



논문

2013~2016년 연무 사례의 에어로졸 화학성분별 농도 특성 및 직접적 복사강제력 추정 연구

Characteristics of Concentrations of Aerosol Chemical Components and their Direct Radiative Forcing Estimates in the Haze Events during 2013~2016

소운영, 송상근^{1),*}, 한승범¹⁾

국가농림기상센터, ¹⁾제주대학교 지구해양학과

Yun-Yeong So, Sang-Keun Song^{1),*}, Seung-Beom Han¹⁾

National Center for Agro Meteorology, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

접수일 2020년 2월 12일

수정일 2020년 3월 7일

채택일 2020년 3월 16일

Received 12 February 2020

Revised 7 March 2020

Accepted 16 March 2020

*Corresponding author

Tel : +82-(0)64-754-3431

E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract The concentration characteristics of four aerosol chemical components (water-soluble, insoluble, black carbon (BC), and sea-salt) and their direct radiative forcing (DRF) were analyzed using the daily or hourly data (PM_{2.5}) measured at urban (Yeonsan, Gwangbok, Hakjang, and Gijang in Busan) and background sites (Aewol in Jeju Island) during haze events, based on a modeling approach. Overall, the concentrations of water-soluble component and its impact on the DRF were predominant over all other components at most of the sites (especially at Aewol, Gwangbok and/or Hakjang). The DRFs at the surface (DRF_{surf}), top of the atmosphere (DRF_{TOA}), and the atmosphere (DRF_{ATM}) for most aerosol components (except for BC) at most of the sites (except for Yeonsan) were high in spring or winter and low in summer or fall. Meanwhile, the DRFs at Yeonsan were highest in summer (for DRF_{TOA}) or fall (for DRF_{surf}) and lowest in spring (for both). These seasonal DRF characteristics in the study sites might be closely related to the seasonal patterns of aerosol component concentrations and/or meteorological conditions (e.g., relative humidity). In addition, the positive DRF_{ATM} of BC in the study sites was highest among the all aerosol components due to strong radiative absorption. The differences in DRFs for water-soluble component between haze and non-haze periods were largest in the all study sites. In particular, the DRF_{TOA} (and DRF_{surf}) of water-soluble at the sites of Gwangbok and Aewol during the haze periods were higher by a factor of 1.8 and 2.3 (and a factor of 1.9 and 2.4) than those during the non-haze periods.

Key words: Aerosol chemical components, Water-soluble component, Direct radiative forcing, BC, Relative humidity, Busan, Jeju Island

1. 서론

대기 중 에어로졸은 전 지구 및 지역 규모에서의 복사균형에 영향을 줄 수 있는 잠재력 때문에 기후와 관련된 많은 연구에서 에어로졸에 대한 중요성이 점차 증가하여 왔다(Singh *et al.*, 2010; Penner *et al.*, 2004). 에어로졸은 태양 복사광을 산란 또는 흡수하

는 직접효과(Charlson *et al.*, 1992)와 구름의 생성과 수명을 변화하는 등 간접효과(Albrecht *et al.*, 1989; Twomey *et al.*, 1974)를 통해 지구에너지 균형에 변화를 일으켜, 직·간접적 복사강제력(radiative forcing, RF)을 발생시킨다. 이러한 에어로졸은 화학조성에 따라 에어로졸 RF의 크기나 부호(양(+)과 음(-))에 미치는 효과가 다르게 나타난다. 예를 들어, 수용성

(water-soluble) 에어로졸의 주요 이온성분인 황산염(SO_4^{2-})과 암모늄(NH_4^+) 등은 태양복사 산란을 통해 음의 직접적 복사강제력(Direct RF, DRF)을 야기시켜 지구 냉각화에 기여하는 반면, 화석연료의 불완전 연소에 의해 발생하는 검댕(black carbon, BC)은 태양복사를 흡수하는 성질이 있어 양의 DRF를 일으켜 온난화에 기여한다(IPCC, 2013, 2007). 한편, 에어로졸의 간접적 RF 추정은 다양한 관측자료(구름의 수 농도 및 입자크기 등)의 한계와 불확실성 등으로 인해 DRF 추정보다 훨씬 복잡하다(IPCC, 2013; Rap *et al.*, 2013; Mahowald *et al.*, 2011).

에어로졸의 복사효과에 영향을 주는 기상현상 중 연무는 상대습도(relative humidity, RH) 75% 이하 조건에서 대기 중의 황산과 같은 연기 및 먼지 등의 물질이 수증기와 함께 응집되면서, 시정을 1~10 km 정도로 크게 감소시키는 특징이 있다(Lim *et al.*, 2004). 연무는 대부분 자동차나 공장에서의 불완전연소 물질(이산화탄소, 질산 등)을 포함하고 있으며, 입자크기는 1 μm 정도로 황사에 비해 매우 작은 크기로 천식과 기관지염 등의 호흡기 질환을 유발시켜 심각한 사회적 문제로 거론되고 있다(Yang *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2014; Quan *et al.*, 2014). 또한 연무현상은 도시 대기 오염물질의 오염원으로 인해 발생하는 고농도 미세먼지 현상으로, 주로 BC와 유기탄소(organic carbon, OC) 성분의 농도가 높은 편이다(Singh *et al.*, 2010). 따라서 이러한 성분들의 배출강도가 높은 도시지역은 배경(또는 시골)지역에 비해 에어로졸의 복사효과도 높게 나타난다(Song *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2010). 예를 들어, 2006~2007년 인도의 Delhi에서 BC 성분의 DRF는 지표(surface, SFC)에서 최고 -110 W/m^2 , 대기상단(top of the atmosphere, TOA)에서 최고 $+21 \text{ W/m}^2$ 으로 높게 나타났다(Singh *et al.*, 2010). 또한 2003년 1~3월 인도의 Hyderabad에서 BC 성분의 평균 DRF는 SFC와 TOA에서 각각 -33 W/m^2 , $+9 \text{ W/m}^2$ 으로 추정되었다(Badarinath and Latha, 2006). 먼지(dust)의 경우, 2004년 10월~2006년 3월 이집트의 수도 Cairo에서 SFC와 TOA에서의 DRF는 각각

-121 W/m^2 , -57 W/m^2 으로 매우 높게 추정되었다(El-Metwally *et al.*, 2011). 한편, 2001~2008년 배경지역(제주 고산)에서 에어로졸의 DRF는 SFC에서 -28 W/m^2 , TOA에서 -16 W/m^2 으로 도시지역에 비해 상대적으로 낮은 수치였다(Kim *et al.*, 2010).

우리나라는 지정학적으로 중국의 풍하측에 위치하여 외부로부터의 유입과 함께 국내배출 증가로 인해, 2008~2015년간 서울지역 연무 발생일수가 100일 이상으로 꾸준히 발생하고 있다(Shi *et al.*, 2016). 부산 지역은 서울에 비해 중국으로부터 먼 거리에 있으며 국내배출 또한 적음에도 불구하고, 같은 기간(2011년 제외)에 최소 49일, 최대 95일의 연무가 발생하여 서울의 35~70% 정도 수준이었다(KMA, 2008~2015). 한편, 한반도에서 관측된 연무로 인해 황산염(SO_4^{2-}), 질산염(NO_3^-), 암모늄(NH_4^+)과 같은 2차 무기 에어로졸이 비연무에 비해 약 6배 이상 증가하는 특성을 보였다(Kang *et al.*, 2004). 또한 Kim *et al.* (2014)은 대기오염물질의 오염원이 거의 없는 배경지역(제주 고산)에서 연무 사례 시 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 비연무에 비해 각각 2.0배, 2.2배 정도 증가한 것으로 보고한 바 있다. 따라서 연무와 같은 기상현상에 따라 에어로졸의 화학조성을 분류하고 그에 따른 농도 특성과 복사효과를 분석하는 것은 지역 대기질과 기후 연구에 있어 매우 중요하다고 볼 수 있다(Ko *et al.*, 2016).

앞서 언급한 것처럼, 지역별 그리고 화학성분에 따라 에어로졸의 물리·화학적 특성과 복사효과는 시·공간적으로 서로 다른 양상을 보이며, 화학조성별 상세한 분석은 기후변화의 특성을 규명하는 데 있어 매우 중요한 정보로 활용될 수 있다(Yoon *et al.*, 2005). 그러나 과거 에어로졸의 광학특성과 복사효과에 대한 연구는 주로 배경지역을 대상으로 이루어져 왔으며(Takamura *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2006; Won *et al.*, 2004), 도시지역에서의 이러한 연구도 일부 대도시를 제외하고는 여전히 많이 부족한 편이다. 또한 에어로졸 DRF에 관한 국내외 연구들은 주로 에어로졸 전체량(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)을 이용한 연구가 대부분이었으며, 다양한 화학성분별 농도에 따라 에어로졸의 광학특

성과 RF를 추정한 연구는 미비한 편이었다. 따라서 본 연구에서는 도시 및 배경지역에서 고농도 미세먼지(예, $PM_{2.5}$)가 관측된 연무 사례를 중심으로 에어로졸 화학성분의 농도 특성을 살펴보고, 성분별 농도에 따른 에어로졸 광학특성과 DRF를 추정하였다. 또한 연무 발생과 비연무 발생 시 에어로졸의 화학성분에 따른 DRF를 비교분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역 및 자료

본 연구에서는 도시 및 배경지역에서의 연무 사례를 대상으로 에어로졸 화학성분별 농도 특성과 이에 따른 DRF를 산출하기 위해 5개 지점, 즉 도시지역에는 부산의 연산, 광복, 학장, 기장 지점, 배경지역으로 제주의 애월지점을 선정하였다(그림 1). 각 측정지점의 일반적인 특성은 다음과 같다. 부산의 경우 연산 지점은 인구 및 주거 밀집지역, 광복지점은 도시 중심에 위치하고 많은 차량과 빌딩이 밀집된 지역, 학

장지점은 산업 및 공업 단지가 인접해 있는 지역, 그리고 기장지점은 인구는 다소 많으나 도심에서 떨어져 주변에 산과 들로 둘러싸여 있는 교외지역이다. 마지막으로 제주의 애월지점은 배경/시골 지역으로 해발 약 600 m의 산간지대에 위치한다. 이외에도, 연무 사례의 농도분포, 광학특성과 DRF를 분석하기 위해 부산 및 제주지역의 기상청 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 일기현상 자료를 이용하여 연무 발생 시기를 정하였다. 즉, ASOS 일기현상의 “40”에 해당하는 모든 시간대를 연무발생으로, 그 외 시간대를 비연무 시기로 선정하여 분석에 이용하였다. 여기서 연무(일기현상 “40”)는 시정과 상대습도에 따라 분류되는데, 상대습도가 75% 미만일 때의 먼지현상을 의미하며 시정에 따라 연무의 강도를 결정한다(KMA, 2016).

$PM_{2.5}$ 에어로졸 화학성분 자료수집의 한계로 인해 지점별로 분석에 이용된 연구기간과 샘플링 간격(일별 또는 시간별)이 서로 다르다. 부산의 4개 지점은 종합대기측정소의 일별 화학성분 농도자료를 사용하였으며, 연구기간은 연산지점이 2013~2016년, 나머지

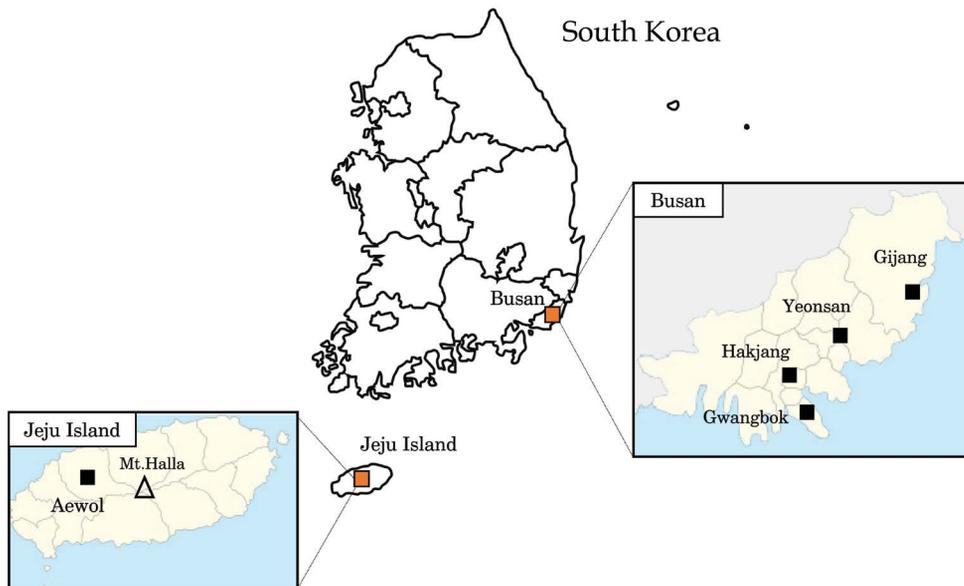


Fig. 1. Geographical locations of the measurement sites (four sites in Busan and one site in Jeju Island) for aerosol chemical components in $PM_{2.5}$.

3지점(광복, 학장, 기장)은 2016년이다. 한편, 제주 애월지점은 대기오염집중측정소의 2013~2014년 시간별 화학성분 농도자료를 이용하였다. 여기서 사용한 일별/시간별 PM_{2.5} 화학성분은 총 8개의 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)과 2개의 탄소성분(OC, 원소탄소(element carbon, EC))이다. 부산의 에어로졸 화학성분 자료는 부산시 보건환경연구원에서 그리고 제주지역의 화학성분 자료는 국립환경과학원에서 운용·관리되고 있으며, 자료 신뢰성 평가에 대한 정도보증(Quality Assurance, QA)과 정도관리(Quality Control, QC)가 함께 수행되고 있다.

일반적으로 에어로졸 입자 중 황산염과 같은 흡수성 에어로졸은 상대습도(RH)가 증가할수록 대기 중 에어로졸 광학두께(aerosol optical depth, AOD)가 증가하고 산란계수 등에 영향을 주어, 결국 에어로졸의 DRF 증가에 영향을 미칠 수 있다(Park *et al.*, 2015; Yoon and Kim, 2006). 본 연구에서는 보다 정확한 분석을 위해 일별 또는 시간별로 관측된 RH 자료를 이용하여 에어로졸 광학모델(Optical Properties of Aerosols and Clouds, OPAC)에 적용하였다. 즉, 부산 4 지점(연산, 광복, 학장, 기장)은 바로 인근에 위치하는 자동기상관측시스템(Automated Weather Station, AWS)의 RH 자료(2013~2016년)를 직접 이용하였고, 제주 애월지점은 측정소가 없는 관계로 제주지방기상청 ASOS의 RH 자료(2013~2014년)를 이용하였다. 또한 에어로졸에 의한 직접적 효과만을 고려하기 위해 구름의 효과를 제거하였는데, 전운량이 100%(전부 구름)인 경우만 분석에서 제외하고 나머지 운량에 대해서는 구름이 없는 맑은 하늘(전운량 0%)로 가정하였다(Kim *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010). 부산 4지점의 AWS에서는 운량이 관측되지 않아 제주 애월지점과 마찬가지로 기상청 ASOS에서 관측한 운량 자료를 이용하였다. 이외에도, 에어로졸 광학모델의 결과(예, AOD)를 검증하기 위해 Aerosol Robotic Network(AERONET)에서 제공되는 선포토펙터(Sun photometer)의 일별 AOD(500 nm) 관측값을 사용하

였으며, 여기서 제공되고 있는 AOD는 AERONET Level 2.0(구름효과 제거 및 품질 보증된 자료) 자료이다(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). 부산지역은 도시 내외로 AERONET에서 제공하는 측정소가 한 곳도 없어 분석에서 제외하였고, 제주 애월지점(해당 관측소는 없지만)은 가장 가까운 고산 측정소(33.3°N, 126.2°E)의 일별 AOD를 이용하여 OPAC 모델의 AOD와 비교하였다.

2.2 에어로졸 직접적 복사강제력(DRF) 산출 방법

일반적으로 에어로졸에 따른 SFC 및 TOA의 직접적 복사강제력(DRF)은 에어로졸이 있는 경우의 복사플럭스(F)와 없는 경우의 복사플럭스(F_{w/o})의 차로 계산하며, 각 복사플럭스는 에어로졸 유무에 따른 상향과 하향 복사플럭스의 차(net flux = 하향플럭스 - 상향플럭스)로 계산한다(식 (1)). 또한 대기 중(atmosphere, ATM) DRF는 TOA와 SFC의 DRF 차이로 계산한다(식 (2)). 다음은 본 연구에 이용된 TOA, SFC, 그리고 ATM에서의 DRF 추정식을 나타낸다.

$$\text{DRF}_{\text{TOA, SFC}} = (F^{\downarrow} - F^{\uparrow})_{\text{TOA, SFC}} - (F_{\text{w/o}}^{\downarrow} - F_{\text{w/o}}^{\uparrow})_{\text{TOA, SFC}} \quad (1)$$

$$\text{DRF}_{\text{ATM}} = \text{DRF}_{\text{TOA}} - \text{DRF}_{\text{SFC}} \quad (2)$$

지점별 연무 사례일의 에어로졸 화학성분에 따른 DRF를 추정하기 위하여 캘리포니아대학교-Santa Barbara에서 개발한 대기복사전달모델(Santa Babara DISORT Atmospheric Radiative Transfer, SBDART)을 이용하였다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). 모델 수행을 위한 주요 입력변수는 AOD, 단일산란알베도(single scattering albedo, SSA), 위상함수(phase function), 지표 알베도, 대기프로파일(기온, 기압 등), 태양 천정각(solar zenith angle, SZA) 등이다. 입력변수 중 AOD, SSA, 위상함수와 같은 광학변수는 OPAC 모델의 산출결과를 이용하였으며, 지표 알베도와 대기프로파일은 모델 내에서 제공하는 초목환경의 알베도와 US62 프로파일(해당지점의 고층 기상요소 부재로 인해)을 각각 이용하였다. 이외에도, SZA는 모델

내 “namelist” 옵션에서 지정해 주는 특정 위도 및 경도, 날짜(Julian day), 시간(UTC) 등에 의해 계산된다.

SBDART 모델의 입력 자료인 에어로졸 광학변수를 계산하기 위해 사용된 OPAC 모델에 대한 설명은 다음과 같다. OPAC 모델은 주어진 파장(0.25~40 μm 사이의 61개 파장)과 8개의 RH (0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99%) 조건에서 에어로졸 및 구름 성분의 광학변수(AOD, 산란 및 흡수 계수 등)를 산출하는 프로그램이며, 주로 10개의 에어로졸 성분(수용성(water-soluble), 불용성(insoluble), BC, sea-salt(2개 mode), mineral dust(4개 mode), sulfate droplets)에 대해 광학변수를 산출할 수 있다(Hess *et al.*, 1998). 본 연구에서는 대상지역에서의 에어로졸 측정 자료의 한계로 인해 10가지 에어로졸 성분 중 4가지 성분(water-soluble, insoluble, BC, sea-salt)으로 분류하여 각각의 광학변수를 산출하였다. 여기서 분류된 4가지 화학성분의 구성에 대해 요약하면 다음과 같다. 먼저, water-soluble 성분은 총 7가지 즉, 4가지 비해염(non-sea-salt, NSS) 성분인 NSS-K⁺, NSS-Mg²⁺, NSS-Ca²⁺, NSS-SO₄²⁻와 NO₃⁻, NH₄⁺, 수용성 OC 성분으로 구성된다(식 (3)). 본 연구에서는 4가지 NSS 이온성분의 질량농도를 $[\text{ion}]_{\text{obs}} - [\text{Na}] \times (\text{해수에서 Na}^+ \text{에 대한 각 이온의 질량비})$ 관계식을 통해 계산하였으며(Pilson, 1998), 수용성 OC의 자료 부재로 인해 OC를 수용성 OC로 가정하였다(Park *et al.*, 2014). 다음으로 insoluble 성분은 OC에 대한 유기물질(organic material, OM)의 비를 이용하였는데(식 (4)), 계절에 따라 각각 다르게(여름: 2.06, 겨울: 1.48, 봄과 가을: 여름과 겨울의 평균값 1.77) 적용하였다(Bae, 2011). 또한 본 연구에서는 BC 성분의 측정이 이루어지지 않아, 측정된 EC 성분으로 대체하였다(식 (5)). 마지막으로 sea-salt 성분은 수용성 이온성분에서 분리된 Na⁺와 Cl⁻로 구성하였다(Quinn *et al.*, 2004)(식 (6)).

$$\begin{aligned} [\text{Water-soluble}] = & [\text{NSS-K}^+] + [\text{NSS-Mg}^{2+}] \\ & + [\text{NSS-Ca}^{2+}] + [\text{NSS-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] \\ & + [\text{NH}_4^+] + [\text{OC}]_{\text{water-soluble}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$[\text{Insoluble}] = \{[\text{OC}] \times [\text{OM}]/[\text{OC}]\} - [\text{OC}]_{\text{water-soluble}} \quad (4)$$

$$[\text{BC}] = [\text{EC}] \quad (5)$$

$$[\text{Sea-salt}] = [\text{Cl}^-] + 1.47 [\text{Na}^+] \quad (6)$$

여기서 에어로졸 광학변수를 산출하기 위해 화학성분별 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 각 성분별 전환계수, 즉 공기 밀도에 대한 표준화된 입자수와 에어로졸 성분별 질량과의 비($([\mu\text{g}/\text{m}^3]/[\text{particle}/\text{cm}^3])$)를 적용하여 4가지 성분의 수농도(number density, $\text{particle}/\text{cm}^3$)로 생성하였으며(Hess *et al.* (1988)의 표 1c), 이를 OPAC 모델의 입력 자료로 사용하였다. 또한 에어로졸 입자 크기 분포(size distributions)는 아래와 같이 각 성분에 대한 로그 정규 분포(lognormal distributions, 식 (7))가 적용되었다(Deepak and Gerber, 1983).

$$\frac{dN_i(r)}{dr} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} r \log\sigma_i \ln 10} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log r_{\text{mod},N,i}}{\log\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (7)$$

여기서 $r_{\text{mod},N,i}$ 는 모드 반경이고, σ_i 는 크기 분포의 너비를 측정한다. N_i 는 각 화학성분에 대한 입자 수농도($\text{particle}/\text{cm}^3$)를 의미한다. 에어로졸 각 성분별 미세 물리적 특성(예, size distribution의 $r_{\text{mod},N,\sigma}$ 등)의 변수들은 선행연구에서 제시하고 있는 값을 이용하여 모델을 수행하였다(Hess *et al.* (1998)의 표 1c). 또한 AOD를 비롯한 SSA, phase function, 소산 및 산란계수 등의 광학변수들은 모델 내에서 화학성분별 수농도, 로그 정규 입자크기 분포, 태양 스펙트럼, 고도분포(height profile) 등의 자료들이 각 광학변수의 산출식에 맞물려 적용되어, 최종적으로 파장별(0.25~40 μm 사이의 61개 파장)로 계산된다. 한편, 연구대상지역은 에어로졸 화학성분별 연직분포(vertical profile)의 관측 자료가 없어 모델 내 default 연직분포를 적용하여 층별 광학변수를 추정하게 되며, 화학성분별 연직분포는 약 2km 경계층 고도 내에서 균일한 것으로 가정하였다(Hess *et al.*, 1998). 이외에도, 모델 내에서 water-soluble과 sea-salt 성분은 RH 증가 또는 수증기 흡수로 인해 에어로졸 입자크기가 성장하고,

insoluble 및 BC 성분은 물에 용해되지 않아 RH 증가에 따라 에어로졸 입자가 성장하지 않는 것으로 가정한다 (Hess *et al.*, 1998). 모델링을 위한 에어로졸 화학성분 분류, 다양한 입력 자료 등 전반적인 OPAC 모델의 구성/특징에 대해서는 여러 선행연구에 자세히 나타나 있다 (So *et al.*, 2019; Song and Shon, 2014; Hess *et al.*, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1 연무 사례의 에어로졸 화학성분 농도 및 광학특성

본 연구에서는 도시 및 배경지역에서 관측된 연무

사례를 중심으로, 연무 발생시 에어로졸 화학성분 농도 및 광학변수(AOD)의 연변화(표 1)와 계절별 농도변화(그림 2)를 살펴보았다. 2.1절에서 언급하였듯이, 대상지역 자료수집의 한계로 인해 지점별 에어로졸 화학성분 자료의 분석기간이 서로 다르다(부산 연산: 2013~2016년, 부산 광복, 학장, 기장: 2016년, 제주 애월: 2013~2014년). 참고로 2013년 부산 연산 지점은 연무 사례에 해당하는 에어로졸 성분(질산염, 암모늄, 황산염, OC)의 농도가 1회 관측값만 있어 평균값(표준편차 제외)만 제시하였다. 전반적으로, 연구기간 동안 모든 지점에서 4가지 화학성분 중 water-soluble 성분의 농도가 공통적으로 가장 높았으며, 다음으로 insoluble, BC, 그리고 sea-salt 순으로 나타났다(표 1과 그림 2). 또한 AOD에 대해 가장 크게

Table 1. Mean concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of four aerosol chemical components in $\text{PM}_{2.5}$ and their optical property (AOD, 550 nm) calculated by OPAC model at several study sites during haze periods.

(a) Mean concentrations and optical property (AOD) of four aerosol chemical components

Region	Site	Period	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Optical property	Mean RH (%)
			Water-soluble	Insoluble	BC	Sea-salt	AOD (τ)	
Busan	Yeonsan	2013	16.7	2.9	1.5	0.5	0.16/0.02/0.04/0.02 ^a	50
		2014	21.0 \pm 3.0 ^b	4.3 \pm 0.8	2.1 \pm 0.8	0.2 \pm 0.1	0.21/0.02/0.05/0.02	57
		2015	21.1 \pm 8.1	2.9 \pm 1.0	2.0 \pm 0.6	0.4 \pm 0.3	0.18/0.02/0.05/0.02	55
		2016	22.8 \pm 9.4	3.5 \pm 1.7	1.5 \pm 0.7	1.8 \pm 1.4	0.23/0.02/0.04/0.03	61
	Gwangbok	2016	33.3 \pm 7.7	3.5 \pm 1.7	1.7 \pm 0.8	1.2 \pm 0.9	0.34/0.02/0.05/0.03	63
	Hakjang	2016	27.7 \pm 8.2	3.9 \pm 1.6	1.9 \pm 0.9	1.6 \pm 1.1	0.29/0.02/0.05/0.03	63
	Gijang	2016	18.8 \pm 5.3	3.2 \pm 1.6	1.2 \pm 0.6	1.3 \pm 2.2	0.20/0.02/0.04/0.03	61
Jeju	Aewol	2013	38.5 \pm 15.4	5.4 \pm 2.2	2.9 \pm 1.6	1.6 \pm 1.1	0.40/0.02/0.06/0.03	64
		2014	46.0 \pm 13.1	5.6 \pm 0.9	3.1 \pm 1.3	2.0 \pm 0.8	0.49/0.02/0.07/0.03	67

(b) Mean concentrations of several components of water-soluble aerosol

Region	Site	Period	Secondary inorganic aerosol (SIA)				Primary inorganic aerosol (PIA) ^c	OC
			All	NO_3^-	NH_4^+	NSS-SO_4^{2-}		
Busan	Yeonsan	2013	12.4 \pm 1.4 ^b	5.1	2.5	4.8	0.6 \pm 0.2	3.8
		2014	15.0 \pm 4.9	0.6 \pm 0.9	4.1 \pm 0.8	10.3 \pm 1.2	0.4 \pm 0.1	5.6 \pm 1.0
		2015	11.6 \pm 2.1	1.9 \pm 1.1	3.6 \pm 1.4	6.1 \pm 1.0	0.4 \pm 0.1	6.1 \pm 2.1
		2016	17.4 \pm 2.0	5.6 \pm 5.6	3.9 \pm 1.8	7.9 \pm 3.8	0.6 \pm 0.2	4.9 \pm 2.2
	Gwangbok	2016	27.5 \pm 2.7	10.2 \pm 7.0	6.1 \pm 2.0	11.2 \pm 4.5	0.7 \pm 0.1	5.3 \pm 2.4
	Hakjang	2016	21.3 \pm 2.3	7.8 \pm 5.0	4.5 \pm 1.7	9.0 \pm 4.1	0.7 \pm 0.1	5.8 \pm 2.3
	Gijang	2016	17.6 \pm 8.6	4.1 \pm 4.1	4.1 \pm 1.6	9.4 \pm 3.3	0.7 \pm 0.2	4.5 \pm 1.9
Jeju	Aewol	2013	28.5 \pm 2.6	9.7 \pm 7.7	6.8 \pm 2.8	12.0 \pm 4.5	1.1 \pm 0.3	9.1 \pm 4.2
		2014	35.2 \pm 2.8	11.8 \pm 8.0	8.9 \pm 3.2	14.5 \pm 6.9	0.7 \pm 0.3	10.1 \pm 3.3

^aWater-soluble/Insoluble/BC/Sea-salt.

^bMean \pm 1 σ .

^cPIA: $\text{NSS-K}^+ + \text{NSS-Mg}^{2+} + \text{NSS-Ca}^{2+}$.

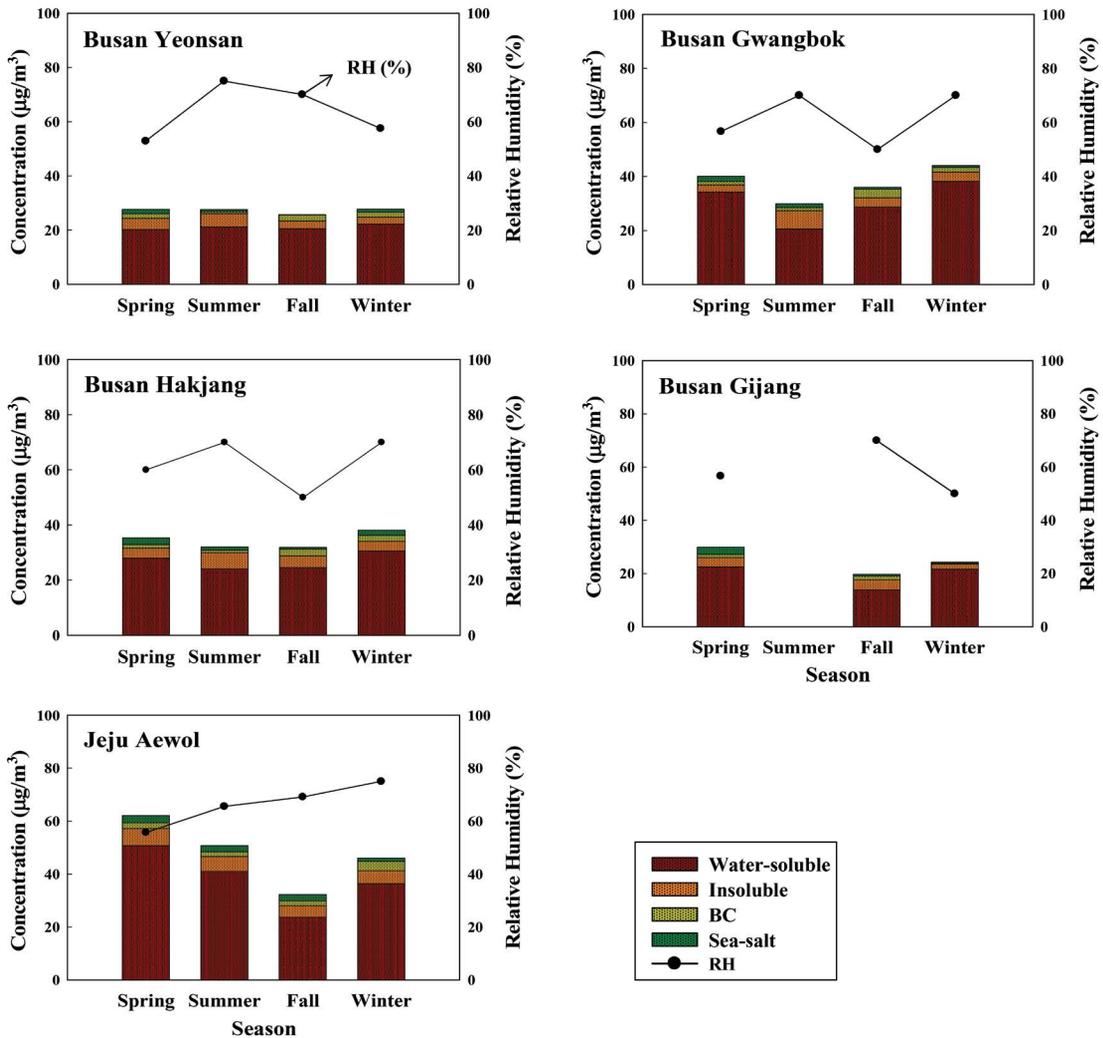


Fig. 2. Seasonal variations of the concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of four different aerosol components in $\text{PM}_{2.5}$ at several study sites during haze periods of the study period (Yeonsan: 2013~2016, Gwangbok, Hakjang, and Gijang: 2016, Aewol: 2013~2014).

영향을 주는 성분도 연간/계절에 상관없이 water-soluble 성분으로 나타났다.

지점별 농도 및 AOD의 연변화를 보면(표 1), 2013~2016년 연무 사례 시 부산 연산지점의 연평균 농도는 water-soluble 성분이 $16.7\sim 22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, insoluble 성분이 $2.9\sim 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, BC 성분이 $1.5\sim 2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sea-salt 성분이 $0.2\sim 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 또한 화학성분 중 water-soluble과 sea-salt 성분은 2016년에 가장 높았고, insoluble과 BC 성분은 2014년에 가장

높은 수준을 보였다. 부산 광복지점의 연평균(2016년) 농도는 water-soluble 성분이 $33.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 부산 4지점 중에서는 가장 높은 수준이었으며, insoluble 성분이 $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, BC와 sea-salt 성분은 각각 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 부산의 학장지점에서 water-soluble, insoluble, BC, sea-salt 성분의 연평균(2016년) 농도는 각각 $27.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 기장지점(2016년)은 각각 $18.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 광복

및 학장지점에서 water-soluble 성분의 높은 농도는 두 지점이 각각 상업지역과 공업지역에 위치하여 많은 차량의 불완전 연소와 산업/공업단지에서 야기되는 질산염(NO_3^-)과 황산염(SO_4^{2-}) 농도가 높았기 때문인 것으로 사료된다. 예를 들어, 2016년 연무 사례 시 질산염 및 황산염의 농도는 광복지점이 $10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 학장지점이 $7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 같은 연도의 다른 2지점(연산, 기장)에 비해 대체로 높은 편이었다(표 1). Seo (2014)에 따르면, 2008년 3월~2010년 3월 서울지역 연무 발생에 있어 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 등의 2차 이온성분이 크게 영향을 준 것으로 나타났다. 반면, 기장지점에서 관측된 화학성분 농도는 대체로 가장 낮게 나타났는데, 이것은 교외지역에 위치하여 다른 지점보다 인위적 배출원이 적어 덜 오염된 지역적 특성인 것으로 추정된다.

제주 애월지점은 배경지역임에도 불구하고 연무 발생시 화학성분 농도는 전체 지점 중 가장 높게 관측되었다(표 1). 예를 들어, 2013과 2014년에 water-soluble 농도가 각각 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, insoluble 농도가 $5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도를 보였다. 이것은 같은 연도(2013~2014년)의 부산 연산지점에 비해 1.3배(insoluble)~2.3배(water-soluble) 정도 높은 수준이었다. 특히, 2014년 애월지점의 sea-salt 성분 농도는 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 같은 연도의 부산 연산지점($0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 약 10배 높았다. 제주 애월지점의 sea-salt 농도는 사면이 바다로 둘러싸여 있는 섬 지역의 특성상 높은 농도가 나타난 것으로 사료되며, water-soluble 등 다른 성분들의 높은 농도는 이 지역이 비교적 인위적 오염원의 영향이 매우 적기 때문에 중국 등 외부로부터의 유입 영향이 크게 기여한 것으로 추정된다. 이와 관련하여 Ko *et al.* (2016)은 2013년 제주지역의 연무 발생 시 중국으로부터 장거리 수송에 의해 2차성 무기이온(질산염 등)의 농도가 크게 증가하였음을 밝힌바 있다. 한편, 본 연구의 도시 및 배경지역에서 에어로졸 광학특성(AOD, 550 nm)은 화학성분별 농도의 연변화 패턴과 매우 유사하게 나타났다(표 1).

그림 2는 연구기간 동안 대상지역(부산, 제주)에서 관측된 연무 사례 시 4가지 화학성분 농도의 계절변화를 나타낸다. 부산 기장지점의 여름철은 연무 발생시 에어로졸 성분 농도의 결측으로 인해 분석에서 제외하였다. 전반적으로 계절별 평균농도는 연평균 농도패턴과 마찬가지로 4가지 화학성분 중 water-soluble 성분의 농도가 가장 높았고, 다음으로 insoluble, BC 또는 sea-salt 순서로 나타났다. 부산의 경우(연산과 다른 3지점의 연구기간이 다름), 4가지 화학성분 전체 농도에 대해 연산지점은 계절별 농도 차이가 크지 않은 반면, 학장과 광복지점은 겨울과 봄에 높고 여름과 가을에 다소 낮게 관측되었다. 또한 기장지점의 화학성분 농도는 봄에 가장 높고, 다음으로 겨울, 가을 순이었다. 한편, 제주 애월지점의 계절별 농도분포 특성은 봄에 가장 높고, 다음으로 겨울, 여름, 가을 순서로 나타나 부산의 기장지점과 유사하였으나(여름 제외), 농도의 크기는 부산 4지점보다 대체로 약 1.5~2배까지 높은 편이었다(제주와 부산 4지점과의 연구기간이 서로 다름을 감안). 이와 같이 측정지점의 겨울과 봄에 주로 높은 농도가 나타난 것은 다른 계절에 비해 겨울과 봄에 많은 난방연료 사용 또는 외부 수송(특히 애월지점) 등으로 인해 연무 발생이 많았기 때문인 것으로 사료된다(Ko *et al.*, 2016; Streets *et al.*, 2003). 연구기간 동안 부산과 제주지역의 봄과 겨울에 관측된 총 연무 발생빈도는 각각 66%(부산)와 74%(제주)로 다른 2계절에 비해 월등히 높은 빈도가 나타났다(그림 제외).

그림 3은 OPAC 모델 결과를 검증하기 위해 연구기간 동안(2013~2014년) 제주 애월지점의 OPAC AOD(일별 자료)와 AERONET에서 제공하는 고산 측정소의 일별 AOD와의 비교를 나타낸다(애월지점 관측소 부재로 인해). 2.1절에서 언급하였듯이, 부산 지역은 주변에 AERONET에서 제공하는 관측소가 한 곳도 없어 분석에서 제외하였다. 전반적으로 OPAC 모델의 AOD가 AERONET의 AOD에 비해 다소 낮은 수준을 보였다. 또한 OPAC과 AERONET의 AOD 관련성은 통계적으로 유의한 양의 상관관계

($r=0.57$, $p<0.0001$)를 나타내었다. 이것은 2010년 서울지역에서 OPAC 모델의 AOD와 2010년 AERONET 및 MODIS의 AOD와의 상관성(각각 $r=0.506$, $r=0.421$)과 유사하거나 다소 높은 편이었다(Song *et al.*, 2017). OPAC 모델과 AERONET 관측 사이의 이러한 차이는 비교 지점에 대한 지리적인 위치 차이가 가장 크게 영향을 준 것으로 추정된다.

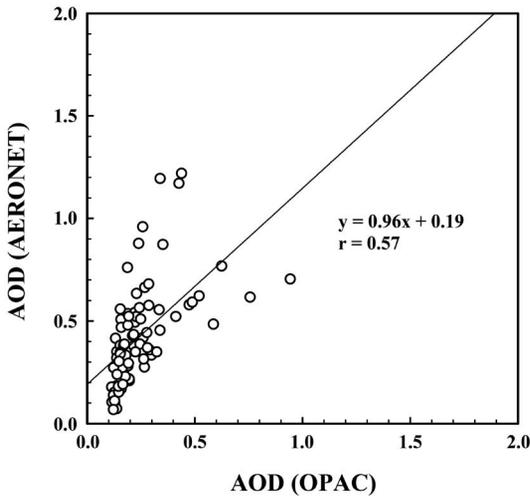


Fig. 3. Comparison of daily AOD (500 nm) between the OPAC model (at Aewol) and Sun photometer observation (at Gosan) provided by the AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

3.2 연무 사례 시 직접적 복사강제력(DRF) 특성

본 연구에서는 연무 사례 시 부산 4지점과 제주 애월지점의 대기상단(TOA), 지표(SFC) 또는 대기 중(ATM)에서의 DRF 연변화(표 2)와 계절변화(그림 4와 5)를 각각 분석하였다. 연변화를 보면(표 2), 모든 지점에서 가장 농도가 높았던 water-soluble 성분이 DRF에 가장 큰 영향을 주었으며, 다음으로 BC, insoluble 및 sea-salt 순으로 나타났다. 지점별로 보면, 연구기간이 서로 달라 직접적인 비교는 어렵지만 부산 4지점 중 상업지역인 광복과 공업지역인 학장에서 대체로 높은 DRF가 추정되었다. 2016년 광복지점에서 water-soluble 성분의 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} , DRF_{ATM} 은 각각 -87 W/m^2 , -66 W/m^2 , $+22 \text{ W/m}^2$ 로 전체 지점 중 가장 높았으며, 2013년 연산지점에서 가장 낮은 DRF를 보였다(각각 -52 W/m^2 , -39 W/m^2 , $+13 \text{ W/m}^2$). 또한 2016년 부산의 교외지역인 기장은 다른 3지점에 비해 다소 낮은 DRF가 추정되었다. 한편, 제주 애월지점은 배경지역임에도 불구하고 2013~2014년 화학성분별 DRF가 상당히 높았는데, 특히 2014년 water-soluble 성분의 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} , DRF_{ATM} 은 각각 -78 W/m^2 , -59 W/m^2 , $+19 \text{ W/m}^2$ 로 나타났다. 이러한 DRF 값들은 같은 연도(2013~2014년) 부산 연산지점에 비해 평균 약 1.3배 높은 수준이었다. 이와

Table 2. Mean direct radiative forcing (DRF, W/m^2) of four aerosol chemical components estimated by SBDART model at several study sites during haze periods.

Region	Site	Period	Direct radiative forcing (W/m^2)											
			Water-soluble			Insoluble			BC			Sea-salt		
			TOA ^a	SFC ^b	ATM ^c	TOA	SFC	ATM	TOA	SFC	ATM	TOA	SFC	ATM
Busan	Yeonsan	2013	-38.9	-51.5	+12.6	-1.3	-10.6	+9.3	+12.8	-38.6	+51.4	-6.0	-6.4	+0.4
		2014	-47.5	-63.3	+15.8	-1.1	-10.9	+9.8	+16.0	-47.1	+63.0	-5.7	-6.1	+0.4
		2015	-42.2	-53.7	+11.5	-2.1	-10.3	+8.2	+10.7	-40.7	+51.4	-6.2	-6.6	+0.4
		2016	-50.1	-65.2	+15.1	-1.6	-10.6	+9.0	+10.7	-35.7	+46.4	-7.4	-7.9	+0.6
	Gwanbok	2016	-65.5	-87.0	+21.5	-1.7	-10.5	+8.8	+11.1	-37.9	+49.0	-7.0	-7.5	+0.5
	Hakjang	2016	-60.2	-79.3	+19.1	-1.7	-10.7	+9.0	+11.6	-35.7	+47.3	-8.2	-9.0	+0.7
	Gijang	2016	-45.4	-58.6	+13.2	-1.6	-10.4	+8.8	+9.9	-32.2	+42.1	-6.9	-7.4	+0.5
Jeju	Aewol	2013	-54.8	-72.6	+17.8	-1.8	-8.8	+7.0	+10.3	-38.6	+48.9	-6.8	-7.2	+0.4
		2014	-58.7	-77.7	+19.1	-1.9	-8.4	+6.5	+11.5	-45.1	+56.6	-7.4	-7.9	+0.4

^aTOA: the top of the atmosphere.

^bSFC: the surface level.

^cATM: the atmosphere.

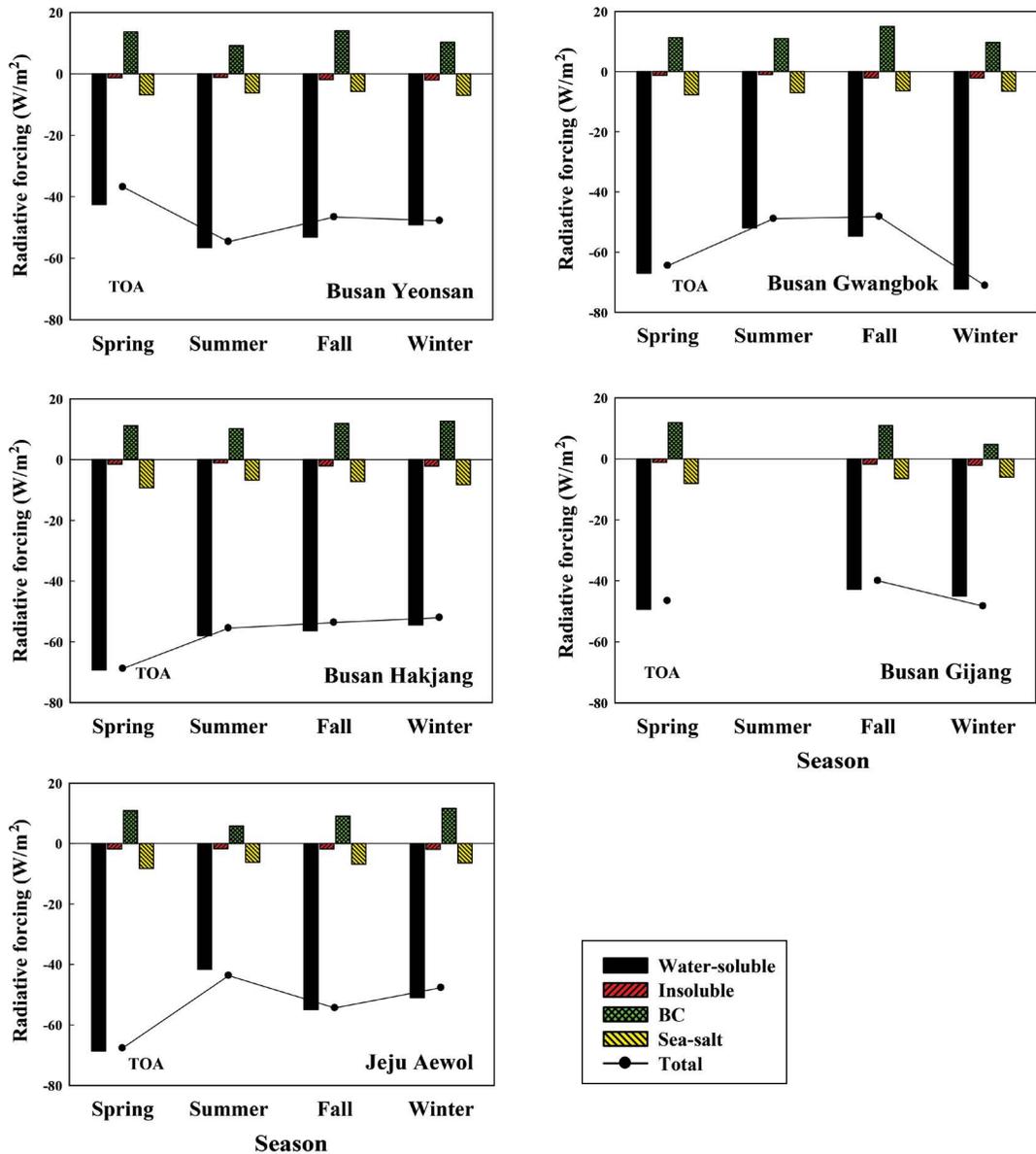


Fig. 4. Seasonal variations of direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the top of the atmosphere (TOA) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at several study sites during haze periods of the study period (Yeonsan: 2013~2016, Gwangbok, Hakjang, and Gijang: 2016, Aewol: 2013~2014).

같이 애월지점의 높은 DRF는 이 지점의 연무 발생 시 매우 높은 농도와 RH(애월: 64%~67%, 연산: 50%~57%)의 기상조건이 복사전달모델에 반영되어 나타난 결과라고 사료된다(표 1)(Park *et al.*, 2017). BC 성분

의 경우, 2014년 연산지점(주거 밀집지역)에서 DRF_{SFC} , DRF_{TOA} , DRF_{ATM} 가 각각 $-47 W/m^2$, $+16 W/m^2$, $+63 W/m^2$ 으로 가장 높게 추정되었다. 이러한 BC 성분의 복사강제력은 인도의 대도시 Delhi(인

구 약 1900만 명, DRF_{SFC} 와 DRF_{TOA} 각각 $-110 W/m^2$ 와 $+21 W/m^2$ 보다는 낮고 (Singh *et al.*, 2010), Hyderabad (인구 약 680만 명, 각각 $-33 W/m^2$ 와 $+9 W/m^2$)보다는 약간 높은 수준이었다 (Badarinath and Latha, 2006). 이외에도, 연산지점의 BC 성분은 전체 화학성분 농도 중에서 약 4~8% 차지함에도 불구하고 (표 1), 강한 복사 흡수성으로 인해 ATM에서 매우 높은 양의 DRF가 나타난 것으로 추정된다 (Song *et al.*, 2017). 한편, 모든 지점에서 insoluble과 sea-salt 성분에 의한 TOA, SFC, ATM에서의 DRF는 다른 성분에 비해 비교적 낮게 추정되었다.

그림 4와 5는 연구기간 동안 연무 발생 시 TOA, SFC에서의 화학성분별 DRF 계절변화를 각각 나타낸다. 앞서 언급하였듯이, 부산 기장지점의 여름철은 연무 발생 시 에어로졸 성분 농도의 결측으로 인해 DRF를 계산할 수 없어서 제외하였다. 먼저 부산 연산지점의 4가지 화학성분의 총 (total) DRF_{TOA} 는 여름에 가장 높고 봄에 가장 낮으며, 총 DRF_{SFC} 는 가을에 가장 높고 봄에 가장 낮게 추정되었다. 연산지점 DRF의 계절 특성은 이 지점의 계절별 농도가 서로 비슷하기 때문에 농도에 의한 영향보다는 오히려 RH의 계절별 특성 (여름 > 가을 > 겨울 > 봄)이 크게 영향을 준 것으로 사료된다 (그림 2). 나머지 4지점 (부산 광복, 학장, 기장과 제주 애월)에 대해서는 총 DRF_{TOA} 와 DRF_{SFC} 는 봄 또는 겨울에 높게 (학장과 기장의 겨울 제외), 여름 또는 가을에 낮게 (광복과 애월의 가을 제외) 추정되었다. 이것은 각 지점의 계절별 농도와 RH의 계절 특성이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 사료된다 (그림 2).

화학성분별 DRF_{TOA} 를 보면 (그림 4), 연변화와 마찬가지로 모든 계절에서 water-soluble 성분이 DRF_{TOA} 에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 지점별로 화학성분에 따른 DRF_{TOA} 가 계절에 따라 조금 다른 양상을 보였다. 예를 들어, 부산 학장 및 기장, 제주 애월 지점의 water-soluble에 의한 음의 DRF_{TOA} 는 대체로 봄에 가장 높게 ($-50 \sim -70 W/m^2$), 부산 광복지점은 겨울과 봄에 가장 높게 추정되었다 (약 $-70 W/m^2$).

이것은 이 지점에서 관측된 water-soluble 성분의 높은 농도가 주된 원인이고 일부 RH의 증가 (AOD 및 DRF 증가)에 의한 영향이라 사료된다 (그림 2). 이처럼 대기 중 RH가 증가할수록 에어로졸의 광학변수 (AOD, 산란계수 등)가 증가하여, 이에 따른 DRF 또한 증가한다는 연구결과들이 여러 선행연구에 잘 나타나 있다 (Park *et al.*, 2015; Yoon and Kim, 2006; Day and Malm, 2001). 반면, 부산 연산지점의 water-soluble에 의한 DRF_{TOA} 는 오히려 여름에 가장 높게 (약 $-50 W/m^2$) 봄에 가장 낮게 (약 $-40 W/m^2$) 나타났다. 이것은 연산지점의 총 DRF의 계절별 특성에 대한 원인과 마찬가지로, 이 지점에서 관측된 RH의 계절별 특성, 즉 여름과 가을에 높고 봄에 가장 낮은 RH의 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다 (그림 2). BC 성분의 경우, 부산 광복 및 연산지점의 양의 DRF_{TOA} 는 가을과 봄에 높고 (약 $+15 W/m^2$) 겨울과 여름은 다소 낮은 편이며 (약 $+10 W/m^2$), 부산 학장과 제주 애월지점은 겨울과 봄에 높게 ($+10 \sim +15 W/m^2$) 여름에 가장 낮게 ($+5 \sim +10 W/m^2$) 나타났다. 이와 달리, 부산 기장지점은 여름에 가장 높게 (약 $+15 W/m^2$) 겨울에 가장 낮게 ($+5 W/m^2$ 이하) 나타났다. 한편, 모든 지점에서 insoluble과 sea-salt 성분의 DRF_{TOA} 는 다른 두 성분에 비해 매우 낮았다. 이외에도, 지점별 4가지 화학성분에 의한 지표에서의 DRF 즉, DRF_{SFC} 의 계절 특성은 DRF_{TOA} 의 계절별 패턴과 유사하게 나타났으나, DRF의 크기는 DRF_{TOA} 보다 조금 크게 추정되었다 (그림 5).

연무 사례의 DRF 특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해, 본 연구에서는 연무 및 비연무 발생으로 나누어 에어로졸 화학성분에 따른 DRF_{TOA} 와 DRF_{SFC} 의 변화를 비교분석하였다 (그림 6과 7). 앞서 2.1절에서 언급하였듯이, 에어로졸 화학성분 자료수집의 한계로 인해, 측정 지점에 따라 사용한 자료의 기간이 서로 다르다 (부산 연산: 2013~2016년, 부산 광복, 기장, 학장: 2016년, 제주 애월: 2013~2014년). 그림 6에서, 전체 지점에서 공통적으로 water-soluble 성분이 연무와 비연무 발생 시의 DRF_{TOA} 차이가 가장 크며, 다음으로

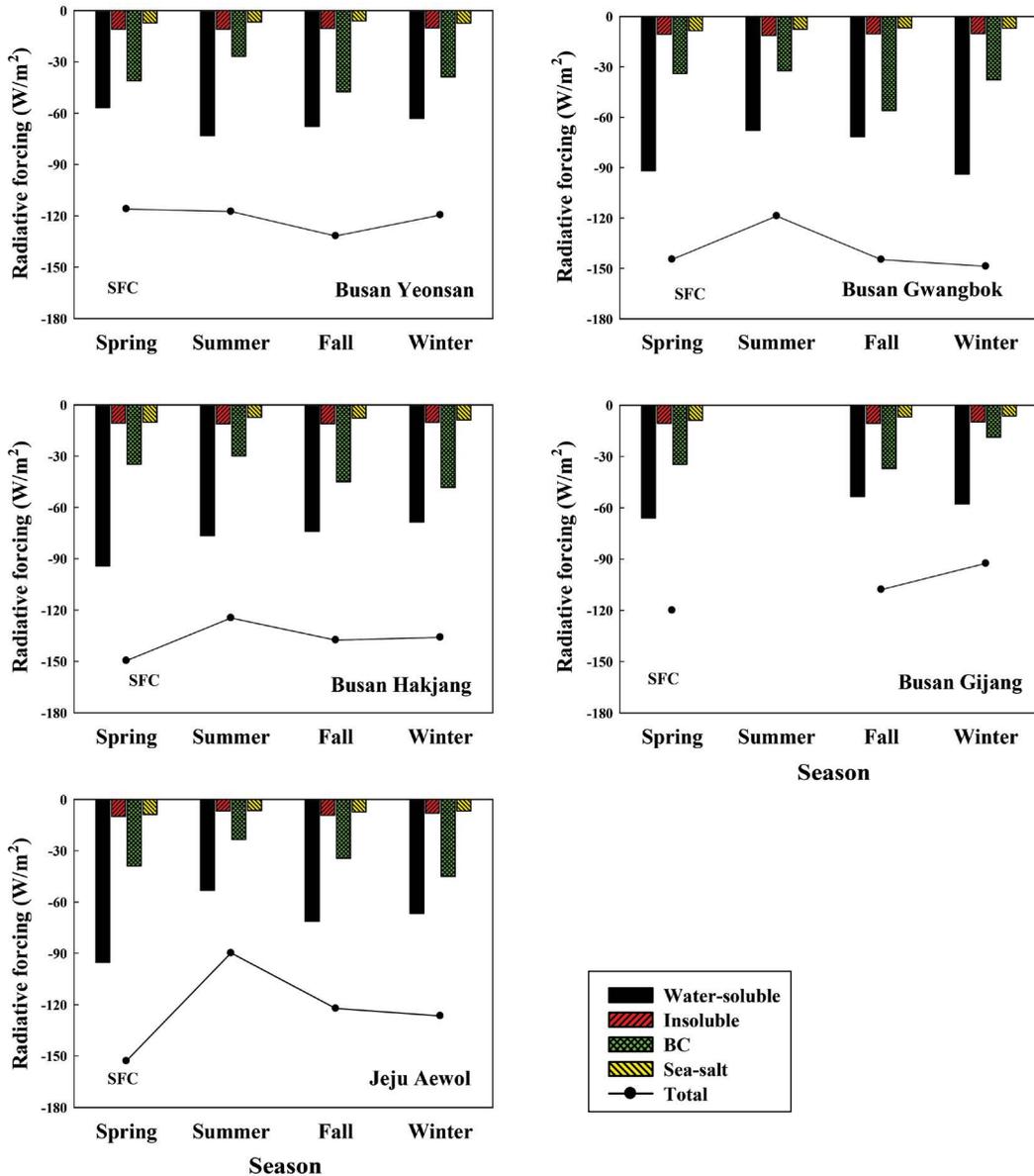


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for the direct radiative forcing (DRF, W/m²) at the surface (SFC).

BC, insoluble 및 sea-salt 순으로 나타났다. 지점별로 자세히 살펴보면, 부산 광복지점에서 water-soluble 성분에 의한 음의 DRF_{TOA}가 연무와 비연무 발생 시에 각각 -66 W/m²와 -37 W/m²로 나타나(약 1.8배 차이) 부산 4지점 중에서 가장 큰 차이를 보였다. 한편, 2013~2014년 제주 애월지점의 연무 발생 시 water-soluble

성분에 의한 DRF_{TOA}가 -56 W/m²으로 비연무 발생 시의 -25 W/m²에 비해 약 2.3배 높게 나타나 전체 지점 중에서 가장 큰 차이를 보였다. 이것은 같은 연도(2013~2014년) 부산 연산지점의 연무 및 비연무 발생 시(각각 -39 W/m², -35 W/m², 그림 제외)의 차이보다 훨씬 큰 폭의 차이임을 확인할 수 있었다. 같은

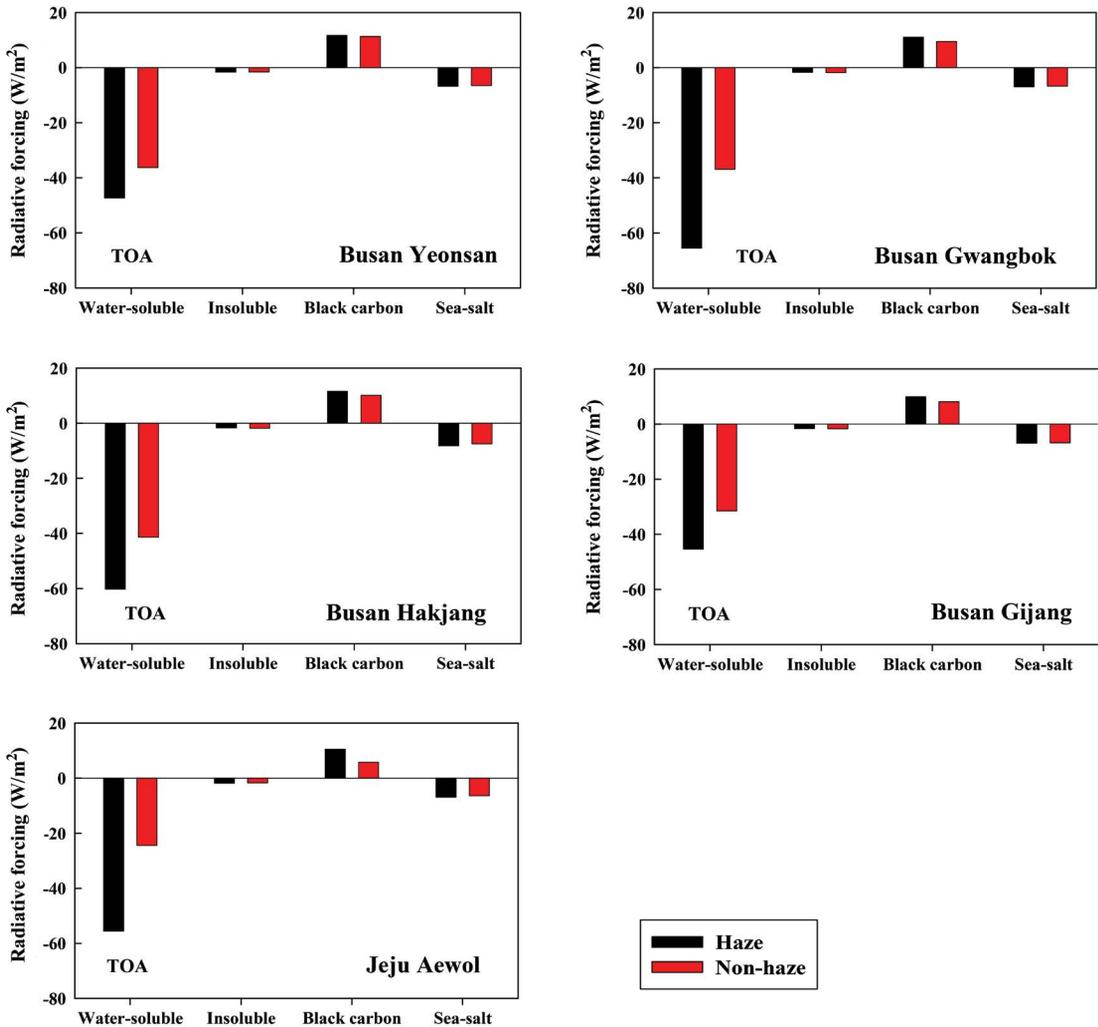


Fig. 6. Comparison of direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the TOA for four aerosol chemical components between haze and non-haze periods of the study period (Yeonsan: 2013~2016, Gwangbok, Hakjang, and Gijang: 2016, Aewol: 2013~2014).

연도 애월 및 연산지점의 이러한 DRF_{TOA} 차이는 두 지점 사이에서 연무와 비연무 발생 시 농도 차이가 (애월 및 연산에서 각각 4.3배, 1.5배 차이, 그림 제외) 주된 원인인 것으로 사료된다. BC 성분의 경우, 연무 및 비연무 발생 시 가장 큰 양의 DRF_{TOA} 차이는 제주 애월지점에서 나타났는데, 각각 $+11 W/m^2$ 와 $+6 W/m^2$ 으로 약 1.8배의 차이를 보였다. 이외에도 부산 4지점(연산, 광복, 학장, 기장)에서 연무 발생 시 BC 성분 에 의한 양의 DRF_{TOA} 는 비연무 발생 시에 비해 1.2배

이하의 차이를 보였다. 한편, 모든 지점에서 연무와 비연무 발생 시 insoluble 및 sea-salt 성분에 의한 DRF_{TOA} 차이는 크지 않은 것으로 추정되었다.

대상지역의 연무 및 비연무 발생 시 DRF_{SFC} 를 보면 (그림 7), 전반적으로 대기상단(TOA)과 마찬가지로 연무 발생 시의 DRF_{SFC} 가 비연무 발생 시에 비해 높게 나타났으며, DRF_{SFC} 의 차이도 4가지 화학성분 중 water-soluble 성분이 가장 크며, 다음으로 BC, insoluble 또는 sea-salt 순이었다. 지점별로 자세히 살펴보

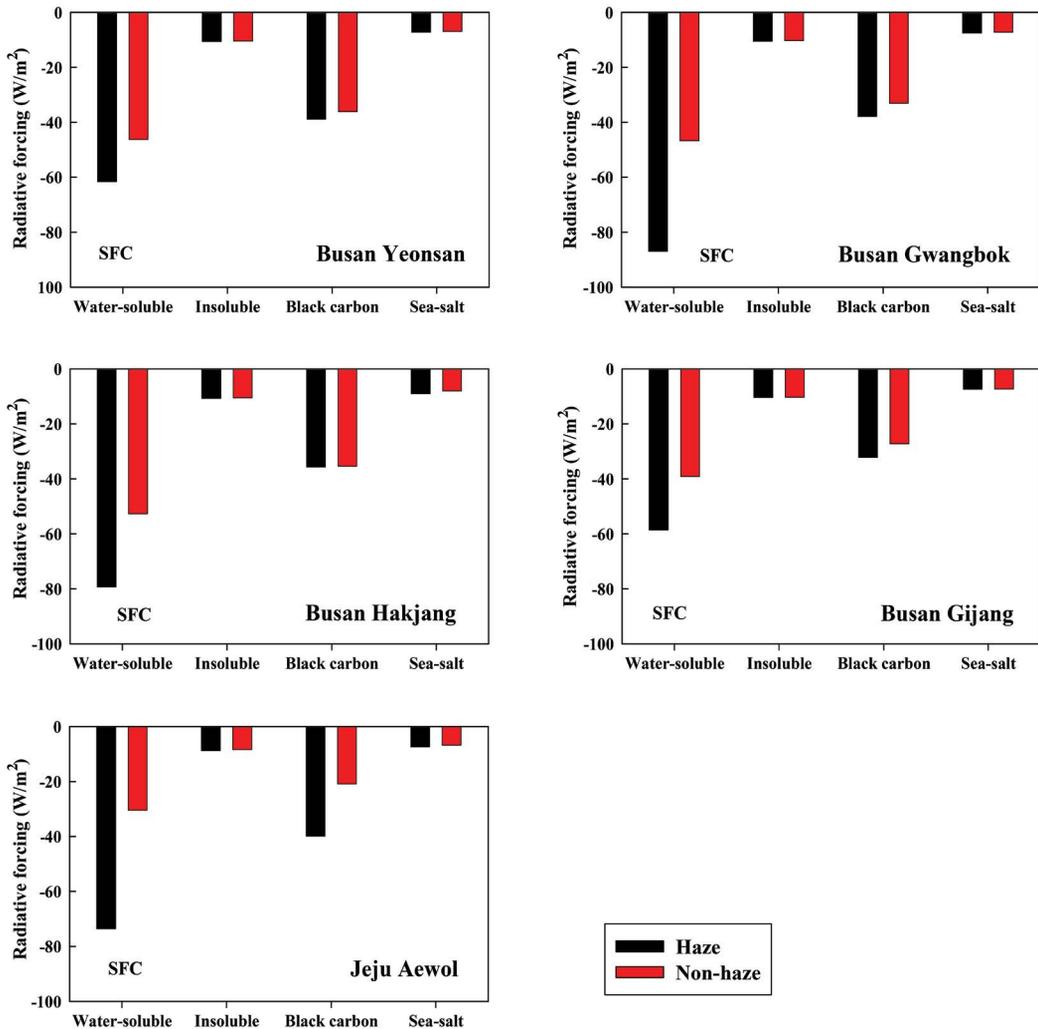


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for the direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the SFC.

면, 부산 광복과 제주 애월지점이 연무 및 비연무 발생 시 DRF 차이가 대체로 크게 나타났으며, 특히 화학성분 중 water-soluble 성분의 DRF_{SFC} 차이가 각각 1.9배와 2.4배로 가장 높았다. 또한 제주 애월지점에서 연무 및 비연무 발생 시 BC 성분에 의한 DRF_{SFC} 차이가 약 1.9배로 가장 높게 추정되었다. 이외에도 부산 연산과 제주 애월지점의 공통연도(2013~2014년)에 대해 살펴본 결과, 대기상단(TOA)과 마찬가지로 연산지점에 비해 제주 애월지점의 연무와 비연무

사이의 DRF_{SFC} 차이가 다소 크게 나타났다. 한편, 모든 지점에서 연무와 비연무 사이의 insoluble과 sea-salt 성분에 의한 DRF_{SFC} 차이는 뚜렷하지 않았다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 부산지역 4지점(연산, 광복, 학장, 기장)과 배경지역(제주 애월)의 연무 사례 시 시간별 또

는 일별 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도자료를 이용하여 농도분포 특성, 광학특성(예, AOD) 및 DRF를 비교분석하였다. 전반적으로 전체 연구기간 동안 지점에 상관없이 water-soluble 성분의 농도가 가장 높았으며(특히, 광복, 학장, 애월), 다음으로 insoluble, BC, sea-salt 순이었다. 부산의 경우는 대체로 인위적 오염원이 많은 도시의 빌딩 밀집지역(광복) 및 공업지역(학장)에서 주로 높은 농도가 관측된 반면, 배경지역인 제주 애월지점의 높은 농도는 중국 등 외부로부터의 수송 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다(2013~2014년 연산지점 water-soluble 농도보다 2.3배 높음). 또한 모든 지점에서 대체로 겨울과 봄에 높은 농도가 나타났는데, 이러한 원인은 많은 국지배출(난방연료 사용) 또는 외부 수송의 영향으로 인해 겨울과 봄에 연무 발생빈도가 높았기 때문으로 사료된다.

DRF의 특성을 보면, 모든 지점에서 농도가 가장 높았던 water-soluble 성분의 대기상단(TOA), 지표(SFC), 대기 중(ATM) DRF가 가장 높게 추정되었다(특히, 부산 광복과 제주 애월). 2013~2014년 애월지점의 water-soluble 성분의 DRF (DRF_{TOA} , DRF_{SFC} , DRF_{ATM})는 같은 연도 부산 연산지점에 비해 평균 1.3배 정도 높은 수준이었다. 애월지점의 DRF 증가는 이 지점의 연무 발생 시 매우 높은 농도와 RH 증가 등의 기상조건이 복합적으로 작용하여 나타난 결과라고 사료된다. BC 성분의 경우, 4가지 화학성분 중 농도는 높지 않았음에도 불구하고 강한 복사 흡수성으로 인해 매우 큰 양의 DRF_{ATM} 이 추정되었다. 한편, 모든 지점에서 insoluble과 sea-salt 성분의 DRF (DRF_{TOA} , DRF_{SFC} , DRF_{ATM})는 다른 성분에 비해 매우 낮았다. 계절별 분석을 보면, 부산 연산지점의 총 DRF_{TOA} 는 여름에 가장 높고 봄에 가장 낮았으며, 총 DRF_{SFC} 는 가을에 가장 높고 봄에 가장 낮았다. 나머지 4지점(광복, 학장, 기장, 애월)의 총 DRF_{TOA} 와 총 DRF_{SFC} 는 봄 또는 겨울에 높게(학장과 기장의 겨울 제외), 여름 또는 가을에 낮게(광복과 애월의 가을 제외) 나타났다. 이러한 지점별 총 DRF의 계절 특성은 각각의 화학성분(BC는 제외)에 따른 DRF (DRF_{TOA} , DRF_{SFC})의 계

절 특성과 매우 유사하게 나타났으며, 이것은 해당지점의 계절별 농도 또는 계절별 기상조건(예, RH)과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한 연무 및 비연무 발생 시 DRF의 차이는 4가지 성분 중 water-soluble 성분이 가장 컸으며, 특히 부산 광복과 제주 애월지점에서 DRF_{TOA} 차이는 각각 1.8배와 2.3배로 가장 크게 나타났다(DRF_{SFC} 차이는 각각 1.9배와 2.4배).

본 연구는 우리나라 도시 및 배경지역에서 관측된 에어로졸($PM_{2.5}$) 화학성분 자료를 이용하여 연무 발생 시 화학성분별 농도, 광학특성(AOD) 및 DRF를 정량화하였으며, 비연무 발생 시와 비교분석하였다. 이러한 분석에 있어 인위적 오염원인 많은 서울, 인천 등 여러 대도시의 에어로졸 자료를 이용하여 좀 더 객관적인 결과를 도출하려고 하였으나, 화학성분별 자료의 관측망 부족 및 자료 수집의 한계, 그리고 측정지점 인근에 고층자료(기상, 에어로졸)가 없는 관계로 전반적인 에어로졸의 복사효과를 이해하는데 어려움이 있었다. 향후 보다 정확한 분석을 위해서는 에어로졸 화학성분 및 기상 자료에 대한 다양한 관측망 구축이 요구되며, 나아가 대기 중 에어로졸에 의한 복사효과와 기상·기후와의 상호 피드백을 살펴보기 위한 고해상도의 3차원 수치모델링 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 제주대학교 교원성과지원 사업에 의하여 연구되었음. 또한 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1A2B2003616).

References

Albrecht, B.A. (1989) Aerosols, Cloud Microphysics, and Fraction-

- al Cloudiness, *Science*, 245, 1227-1230, <https://doi.org/10.1126/science.245.4923.1227>
- Badarinath, K.V.S., Latha, K.M. (2006) Direct Radiative Forcing from Black Carbon Aerosols over Urban Environment, *Advances in Space Research*, 37, 2183-2188, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.10.034>
- Bae, M.S. (2011) Seasonal Estimation of Organic Mass to Organic Carbon (OM/OC ratio), *Proceedings of 52nd Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 182.
- Charlson, R.J., Schwartz, S.E., Hales, J.M., Cess, R.D., Coakley, J.A., Hansen, J.E., Hofmann, D.J. (1992) Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols, *Science*, 255, 423-430, <https://doi.org/10.1126/science.255.5043.423>
- Day, D.E., Malm, W.C. (2001) Aerosol Light Scattering Measurements as a Function of Relative Humidity: a Comparison Between Measurements Made at Three Different Sites, *Atmospheric Environment*, 35, 5169-5176, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00320-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00320-X)
- Deepak, A., Gerber, H.E. (1983) Report of the Experts Meeting on Aerosols and their Climatic Effects, WCP-55, 107 pp.
- El-Metwally, M., Alfaro, S.C., Abdel Wahab, M.M., Favez, O., Mohamed, Z., Chatenet, B. (2011) Aerosol Properties and Associated Radiative Effects Over Cairo (Egypt), *Atmospheric Research*, 263-276, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.017>
- Hess, M., Koepke, P., Schult, I. (1998) Optical Properties of Aerosols and Clouds: the Software Package OPAC, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 831-844, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2)
- 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, 129 pp.
- 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, 1535 pp.
- Kang, C.-M., Lee, H.-S., Kang, B.-W., Lee, S.-K., Young, S.-W. (2004) Chemical Characteristics of Acidic Gas Pollutants and PM_{2.5} Species During Hazy Episode in Seoul, South Korea, *Atmospheric Environment*, 38, 4749-4760, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.007>
- Kim, J., 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, *Atmospheric Environment*, 40, 6718-6729, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.007>
- Kim, K.J., Lee, S.H., Hyeon, D.R., Ko, H.J., Kim, W.H., Kang, C.H. (2014) Composition Comparison of PM₁₀ and PM_{2.5} Fine Particles Matter for Asian Dust and Haze Events of 2010-2011 at Gosan Site in Jeju Island, *Analytical Science and Technology*, 27(1), 1-10, (in Korean with English abstract), <http://dx.doi.org/10.5806/AST.2014.27.1.1>
- 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), *Atmospheric Research*, 95, 279-287, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.10.008>
- Ko, H.-J., Song, J.-M., Cha, J.W., Kim, J., Ryoo, S.-B., Kang, C.-H. (2016) Chemical Composition Characteristics of Atmospheric Aerosols in Relation to Haze, Asian Dust and Mixed Haze-Asian Dust Episodes at Gosan site in 2013, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3), 289-304, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.289>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2008-2015) Annual Climatological Report 2008-2015.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2016) Guide to Agrometeorological Observation, 122.
- Lee, Y.-J., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Kim, S.-J., Park, M.-K., Ahn, J.-Y., Lyu, Y.-S., Choi, W.-J., Hong, Y.-D., Han, J.-S., Lim, J.-H. (2014) Characteristics of PM Chemical Component during Haze Episode and Asian Dust at Gwang-ju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30, 434-448, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.5.434>
- Lim, J.-Y., Chun, Y.-S., Cho, K.-M., Lee, S.-S., Shin, H.-J. (2004) The Meteorological, Physical, and Chemical Characteristics of Aerosol during Haze Event in May 2003, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20, 697-711 (in Korean with English abstract).
- Mahowald, N., Ward, D.S., Kloster, S., Flanner, M.G., Heald, C.L., Heavens, N.G., Hess, P.G., Lamarque, J.-F., Chuang, P.Y. (2011) Aerosol Impacts on Climate and Biogeochemistry, *Annual Review of Environment and Resources*, 36, 45-74, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042009-094507>
- Park, D.-J., Ahn, J.-Y., Shin, H.-J., Bae, M.-S. (2014) Characteristics of PM_{2.5} Carbonaceous Aerosol Using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(5), 461-476, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.5.461>

- Park, J.-S., Park, S.-M., Song, I.-H., Shin, H.-J., Hong, T.-D. (2015) Characteristics of Visibility Impairment by Semi-continuous Optical and Chemical Property Monitoring of Aerosols in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 319-329, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.4.319>
- Penner, J.E., Dong, X., Chen, Y. (2004) Observational Evidence of a Change in Radiative Forcing due to Indirect Aerosol Effect, *Nature*, 427, 231-234, <https://doi.org/10.1038/nature02232>
- Pilson, M.E.Q. (1998) *An Introduction to the Chemistry of the Sea*, Prentice Hall, New Jersey, 431.
- Quan, J., Tie, X., Liu, Q., Li, X., Gao, Y., Zhao, D. (2014) Characteristics of Heavy Aerosol Pollution during the 2012-2013 Winter in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 88, 83-89, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.058>
- 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, *Journal of Geophysical Research*, 109(D19), D19S01, <https://doi.org/10.1029/2003JD004010>
- Rap, A., Scott, C.E., Spracklen, D.V., Bellouin, N., Forster, P.M., Carslaw, K.S., Schmidt, A., Mann, G. (2013) Natural Aerosol Direct and Indirect Radiative Effects, *Geophysical Research Letters*, 40, 3297-3301, <https://doi.org/10.1002/grl.50441>
- 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, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2101:SARATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2101:SARATS>2.0.CO;2)
- Seo, Y.-H. (2014) Correlation Analysis Between High Levels of PM_{2.5} and Sulfate Anion, Organic Carbons Sampled in Seoul, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 20(3), 103-111 (in Korean with English abstract).
- Shi, H., Lee, S.-S., Chun, H.-W., Song, H.-J., Noh, Y.-C., Sohn, B.-J. (2016) Optical Properties of Aerosols Related to Haze Events over Seoul Inferred From Skyradiometer and Satellite-borne Measurements. *Korean Meteorological Society, Atmosphere*, 26, 289-299, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.2.289>
- Singh, S., Soni, K., Bano, T., Tanwar, R.S., Nath, S., Arya, B.C. (2010) Clear-sky Direct Aerosol Radiative Forcing Variations over Mega-city Delhi, *Annales Geophysicae*, 28, 1157-1166, <https://doi.org/10.5194/angeo-28-1157-2010>
- So, Y.-Y., Song, S.-K., Choi, Y.-N. (2019) Comparison of the Concentration Characteristics and Optical Properties of Aerosol Chemical Components in Different Regions, *Journal of Environmental Science International*, 28(1), 107-123, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.1.107>
- 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30, 1-17, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.1.001>
- 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, *Science of the Total Environment*, 599-600, 400-412, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.195>
- Streets, D.G., Yarber, K.F., Woo, J.H., Carmichael, G.R. (2003) Biomass Burning in Asia: Annual and Seasonal Estimates and Atmospheric Emissions, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 10-1-10-20, <https://doi.org/10.1029/2003GB002040>
- Takamura, T., Sugimoto, N., Shimizu, A., Uchiyama, A., Yamazaki, A., Aoki, K., Nakajima, T., Sohn, B.J., Takenaka, H. (2007) Aerosol Radiative Characteristics at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005, *Journal of Geophysical Research, Atmosphere*, 112, D22, <https://doi.org/10.1029/2007JD008506>
- Twomey, S. (1974) Pollution and the Planetary Albedo, *Atmospheric Environment*, 8, 1251-1256, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(74\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(74)90004-3)
- Won, J.-G., Yoon, S.-C., Kim, S.-W., Jefferson, A., Dutton, E.G., Holben, B.N. (2004) Estimation of Direct Radiative Forcing of Asian Dust Aerosols with Sun/Sky Radiometer and Lidar Measurements at Gosan, Korea, *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser. II*, 82(1), 115-130, <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.115>
- Yang, Y., Liu, X., Qu, Y., Wang, J., An, J., Zhang, Y., Zhang, F. (2015) Formation Mechanism of Continuous Extreme Haze Episodes in the Megacity Beijing, China, in January 2013, *Atmospheric Research*, 155, 192-203, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.010>

doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.023

Yoon, S.-C., Kim, J.-Y. (2006) Influences of Relative Humidity on Aerosol Optical Properties and Aerosol Radiative Forcing during ACE-Asia, *Atmosphere Environment*, 40, 4328-4338, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.036>

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, *Atmospheric Environment*, 39,

6620-6630, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.058>

Authors Information

소윤영 (국가농림기상센터 연구원)

송상근 (제주대학교 지구해양과학과 교수)

한승범 (제주대학교 지구해양과학과 박사수료)