Check for updates

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 36, No. 5, October 2020, pp. 688-707
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.688
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

도시 및 청정지역에서 RCP 기후변화시나리오의 상대습도 변화에 따른 에어로졸 화학성분별 미래 직접적 복사강제력 추정

Estimation of Future Direct Radiative Forcing of Aerosol Chemical Components according to Changes in Relative Humidity of RCP Climate Change Scenario in Urban and Background Areas

문수환, 송상근*
제주대학교 지구해양과학과

Soo-Hwan Moon, Sang-Keun Song*
Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

접수일 2020년 9월 23일
수정일 2020년 10월 11일
채택일 2020년 10월 19일

Received 23 September 2020
Revised 11 October 2020
Accepted 19 October 2020

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)64-754-3431
E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract We estimated the current (base years) and future (2021-2100) direct radiative forcing (DRF) of four aerosol components (water-soluble, insoluble, black carbon (BC), and sea-salt) at urban (Yeonsan (Busan) and Gwangjin (Seoul)) and background sites (Aewol and Gosan (Jeju Island)), based on a modeling approach. The analysis for base years was conducted using $PM_{2.5}$ samples measured at two urban and two background sites (Yeonsan and Gwangjin: 2016, Aewol and Gosan: 2014). The future DRFs were estimated according to changes in relative humidity (RH) of RCP8.5 climate change scenario at the same sites during four different periods (PI: 2021~2040, PII: 2041~2060, PIII: 2061~2080, and PIV: 2081~2100). In addition, we compared the differences between the DRFs of future (PI~PIV) and base years (2016 and 2014). Overall, the water-soluble component was predominant over all other components in terms of the concentrations, optical parameters (e.g., AOD), and DRFs, regardless of sites. For the base years, the monthly patterns of total DRFs for all components and the DRFs for the water-soluble component varied with sites, and months of their highest and lowest DRFs were different depending on sites. This might be due to the combined effect of the monthly patterns of the concentrations and RHs for each site. For the differences between the DRFs of future and base years, the highest future DRFs at Yeonsan and Aewol ranged from −59 to −63 W/m^2 increasing −20 (July in PII) to −28 W/m^2 (August in PIII) compared to the base years and from −73 to −74 W/m^2 increasing −31 (July in PII) to −41 W/m^2 (September in PIV), respectively. These DRFs at Gwangjin and Gosan ranged from −79 to −84 W/m^2 increasing −29 (June in PII and PIII) to −34 W/m^2 (June in PI) and from −58 to −92 W/m^2 increasing −14 (July in PII) to −26 W/m^2 (May in PI), respectively. The high heating rates at Yeonsan (up to 4.4 K/day in November) and Aewol (up to 3.7 K/day in February) of BC component might be caused by its strong radiative absorption.

Key words : $PM_{2.5}$ aerosol components, Water-soluble component, Future direct radiative forcing, RCP8.5 climate change scenario, Relative humidity

1. 서 론

대기 중 에어로졸은 직접적으로 태양복사를 산란 및 흡수시키고, 간접적으로 구름의 생성, 소멸 및 수명을 변화시킴으로써 지구대기의 복사수지에 영향을 준다(Rosenfeld, 2000; Albrecht, 1989; Twomey, 1974). 따라서 에어로졸에 의한 복사효과 연구는 지구-대기 시스템 섭동의 여러 가지 원인을 비교분석하고 아울러 미래의 기후 변동성을 추정하는데 유용하다(IPCC, 2014). 에어로졸로 인한 직·간접적 복사강제

력(radiative forcing, RF)은 온실가스로 인한 RF보다 더 복잡한데, 이것은 에어로졸 질량농도와 화학조성이 시·공간적으로 매우 다양하기 때문이다(Bates *et al.*, 2006; Yoon *et al.*, 2005; Penner *et al.*, 1994). 또한 에어로졸로 인한 직접적 복사강제력(direct RF, DRF)은 화학성분에 따라 다르게 나타난다. 주로 차량 및 선박 수송 등 교통배출에 의해 생성되는 수용성 성분은 태양복사를 산란, 반사 및 소산시킴으로써 대기에 냉각효과를 일으켜 음(−)의 DRF를 산출하며, 화석연료의 소각 및 연소 등에 의해 생성되는 검댕(black carbon, BC 혹은 soot)은 태양복사를 흡수하여 대기에 온난효과를 일으켜 양(+)의 DRF를 산출하기도 한다(IPCC, 2007). 이외에도 BC 성분은 대기에서 태양복사를 흡수하여 지표면에 냉각효과, 대기에 온난효과를 일으킴으로써 대기의 안정도를 증가시킬 수 있으며, 이차적으로 대기 순환과 구름형성에 영향을 미칠 수 있다(Kim *et al.*, 2013). 이와 같이, 에어로졸에 의한 DRF는 두 가지의 경쟁적인 요소로 인해 총 DRF를 추정하는데 있어 많은 어려움이 있다(IPCC, 2014).

최근 기후변화와 온실가스 및 에어로졸과 관련하여 대표농도경로(representative concentration pathways, RCP) 기후변화시나리오를 통한 미래 기후예측 및 기후변동성을 전망한 여러 연구들이 진행되어 왔다(Lee *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2016; IPCC, 2013). 예를 들어, Lin *et al.* (2016)은 RCP 기후변화시나리오를 이용하여 온실가스 및 에어로졸의 RF에 따른 극한 강수의 변화율을 전망하였으며, 이를 통해 에어로졸 RF가 극한 강수 지수에 대해 온실가스 RF보다 더 큰 증가율이 나타나 극한 강수 변화에 중요한 역할을 한다는 것을 밝혔다. Lee *et al.* (2016)은 RCP 기후변화시나리오에 따른 지표 복사에너지 및 구름 종류별 변화를 예측하여, 하층운의 감소로 인한 단파복사의 증가와 상층운량의 증가로 인한 장파 차단으로 지표기온의 상승을 전망하였다. 이외에도, RCP 기후변화시나리오의 미래 기온 및 상대습도를 이용하여 이슬점 온도를 산출하고, 현재와 대비하여 미래의 가능최대강수량(probable maximum precipitation)의 변동을 확인한 바 있다(Lee and Kim, 2016). 또한, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 기온과 상대습도를 이용하여 우리나라 지역별 미래 열지수와 불쾌지수를 전망한 결과, 대부분 지역에서 현재 대비 미래의 열지수와 불쾌지수가 크게 증가하는 경향을 보였다(Lee *et al.*, 2013).

앞서 언급하였듯이, RCP 기후변화시나리오를 이용하여 미래의 기후를 예측하고 기후변동성을 전망한 많은 연구가 수행되었으나, 온실가스 또는 에어로졸에 의한 미래의 RF를 전망한 연구는 IPCC에서 추정한 연구결과를 제외하고는 거의 수행된 바 없다(IPCC, 2013). 또한 여러 연구결과에서 수용성 성분(황산염, 질산염 등)의 에어로졸은 대기 중 상대습도의 변화로 인해 이들의 광학변수(산란 및 소산계수 등)와 RF 크기에 미치는 효과가 다르게 나타났으며, 이러한 민감도 분석을 통해 에어로졸의 복사효과에 대한 상대습도의 중요성을 밝힌바 있다(So *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2015; Yoon and Kim, 2006). 따라서 본 연구에서는 도시 및 배경지역에서 측정한 $PM_{2.5}$ 에어로졸 화학성분 농도의 시·공간적 특성을 분석하고, 이 자료를 이용하여 화학성분별 DRF를 산정하였다. 또한 RCP 기후변화시나리오의 상대습도 변화에 따른 화학성분별 미래 DRF를 추정하고, 미래와 현재기준 DRF와의 차이를 통해 미래의 DRF 변화를 전망하였다. 특히 본 연구에서는 RCP 시나리오 중 최악의 조건인 RCP8.5 시나리오 가정하에서 미래 상대습도 변화에 따른 미래의 DRF 변화를 추정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역, 자료 및 방법

본 연구에서는 RCP 기후변화시나리오의 상대습도 변화에 따른 $PM_{2.5}$ 에어로졸 화학성분별 미래의 DRF를 추정하고 현재기준시점과 비교하기 위하여, 먼저

대상지역과 현재시점의 기준연도를 정하여 분석을 진행하였다. 본 연구를 수행하기 위한 대상지역으로 도시지역 2곳(부산 연산, 서울 광진)과 배경지역 2곳(제주 애월과 고산)의 측정지점을 선정하였다(그림 1). 부산의 연산 측정지점은 단일 행정구역으로 부산에서 인구가 가장 많은 지역 내에 위치하며, 인근에 많은 도로와 주거가 밀집해 있다. 서울의 광진 측정지점은 구의아리수정수센터에 위치해 있으며, 주변으로 밀집된 주거지역과 한강이 인접해 있다. 제주의 애월 측정지점은 해발고도 약 550 m로 주변에 산으로 둘러싸여 위치하고 있는 대기오염집중측정소이다. 마지막으로, 제주의 고산 측정지점은 해안가에 인접해 있으며, WMO에서 권고하는 지역급 관측소의 환경조건을 만족하는 국가배경지점으로 인위적 오염물질의 배출원이 매우 적은 지역이다.

$PM_{2.5}$ 에어로졸의 자료수집 한계로 인해 지점별로 기준연도와 에어로졸 성분 자료가 다르게 적용되었다. 먼저, 도시지역인 부산 연산과 서울 광진의 기준연도는 2016년, 배경지역인 제주 애월과 고산의 기준연도는 2014년으로 정하였다. 또한 부산 연산과 제주 애월지점의 경우, 측정되고 있는 $PM_{2.5}$ 8개의 이온성분(SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+, Cl^-, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+})과 2개의 탄소성분(유기탄소(organic carbon, OC), 원소탄소(element carbon, EC))을 분석에 이용하였고, 광진과 고산 지점에서는 OC와 EC 성분이 측정되고 있지 않아 8개의 이온성분을 분석에 이용하였다. 이외에도 에어로졸 성분 농도의 자료 부재로 인해, 연산지점은 2016년 4월, 광진지점은 2016년 4월과 8월, 애월지점은 2014년 3월, 고산지점은 2014년 8월의 자료를 분석에서 제외하였다.

RCP 기후변화시나리오는 영국 기상청 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 이용하여 산출되는 것으로, 우리나라 기상청 기후정보포털에서 제공하고 있다(http://www.climate.go.kr/). RCP 기후변화시나리오는 온실가스저감 정책의 수행 정도에 따라 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5로 구분되며, RCP2.6에서 RCP8.5 시나리오로 갈수록 온실가스 감축이 상대적

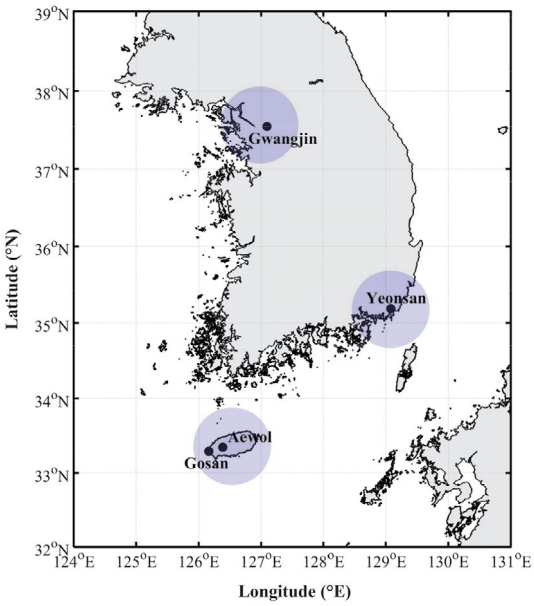


Fig. 1. Geographical locations of four measurement sites for aerosol chemical components in $PM_{2.5}$: Gwangjin in Seoul, Yeonsan in Busan, and Aewol and Gosan in Jeju.

으로 덜 수행된 시나리오를 의미한다. 본 연구에서는 온실가스 배출이 현재 추세대로 지속된다는 가정 하에 생성된 최악의 조건인 RCP8.5 시나리오의 미래(2021~2100년) 월별 자료를 분석에 이용하였다. 이것은 2100년 CO_2 농도가 940 ppm이 될 때 태양복사를 8.5 W/m^2 흡수함을 의미한다(http://www.climate.go.kr/). 또한 기후정보포털에서 제공되는 RCP8.5 시나리오의 미래 기상변수(일별, 월별)로는 상대습도, 기온, 풍속, 강수량이 있지만, 본 연구에서는 에어로졸 모델링의 입력 자료이고 에어로졸 화학성분 및 특성에 매우 민감한 상대습도 자료를 이용하여 에어로졸 성분별 미래 DRF를 추정하였다. 또한 대상지역의 에어로졸 화학성분별 현재기준의 DRF와 미래 최악의 시나리오로 가정했을 때의 DRF와 서로 비교분석하기 위하여, 2021년 1월~2100년 12월까지 총 960개월의 상대습도 월별 자료를 이용하였으며, 보다 상세한 분석을 위하여 전체 4개의 기간으로 구분하였다(Period I (PI): 2021~2040년, PII: 2041~2060년, PIII:

2061~2080년, PIV: 2081~2100년).

2.2 모델 구성 및 입력자료

본 연구에서는 대상지역의 에어로졸 성분별 DRF를 산출하기 위해 캘리포니아대학교-Santa Barbara에서 개발한 복사전달모델(Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer, SBDART)을 이용하였다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). SBDART 모델은 자외선, 가시광선, 적외선의 넓은 파장영역(0.25~100 μm)에서 DISORT (discrete-ordinate-method radiative transfer)기법을 기반으로 대기와 지표면에서의 평행-평면 복사 전달을 계산하는 모델이다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). 이 모델은 지표로부터 100 km 고도까지 33개의 연직 층으로 구성되며, 대류권에서는 1 km의 해상도를 갖는다. 모델 수행에 필요한 주요 입력변수는 에어로졸 광학두께(aerosol optical depth, AOD), 단일산란알베도(single scattering albedo, SSA), 비대칭변수(asymmerty factor, ASYM), 위상함수(phase function), 지표 알베도, 대기프로파일(기온, 기압 등), 태양천정각(solar zenith angle, SZA) 등이다. AOD, SSA, ASYM, 위상함수와 같은 광학변수는 에어로졸 광학모델(Optical Properties of Aerosol and Clouds, OPAC)의 산출결과를 이용하였고, 나머지 입력변수는 모델 내에서 주어진 값들을 이용하였는데 이에 대한 자세한 설명은 선행연구에 제시되어 있다(Park *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017; Hess *et al.*, 1998). 한편, RCP8.5 시나리오의 월별 상대습도 자료를 이용하여 에어로졸 성분별 DRF를 산출하므로, 특정 위·경도, 날짜(Julian day), 시간 지정을 통해 모델 내에서 계산되는 SZA는 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 SBDART 모델을 이용하여 0.3~4.0 μm의 단파장 영역에 대해 지표(surface, SFC)와 대기상단(top of the atmosphere, TOA)에서의 현재 기준연도(연산과 광진: 2016년, 애월과 고산: 2014년)와 미래(PI~PIV)의 에어로졸 성분별 DRF를 산출하였다. 여기서 SFC와 TOA에서의 DRF는 에어로졸이 있는 경우의 순 복사플럭스(net flux = 하향 복사플럭스 −상향 복사플럭스)와 에어로졸이 없는 경우의 순 복사플럭스의 차이로 계산된다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). 다음은 SFC와 TOA에서의 에어로졸에 따른 DRF 추정식을 나타낸다.

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

본 연구에서는 SBDART 모델의 입력 자료 중 여러 광학변수(AOD, SSA, 위상함수 등)를 산출하기 위하여 OPAC 모델을 수행하였는데, 이 모델에 대한 자세한 설명은 선행연구에 잘 나타나 있다(Hess *et al.*, 1998). 요약하면, OPAC 모델은 주어진 파장과 상대습도 조건 하에서 에어로졸과 구름 성분의 광학특성(흡수, 산란, 소산 계수, AOD, SSA 등)을 산출하는 모델이다. 특히, 상대습도는 총 8개의 조건(0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99%)에서 각 성분의 광학특성을 산출할 수 있다. 또한 이 모델은 총 10개 유형의 에어로졸 화학성분(water-soluble, insoluble, BC, sea-salt (2개 mode), mineral dust (4개 mode), sulfate droplets)에 대하여 각각의 광학특성을 산출할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 대상지점에서의 측정 자료의 한계(mineral dust와 sulfate droplets의 측정이 이루어지지 않음)로 인해 water-soluble, insoluble, BC, sea-salt 성분에 대한 광학특성을 산출하여 분석에 이용하였다. 이러한 4가지 화학성분에 대한 분류 및 구성에 관한 자세한 설명은 여러 선행연구에 제시되어 있다(Park *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017; Song and Shon, 2014). 아래 식은 여러 선행연구에서 제시된 4가지 에어로졸 화학성분의 구성에 대한 요약이다.

$$[\text{Water-soluble}] = [\text{NSS-}K^+] + [\text{NSS-}Mg^{2+}] + [\text{NSS-}Ca^{2+}] + [\text{NSS-}SO_4{}^{2-}] + [NO_3{}^-] + [NH_4{}^+] + [\text{OC}]_{\text{water-soluble}} \quad (2)$$

$$[\text{Insoluble}] = \{[\text{OC}] \times [\text{OM}]/[\text{OC}]\} - [\text{OC}]_{\text{water-soluble}} \quad (3)$$

$$[\text{BC}] = [\text{EC}] \quad (4)$$

$$[\text{Sea-salt}] = [Cl^-] + 1.47[Na^+] \quad (5)$$

2.1절에서 언급하였듯이, 부산 연산과 제주 애월지

점은 측정된 8개의 이온성분과 2개의 탄소성분(OC, EC)을 이용하여 식(2)~식(5)로 분류되는 4가지 화학성분을 분석에 이용하였으며, 서울 광진과 제주 고산 지점에서는 OC와 EC 성분이 측정되고 있지 않아 식(2)와 식(5)로 분류되는 2가지 화학성분을 분석에 이용하였다. OPAC 모델의 입력 자료로 에어로졸 성분별 수농도(number density, particle/cm^3)가 필요한데, 이것은 성분별 질량농도(μg/m^3)와 전환계수 즉, 공기밀도에 대한 표준화된 입자수와 에어로졸 성분별 질량과의 비([(μg/m^3)/(particle/cm^3)])를 적용하여 산출하였다(Hess *et al.*, 1998). 여기서, 미래의 에어로졸 성분 농도 자료가 없는 관계로 기준연도의 성분 농도 자료를 미래 DRF 추정을 위한 입력 자료로 활용하였다. 한편, OPAC 모델에서는 water-soluble과 sea-salt 성분은 상대습도 증가 또는 수증기 흡수로 인해 에어로졸 입자의 크기를 성장시키지만, insoluble과 BC 성분은 물에 용해되지 않기 때문에 상대습도 증가에 따라 입자가 성장하지 않는 것으로 가정한다(Hess *et al.*, 1998). 이외에도, 모델 수행을 위한 에어로졸 입자크기 분포(size distributions)와 성분별 연직분포(vertical profile) 등에 대한 설명은 선행연구에 자세히 나타나 있다(So *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2017; Hess *et al.*, 1998).

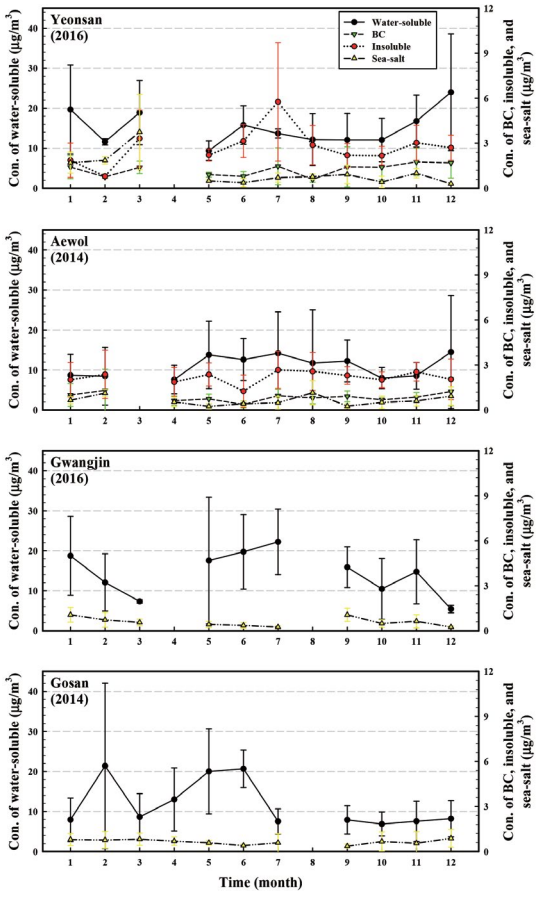


Fig. 2. Monthly variations of the concentrations (μg/m^3) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at four measurement sites (Yeonsan, Aewol, Gwangjin, and Gosan) in base years (Yeonsan and Gwangjin: 2016, Aewol and Gosan: 2014). The vertical bars denote the 1σ standard deviation from the mean values.

3. 결과 및 고찰

3.1 에어로졸 화학성분 농도 및 상대습도 특성

3.1.1 기준연도의 화학성분별 농도 특성

그림 2는 대상지역의 기준연도(연산과 광진: 2016년, 애월과 고산: 2014년)에 대한 에어로졸 화학성분 농도의 월변화를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 지점별 측정 항목의 차이로 인해 연산과 애월지점은 4가지 화학성분(water-soluble, BC, insoluble, sea-salt), 광진과 고산 지점은 2가지 화학성분(water-soluble, sea-salt)에 대하여 분석하였다. 먼저 연산과 애월지점에서는 연구기간 동안 모든 월에 대한 화학성분 중 water-soluble 성분의 농도가 가장 높았으며, 다음으로 insoluble 성분, 그리고 BC와 sea-salt 성분은 비슷한 수준이었다. 광진 및 고산 지점에서는 2가지 화학성분 중 water-soluble 성분이 sea-salt 성분의 농도보다 훨씬 높게 관측되었다. 또한 4지점의 화학성분별 농도 수준을 비교해보면, 도시지역인 연산과 광진 지점의 농도(주로 water-soluble)는 배경지역인 애월과 고산 지점보다 다소 높거나 비슷한 수준으로 나타났다. 대체로 도시지역이 높게 나타난 것은 인위적 오염물질의 배출(국지 및 수송의 복합적 효과)이 주요 원인으로 사료되며, 오염물질 배출원이 거의 없는

배경지역에서 도시지역과 유사하게 농도가 높은 것은 외부 인위적 배출원으로부터의 수송에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 추정된다(Park *et al.*, 2016; Korean Ministry of Environment, 2013).

그림 2에서 알 수 있듯이, 전반적으로 지점별 에어로졸 화학성분 농도의 월변화 패턴은 서로 다른 양상이 나타났다(기준연도가 서로 다른 점을 감안). 먼저 연산지점의 water-soluble 성분의 평균농도는 대체로 1월, 3월, 12월에 높고 2월과 5월에 낮은 경향을 보인 반면, 애월지점은 5~7월과 12월에 높고 4월과 10월에 다소 낮게 나타났다. 특히, 연산지점의 water-soluble 성분은 2016년 12월에 약 24.0 μg/m^{3}으로 가장 높고 5월에 약 9.4 μg/m^{3}으로 가장 낮았으며, 애월지점은 2014년 12월에 약 14.5 μg/m^{3}으로 가장 높고 4월에 약 7.6 μg/m^{3}으로 가장 낮게 관측되었다. 두 지점의 insoluble 성분은 모두 7월에 최고치를 기록하였으며(연산: 5.8 μg/m^3, 애월: 2.7 μg/m^3), 다음으로 연산의 3월, 6월, 11월과 애월의 8월, 11월에 높고, 나머지 월은 대부분(연산 2월과 애월 6월에 최저) 서로 비슷한 수준이었다. BC 성분의 경우, 연산지점은 11~12월에 애월지점은 2월과 12월에 높은 경향을 보였으나 전체적으로 큰 차이는 아니었으며, 두 지점의 sea-salt 성분은 대부분(연산 지점 3월 제외) 매우 낮은 농도 수준이었다. 한편, 광진지점의 water-soluble 성분의 농도는 대체로 1월과 6~7월에 높고 3월과 12월에 매우 낮은 반면, 고산지점은 이와 달리 2월과 5~6월에 높고 10~11월에 낮게 나타났다. 특히, 광진지점의 water-soluble 성분은 2016년 7월에 최고 22.2 μg/m^3, 12월에 최저 5.4 μg/m^{3}이었으며, 고산지점은 2014년 2월에 최고 21.4 μg/m^3, 10월에 최저 6.9 μg/m^{3}이었다. 이외에도, 두 지점의 sea-salt 성분은 연산 및 애월지점과 마찬가지로 매우 미미한 농도 수준을 보였으며 뚜렷한 월변화 패턴도 볼 수 없었다.

3.1.2 기준연도와 미래 RCP 시나리오의 상대습도 특성

본 연구에서는 RCP8.5 기후변화시나리오의 가정하에서 생성된 미래 상대습도 자료를 이용하여 지점별(연산, 애월, 광진, 고산) 4기간(PI~PIV)에 대한 월변화를 산출하고, 기준연도에 대한 상대습도의 월변화 패턴과 서로 비교하였다(그림 3과 표 1). 전반적으로, 고산을 제외한 대부분 지점에서 미래 4기간의 상대습도(HadGEM3-RA 모델링 결과)는 기준연도의 상대습도에 비해 대체로 높은 편이었으나, 일부 월은 낮은 경향을 보였다. 먼저 연산과 애월지점의 미래 상대습도 월변화를 자세히 살펴보면, 즉 PI에서는 두 지점 각각 9~10월과 12월, 8~10월, PII에서는 4월과 9~12월, 2월과 10~11월, PIII에서는 4월과 11~12월, 2월과 11월, PIV에서는 연산지점만 4월과 12월의 상대습도가 기준연도에 비해 다소 낮게 나타났다. 광진지점의 경우 미래의 월별 상대습도가 대부분 기준연도보다 높았으며, 고산지점은 미래의 PI, PII, PIII에서는 대체로 늦봄~여름을 제외하고 PIV에서는 가을을 제외하고 대체로 기준연도가 미래의 상대습도 보다 더 높게 나타났다. 아울러 지점별 미래 80년 동안(PI~PIV)의 전체 연평균 추세를 보면 연산지점은 약한 감소 추세(선형추세 기울기: −0.02)를 보이며, 나머지 3지점은 매우 미세하게 감소하지만(−0.001 미만) 뚜렷한 경향성을 찾을 수 없었다. 이외에도, 미래 상대습도에 대한 신뢰도를 검증하기 위해 같은 모델인 HadGEM3-RA를 통한 과거모의(historical simulation, http://www.climate.go.kr/)의 상대습도 연변화(1979~2005년)를 살펴본 결과, 과거 연산과 광진 지점은 약한 감소 추세(선형추세 기울기: −0.04)를 보이고 애월과 고산지점은 경향성이 뚜렷하지 않았다(그림 제외).

지점별 상대습도 분포를 상세히 살펴보면(그림 3과 표 1), 대부분 기준연도의 상대습도 분포는 대체로 봄 또는 여름에 높고 겨울에 낮은 전형적인 패턴을 보였으며(연산지점의 4월과 12월 제외), RCP8.5 시나리오의 미래 상대습도는 PI과 PII에서 봄과 여름에 높고 PIII와 PIV으로 갈수록 여름과 가을에 높은 경향이 나타났다(그림 3). 예를 들어, 연산지점의 경우 기준연도에서는 4월, 7월, 9월에 높고 2월에 매우 낮

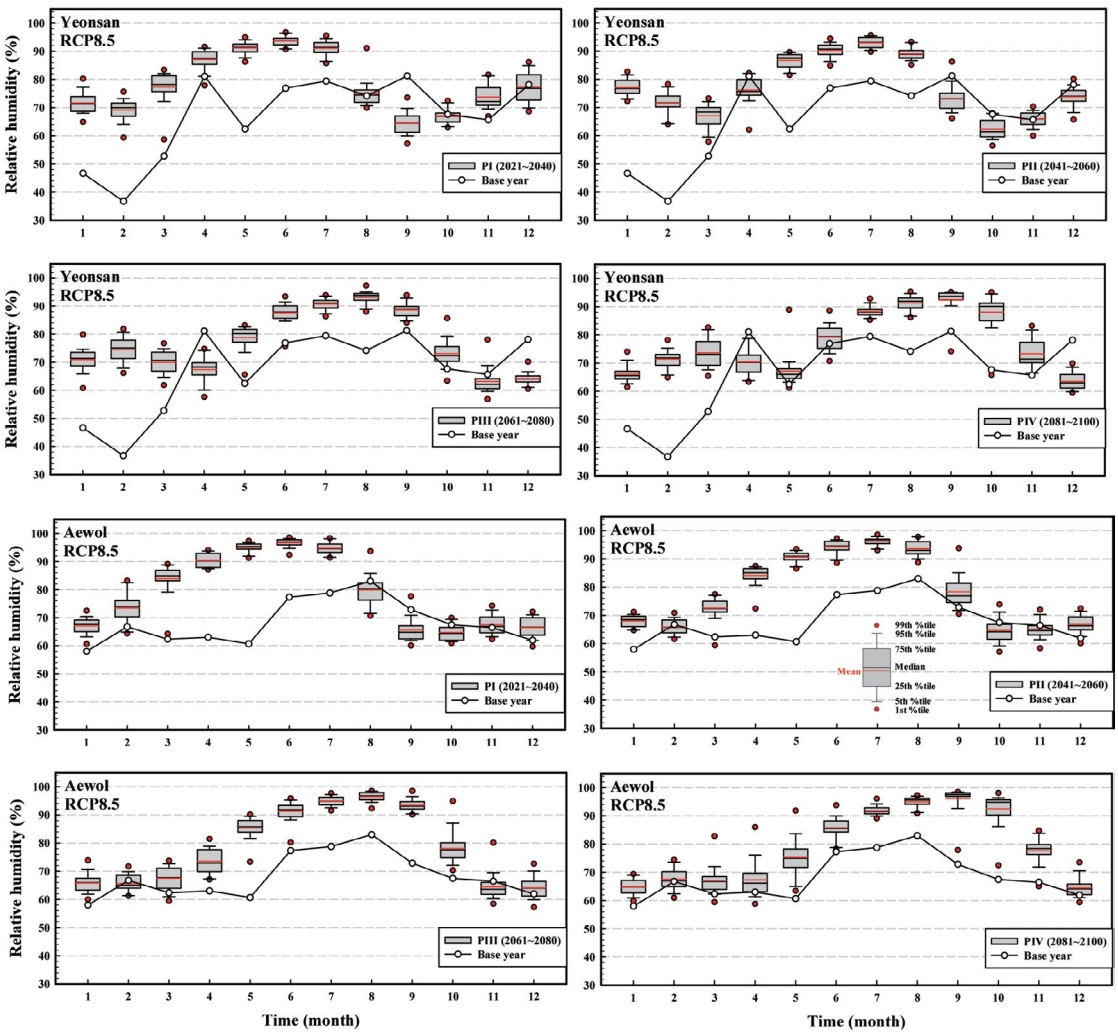


Fig. 3. Monthly variations of relative humidity (%) at four measurement sites (Yeonsan, Aewol, Gwangjin, and Gosan) in base years (Yeonsan and Gwangjin: 2016, Aewol and Gosan: 2014) and four different periods (PI~PIV) under RCP8.5 climate change scenario.

은 수치가 나타난 반면, 미래의 PI, PII, PIII, PIV에서는 각각 6월, 7월, 8월, 9월에 최고(93~94%), 각각 9월, 10월, 11월, 12월에 최저(62~64%)가 나타났다. 특징적으로, 연산지점에서 미래 4기간(PI~PIV)의 12월 상대습도(PI: 77%, PII: 74%, PIII: 64%, PIV: 64%)는 같은 지점 기준연도의 12월 상대습도(약 78%)보다 낮은 경향을 보였다. 한편, 애월지점의 기준연도 상대습도는 연산지점보다 약간 높게 나타났으며, 8월에 최고 1월에 최저를 기록하였다. 이 지점의 미래 4기간의 상대습도 역시 연산지점에 비해 상대적으로 높은 수치를 보였다. 이외에도, 애월지점의 미래 4기간의 최고 상대습도(96~97%)가 나타난 월은 연산지점과 같았으나, 최저가 나타난 월은 서로 달랐다(PI과 PII: 10월에 65%, PIII과 PIV: 12월에 64~65%).

대도시 주거 밀집지역에 위치한 광진지점은 기준연도의 상대습도가 4지점 중에서 가장 낮은 수치가

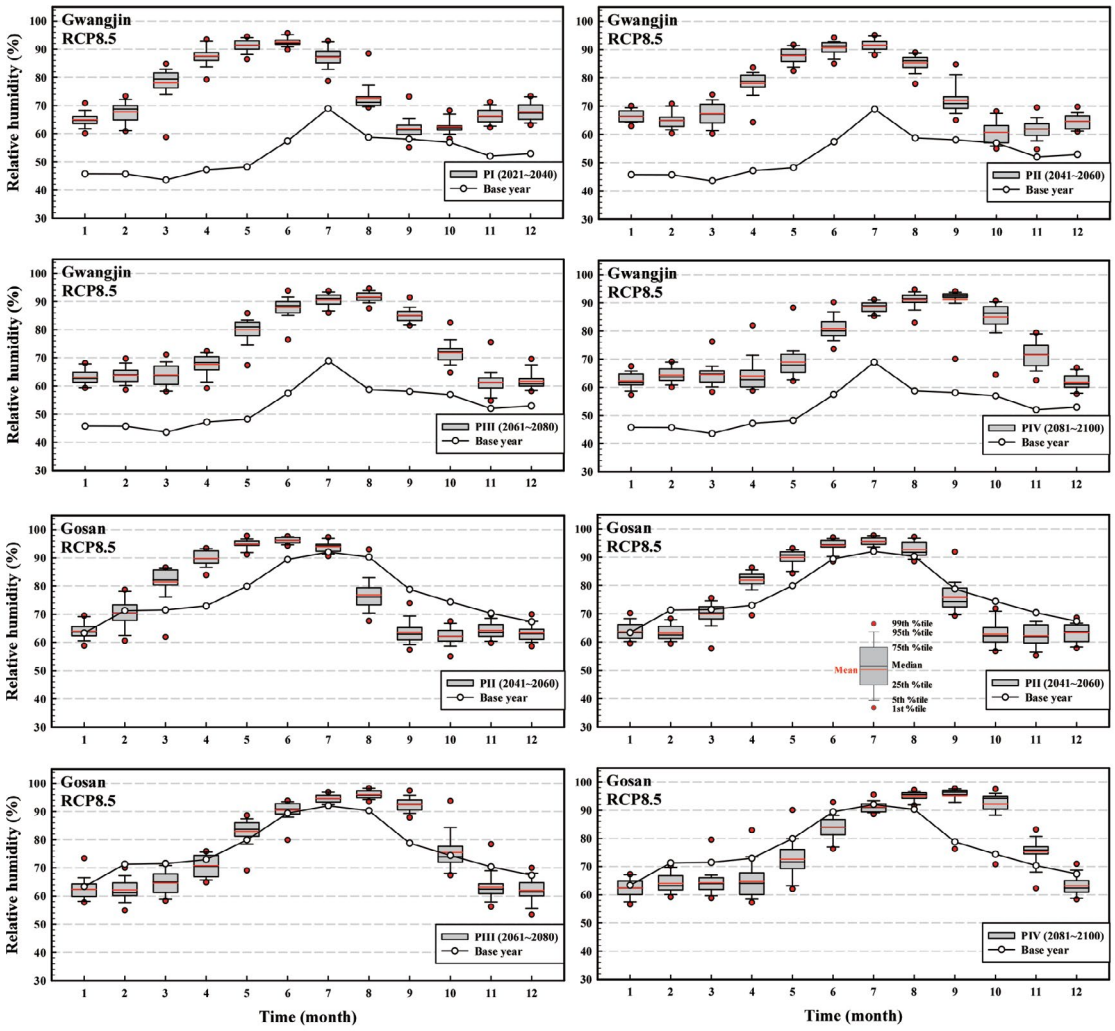


Fig. 3. Continued.

나타나 미래 4기간(PI~PIV)의 상대습도에 비해 큰 폭의 차이를 보였다(그림 3과 표 1). 이 지점의 기준연도 상대습도는 7월에 최고 3월에 최저를 기록한 반면, 미래 4기간의 최고 및 최저 상대습도가 나타난 월은 도시지역인 연산지점과 일치하였다(4기간 최고: 91~93%, 4기간 최저: 61~62%). 한편, 고산지점은 제주도 서쪽 해안가 끝단에 위치하고 있어 이 지점의 기준연도 상대습도(평균 77%)는 다른 지점(연산: 67%, 광진: 53%, 애월: 68%)에 비해 훨씬 높았으며, 7월에 최고 1월에 최저를 기록하였다. 이 지점의 미래 4기간의 최고 상대습도(95~96%)가 나타난 월은 다른 3지점과 같았으나, 최저가 나타난 월은 PI~PIV의 순서대로 각각 10월, 11월, 12월, 1월에 나타났다(모두 62%). 이와 같이 고산지점의 미래 상대습도가 다른 지점에 비해 다소 높게 나타나 이 지점의 에어로졸 화학성분별(특히 수용성 성분) 미래 복사효과는 상대적으로 클(DRF 증가) 것으로 예상된다.

Table 1. Monthly variations of relative humidity (%) at four measurement sites (Yeonsan, Aewol, Gwangjin, and Gosan) in base years and four different periods (PI-PIV) under RCP8.5 climate change scenario.

[A] Yeonsan and Aewol

Relative humidity (%)			Base year	PI (2021~2040)	PII (2041~2060)	PIII (2061~2080)	PIV (2081~2100)
Region	Site	Month					
Busan	Yeonsan	1	47±16[a]	72±4	77±3	71±4	66±3
		2	37±11	69±4	72±4	75±4	71±3
		3	53±18	77±5	67±4	70±4	74±5
		4	81±0	87±3	76±5	67±4	70±5
		5	62±12	91±2	87±3	79±4	67±6
		6	77±7	94±2	90±2	88±4	79±4
		7	79±0	91±3	93±2	91±2	88±2
		8	74±9	75±5	89±2	93±2	91±2
		9	81±9	64±4	73±4	89±3	93±5
		10	68±6	67±2	62±3	73±5	88±6
		11	66±15	74±4	66±3	63±4	73±5
		12	78±14	77±5	74±3	64±2	64±3
Jeju	Aewol	1	58±12	67±3	68±2	66±3	65±3
		2	67±15	73±5	66±3	66±3	68±4
		3	62±18	84±5	73±4	67±4	67±5
		4	63±18	90±2	84±3	74±4	67±6
		5	61±18	95±1	91±2	85±4	75±6
		6	77±10	97±1	94±2	91±3	86±4
		7	79±12	95±2	96±1	95±2	92±2
		8	83±9	80±5	94±3	96±2	95±2
		9	73±10	66±4	78±5	93±2	96±5
		10	67±12	65±3	65±4	78±5	93±6
		11	66±13	67±3	65±3	64±5	78±4
		12	62±10	67±3	67±3	64±4	65±3

[a] Mean ± Standard deviation (1σ).

3. 2 에어로졸 화학성분에 따른 기준연도 및 미래의 직접적 복사강제력 예측

3. 2. 1 기준연도의 직접적 복사강제력 산출

본 연구에서는 4곳의 대상지점(연산, 광진, 애월, 고산)을 중심으로 에어로졸 화학성분에 따른 기준연도의 DRF 대비 미래의 DRF를 전망하기 위하여, 먼저 기준연도(연산과 광진: 2016년, 애월과 고산: 2014년)에 대한 TOA에서의 DRF 월변화를 산출하였다(그림 4). 여기서, 연산과 애월지점은 4가지 화학성분(water-soluble, BC, insoluble, sea-salt), 광진과 고산지점은 2가지 화학성분(water-soluble, sea-salt)에 대해 각각 구분하여 분석하였다(2.1절과 2.2절 참조).

연산지점의 전체 화학성분에 대한 총(total) 음의 DRF는 2016년 12월에 −59 W/m^{2}으로 가장 높고 5월에 −26 W/m^{2}으로 가장 낮았으며, 애월지점은 2014년 6월에 −36 W/m^{2}으로 가장 높고 11월에 −16 W/m^{2}으로 가장 낮았다. 두 지점 모두 water-soluble 성분에 따른 음의 DRF가 가장 우세하였다(BC 성분 제외). 예를 들어, 연산지점의 water-soluble 성분에 대한 음의 DRF는 2016년 12월에 최고(−67 W/m^2) 5월에 최저였으며(−30 W/m^2), 애월지점은 2014년 7월에 최고(−47 W/m^2) 1월에 최저(−24 W/m^2)가 나타났다. 두 지점 모두 최고 및 최저의 음의 DRF 크기는 같은 월에 나타난 높은 water-soluble 성분 농도와 높은 상대습도에 의해 야기된 것으로 볼 수 있다(그림 2와

Table 1. Continued.

[B] Gwangjin and Gosan

Relative humidity (%)			Base year	PI (2021~2040)	PII (2041~2060)	PIII (2061~2080)	PIV (2081~2100)
Region	Site	Month					
Seoul	Gwangjin	1	46±17	65±2	66±2	63±3	62±3
		2	46±21	68±3	65±3	64±3	64±3
		3	44±19	78±5	67±4	64±4	65±4
		4	47±22	88±3	78±4	68±3	64±5
		5	48±22	91±2	88±3	80±4	69±6
		6	57±17	93±1	91±2	88±4	81±4
		7	69±14	87±3	92±2	91±2	89±2
		8	59±14	73±4	85±3	92±2	91±3
		9	58±15	62±4	72±5	85±2	91±5
		10	57±18	62±2	61±4	72±4	85±6
		11	52±18	66±3	62±3	61±4	71±4
		12	53±18	68±3	65±2	62±3	62±3
Jeju	Gosan	1	63±8	64±3	64±3	62±4	62±3
		2	71±11	70±5	63±3	62±4	64±3
		3	72±17	81±5	70±4	65±4	64±4
		4	73±14	90±2	82±4	71±4	65±6
		5	80±12	95±2	90±2	83±4	73±6
		6	89±4	96±1	94±2	90±3	84±4
		7	92±6	94±2	96±1	95±1	91±2
		8	90±6	77±5	93±3	96±1	95±2
		9	79±7	64±4	76±5	92±2	95±5
		10	74±10	62±3	63±4	76±6	92±6
		11	70±11	64±3	62±4	63±5	75±4
		12	67±7	63±3	63±3	62±4	63±3

[a] Mean ± Standard deviation (1σ).

3). 즉, 에어로졸 입자 중 water-soluble 성분과 같은 흡습성 에어로졸(황산염, 질산염 등)은 상대습도가 증가할수록 대기 중 AOD가 증가하고 산란계수 등에 영향을 주어, 결국 음의 DRF 증가에 기여한 것으로 사료된다(Park *et al.*, 2015; Yoon and Kim, 2006). 참고로, OPAC 모델에서 산출된 AOD의 검증은 여러 선행연구를 통해 이미 확인된 바 있는데, 특히 제주지역을 중심으로 OPAC AOD와 관측기반(MODIS, AERONET) AOD 사이의 상관성이 다소 높게($r \geq 0.6$) 나타났고 통계적으로 유의하다는 연구결과들이 있었다(So *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2017). 이외에도, BC 성분은 양(+)의 DRF가 추정되었으며, 연산지점은 2016년 11월에 최고(+15 W/m^2) 8월에 최저였으며(+9 W/m^2), 애월지점은 2014년 2월에 최고(+13 W/m^2) 6월에 최저(+8 W/m^2)가 나타났다. 한편, 두 지점에서의 insoluble과 sea-salt 성분에 대한 음의 DRF는 대체로 뚜렷한 월변화 패턴이 나타나지 않았다.

광진지점의 경우, 총(total) 음의 DRF는 2016년 7월에 −62 W/m^{2}으로 가장 높고 12월에 −26 W/m^{2}으로 가장 낮았으며, 고산지점은 애월지점과 유사하게 2014년 6월에 −81 W/m^{2}으로 가장 높고 10월에 −30 W/m^{2}으로 가장 낮았다. 이 두 지점 역시 연산 및 애월지점과 마찬가지로 water-soluble 성분에 의한 음의 DRF가 가장 우세하게 나타났다(그림 4). 광진지점의 water-soluble 성분에 의한 음의 DRF는 2016년 7월에 최고(−56 W/m^2) 12월에 최저였으며(−17 W/m^2), 고산지점은 2014년 6월에 최고(−75 W/m^2) 10월에 최저(−24 W/m^2)가 나타났다. 이와 같이 두 지점에 나

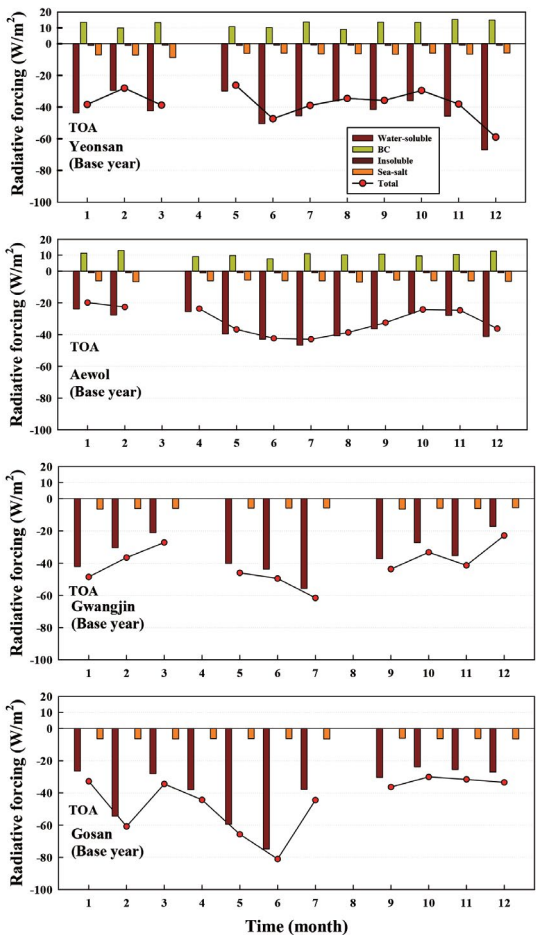


Fig. 4. Monthly variations of direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the TOA for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at four measurement sites (Yeonsan, Aewol, Gwangjin, and Gosan) in base years (Yeonsan and Gwangjin: 2016, Aewol and Gosan: 2014).

타난 DRF의 월변화 패턴은 연산 및 애월지점과 마찬가지로 water-soluble 성분의 농도와 상대습도의 월변화 패턴과 유사하게 나타나 이들의 복합적인 효과가 주요 원인인 것으로 추정된다. 아울러 광진지점의 water-soluble 농도가 대체로 고산지점보다 높음에도 불구하고 고산지점의 DRF가 더 높게 추정된 이유는 고산지점이 상대적으로 높은 상대습도가 에어로졸 광학변수에 영향을 주어 결국 높은 DRF가 산출된 것으로 사료된다(Park *et al.*, 2015; Yoon and Kim, 2006). 이외에도, 두 지점의 sea-salt 성분에 의한 음의 DRF는 지점별 sea-salt 성분의 농도 패턴과 마찬가지로 월변화가 뚜렷하지 않았다(그림 4). 본 연구에서 계산된 기준연도의 DRF에 대한 불확실성은 화학성분별 광학변수(AOD, SSA 등)의 표준편차(1σ)를 이용하여 산정되었으며(Singh *et al.*, 2010), 4가지 화학성분(water-soluble, BC, insoluble, sea-salt)에 대한 TOA에서의 불확실성은 각각 약 23%, 14%, 5.4%, 5.9%로 추정되었다. 한편, 모든 연구지역(연산, 애월, 광진, 고산)에서 화학성분별(BC 성분 제외) SFC에서의 DRF는 TOA에서의 DRF보다 다소 높게 추정되었으나, 각 성분의 SFC 및 TOA에서의 DRF에 대한 불확실성은 서로 비슷하였다(그림 제외).

3.2.2 직접적 복사강제력의 미래 예측

그림 5와 6은 대상지역(연산, 애월, 광진, 고산)에서의 RCP8.5 기후변화시나리오 4기간(PI~PIV)에 대한 에어로졸 화학성분별 TOA에서의 DRF를 나타낸다. 전반적으로, 모든 지점에서 4기간에 대한 DRF의 월변화 패턴은 서로 다른 양상을 보였다. 먼저 연산지점의 전체 화학성분에 대한 총(total) 음의 DRF는 PI와 PII에서 6월, PIII에서 8월, PIV에서는 9월에 가장 높았고, 가장 낮게 추정된 월은 PI에서 9월, PII에서 10월, PIII와 PIV에서는 5월이었다. 애월지점의 경우, 가장 높은 음의 DRF가 나타난 월은 PI에서 6월, PII에서 7월, PIII에서 8월, PIV에서는 9월이었고, 가장 낮게 추정된 월은 4기간 모두 2월이었다. 기준연도와 마찬가지로, 지점별 미래의 DRF에 가장 크게 기여한 성분도 water-soluble 성분이었다(BC 성분 제외). 연산과 애월지점에서 water-soluble 성분에 의한 음의 DRF가 가장 높게 추정된 월은 두 지점의 총 DRF 월변화 패턴과 매우 비슷하였지만, 가장 낮게 추정된 월은 다소 상이하였다. 즉, 연산지점에서 가장 낮게 추정된 월은 PI에서 2월, PII에서 10월, PIII와 PIV에서는 5월이었으며, 애월지점은 PI에서 10월, PII에서 6월, PIII와 PIV에서는 4월이었다. 두 지점에서 water-soluble에 의한 미래 4기간의 DRF가 가장

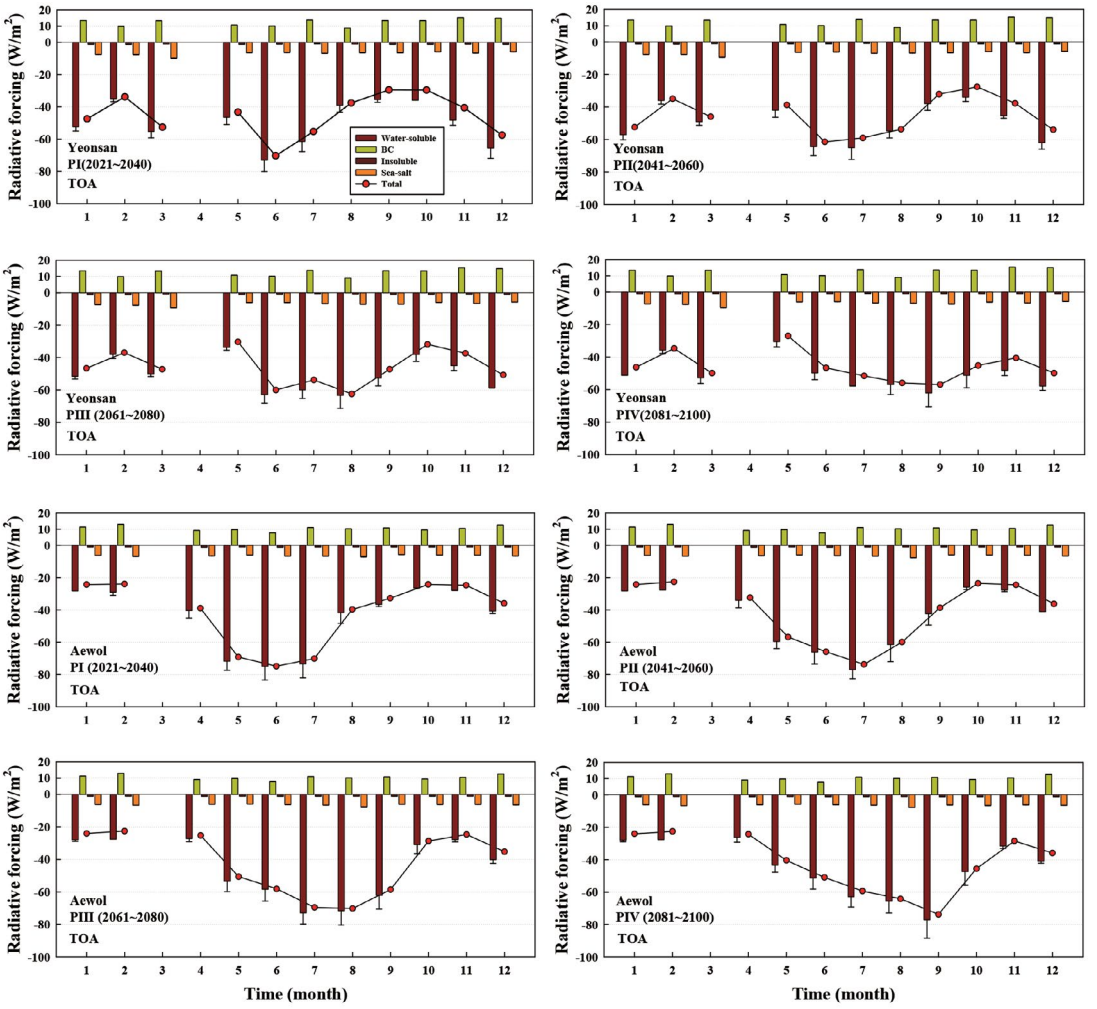


Fig. 5. Monthly variations of direct radiative forcing (DRF, W/m^2) at the TOA for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at sites of Yeonsan and Aewol in four different periods (PI~PIV) under RCP8.5 climate change scenario.

높게 그리고 가장 낮게 나타난 월은 화학성분 농도의 월변화 및 미래(PI~PIV) 상대습도의 월변화 패턴과 유사하므로 이들이 복합적으로 영향을 준 것으로 추정된다. 한편, 두 지점의 sea-salt 성분에 의한 미래 DRF는 기준연도와 마찬가지로 월변화가 뚜렷하지 않았는데, 이것은 일부 상대습도의 기여가 있음에도 불구하고 이 성분의 농도가 매우 낮게 나타나 월별 차이가 크지 않았기 때문이다(그림 2와 3).

그림 6을 보면, 광진지점의 총 DRF는 PI에서 6월, PII, PIII, PIV에서는 7월에 가장 높고 4기간 모두 가장 낮게 추정된 월은 12월이었으나, 고산지점에서는 4기간 모두 6월에 가장 높고 가장 낮게 추정된 월은 PI과 PII에서 10월, PIII에서 11월, PIV에서는 1월이었다. 연산 및 애월지점과 마찬가지로, 두 지점에서도 미래 DRF에 가장 크게 기여한 성분은 water-soluble 성분이며, 그들의 음의 DRF는 각각 같은 지점에서의 전체 화학성분의 총 DRF 월변화와 유사한 패턴이었다. 반면, sea-salt 성분에 의한 음의 DRF는 기준연도

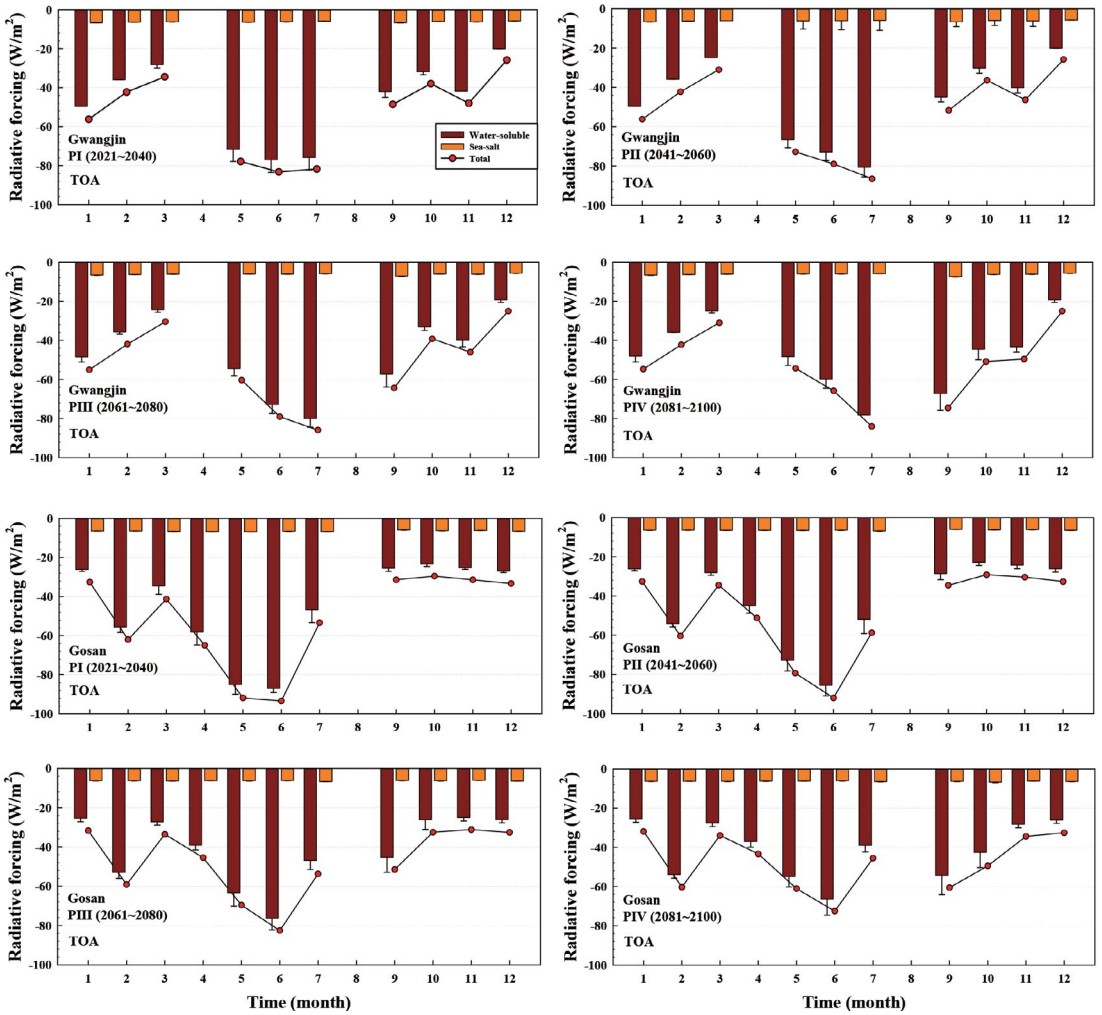


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for the direct radiative forcing (DRF, W/m^2) of two aerosol components (water-soluble and sea-salt) at sites of Gwangjin and Gosan.

DRF와 마찬가지로 뚜렷한 월변화 패턴을 볼 수 없었다. 두 지점에서의 미래 DRF 월변화 경향은 연산 및 애월지점에서처럼 화학성분 농도와 상대습도의 월변화 패턴에 따라 크게 좌우된 것으로 사료된다(그림 2와 3). 한편, OPAC 모델 내에서 insoluble과 BC 성분은 상대습도 증가에 따라 입자가 성장하지 않는 것으로 가정하였기 때문에(Hess *et al.*, 1998), 상대습도 변화만을 고려하여 추정한 두 지점에서의 미래 DRF는 기준연도의 DRF와 같게 나타났다(그림 4와 5). 참고로, water-soluble과 sea-salt 성분에 대한 미래 DRF의 불확실성(TOA에서의)은 각각 약 19% (PIV)~29% (PI)와 3.5% (PIV)~6.8% (PIII)로 추정되었다.

본 연구에서는 대상지역(연산, 애월, 광진, 고산)에서 RCP8.5 기후변화시나리오의 상대습도 변화에 따른 미래(PI~PIV) DRF의 전망을 위해, 추정된 미래 DRF (그림 5와 6)와 기준연도 DRF (그림 4) 사이의 차이(미래 DRF−기준연도 DRF)를 분석하였다(그림 7과 8). 앞서 언급한 바와 같이, 화학성분 중 BC와

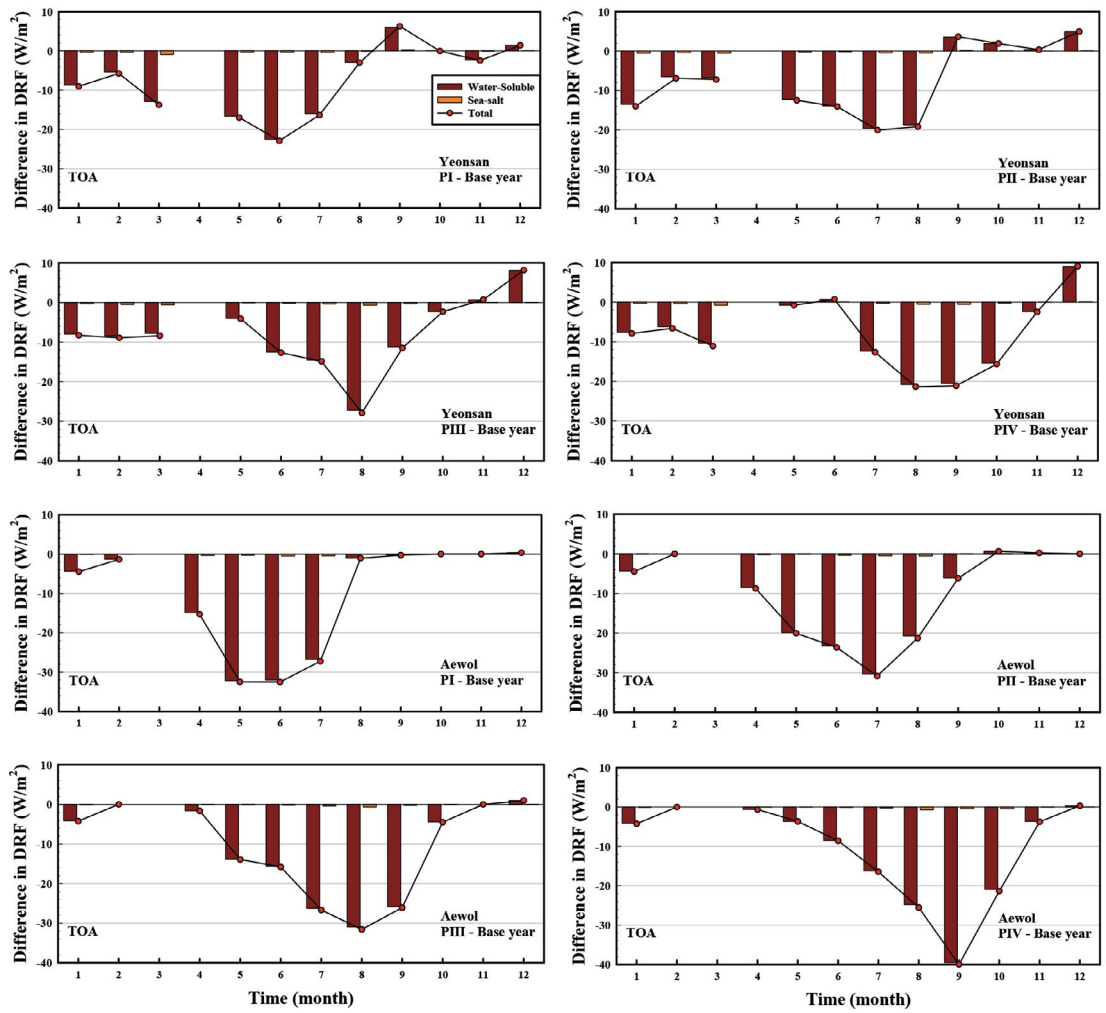


Fig. 7. Differences in the direct radiative forcing (DRF, W/m^2) between the PI-PIV under RCP8.5 climate change scenario and base years at sites of Yeonsan and Aewol.

insoluble 성분에 의한 미래 DRF는 기준연도의 DRF와 같기 때문에 미래 DRF의 전망에서 제외하였다. 전반적으로, 연산과 애월지점의 총 DRF에 대한 차이는 미래 4기간(PI~PIV)에서 대부분 여름 또는 초가을에 음(−)의 값으로 가장 크게 추정되었고, 늦가을~겨울에는 음(−)의 값과 양(+)의 값이 각각 부분적으로 나타났다(그림 7). 예를 들어, 연산과 애월지점의 PI에는 6월, PII에는 7월, PIII에는 8월, PIV에는 각각 8월(연산)과 9월(애월)에 가장 큰 차이가 나타났다. 즉, PI에는 기준연도 6월(연산 −47 W/m^2, 애월 −42 W/m^2)에 비해 각각 −23 W/m^2, −33 W/m^2 증가하여 −70 W/m^{2}와 −75 W/m^2, PII에는 기준연도 7월(−39 W/m^2, −43 W/m^2)에 비해 −20 W/m^2, −31 W/m^2 증가하여 −59 W/m^{2}와 −74 W/m^2, PIII에는 기준연도 8월(−35 W/m^2, −39 W/m^2)에 비해 −28 W/m^2, −32 W/m^2 증가하여 −63 W/m^{2}와 −71 W/m^2, PIV에는 기준연도 8월(연산 −35 W/m^2)과 9월(애월 −32 W/m^2)에 비해 각각 −21 W/m^2, −41 W/m^2 증가하여 −56 W/

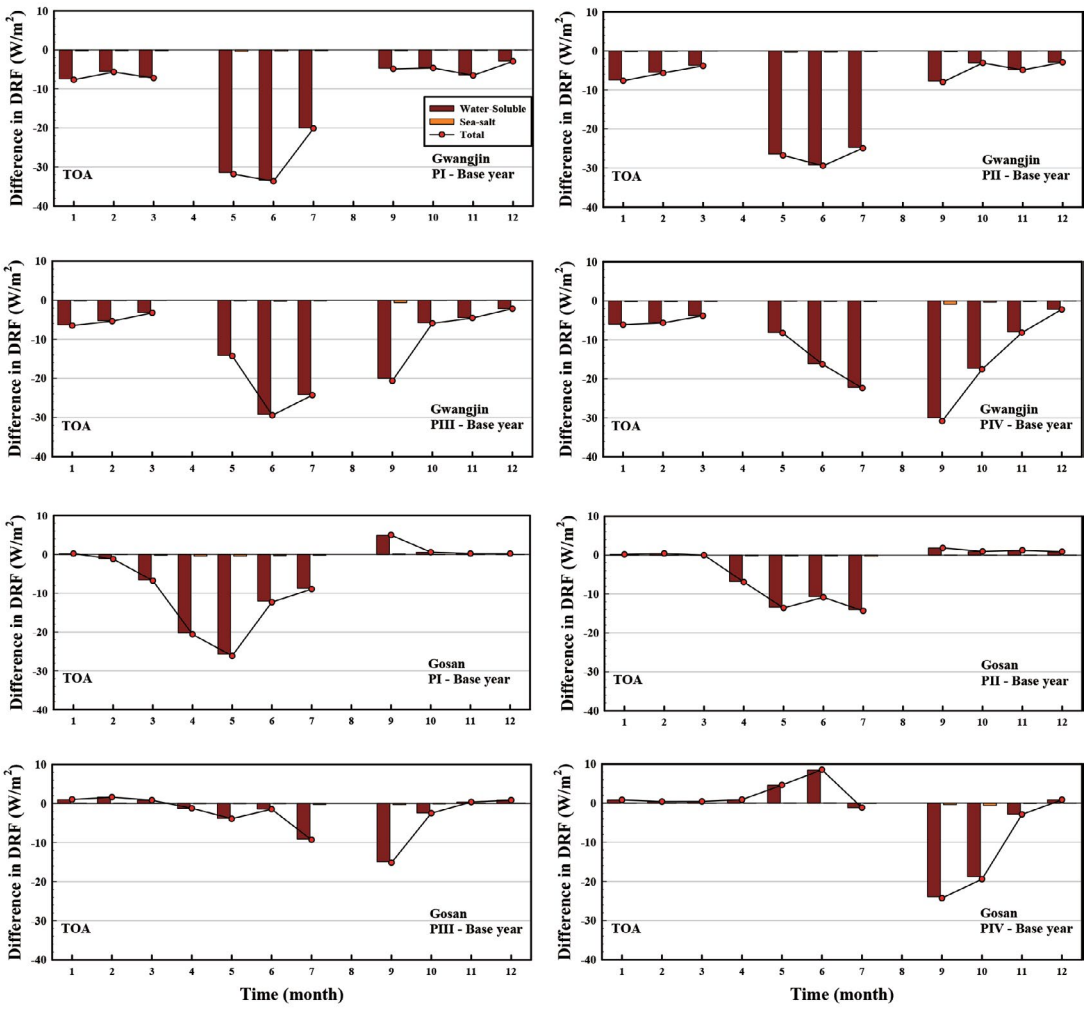
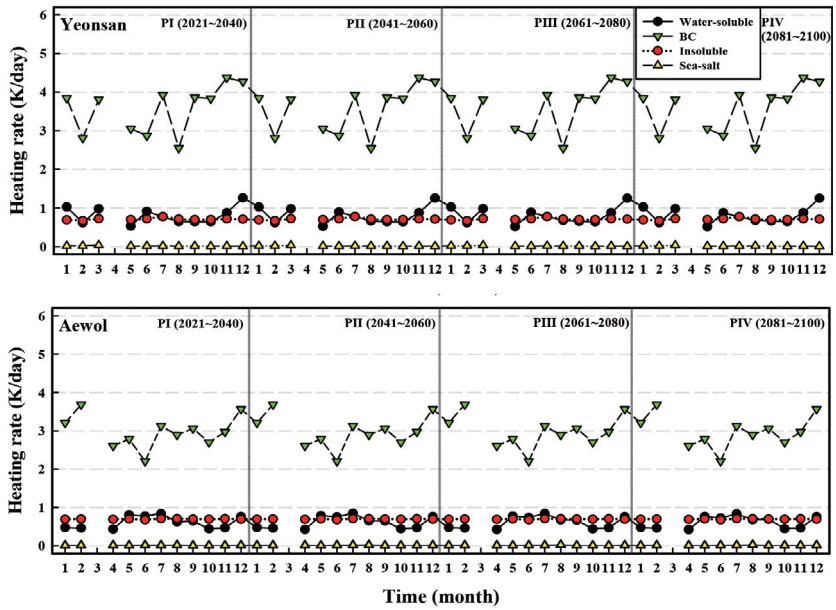


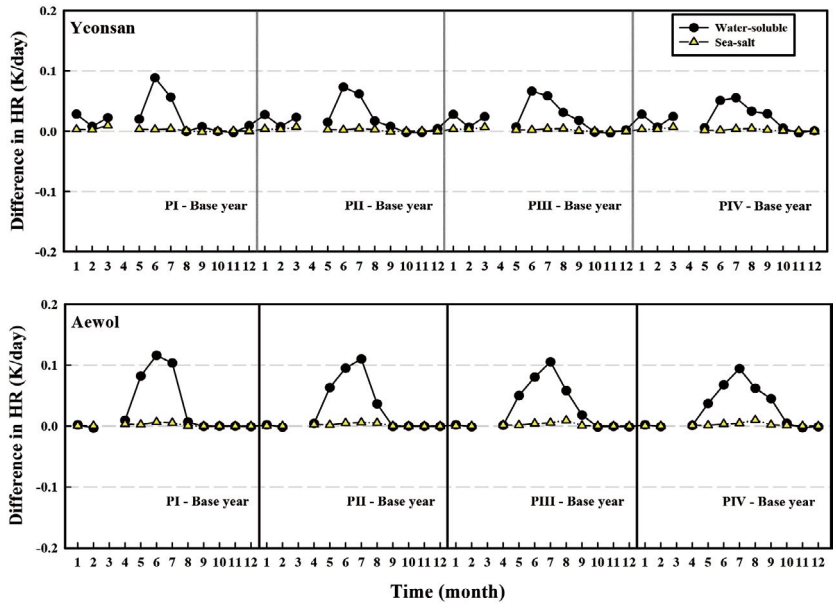
Fig. 8. Same as Fig. 7 except for sites of Gwangjin and Gosan.

m^2와 −73 W/m^2으로 전망된다(그림 4, 5, 7). 또한 특징적으로, 연산과 애월지점에서 PI~PIV의 12월에는 기준연도 DRF와의 차이가 양(+)의 값으로 나타났는데(특히 PIII와 PIV에서 최고 +8 W/m^2, +9 W/m^2), 이것은 미래 4기간의 12월 상대습도(64~77%)가 기준연도(약 78%)에 비해 상대적으로 낮아(그림 3), 결국 미래의 음의 DRF 크기가 기준연도보다 작았기 때문이다(그림 4, 5, 7).

광진지점의 미래와 기준연도 사이의 DRF 차이는 대체로 애월지점과 일부 비슷한 패턴을 보였으나, 고산지점은 다른 3지점에 비해 다소 다른 패턴이 나타났다(그림 8). 즉 고산지점에서 미래(PI~PIV)와 기준연도 사이의 DRF 차이를 보면, PI과 PII에는 1~7월에 음(−)의 값과 9~12월에 양(+)의 값, PIII에는 4~10월에 음(−)의 값과 1~3월 및 11~12월에 양(+)의 값, PIV에는 9~11월에 음(−)의 값과 1~6월 및 12월에 양(+)의 값이 추정되었다. 미래와 기준연도 사이의 음(−)의 값 차이는 기준연도에 비해 미래의 DRF가 증가한 것을 의미하고, 양(+)의 값의 차이는 미래의 DRF가 감소한 것을 의미한다. 고산지점에서



(a)



(b)

Fig. 9. Monthly variations of (a) atmospheric heating rate (HR) for each aerosol chemical component and (b) heating rate differences between the PI-PIV under RCP8.5 climate change scenario and base years at sites of Yeonsan and Aewol.

의 이러한 특징은 고산지점의 미래(PI~PIV) 및 기준연도의 상대습도 월변화 차이(그림 3)가 각각의 광학변수에 영향을 주어, 결국 미래 DRF 전망에 영향을 준 것으로 추정된다. 이외에도 광진지점의 총 DRF

차이를 보면, 3기간(PI, PII, PIII)에는 6월, PIV에는 9월에 가장 크게 추정되었다. 즉, PI, PII, PIII에는 기준연도 6월(−50 W/m^2)에 비해 각각 −34 W/m^2, −29 W/m^2, −29 W/m^2 증가하여 −84 W/m^2, −79 W/m^2, −79 W/m^2, PIV에는 기준연도 9월(−44 W/m^2)에 비해 −31 W/m^2 증가하여 −75 W/m^{2}으로 전망된다(그림 4, 6, 8). 고산지점의 경우 PI에는 5월, PII에는 7월, PIII와 PIV에는 9월에 가장 큰 차이를 보였으며, PI에는 기준연도 5월(−66 W/m^2)에 비해 −26 W/m^2 증가하여 −92 W/m^2, PII에는 기준연도 7월(−44 W/m^2)에 비해 −14 W/m^2 증가하여 −58 W/m^2, PIII와 PIV에는 기준연도 9월(−36 W/m^2)에 비해 각각 −15 W/m^2, −24 W/m^2 증가하여 −51 W/m^{2}와 −60 W/m^{2}으로 전망된다(그림 4, 6, 8). 한편, 모든 지점에서 미래(PI~PIV)와 기준연도 사이의 DRF 차이는 water-soluble 성분이 sea-salt 성분에 비해 월등히 크게 나타나, 미래 DRF의 전망은 대부분 water-soluble 성분에 의한 것이라 볼 수 있다.

미래 대기의 가열정도를 전망하기 위하여, 에어로졸 화학성분별 미래(PI~PIV) 대기가열속도(atmospheric heating rate)를 추정하고, 미래 가열속도와 기준연도 가열속도의 차이를 분석하였다(그림 9). 4가지 화학성분에 대한 분석을 위해 부산 연산과 제주 애월지점의 기준연도 및 미래의 가열속도 변화를 살펴보았다. 전반적으로, 두 지점의 미래 가열속도는 BC 성분에 의한 기여가 가장 크게 나타났으며, 다음으로 water-soluble (연산) 또는 insoluble 성분(애월), 가장 낮게 나타난 것은 sea-salt 성분이었다(그림 9 (a)). 먼저 연산지점의 BC 성분은 4기간(PI~PIV) 모두 늦가을~초겨울에 높은 편이며, 11월에 최고(4.4 K/day) 8월에 최저였다(2.6 K/day). 이 지점의 water-soluble 성분에 의한 미래 가열속도는 대체로 겨울에 높았으며, 12월에 최고(1.3 K/day) 5월에 최저였다(0.5 K/day). 또한 insoluble 성분에 의한 미래 가열속도는 겨울을 제외하고는 water-soluble 성분과 유사한 월변화 패턴을 보였으나, sea-salt 성분은 매우 낮은 수치로 뚜렷한 패턴이 나타나지 않았다. 애월지점의 BC 성분에 의한 미래 가열속도는 연산지점과 비슷하게 4기간(PI~PIV) 모두 겨울에 높은 편이며, 2월에 최고(3.7 K/day) 6월에 최저였다(2.2 K/day). 두 지점에서 추정된 BC 성분에 의한 높은 가열속도는 BC 성분의 강한 복사 흡수에 기인된 것으로 사료된다(그림 5와 9). 한편, 애월지점의 water-soluble과 insoluble 성분에 의한 미래 가열속도는 대부분 약 1 K/day 이하로 낮게 나타났으며, sea-salt 성분은 무의미할 정도로 낮은 수치였다. 이외에도, 미래 및 기준연도 가열속도와의 차이를 보면(그림 9 (b)), 두 지점 모두 PI과 PII에서는 6~7월(여름)에 높다가 PIII와 PIV로 갈수록 6월에서 9월까지 높아지는 경향을 보였는데, 이것은 4기간의 RCP8.5 시나리오의 상대습도 변화와 일부 유사한 패턴이었다(그림 3). 또한 두 지점의 water-soluble 성분의 가열속도 차이는 대부분 0.12 K/day 이하로 나타났으며, sea-salt 성분의 차이는 무의미할 정도로 매우 낮은 수치였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 도시(부산 연산, 서울 광진) 및 배경지역(제주 애월과 고산)에서 측정한 $PM_{2.5}$ 에어로졸 화학성분 자료를 이용하여 기준연도의 화학성분별 DRF를 산정하였으며, 또한 RCP 기후변화시나리오의 상대습도 변화에 따른 미래 DRF를 추정하여 기준연도의 DRF 대비 미래의 DRF 변화를 전망하였다. 여기서, 미래의 화학성분별 농도 자료가 없는 관계로 기준연도의 농도를 이용하여 미래의 성분별 DRF를 추정하였다. 모든 지점에서 화학성분 중 water-soluble 성분이 농도 분포, 광학변수(AOD), 기준연도 및 미래 DRF에 대해 가장 크게 기여한 것으로 나타났다. 기준연도의 전체 성분에 대한 총(total) DRF와 water-soluble 성분의 DRF는 대부분 지점별로 월변화 패턴이 달랐으며, 최고 및 최저 DRF가 나타난 월도 서로 다른 양상을 보였다. 한편, 연산과 애월지점의 insoluble 및 sea-salt 성분과 광진과 고산지점의 sea-

salt 성분에 의한 DRF는 모두 월변화 패턴이 뚜렷하지 않았다. 이와 같이 지점별 화학성분에 의한 DRF 차이는 각 지점의 성분 농도와 상대습도의 월변화 경향에 따른 복합적 효과가 원인인 것으로 추정된다.

대상지역의 미래(PI~PIV) DRF 전망을 보면, 연산과 애월지점의 미래 및 기준연도의 DRF 차이는 대부분 여름 또는 초가을에 음(−)의 값으로 가장 크게 나타났고, 늦가을~겨울에는 일부 음(−)의 값과 양(+)의 값이 각각 나타났다. 광진지점의 이러한 DRF 차이는 애월지점과 유사한 편이었으며, 고산지점은 4기간에 따라 그 차이가 음(−)의 값이 나타난 빈도가 대부분 높으나, 양(+)의 값의 빈도도 다소 보였다. 이것은 기준연도에 비해 미래의 DRF가 감소(양의 값 차이) 또는 증가(음의 값 차이)한 것을 의미한다. 또한 지점별로 가장 높은 차이(미래 DRF−기준연도 DRF)를 보인 월과 그때의 미래 DRF 전망은 일부 다른 양상을 보였다. 연산과 애월지점의 DRF 차이는 PI에 6월, PII에 7월, PIII에 8월, PIV에 각각 8월(연산)과 9월(애월)에 가장 컸으며, 광진지점의 경우 3기간(PI, PII, PIII)에는 6월, PIV에는 9월에 가장 크게 나타났다. 마지막으로 고산지점은 PI에 5월, PII에 7월, PIII와 PIV에는 9월에 가장 큰 차이를 보였다. 즉, 지점별 기준연도 대비 4기간의 DRF는 연산지점에서 −20 (PII)~−28 W/m^2 (PIII), 애월지점에서 −31 (PII)~−41 W/m^2 (PIV), 광진지점에서 −29 (PII와 PIII)~−34 W/m^2 (PI), 고산지점에서 −14 (PII)~−26 W/m^2 (PI) 으로 음(−)의 DRF가 증가하는 것으로 전망된다. 이외에도, 미래의 대기가열속도는 BC 성분을 제외하고 대체로 약 1.0 K/day 이하로 낮게 추정되었다. BC 성분은 4기간 모두 늦가을~초겨울에 높은 편이고, 연산지점은 11월에 4.4 K/day로 최고 8월에 2.6 K/day로 최저, 애월지점은 2월에 3.7 K/day로 최고 6월에 2.2 K/day로 최저였다. 이러한 BC 성분에 의한 높은 가열속도는 BC 성분이 가지고 있는 강한 복사흡수에 기인된 것으로 사료된다.

본 연구에서는 대상지역(연산, 애월, 광진, 고산)의 기준연도에 대한 에어로졸 성분 농도와 미래 최악의 시나리오인 RCP8.5의 미래 상대습도 자료를 이용하여 미래 DRF를 추정하고 기준연도 대비 미래 DRF 변화를 전망하였다. 미래 화학성분별 농도 자료가 없는 관계로 기준연도의 농도를 미래로 가정한 것과 제한된 기상조건(상대습도에 대해서만) 하에서 모델링을 수행하였기 때문에 명확하게 미래 DRF를 전망하기에는 부족함이 많다. 또한 RCP8.5의 미래 상대습도 자료에 대한 예측 불확실성이 미래 DRF의 예측 불확실성에 일부 영향을 준 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고, 미래 최악의 RCP 시나리오의 상대습도 변화에 따른 미래 화학성분별 DRF의 추정과 전망은 향후 에어로졸 화학조성에 따른 상세 복사효과 및 기후변화를 이해하는데 기여할 것으로 기대되는 바 의미 있는 연구라 사료된다. 향후 에어로졸 DRF를 추정하기 위한 모델 입력 자료로서 상대습도 이외에 다양한 양질의 자료(예, 기상 및 에어로졸의 연직 프로파일)가 구축된다면, 보다 정확한 대기 중 에어로졸의 복사효과와 기상·기후와의 상호 피드백을 평가하는데 크게 일조할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음. 또한 이 논문은 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R1A2C2011081).

References

Albrecht, B.A. (1989) Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness, Science, 245(4923), 1227-1230. https://doi.org/10.1126/science.245.4923.1227

Bates, T.S., Anderson, T.L., Baynard, T., Bond, T., Boucher, O., Carmichael, G., Clarke, A., Erlick, C., Guo, H., Horowitz, L., Howell, S., Kulkarni, S., Maring, H., McComiskey,

A., Middlebrook, A., Noone, K., O'Dowd, C.D., Ogren, J., Penner, J., Quinn, P.K., Ravishankara, A.R., Savoie, D.L., Schwartz, S.E., Shinozuka, Y., Tang, Y., Weber, R.J., Wu, Y. (2006) Aerosol Direct Radiative Effects over the Northwest Atlantic, Northwest Pacific, and North Indian Oceans: Estimates based on In-situ Chemical and Optical Measurements and Chemical Transport Modeling, Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 1657-1732. https://doi.org/10.5194/acp-6-1657-2006

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

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.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kim, S.-W., Choi, I.-J., Yoon, S.-C., Kim, Y. (2013) Sensitivity of Aerosol Optical Parameters on the Atmospheric Radiative Heating Rate, Atmosphere, 23(1), 85-92, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.14191/Atmos.2013.23.1.085

Korean Ministry of Environment (2013) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2012, Republic of Korea.

Lee, C., Boo, K.-O., Shim, S., Byun, Y.-H. (2016) Future Changes in Surface Radiation and Cloud Amount over East Asia under RCP Scenarios, Journal of Climate Change Research, 7(4), 433-442, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.15531/ksccr.2016.7.4.433

Lee, O., Kim, S. (2016) Future PMPs Projection under Future Dew Point Temperature Variation of RCP 8.5 Climate Change Scenario, Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, 16(2), 505-514, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.2.505

Lee, S., Kwon, B.Y., Jung, D., Jo, K., Kim, M., Ha, S., Kim, H., Kim, B.N., Masud, M.A., Lee, E., Kim, Y. (2013) Future Prediction of Heat and Discomfort Indices Based on two RCP Scenarios, Atmosphere, 23(2), 221-229, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.14191/Atmos.2013.23.2.221

Lin, L., Wang, Z., Xu, Y., Fu, Q. (2016) Sensitivity of Precipitation Extremes to Radiative Forcing of Greenhouse Gases and Aerosols, Geophysical Research Letters, 43(18), 9860-9868. https://doi.org/10.1002/2016gl070869

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

Park, Y.-H., Song, S.-K., Lee, S.-J., Kim, S.-W., Han, S.-B. (2016) An Analysis of Long-Term Variation of PM_{10} Levels and Local Meteorology in Relation to Their Concentration Changes in Jeju, Journal of Environmental Science International, 25(1), 107-125, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.1.107

Park, Y.-H., Song, S.-K., Kang, C.-H., Song, J.-M. (2017) Estimations of the Optical Properties and Direct Radiative Forcing of Aerosol Chemical Components in $PM_{2.5}$ Measured at Aewol Intensive Air Monitoring Site on Jeju Island, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(5), 458-472, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.458

Penner, J.E., Charlson, R.J., Hales, J.M., Laulainen, N.S., Leifer, R., Novakov, T., Ogren, J., Radke, L.F., Schwartz, S.E., Travis, L. (1994) Quantifying and Minimizing Uncertainty of Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols, Bulletin of the American Meteorological Society, 75(3), 375-400. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<0375:Qamuoc>2.0.Co;2

Ricchiazzi, P., Yang, S.R., Gautier, C., Sowle, D. (1998) SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-par-

allell Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere, Bulletin of the American Meteorological Society, 79(10), 2101-2114. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2101:Sarats>2.0.Co;2

Rosenfeld, D. (2000) Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution, Science, 287(5459), 1793-1796. https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1793

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/10.5572/KOSAE.2020.36.2.198

So, Y.-Y., Song, S.-K., Han, S.-B. (2020) Characteristics of Concentrations of Aerosol Chemical Components and their Direct Radiative Forcing Estimates in the Haze Events during 2013-2016, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 36(2), 198-215, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.198

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), 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, 400-412. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.195

Twomey, S. (1974) Pollution and Planetary Albedo, Atmospheric Environment, 8(12), 1251-1256. https://doi.org/10.1016/0004-6981(74)90004-3

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(35), 6620-6630. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.058

Yoon, S.-C., Kim, J. (2006) Influences of Relative Humidity on Aerosol Optical Properties and Aerosol Radiative Forcing during ACE-Asia, Atmospheric Environment, 40(23), 4328-4338. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.036

Authors Information

문수환 (제주대학교 지구해양과학과 석사과정)
송상근 (제주대학교 지구해양과학과 교수)