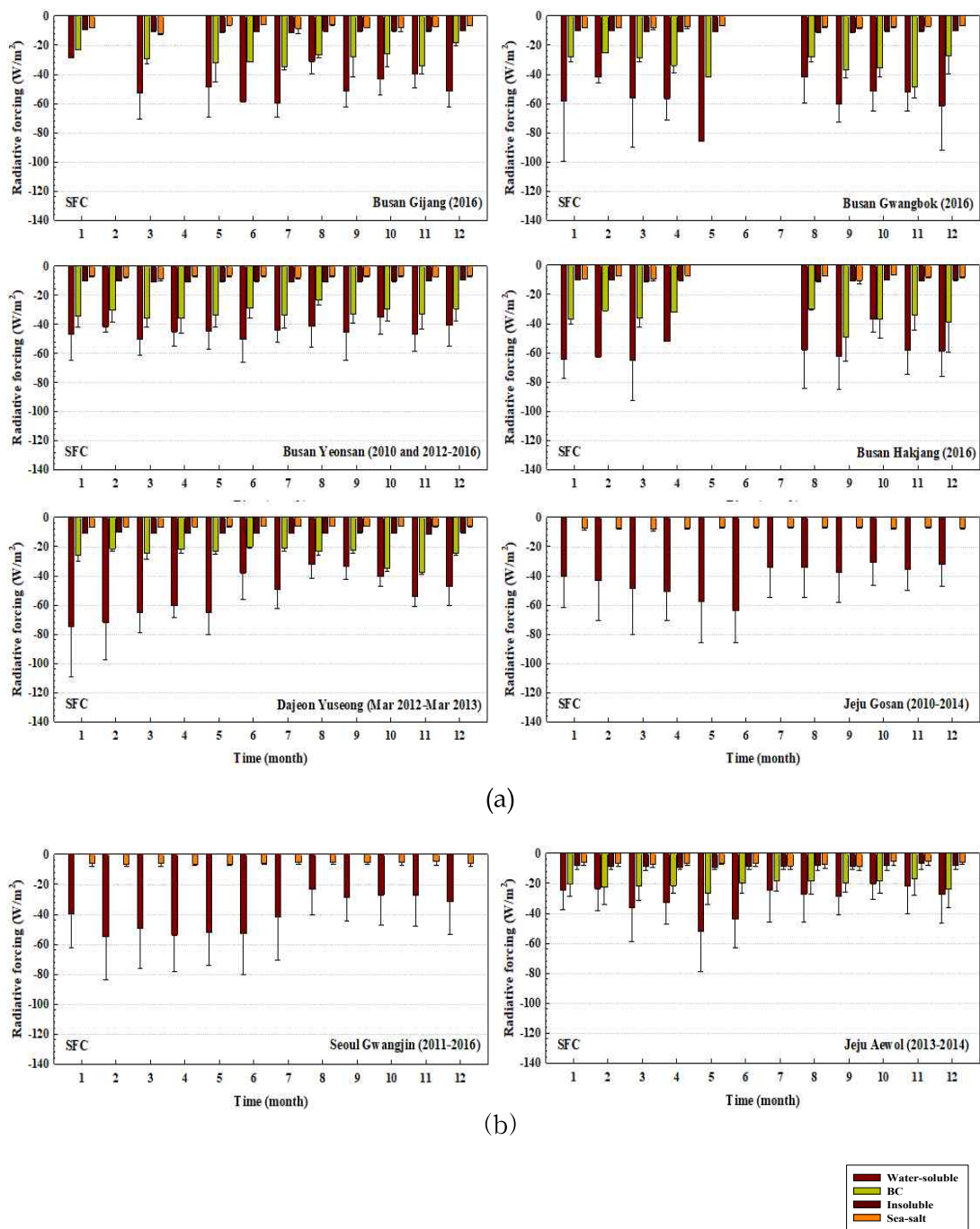


Fig. 7. Monthly variations of Direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at surface (SFC) for each aerosol chemical component at each study sites during the study period. Gwangjin and Aewol sites were calculated by the SBDART model during the day (07:00–18:00 LST for spring, 06:00–19:00 LST for summer, 07:00–18:00 LST for fall, and 08:00–17:00 LST for winter).

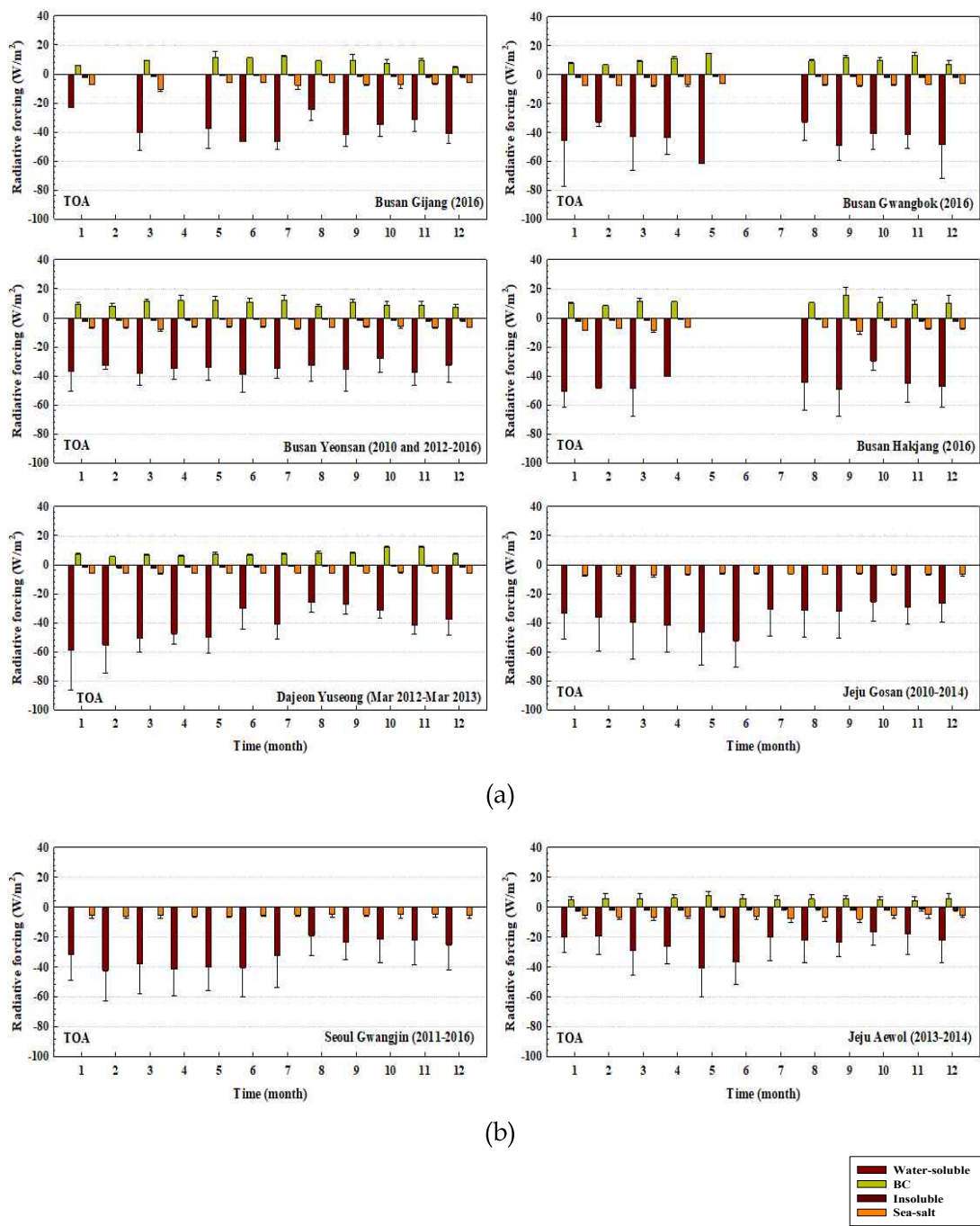


Fig. 8. Same as Fig 7 but for Direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at top of the atmosphere (TOA).

Fig. 9와 10은 시간별 자료를 이용한 서울 광진구 지점과 제주 애월 지점의 각 연구 기간 동안의 지표(SFC) 및 대기상단(TOA)에서의 복사강제력(DRF)의 일중변화를 각각 나타낸다. 여기서 각 지점별 일중 변화는 계절에 따른 일출과 일몰의 시간을 고려하여 주간의 기준을 고려하였으며 봄철과 가을철에는 07~18시, 여름철에는 06~19시, 겨울철에는 08~17시로 분류하여 분석하였다.

일중 변화 패턴을 보면, 두 지점의 에어로졸 측정기간이 다르기 때문에 직접적으로 비교하기 어렵지만, 전반적으로 두 지점 모두 water-soluble 과 BC를 제외한 나머지 성분에서는 일중 농도 변화의 폭이 크지 않았다. 성분별로 살펴보면, 광진구 지점 SFC에서의 water-soluble 성분의 DRF가 제주 애월 지점보다 높게 나타났으며(약 1.5배 내외), 특히 늦은 오전 11시부터 오후 3시 사이에 가장 뚜렷하였다. 또한, 두 지점 모두 이른 아침과 늦은 오후보다는 정오 주변의 오후시간대에 높게 나타났는데, 이것은 광화학반응이 활발한 낮 시간에 water-soluble 성분의 농도가 증가함에 따라 음의 DRF가 높게 나타난 것으로 추정할 수 있다(Fig. 4). 예를 들어, water-soluble의 DRF 값이 서울 광진구 지점은 12시에 -54.8 W/m^2 , 제주 애월 지점은 오후 2시에 -37 W/m^2 로 가장 높게 추정되었다. 이외에도, 두 지점 모두 대부분 화학성분(BC 제외)의 TOA에서의 DRF가 SFC에서의 DRF 보다는 크기가 작지만 일중 변화의 패턴은 매우 유사하였다. 제주 애월 지점 BC 성분의 경우, TOA에서의 DRF는 SFC와 달리 오전 6시~오후 7시까지 평균 $+4.9 \text{ W/m}^2$ (범위: $+0.4 \sim +8.3 \text{ W/m}^2$)로 양의 DRF가 추정되었으며, 대부분 늦은 오전부터 오후시간대(11시~15시)에 평균 $+7.7 \text{ W/m}^2$ 정도로 일중 가장 높은 양의 DRF가 추정되었다.

선행연구에서 산출된 복사강제력 결과와 비교시, 배경지역인 고산의 복사강제력의 경우 2001년 4월 11일~13일 SFC에서 $-4.3 \sim -9.6 \text{ W/m}^2$, TOA에서 $-2.7 \sim -7.3 \text{ W/m}^2$ 으로, 연구기간의 차이가 있는 것을 고려하면 본 연구에서는 낮 시간대를 대표하는 복사강제력을 산출하였기 때문에 고산 지점에서 산출된 복사강제력과 유사하거나 조금 낮게 산출되었다(Yoon and Kim, 2006). 선행 연구의 결과 중 도시지역의(India, Delhi) 에어로졸 복사강제력은 SFC에서는 $-45 \sim -110 \text{ W/m}^2$, TOA에서는 $-1 \sim 21 \text{ W/m}^2$ 으로 본 연구의 도시지역에서 산출된 복사강제력과 비교적 유사하게 산출된 것으로 판단된다(Singh et al, 2010).

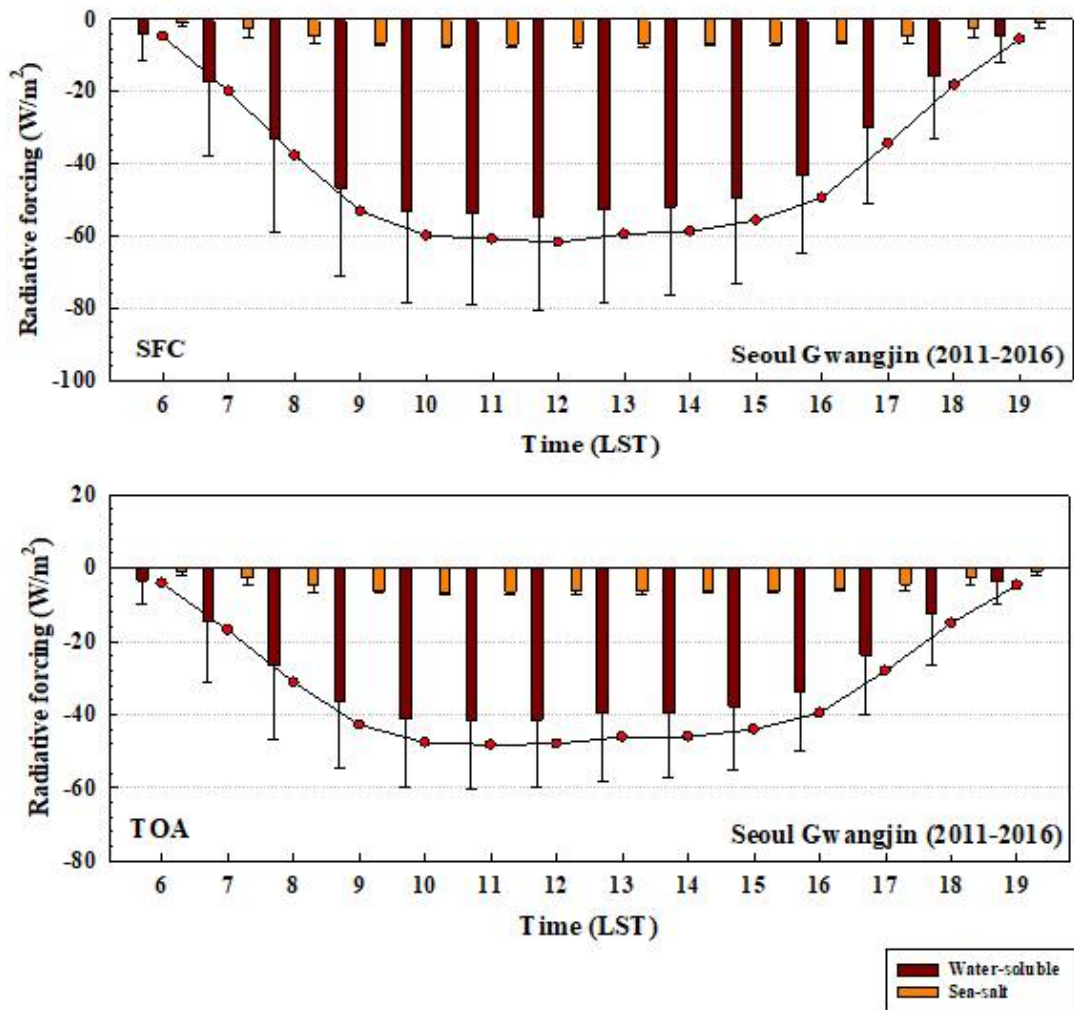


Fig. 9. Diurnal variations of direct radiative forcing (DRF, W/m²) at the SFC and TOA for each aerosol chemical components at Seoul Gwangjin site during the study period.

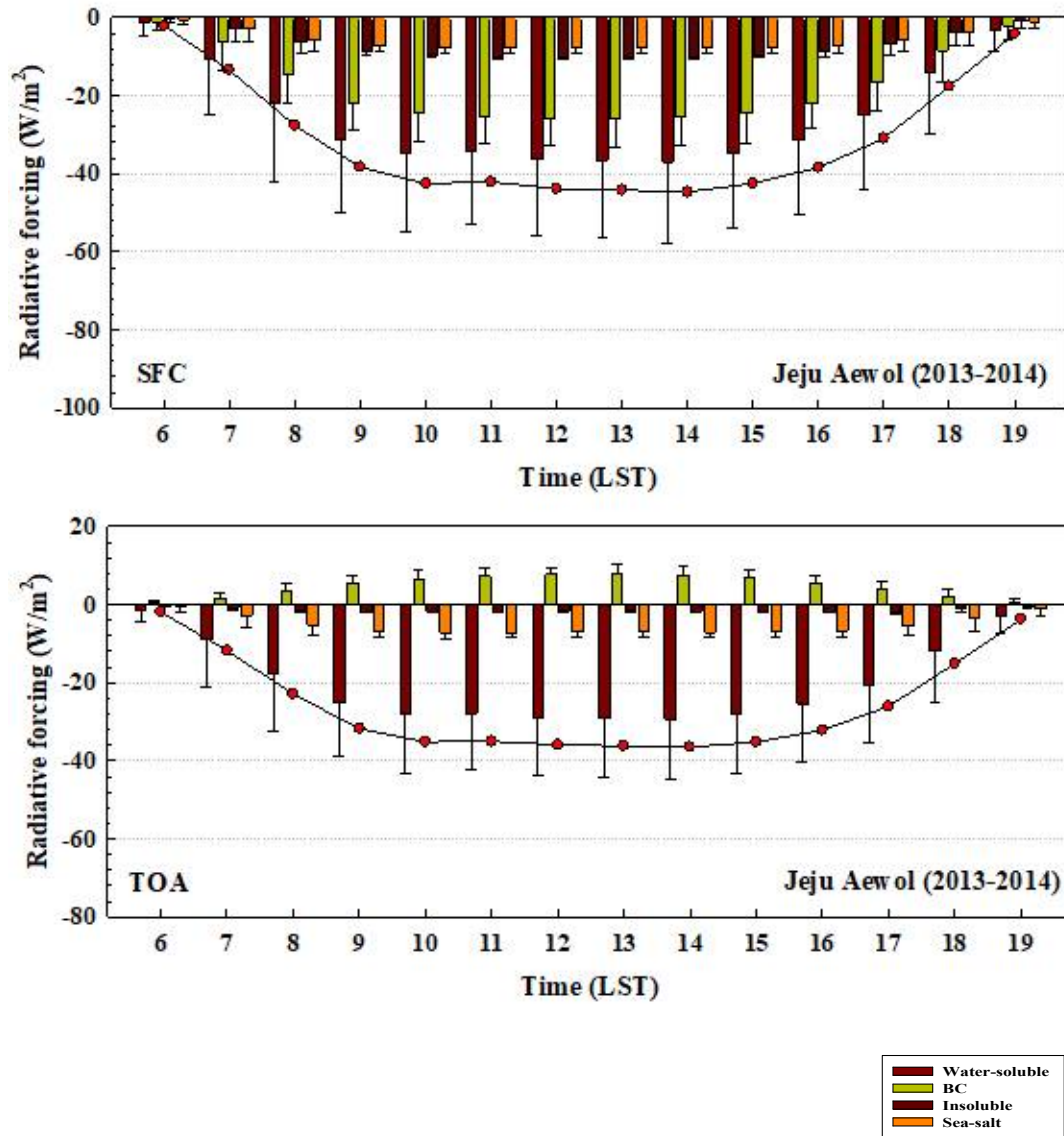


Fig. 10. Same as Fig 9 but for Jeju Aewol site.

3.2.2 연무 사례일의 직접적 복사강제력 특성

본 연구에서는 도시 및 배경지역에서 관측된 연무 사례일을 중심으로, 연무 발생시 직접적 복사강제력의 특성을 살펴보기 위하여, 연무를 제외한 비연무일의 특성과 비교분석 하였다. 시간별/일별 에어로졸 화학성분 자료를 이용한 8개 지점 중 4개(water-soluble, insoluble, BC, sea-salt) 화학성분에 따른 분석을 위해 부산 4지점, 대전 유성구, 제주 애월 지점의 연무 및 비연무 발생일의 지표(SFC)와 대기상단(TOA)에서 직접적 복사강제력의 변화를 비교하였다. 각 지점은 서로 다른 에어로졸 화학성분별 자료 관측 시점에 따라 측정지점별로 연구기간이 다르다. 부산 연산 지점은 2010년과 2012~2016년, 나머지 광복, 학장, 기장 지점은 2016년 자료이다. 대전의 유성구 지점은 2012년 3월~2013년 3월, 제주 애월 지점은 2013년~2014년 자료를 이용하였다.

연무현상에 따른 직접적 복사강제력의 영향을 살펴보기에 앞서, 연무 사례일에 대해 에어로졸 화학성분별 농도 및 광학특성(AOD)의 변화를 분석하였다(Fig. 11, 12). 연무사례일의 화학성분별 농도를 살펴보면(Fig. 11), 6개 지점 모두 연구기간 동안의 연무일의 농도가 비연무일에 비해 높게 관측되었으며, 특히 제주 애월지점이 연무사례일 동안 water-soluble 성분의 농도가 약 $39.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며 그 다음으로 부산 광복지점과 대전 지점이 $33.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났다. 또한, 연무 사례일과 비연무일의 농도 차이를 살펴보면 제주 애월 지점과 대전 유성구 water-soluble 성분의 연무일 농도가 비연무일에 비해 각각 약 4.3 배와 2.4 배이며 전체 지점 중 가장 높은 차이를 보였으며, water-soluble 성분을 제외한 나머지 성분의 차이는 크지 않았다. 한편, 연무 사례일 기간의 AOD(Fig. 12)는 대체적으로 농도의 패턴과 비슷하게 나타났다. 특히 제주 애월 지점의 연무사례일 기간 water-soluble 성분의 AOD가 0.42로 가장 높게 나타났으며 이는 같은 기간 전체 지점가운데 가장 높았던 농도에 기인한 것으로 사료된다(Fig. 11).

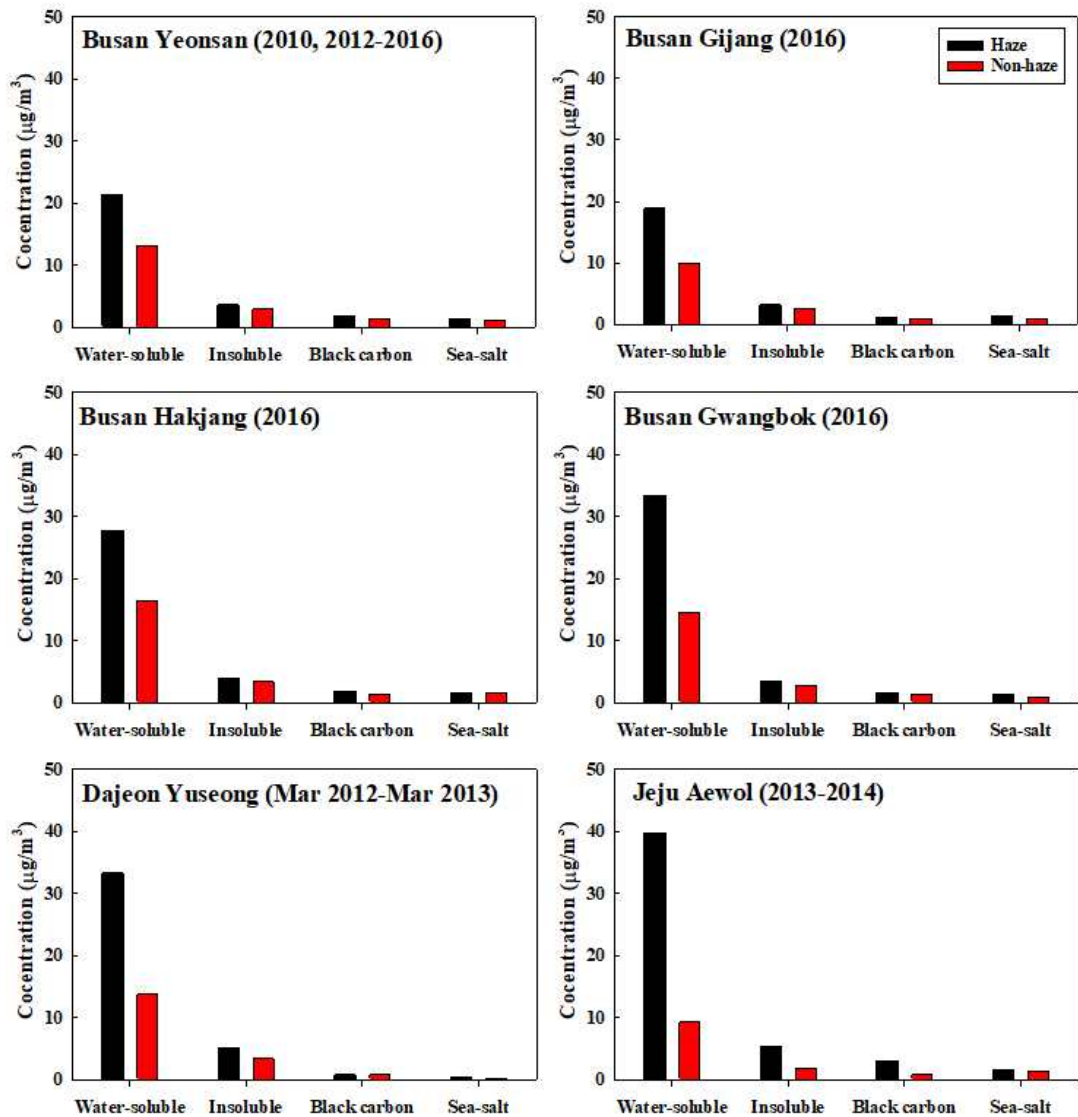


Fig. 11. Concentration of each aerosol component at the 6 different study sites (sites have 4 aerosol chemical components) during haze and non-event periods.

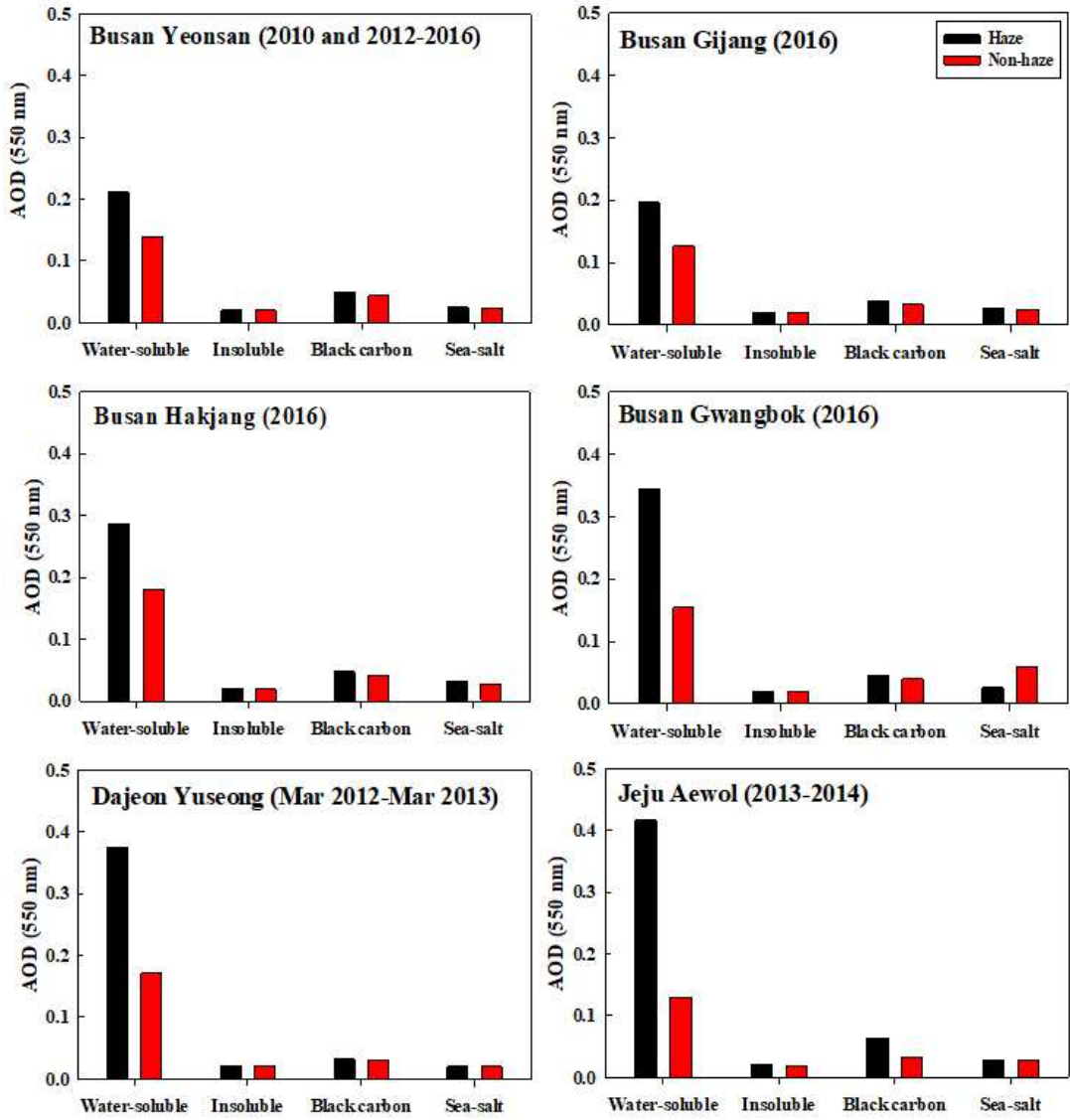


Fig. 12. Same as Fig 11 but for AOD.

DRF_{SFC}를 살펴보면(Fig. 13), 전체적으로 연무 발생일의 DRF 수치가 비연무일에 비해 높게 나타는 것을 확인할 수 있다. 지점별로 자세히 살펴보면, 먼저 부산 연산 지점의 2010, 2012~2016년 연무사례일 DRF_{SFC} 는 4가지 성분 전체 평균 약 -26.8 W/m²이며 (water-soluble 성분이 가장 높음: -49.3 W/m²), 이것은 비연무일에 비해 약 1.2배 높게 나타났다. 나머지 2016년 부산 3지점(기장, 학장, 광복) 또한 전체적으로 비연무일에 비해 연무 사례일에 DRF_{SFC} 가 높게 나타났으며, 특히 광복 지점의 경우 연무 사례일의 water-soluble 성분 DRF_{SFC}(-87 W/m²)가 비연무일(-46.7 W/m²)에 비해 약 1.9배 높게 나타났다. 전반적으로 water-soluble 성분과 BC 성분을 제외한 나머지 성분들의 연무/비연무 사례일의 DRF_{SFC} 차이는 크지 않았다. 대전 지점의 경우 4가지 성분의 DRF_{SFC} 가 연무일 때 비연무 사례일 보다 약 1.2배 높게 나타났으며 water-soluble과 sea-salt 성분의 DRF_{SFC} 가 각각 약 1.8배와 1.1배 높게 나타났다. 한편, 애월 지점의 2013~2014년 연무사례일 DRF_{SFC} 는 4가지 성분의 전체 평균이 약 -25 W/m²로 비연무일에 비해 약 1.3배 높게 나타났다.

다음으로 DRF_{TOA} 수치에 대해 살펴보면(Fig. 14), 부산 연산지점의 BC 성분의 DRF_{TOA}가 연무와 비연무 사례일에 각각 +13.1 W/m² 와 +9.4 W/m² 으로 나타났으며 약 1.4배 높게 차이가 나타났으며 water-soluble을 제외한 나머지 3가지 성분들의 차이는 크지 않았다. 부산 기장, 학장 그리고 광복 지점은 세 지점 모두 공통적으로 연무일 때 4가지 성분 평균이 비연무 사례일에 비해 약 1.2배 높게 나타났으며, 특히 광복지점 water-soluble 성분의 DRF_{TOA}가 연무와 비연무일 때 각각 -65.5 W/m²와 -36.9 W/m²로 3지점 중 가장 차이가 컸다(약 1.8배). 대전 유성구 지점의 경우 연무일 때 4가지 성분 평균 -15 W/m²이었으며 비연무 사례일 때는 평균 -8.9 W/m²로, 연무일 때 약 1.3배 높게 나타났다. 마지막으로 애월 지점의 경우 연무일 때 water-soluble과 BC 성분의 DRF_{TOA}가 각각 -42.2 W/m²와 +8.5 W/m²로, 비연무 사례일에 비해 1.8배와 1.5배 높았다.

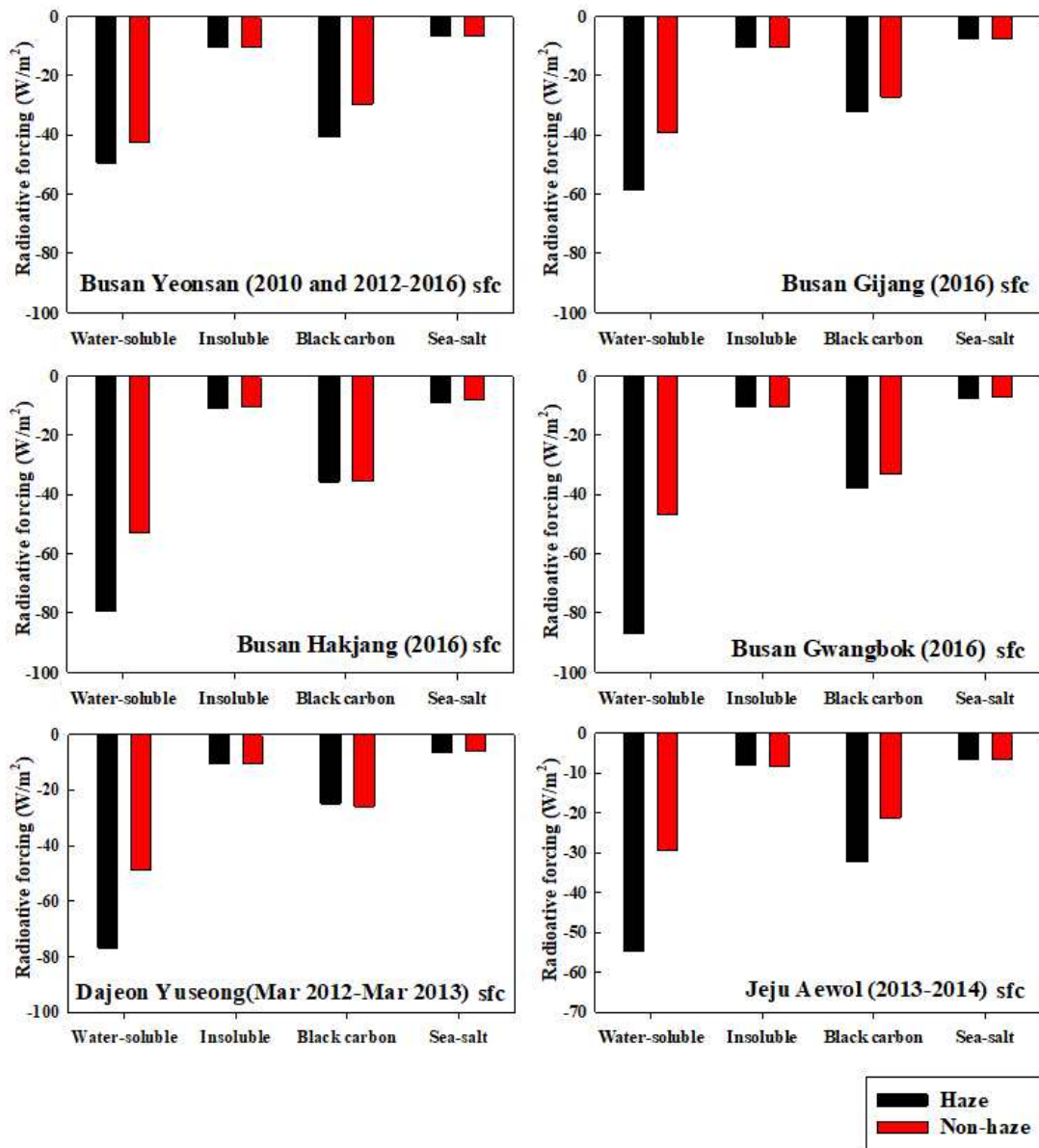


Fig. 13. Direct radiative forcing(DRF, W/m^2) at the surface (SFC) for each aerosol component at the 8 different study sites during haze and non-event periods.

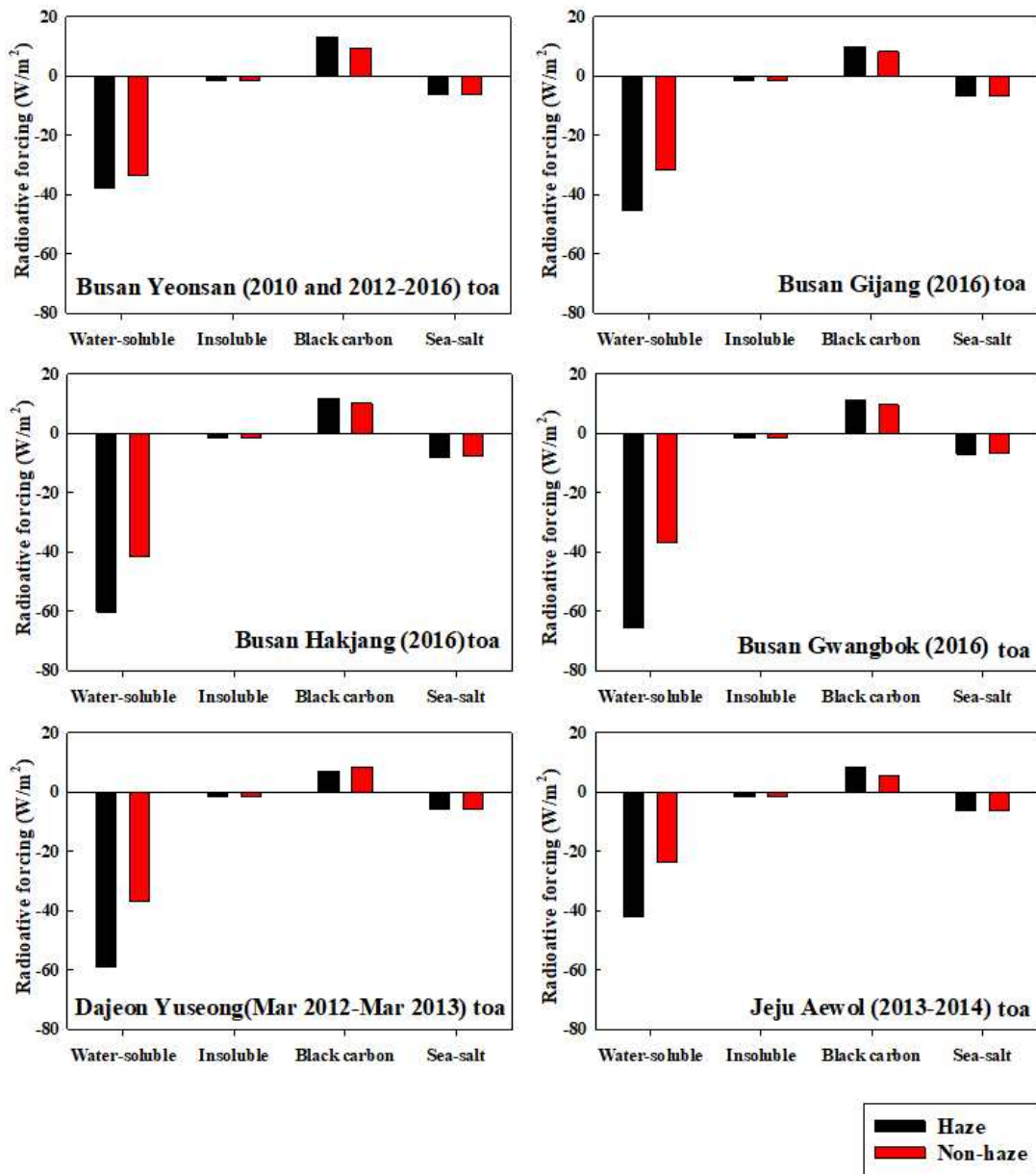


Fig. 14. Same as Fig 13 but for DRF at the top of atmosphere (TOA).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 도시(서울, 부산, 대전) 및 배경지역 (제주 애월과 고산)의 에어로졸 화학성분(water-soluble, Insoluble, BC, sea-salt)에 따른 시·공간 농도 특성을 비교 분석하였다. 또한 에어로졸 화학성분 농도 자료를 이용하여 에어로졸 광학모델(OPAC) 수행을 하고, 광학특성(흡수계수 σ_{ab} , 산란계수 σ_{sc} , 소산계수 σ_{ext} , AOD)을 산출하였다. 이러한 에어로졸 화학성분에 따른 지표, 대기상단, 대기중의 직접적 복사강제력을 추정하기 위하여 농도 및 광학특성 수치자료를 사용하여 대기복사전달 모델(SBDART)을 수행하였다. 마지막으로, 부산 (4지점), 대전, 제주 애월 지점의 시간별·일별 연무 사례일을 선정하고 이 같은 기상현상이 복사강제력에 미치는 영향을 정량화하여 비교분석하였다.

1) 전체 연구기간 동안 지점별 에어로졸 화학성분 농도의 특성을 분석해본 결과, 전반적으로 water-soluble 성분의 농도가 가장 높았으며 Insoluble, BC 또는 sea-salt 순이었다. 지점별로 살펴본 결과 인구밀집과 많은 차량으로 인해 인위적 배출원의 영향이 큰 서울 광진구 지점과 부산의 학장지점의 water-soluble 성분 농도가 높았으며 sea-salt 성분은 지역별로 큰 차이가 나타나지 않았다. 한편 도시지역(부산 연산)과 배경지역(제주 고산지점)의 공통년도(2013~2014)에 대하여 비교해본 결과 water-soluble 성분은 연산지점이 훨씬 높게 나타났지만, sea-salt 성분은 고산지점이 약 1.2배 높았는데 이것은 4면이 바다로 둘러싸인 제주 고산지점의 지리·지형적 특징 때문이라고 사료된다. BC 성분의 경우 주로 화석연료의 불완전 연소를 통해 발생하는 특징으로 인해 인구 밀집지역 및 산업지역(연산, 광복 등)에서 전원지역(기장)에 비해 상대적으로 약 1.5배 내외로 높게 관측되었다.

계절변화로는, water-soluble 성분은 주로 여름철(6~8월)에 가장 낮게 나타나며, BC 성분과 더불어 늦가을부터 겨울철(11~2월) 및 봄철(3~5월)에 높았다. Insoluble 성분 또한 앞의 두 성분과 비슷한 계절패턴을 보였으며 sea-salt 성분은 큰 패턴이 보이지 않았다. 도시지역인 서울 광진구에서 겨울철(2월)에 높은

water-soluble 성분이 높은 농도를 보였는데, 이것은 배경지역에 비해 상대적으로 높은 연무 발생빈도(제주에 비해 약 5배 이상)와 더불어 겨울철 난방의 사용량 증가로 인해 도시지역 에어로졸 농도가 높게 나타난 것으로 추정된다. 주중/주말의 농도 특성을 보면 전체적으로 water-soluble을 제외한 나머지 성분들은 상대적으로 큰 차이가 없었다. 제주 애월 지점의 경우, sea-salt 성분을 제외하고 나머지 성분에서 주중과 주말의 농도차이가 거의 나타나지 않았는데 이것은 인위적 배출원의 영향이 적은 배경지역의 특징으로 사료된다. 일중 변화로는 주로 오후 시간대에 광화학 반응이 활발하게 일어남에 따라 정오 및 오후시간대(12시~16시)에 에어로졸 농도가 높게 나타났다.

2) 지역별 에어로졸 광학특성을 보면, 대체적으로 화학성분별 농도패턴과 비슷하게 도시지역에서의 광학변수(AOD, 흡수계수, 소산계수 등)가 높게 나타났다. 지점과 상관없이 전체적으로 water-soluble 성분의 광학특성 수치가 가장 높았으며, BC성분의 경우는 2013년과 2015년 부산 연산지점에서 water-soluble의 농도보다 낮음에도 불구하고 BC 성분의 흡습능력으로 인해 흡수계수 값은 전체 지점 중 가장 높았다. 또한 지점별 AOD는 전체적으로 농도의 패턴과 유사했으며 주로 봄철(3월)에 높고 여름철(8월)에 낮았다. 반면, 부산 학장 지점의 2월은 water-soluble 농도가 높았지만 상대적으로 다른 월에 비해 낮은 상대습도가 나타나 AOD가 낮게 추정된 것으로 사료된다. 일중변화로는 주로 오전 8시~9시에 값이 가장 컸으며, 오후시간대에 농도 패턴과 달리 감소하는 경향을 보였다. 이는 오후시간대의 상대습도가 오전에 비해 상대적으로 낮았기 때문으로 추정된다.

3) 연구기간동안 지점별 에어로졸 화학성분에 따른 총 DRF는 전 지점에서 공통적으로 water-soluble 성분의 음의 복사강제력이 높게 나타났으며, 다음으로 BC (TOA에서는 양의 DRF), Insoluble 및 Sea-salt 성분의 음의 복사강제력 순으로 나타났다. water-soluble 성분의 DRF는 도시지역인 부산(광복, 학장)지역과 서울 지역에서 가장 높은 음의 값이 추정되었으며, 공통연도(2013~2014년)를 비교해 보았을 때 도시지역(서울 광진구)이 배경지역(제주 애월)에 비해 DRF (SFC, TOA, ATM 모두) 수치가 약 2배 내외로 높았다. 계절 및 월변화를 살펴보면, 음

의 DRF_{SFC} 는 대체적으로 여름을 제외한 늦가을부터 초봄까지 높으며 전체적으로 지점별 AOD 값과 유사한 패턴을 보였다. 한편, sea-salt 성분은 전체 화학성분 중 가장 낮게 나타났으며 월변화 또한 뚜렷하지 않았다. BC 성분의 DRF_{TOA} 는 대체적으로 봄철에 높은 양의 복사강제력 값이 추정되었다. DRF의 일중변화는 서울 광진구 지점과 제주 애월 지점 모두 이른 아침에 비해 정오 또는 오후 시간대에 높게 나타났으며, 이것은 오후시간대의 광화학 반응이 활발함에 따라 증가한 것으로 추정된다. 애월 지점 BC성분의 경우 TOA에서 DRF는 11시~15시에 평균 약 $+7.7 \text{ W/m}^2$ 로 일중 가장 높은 양의 DRF가 추정되었다.

지역별 연무/비연무 사례일 기간의 농도는 전체 지점에서 연무일의 농도가 비연무일에 비해 높게 관측되었으며, 특히 제주 애월 지점과 부산 광복 및 대전 유성구 순서로 높게 나타났다(각각 $39.7 \mu\text{g/m}^3$ 와 $33.3 \mu\text{g/m}^3$). 또한, 제주 애월 지점에서 연무/비연무 농도 차이가 약 4.3배로 지점 중 가장 높게 나타났다. AOD 광학특성 또한 농도패턴과 비슷하게 나타났다. DRF 수치는 부산 광복지점에서 연무일의 water-soluble 성분의 $DRF_{SFC,TOA}$ 가 비연무일에 비해 각각 약 1.9배와 1.8배로 지점 중 차이가 가장 높았다. 반면, 전체 지점에서 water-soluble과 BC 성분을 제외한 나머지 성분들은 연무/비연무 사례일의 차이가 크지 않았다.

본 연구를 통해 화학특성에 따라 달라지는 지점별 농도특성을 볼 수 있었으며, 에어로졸의 화학성분별 특성뿐만 아니라 상대습도, 전운량 등 기상요소가 광학특성 및 복사강제력에 영향을 미치는 것으로 보여 진다. 좀 더 많은 화학성분 자료(특히, 시간별 자료)를 통해서 분석의 객관성을 높이고 싶었으나, 자료수집의 한계로 인해 전반적인 분석의 어려움이 있었다. 따라서 향후 보다 객관적이고 정확한 분석을 위해 대기오염집중측정소 및 지역별 $PM_{2.5}$ 자료 등의 활용이 요구되며, 대기화학모델(예, WRF-Chem)을 통해 기상과 에어로졸의 상호 피드백을 통해 좀 더 심화된 연구를 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 고희정, 송정민, 차주완, 김정은, 류상범, 강창희, 2016, 2013년 고산지역 연무, 황사, 연무-황사혼재 대기 에어로졸의 화학조성 특성, 한국대기환경학회지, 32(3), 289-304.
- 김상우, 최인진, 윤순창, 김유미, 2013, 에어로졸 광학변수가 대기복사가열률 산정에 미치는 민감도 분석, 한국기상학회지, 23(1), 85-92.
- 김석우, 송상근, 한승범, 2010, 2010년 3월 극심한 황사사례의 발생 및 수송과정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 32(3), 256-271.
- 박기형, 이병규, 2015, 부산 도심지역 대기중 입자상물질의 크기분포에 따른 수용성 이온성분의 특성, 한국대기환경학회지, 31(3), 287-301.
- 박승식, 김선정, 공부주, 이권호, 조석연, 김종춘, 이석조, 2013, 준 실시간 화학적 조성자료를 이용한 미세입자 연무 에피소드 규명, 한국대기환경학회지, 29(5), 642-655.
- 박연희, 2017, 제주지역 에어로졸 농도의 시공간적 변화 및 에어로졸 화학성분에 따른 복사강제력 영향 연구, 제주대학교, 석사학위 논문, 64.
- 박종성, 박승명, 송인호, 신혜정, 홍유덕, 2015, 에어로졸의 광학 및 화학 특성 준 실시간 모니터링을 통한 서울지역 시정 감쇄 분석, 한국대기환경학회지, 31(4), 319-329.
- 배현주, 2011, 서울시 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 단기 노출로 인한 사망영향, 한국환경보건학회지, 40(5), 346-354.
- 송상근, 손장호, 2014, 서울지역 시간별 에어로솔 자료를 이용한 화학성분별 광학 특성 및 직접 복사강제력의 시간 변화 분석, 한국대기환경학회지, 30(1), 1-17.
- 은승희, 남형구, 김병곤, 박진수, 안준영, 이석조, 2013, 서울과 백령도의 에어로솔 산란계수 특성 분석, 한국대기환경학회지, 29(3), 264-274.
- 이동하, 이권호, 김영준, 2006, 에어로졸 종류 구분을 위한 MODIS 에어로졸 자료의 적용, 대한원격탐사학회지, 22(6), 495-505.

- 이시혜, 김영성, 김상우, 윤순창, 2008, 서울과 고산의 에어로졸 화학성분과 광학 특성의 계절변화, 한국대기환경학회지, 24(4), 470-482.
- 임주연, 전영신, 조경미, 이상삼, 신혜정, 2004, 2003년 5월의 연무 관측시 에어로졸의 기상·물리·화학 특성, 한국대기환경학회지, 20(5), 697-711.
- 전영신, 임주연, 최병철, 2003, 황사 현상과 연무 현상에 따른 서울의 봄철 에어로졸 특성, 한국기상학회지, 39(4), 459-474.
- 전영신, 김지영, 부경은, 김남욱, 2000, 겨울철 황사 현상의 특징, 한국대기환경학회지, 16(5), 487-497.
- 정진희, 한영지, 2008, 춘천시 PM_{2.5}의 질량농도 및 이온성분 농도의 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 24(6), 682-692.
- Day, D. E., Malm, W. C., 2001, Aerosol light scattering measurement as a function of relative humidity: A comparison between measurement made at three different sites, Atmos. Environ., 35, 5169-5176.
- Hess, M., Koepke, P., Schult, 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.
- 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.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2013-2014, Annual Climatological Report, Republic of Korea.
- Pöschl, U., 2005, Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects, Angew. Chem. Int. Ed., 44(46), 7520 - 7540.

- Pilson, M. E. Q., 1998, *An Introduction to the Chemistry Of the Sea*. 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, 431.
- 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.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., Sowle, D., 1998, SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
- Sang-Keun Song., Zang-Ho Shon., Yeon-Hee Park., 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.
- 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.
- Soon-Chang Yoon., Jae-Gwang Won., Ali H. Omar., Sang-Woo Kim., Byung-Ju Sohn., 2005, Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data, *Atmospheric Environment*, 39, 6620-6630.
- Sihye Lee., Young Sung Ghim., Sang-Woo Kim., Soon-Chang Yoon., 2009, Seasonal characteristics of chemically apportioned aerosol optical properties at Seoul and Gosan, Korea, *Atmospheric Environment*, 43,

1320-1328.

- 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.
- 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.
- Zang-Ho Shon., Samik Ghosh., Ki-Hyun Kim., Sang-Keun Song., Kweon Jung., Nam-Jin Kim., 2013, Analysis of water-soluble ions and their precursor gases over diurnal cycle, *Atmospheric research*, 132, 309-321.
- 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.

Estimation of optical properties and direct radiative forcing of aerosol chemical components in urban and background areas

Yun-Yeong So

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

Abstract

In this study, the characteristics of time and spatial concentration according to four aerosol chemical components (Water-soluble, Insoluble, BC and Sea-salt) were compared and analyzed in urban (Seoul, Daejeon, and Busan 4 sites) and background (Jeju Aewol and Gosan) areas during each study period. Due to the limitations of data collection, each site used different PM_{2.5} data for this study. Busan, Daejeon, and Jeju Gosan sites used daily aerosol sampling data and Seoul and Jeju Aewol sites used hourly aerosol sampling data. The optical properties (e.g. absorption, scattering, and Aerosol Optical

Depth (AOD)) of the four different aerosol chemical components were analyzed using the OPAC model and direct radiative forcing using the SBDART model at each study site. Also concentration, AOD, DRF_{SFC} , and DRF_{TOA} of each aerosol component at the six different study sites (Busan 4 sites, Daejeon and Jeju Aewol) were calculated during haze and non-event periods.

Overall, the highest concentration of Water-soluble aerosol component was followed by Insoluble, BC or Sea-salt. In general, the concentration of aerosol components in urban environments (e.g. Seoul and Busan) where the effects of artificial emission sources was high due to population density and many vehicles. And the sea-salt components did not show significant differences between regions. Comparing the common year (2013~2014) of the urban area (Busan Yeonsan) and the background area (Jeju Gosan), the water-soluble component was much higher in urban area, but sea-salt component was about 1.2 times higher in Jeju Gosan. This is thought to be due to the geographic and topographical features of Jeju Island as it is surrounded by four sides of the sea. The diurnal variation of component concentration in Seoul Gwangjin and Jeju Aewol sites, due to the photochemical reaction in the afternoon, the aerosol concentration was high at noon and in the afternoon time (12:00 to 16:00).

Regional aerosol optical characteristics, the optical parameters (AOD, absorption coefficient, dissipation coefficient, etc.) in urban areas were high, similar to the concentration patterns of chemical components. Furthermore, the BC component had the highest absorption coefficient value despite its relatively small concentration due to the strong light absorption ability. The diurnal variation was mainly the highest at 8:00 to 9:00, and showed a tendency to decrease unlike the concentration pattern in the afternoon. This is presumably because the relative humidity in the afternoon is lower than in the morning.

During the study, total DRF by aerosol chemical component of every study site was common to high negative radiative forcing of water-soluble components, followed by BC (positive DRF in TOA), Insoluble, and Sea-salt components. Negative DRF_{SFC} was generally high from late fall to early spring, showing a pattern similar to AOD values as a whole. In the case of DRF_{TOA} , it was generally estimated to be the similar order of radiative forcing with SFC (water-soluble, BC (positive DRF), sea-salt and insoluble components). The daily variation of DRF was higher in the noon or afternoon compared to the early morning, due to the increase in photochemical reaction. In the case of the Aewol site BC component, the average DRF in the TOA was estimated at an average of about $+7.7 \text{ W/m}^2$ from 11:00 to 15:00 hours.

Overall, the aerosol concentration of haze was higher than that of non-haze event, especially in the order of the Jeju Aewol and the Busan Gwangbok and the Daejeon Yuseong ($39.7 \mu\text{g/m}^3$ and $33.3 \mu\text{g/m}^3$, respectively). The AOD optical characteristics were also shown to be similar to the concentration. The DRF on haze days was the highest among the sites, with DRF_{SFC} and DRF_{TOA} of water-soluble component at Busan Gwangbok at 1.9 times and 1.8 times, respectively, compared to non-haze days.