creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

碩士學位論文

제주지역 에어로졸 농도의 시공간적 변화 및 에어로졸 화학성분에 따른 복사강제력 영향 연구

濟州大學校 大學院

地 球 海 洋 科 學 科

朴 娟 姬

2017 年 2 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주지역 에어로졸 농도의 시공간적 변화 및 에어로졸 화학성분에 따른 복사강제력 영향 연구

지도교수 송 상 근

박 연 희

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2016 年 12 月

박연희의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 김 태호 ㊞

위 원 송 상 근 ㊞

위 원 윤 재홍 ㊞

제주대학교 대학원

2016 年 12 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Temporal and Spatial Variations in Aerosol Concentrations and the Impact of Different Aerosol Chemical Components on Direct Radiative Forcing in Jeju Area

Yeon-Hee Park
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

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

2017 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

List of Figures ····· ii
List of Tables ····· iv

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 자료 및 방법 ····· 4
2.1. 대상지역, 자료 및 연구방법 ····· 4
2.2. 모델 구성 ····· 8
2.2.1. 광학 모델 ····· 8
2.2.2. 대기복사전달 모델 ····· 11

제 3 장 결과 및 고찰 ····· 14
3.1. 에어로졸 농도의 시공간적 변화 경향 ····· 14
3.1.1. 연변화 ····· 14
3.1.2. 월/계절 변화 ····· 19
3.1.3. 주중/주말 및 시간 변화 ····· 22
3.2. 에어로졸 화학성분별 광학특성 ····· 27
3.3. 에어로졸 화학성분에 따른 기후환경변화 영향 ····· 37
3.3.1. 복사강제력 영향 추정 ····· 37
3.3.2. 대기 복사가열율 추정 ····· 46

제 4 장 요약 및 결론 ····· 52
참 고 문 헌 ····· 55
Abstract ····· 62

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Figures

Fig. 1. Geographical locations of three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong), Aewol intensive air monitoring site, and Gosan site on Jeju ····· 7

Fig. 2. Example of 'INPUT' file namelist in SBDART model ····· 12

Fig. 3. Annual variations in the mean PM_{10} concentrations observed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014 ····· 15

Fig. 4. Annual variations in the mean concentrations of aerosol chemical components in (a) $PM_{2.5}$ observed at Aewol site and in (b) $PM_{2.5}$ and (c) PM_{10} observed at Gosan site during 2010-2014 ····· 18

Fig. 5. Same as Fig. 3 but for the monthly mean PM_{10} concentrations ····· 20

Fig. 6. Same as Fig. 4 but for the monthly mean concentrations of aerosol chemical components ····· 21

Fig. 7. Weekday and weekend variations in the mean PM_{10} concentrations observed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014 ····· 23

Fig. 8. Diurnal variations in the mean PM_{10} concentrations observed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014 ····· 23

Fig. 9. Weekday and weekend variations in the mean concentrations of aerosol chemical components in (a) $PM_{2.5}$ at Aewol site in 2013 and in (b) $PM_{2.5}$ and (c) PM_{10} at Gosan site in 2010-2014 ····· 25

Fig. 10. Diurnal variations in the mean concentrations of aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ observed at Aewol site in 2013 ····· 26

Fig. 11. Monthly variations of AOD at a wavelength of 500 nm for each

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

aerosol chemical component in (a) $PM_{2.5}$ at the Aewol site in 2013 and in (b) $PM_{2.5}$ and (c) PM_{10} at Gosan site in 2010-2014 ····· 32

Fig. 12. Diurnal variations of (a) concentrations ($\mu g/m^3$) and (b) aerosol optical depth (AOD) at 500 nm for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ during four seasons in 2013 ····· 33

Fig. 13. Monthly variations of (a) single scattering albedo (SSA) estimated by the OPAC model and (b) black carbon (BC) concentration in Aewol during 2013. The vertical bars denote the standard deviation from the mean values ····· 35

Fig. 14. Comparison of hourly AOD between the OPAC model and Sun photometer observation (at the Gosan site) provided by the AERONET program (http://aeronet.gsfc.nasa.gov/) ····· 36

Fig. 15. Diurnal variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) at the surface (SFC) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ during four seasons in 2013. WS: water-soluble, IS: insoluble, BC: black carbon, and SS: sea-salt ····· 42

Fig. 16. Diurnal variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) at the TOA for each aerosol chemical component and total net DARF in $PM_{2.5}$ during four seasons in 2013. WS: water-soluble, IS: insoluble, BC: black carbon, and SS: sea-salt ····· 43

Fig. 17. Hourly variations of atmospheric heating rate and scattered plots of heating rate per unit AOD (heating rate efficiency = regression slopes) for each aerosol chemical component in at the Aewol site $PM_{2.5}$ from January to December 2013 ····· 48

Fig. 18. Daily variations of atmospheric heating rate and scattered plots of heating rate per unit AOD (heating rate efficiency = regression slopes) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Gosan site during 2010-2014 ····· 50

Fig. 19. Same as Fig. 18 but for each aerosol chemical component in PM_{10} ·· 51

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Tables

Table 1. Geographic coordinates (latitude, longitude) and study period of three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) for air pollutants, Aewol intensive air monitoring site, and Gosan site on Jeju … 6

Table 2. Types and descriptions of input files available by user ····· 13

Table 3. A statistical summary of PM_{10} concentration ($\mu g/m^3$) at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) in Jeju during the study period (2001-2014) ····· 16

Table 4. Concentrations of aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ and their optical properties at a wavelength of 500 nm estimated by OPAC model at the Aewol site in 2013 ····· 28

Table 5. Concentrations of aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ and their optical properties at a wavelength of 500 nm estimated by OPAC model at the Gosan in 2010-2014 ····· 29

Table 6. Same as Table 5 but for aerosol chemical components in PM_{10} ····· 30

Table 7. Monthly variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Aewol site in Jeju from January to December 2013 ····· 38

Table 8. Monthly variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ and PM_{10} at the Gosan site in Jeju during 2010-2014 (12:00 LST) ····· 40

Table 9. Comparison of direct aerosol radiative forcing (DARF) between different studies ····· 45

Table 10. Monthly variations of heating rate (HR, K/day) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Aewol site during the year 2013 … 48

Table 11. Monthly variations of heating rate (HR, K/day) for each aerosol

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

chemical component in $PM_{2.5}$ and PM_{10} at the Gosan site during 2010-2014 ····· 49

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅰ. 서 론

일반적으로 에어로졸은 고체 및 액체상태 또는 두 상이 혼재하여 대기 중에 부유하는 작은 미세입자(0.001～100 ㎛ 크기)로, 지역의 지리·지형적 특성, 장거리수송에 의한 외부유입, 기상요소 등에 의해 대기 중 농도 분포가 좌우된다(환경부, 2013). 에어로졸은 발생원에 따라 자연적 에어로졸과 인위적 에어로졸로 분류한다. 예를 들어 황사나 해염입자 등은 자연적 에어로졸에 해당되며, 화석연료의 연소나 생체소각(biomass burning)에 의해 배출되는 가스 등은 인위적 에어로졸에 해당된다. 인위적 에어로졸 배출원이 많은 도시지역과 비교적 적은 배경/시골지역에서의 에어로졸 화학조성 및 농도는 서로 다른 양상을 띤다(송상근과 손장호, 2014; Seinfeld and Pandis, 2006). 제주지역은 국내에서 청정한 지역 중 한 곳으로 꼽히나 최근 들어 관광객 및 차량 급증, 중국으로부터 오염물질의 장거리 수송 등 복합적인 요인으로 인해 대기환경 중 에어로졸의 농도 및 그에 따른 영향이 증가할 것으로 예상된다. 환경부 대기환경연보에 따르면(환경부, 2002～2015), 제주지역에서 10 ㎛ 이하의 에어로졸 즉 PM_{10}의 농도는 2007년 이후 매년 환경기준치(24시간 100 ㎍/m^3)를 초과하고 있는 것을 알 수 있으며, 또한 최근 선행연구에서는 제주지역의 PM_{10} 농도에 대하여 최근으로 올수록 고농도 발생빈도가 증가하고 있다고 밝혀진 바 있다(박연희 등, 2016).

에어로졸의 농도와 관련된 많은 선행연구들은 기상인자에 의한 에어로졸(PM_{10} 등) 농도의 변화 특성 또는 에어로졸 농도가 인체에 미치는 위해성 연구 등이 이루어지고 있다. 김지아 등(2007), 박연희 등(2016), Clements 등(2016)에 의하면, 에어로졸의 농도는 국지 배출량 혹은 외부로부터 오염물질 유입의 영향이 크며, 강수량, 상대습도, 일사량, 풍속 등 기상요소의 변화패턴과 일부 관련이 있는 것으로 나타났다. 또한 배현주(2014), Janssen 등(2013), Samoli 등(2013)에 의하면, 에어로졸의 고농도 발생은 인간의 건강 즉, 호흡기 질환과 혈관 기능 장애 및 심혈관 질환 등을 유발하며 사망률 증가에도 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

복사강제력(RF, radiative forcing)은 기후변화를 야기할 수 있는 인자(온실기체,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

에어로졸 등)의 영향력을 말하며 인자가 변할 때 지구-대기 시스템의 에너지 균형이 어떤 영향을 받는지를 나타낸 척도이다(Forster et al., 2007). 인자의 영향력이 양(+)의 복사강제력이면 지구-대기 시스템의 에너지가 증가하여 지구온난화를 초래하며, 음(-)의 복사강제력이면 에너지가 감소하여 지구냉각화가 초래된다(Forster et al., 2007). 지구대기 중 에어로졸은 복사강제력에 대하여 직·간접적으로 영향을 준다. 직접적인 효과는 에어로졸이 직접 태양복사를 대기 중에서 산란 또는 흡수하여 지구-대기 시스템의 복사균형(예, 복사강제력)을 변화시키는 효과를 말하며, 간접적인 효과는 에어로졸이 구름생성에 관여하여 구름알베도에 의해 복사균형을 변화시키는 효과를 말한다(Albrecht, 1989; Twomey, 1977).

간접적인 효과를 제외한 에어로졸의 직접적 복사강제력(DARF, direct aerosol radiative forcing) 결정에 있어 중요한 요인은 파장과 상대습도에 의해 결정되는 에어로졸 광학특성(산란계수, 흡수계수 등)이다(Forster et al., 2007). 에어로졸은 지구온난화를 일으키는 온실기체(CO_2, CH_4 등)와 달리 일반적으로 태양복사를 산란하여 지구냉각화에 영향을 주며, 일부 태양복사를 흡수하여 지구온난화에도 영향을 준다. 예를 들어, 질산염(nitrate, NO_3^-), 황산염(sulfate, SO_4^{2-}) 등의 수용성 에어로졸(water-soluble) 성분은 태양복사를 산란하여 음의 복사강제력을 야기시켜 지구냉각화의 원인이 되며, 검댕(BC, black carbon) 성분은 태양복사를 대기상단(TOA, top of the atmosphere)으로부터 흡수하여 대기 중에서 양의 복사강제력을 야기시켜 지구온난화의 원인이 된다(송상근과 손장호, 2014; Forster et al., 2007; Ramanathan and Carmichael, 2008; Ramana et al., 2010).

일반적으로, 에어로졸은 입자크기에 따라 대기 중 체류시간이 수 분에서 수 주 가량까지 다양하기 때문에 에어로졸 광학특성 및 기후환경변화는 시간규모(시간별, 월/계절별 등)에 따라 매우 다를 수 있다(송상근과 손장호, 2014). 또한 water-soluble, BC 등과 같은 다양한 에어로졸 화학성분들은 복사강제력에 대하여 양 또는 음의 크기에 서로 다른 영향을 미친다(Kaskaoustis et al., 2007). 따라서 시간별 그리고 에어로졸 화학성분별 농도에 따른 복사강제력 산출은 기후변화 특성을 규명하는데 중요한 정보가 될 수 있다. 그러나 국내외 선행연구 중 시간별 에어로졸 화학성분 농도 자료를 이용하여 화학성분에 따른 복사강제력의 영향을 살펴본 연구는 극히 드물다. 과거 오랫동안 에어로졸에 의한 복사강제력 산출 연구는 대부

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

분 에어로졸 전체 혹은 dust에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, 대부분 시간적으로 평균된 자료(일평균, 월평균)을 이용하여 복사강제력을 추정하였다(Yu et al., 2006). 따라서 본 연구에서는, 과거 10여 년간(2001～2014년) 제주지역 대기질 측정지점(도시)에서 관측한 시간별 에어로졸(예, PM_{10}) 농도의 시공간적 변화 특성을 분석하여 PM_{10} 농도의 장기변화 경향을 살펴보았다. 또한 최근 5년 동안(2010～2014년) 제주지역 내 시골 및 배경지점인 애월과 고산 지점에서 짧은 시간 간격(시간별 또는 약 3일)의 에어로졸 화학성분 농도 자료를 이용하여 시공간적 농도 변화 특성을 분석하고, 광학모델과 대기복사전달모델을 통하여 광학특성 및 기후환경변화(복사강제력 및 가열율 등)를 추정하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅱ. 자료 및 방법

2.1. 대상지역, 자료 및 연구방법

본 연구에서는 제주지역 에어로졸 농도의 시공간적 변화 특성 및 장기변화 경향을 살펴보기 위하여 과거 10여 년간(2001～2014년) 대기질 측정지점 3곳(이도동, 연동, 동홍동)의 PM_{10} 농도자료를 이용하였다. 또한, 에어로졸 화학성분 농도의 시공간적 변화 특성과 화학성분별 광학특성 및 기후환경변화(복사강제력 및 가열율)를 추정하기 위하여 최근 5년간(2010～2014년) 시골(애월)과 배경(고산) 지점에서의 $PM_{2.5}$, PM_{10}의 화학성분 농도자료를 이용하였다. PM_{10} 농도자료는 환경부 산하 제주지역 내 대기질 측정지점 3 곳에서 관측한 시간별 자료이며 $PM_{2.5}$, PM_{10}의 화학성분별 농도 자료는 국립환경과학원 산하 애월 대기오염집중측정소($PM_{2.5}$의 시간별 자료)와 고산측정소($PM_{2.5}$, PM_{10}의 3일 간격 자료)에서 관측한 자료이다(Fig. 1).

각 대기질 측정지점 3곳에서 PM_{10} 농도는 관측을 시작한 시점이 모두 다르므로 본 연구에서 이용된 연구기간은 측정지점별로 다르다. 즉 이도동 지점은 2001～2014년(총 14년), 연동 지점은 2007～2014년(총 8년), 동홍동 지점은 2002～2014년(총 13년)에 해당하는 자료이다. 에어로졸 화학성분 농도자료의 경우, 애월 지점에서는 2013년의 $PM_{2.5}$ 화학성분별 농도 자료를 이용하였으며, 고산 지점에서는 2010～2014년(총 5년)의 $PM_{2.5}$, PM_{10} 화학성분별 농도 자료를 이용하였다. 총 5개 지점의 지리적 위치(위·경도)는 연구기간과 함께 Table 1에 나타냈으며 각 지점의 일반적인 특성은 다음과 같다. 먼저 대기질 측정지점이 위치한 이도동, 연동은 제주도의 북쪽에 위치, 동홍동 지점은 제주도의 남쪽에 위치하고 있으며, 2014년 12월을 기준으로 각각 58,648명, 42,833명, 22,225명의 인구가 거주하고 있는 도시지역에 속한다. 한편, 애월 대기오염집중측정소는 해발 600m 산간지대의 드넓은 초지 위에 위치한 시골지점이며, 고산 측정소는 해발 72m의 해안가 언덕에 위치한 국가배경지점이다(Fig. 1).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이도동, 연동, 동홍동 지점과 같은 우리나라 대기질 측정지점에서는 미세먼지의 질량농도를 측정하기 위하여 자동측정방법인 베타선 흡수법(b-ray absorption method, BAM)을 공식적으로 사용하고 있다. 베타선 흡수법은 대기 중에 부유하고 있는 10 ㎛ 이하의 입자상 물질을 일정시간동안 여과지 위에 포집한 후, 베타선을 투과시켜 흡수·소멸되는 베타선의 차로서 입자상 물질의 질량농도를 연속적으로 측정하는 방법이다. 한편, 애월 및 고산 지점에서는 채취한 에어로졸 시료의 이온 성분을 각각 정량 분석하기 위하여 이온 크로마토그래피(ion chromatography) 분석을 사용하여 $PM_{2.5}$과 PM_{10}의 이온성분을 분석한다. 따라서 제주지역 내 대기질 측정지점(이도동, 연동, 동홍동)에서 제공받은 PM_{10} 농도와 애월 및 고산 지점에서 제공받은 $PM_{2.5}$, PM_{10} 화학성분별 농도 자료는 측정방법이 다르므로 각각 구분하여 이용되었으며, 애월 및 고산 지점의 경우 모든 분석에서 화학성분별로 분류하여 분석하였다.

에어로졸 농도의 시공간적 변화 특성은 대기질 측정지점 3 곳과 애월 및 고산 지점에서 연변화, 월/계절 변화, 주중/주말 변화, 시간변화로 분류하여 살펴보았으며, 3곳의 대기질 측정지점에서 10여 년간 PM_{10} 농도의 연평균 증가율을 살펴보기 위하여 Mann-Kendall 검정법(MK test)을 적용하여 계산하였다. MK 검정법은 연평균 데이터의 시계열 추세를 추정하기 위하여 개발된 방법으로 증가 또는 감소 경향의 선형 기울기(slope)를 추정하여 평균 증가율을 산정하는 방법이다(Anttila and Tuovinen, 2010; Simmonds et al., 2004). MK 검정법은 최소 10년 이상의 연평균 데이터가 있어야 신뢰할 수 있으므로, 본 연구에서는 이도동, 동홍동 지점에 대해서만 연구기간동안(10여 년간)의 연평균 증가율을 계산하였다.

애월 대기오염집중측정소의 $PM_{2.5}$ 시간별 화학성분 농도 자료와 고산 측정소 $PM_{2.5}$, PM_{10}의 약 3일 간격 화학성분 농도 자료는 시공간적 변화 분석뿐만 아니라 에어로졸 화학성분별 광학특성 및 기후환경변화(복사강제력 및 가열율) 영향을 추정하기 위하여 이용되었다. 에어로졸 화학성분별 광학특성 및 복사강제력을 산출하기 위하여 이용된 모델은 각각 광학모델인 OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) 모델과 대기복사전달모델인 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 모델이다. OPAC 모델과 SBDART 모델에 대한 자세한 설명은 2.2절에 제시하였다. 각 모델을 수행시 애월 지점에서는 태양이 떠있

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

는 시간 즉, 주간(daytime)에 대하여 모델을 수행하였으며, 고산 지점에서는 시간별 자료의 부재로 모든 자료를 12시로 가정하여 이용하였다. 이때 주간의 기준은 계절별 일출과 일몰의 시간을 고려하여 봄철과 가을철에는 7~18시, 여름철에는 6~19시, 겨울철에는 8~17시로 분류하였다.

두 지점에서 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성 및 복사강제력 분석은 에어로졸에 의한 직접효과만을 보기 위하여 간접효과인 구름의 효과를 무시하였는데, 이를 위하여 두 지점에서 모두 기상청 산하 종관기상관측지점(ASOS, Automated Synoptic Observing System)인 고산 기상대의 시간별 전운량 자료를 이용하였다(애월 지점 부근의 시간별 전운량 자료 부재). 애월 지점에서는 전운량이 100%인 시간의 자료는 분석에서 제외하였으며, 100% 전운량을 제외한 나머지의 시간에 대해서는 구름이 없는 맑은 하늘(cloud free sky), 즉 전운량을 0%로 가정하여 계산에 이용하였다. 반면 고산 지점에서 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 화학성분 농도 자료는 해당일의 24시간 중 전운량 100%인 시간이 18시간 이상인 날의 경우는 분석에서 제외하였으며, 나머지는 구름이 없는 맑은 하늘로 가정하여 분석에 이용하였다.

Table 1. Geographic coordinates (latitude, longitude) and study period of three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) for air pollutants, Aewol intensive air monitoring site, and Gosan site on Jeju

Measurement site	Latitude, Longitude	Study period
PM_{10} concentration		
Ido-dong	33°29′N, 126°31′E	2001-2014
Yeon-dong	33°29′N, 126°30′E	2007-2014
Donghong-dong	33°15′N, 126°34′E	2002-2014
PM_{10} and/or $PM_{2.5}$ chemical components		
Aewol	33°20′N, 126°23′E	2013
Gosan	33°17′N, 126°10′E	2010-2014

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

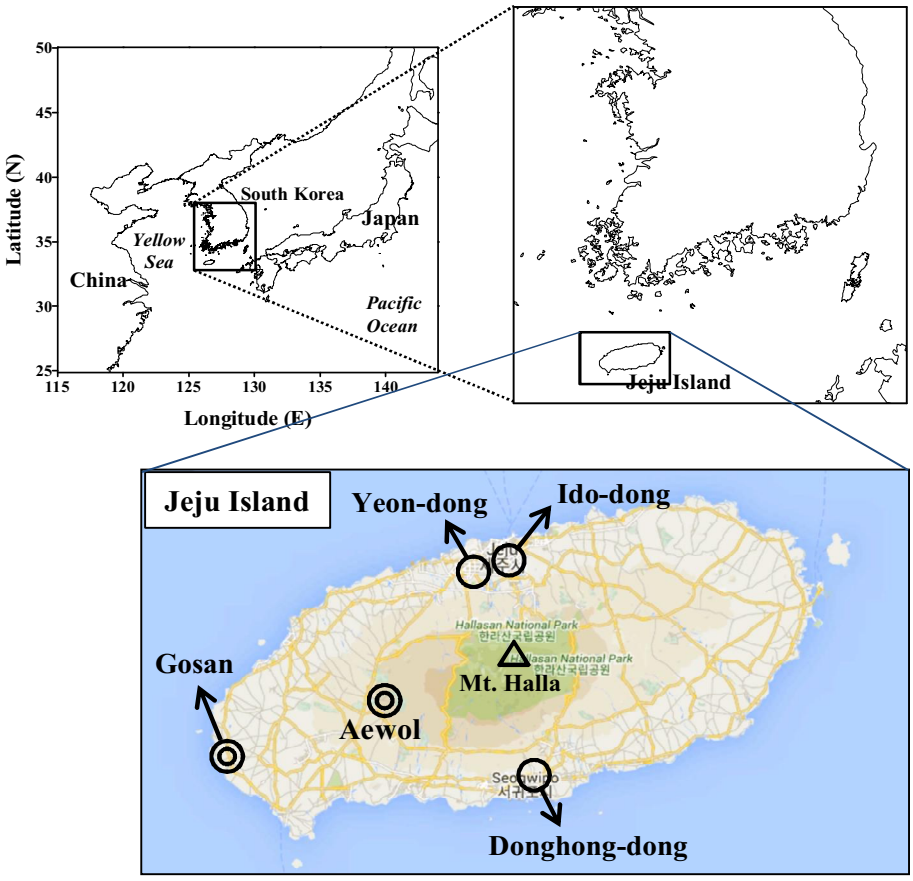


Fig. 1. Geographical locations of three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong), Aewol intensive air monitoring site, and Gosan site on Jeju

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2. 모델 구성

2.2.1. 광학 모델

본 연구에서는 각 에어로졸 화학성분별 광학특성을 산출하기 위하여 OPAC 모델을 이용하였다. OPAC 모델은 주어진 파장과 상대습도의 조건하에서 에어로졸 및 구름 성분의 광학특성(소산·산란·흡수계수, AOD (aerosol optical depth) 등)과 미세물리학적 특성을 산출하는 모델로서, 에어로졸 및 water clouds에 대하여 0.25~40 μm 범위의 61개 파장, ice clouds에 대하여 0.28~40 μm 범위의 67개 파장에 해당하는 광학특성의 산출이 가능하며, 상대습도는 8개 상대습도, 즉 0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99% 중 선택가능하다. 또한 OPAC 모델은 에어로졸의 성분에 기초하여 대륙, 도시, 사막, 해양, 북극, 남극 에어로졸로 분류하여 수행할 수 있으며, 6개 유형의 water clouds, 3개 유형의 ice clouds, 10개 유형의 에어로졸 성분(water-soluble, insoluble, BC (black carbon), sea-salt 2개 mode, mineral dust 4개 mode, sulfate droplets)에 대하여 각각의 광학특성을 산출할 수 있다. 한편, 각 에어로졸 성분들은 화학조성물들이 내부적으로 혼합되어있는 것으로 가정한다(Hess et al., 1998).

본 연구에서는 애월과 고산 지점을 대상으로 OPAC 모델을 이용하여 단파장 영역대 인 0.3~4.0 μm 범위 내의 총 24개 파장에 대한 광학특성을 산출하였다. 상대습도는 애월 지점에서 연구기간(2013년)의 시간별 상대습도와 가장 근접한 모델 내 8개의 상대습도를 서로 매칭하여 및 이용, 반면 고산 지점은 시간별 자료의 부재로 연구기간(2010~2014년)의 연평균 상대습도와 가장 근접한 상대습도를 선택하여 모델을 수행하였다. 즉, 고산 지점의 2010~2013년은 연평균 상대습도가 각각 71.5%, 73%, 70.5%, 74.5%이므로 모델 내의 70%를 선택, 2014년은 77%이므로 모델 내의 80% 상대습도를 선택하였다. 한편 애월 지점에서는 mineral dust, sulfate droplets의 측정 및 자료 부족으로 인하여 에어로졸 성분을 4가지 화학성분 즉, 수용성(water-soluble), 불용성(insoluble), 검댕(BC), 해염(sea-salt) 에어로졸로 분류하여

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

광학특성을 산출, 고산 지점에서는 mineral dust, sulfate droplets 뿐만 아니라 OC와 EC에 대한 측정이 이루어지지 않아 2가지 화학성분 즉, water-soluble(수용성 OC 제외), sea-salt에 대하여 산출하였다.

OPAC 모델 수행을 위하여 적용된 각 에어로졸 화학성분별 내부 이온조성은 다음과 같다. 먼저 water-soluble은 SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, 그리고 수용성 OC와 같은 7가지 성분들로 구성되며, 일부 성분들은 해염 및 비해염(non-seasalt, NSS) 성분으로 세분화하여 NSS 성분에 대한 질량농도만을 이용하였다. 여기서 수용성 OC는 측정이 이루어지지 않아 OC를 수용성 OC로 가정하였다. 선행연구에 따르면(박다정 등, 2014), OC 중에서 수용성 OC가 대부분의 비중을 차지한다는 연구결과가 있다. 총 4가지 NSS 성분인 NSS-SO_4^{2-}, NSS-K^+, NSS-Mg^{2+}, NSS-Ca^2의 질량농도는 $[ion]_{obs}$-[Na]×(Na^+에 대한 이온의 질량비) 관계식에 의하여 계산하였다. 여기서 Na^+에 대한 SO_4^{2-}, K^+, Mg^{2+}, Ca^2 이온의 질량비는 각각 0.252, 0.036, 0.121, 0.041을 적용하였다(Pilson, 1998). 다음으로 insoluble은 OC에 대한 유기물질(OM, organic material)의 비를 이용하였다. OC/OM 비는 계절에 따라 다르게 적용하였는데, 여름은 2.06, 겨울은 1.48, 봄과 가을은 여름, 겨울의 평균인 1.77을 이용하였다(송상근과 손장호, 2014; Bae, 2011). Sea-salt는 [Cl^-]+1.47[Na^+] 관계식으로 계산되었다(Quinn *et al.*, 2004). 마지막으로 BC는 EC 농도를 이용하였다. 총 4 가지 화학성분에 대하여 요약하면 다음과 같다.

$$[\text{Water-soluble}] = [\text{NSS-}K^+] + [\text{NSS-}Mg^{2+}] + [\text{NSS-}Ca^{2+}] + [\text{NSS-}SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [NH_4^+] + [\text{OC}] \quad (1)$$

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

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

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

OPAC 모델을 수행하기 위한 입력자료는 각 화학성분들의 수농도(number concentration)로 단일입자 당 질량농도를 이용하여 각각 계산되었다(Hess et al., 1998). 이외에도 에어로졸의 연직 프로파일은 측정의 부재로 모델에 내장된 기본값(혼합층: 0~2km, 자유대류권: 2~12km, 성층권: 12~35km 등)을 이용하였으며,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

각 에어로졸 화학성분의 수직분포가 경계층 내에서 균일한 것으로 가정하였다. 결과적으로, 본 연구에서는 각 파장에 대하여 에어로졸 화학성분별 광학특성 즉, 소산·산란·흡수계수, AOD, 단일산란알베도(SSA, single-scattering albedo), 비대칭계수(ASYM, asymmetry factor), 위상함수(phase function)를 산출하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2.2. 대기복사전달 모델

본 연구에서는 애월 및 고산지점에서 에어로졸이 직접적 복사강제력(DARF)에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Santa Barbara의 캘리포니아대학교에서 개발된 대기복사전달모델인 SBDART 모델을 이용하였다(Ricchiazziet al., 1998). SBDART 모델은 단파(0.25~4.0 μm), 장파(4.0~100 μm), 전 파장영역(0.25~100 μm)에서 DISORT (Discrete-ordinate-method)를 기반으로 하여 맑은 또는 흐린 하늘 조건에서 지구 대기 내부와 표면의 평행-평면 복사 전달을 계산하는 모델이다(Ricchiazziet al., 1998). 모델 수행을 위한 주요 매개변수는 AOD, SSA, ASYM, phase function, 지표 알베도, 대기 프로파일(기온, 기압, 오존 등), 태양 천정각(SZA, solar zenith angle)이다. 태양 천정각은 SBDART 모델의 namelist 파일인 'INPUT' 파일에 특정 날짜(Julian day), 시간(UTC), 위도 및 경도를 지정해 줌으로써 모델 내에서 계산된다. 한편, 태양 천정각 뿐만 아니라 모델링 수행을 위한 입력변수 및 조건들은 'INPUT' 파일 내에서 지정되어 복사강제력을 산출하기 위한 조건으로 이용된다. 예를 들어 본 연구에서 애월 지점의 복사강제력 산출시 이용된 INPUT 파일은 Fig. 2에 나타냈다.

SBDART 모델은 'INPUT' 파일 외에도 'aerosol.dat', 'atms.dat', 'albedo.dat', 'filter.dat', 'solar.dat', 'usrcld.dat'와 같이 모델 내에 지정된 값이 아닌 사용자에 의해 추가로 제공되어 이용 가능한 파일이 있다(Table 2). 특히 에어로졸에 의한 복사강제력을 산출할 경우에는 'aerosol.dat' 파일을 추가로 생성하여 제공해 주어야 하며, 'aerosol.dat' 파일의 입력변수로는 파장별 AOD, SSA, phase function이 필요하다. 본 연구에서는 OPAC 모델을 통하여 산출된 파장별(0.3~4.0 ㎛ 범위 중 총 24개 파장) AOD, SSA, phase function 값을 이용하였다.

본 연구에서는 애월 지점의 시간별 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도와 고산 지점의 3일 간격 $PM_{2.5}$, PM_{10} 화학성분 농도에 대하여 단파장 영역인 0.3~4.0 ㎛ 파장영역과 구름이 없는 맑은 하늘 조건 하에서 지표(SFC, surface), 대기상단(TOA, top of the atmosphere), 대기 중(ATM, atmosphere)의 복사강제력을 산출하였다. 대기프로파일은 고층 기온, 기압 등 요소의 시간별 관측자료 부족으로 모델 내에서 제공하는 US62(미국표준대기) 대기 프로파일을 이용하였으며 에어로졸의 영향만을 살펴보기

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

위하여 O_3, N_2, O_2, CO_2, CH_4, N_2O, CO 등의 오염물질들은 모델 내의 default 값(INPUT 파일 내에서 '-1')을 이용하였다.

```
 &INPUT
    isat = 0,
    nf = 2,
    wlinf = 0.3,
    wlsup = 4.0,
    wlinc = 0.005,
    sza = 0,
    csza = -1,
    iday = 365,
    time = 3,
    alat = 33.28333,
    alon = 126.1667,
    isalb = 6,
    idatm = 6,
    uw = -1,
    uo3 = -1,
    xn2 = -1,          (PPM,  default = 781000.00 )
    xo2 = -1,          (PPM,  default = 209000.00 )
    xco2 = -1,         (PPM,  default =    360.00 )
    xch4 = -1,         (PPM,  default =      1.74 )
    xn2o = -1,         (PPM,  default =      0.32 )
    xco = -1,          (PPM,  default =      0.15 )
    xnh3 = -1,         (PPM,  default =     5.0e-4)
    xso2 = -1,         (PPM,  default =     3.0e-4)
    xno = -1,          (PPM,  default =     3.0e-4)
    xhno3 = -1,        (PPM,  default =     5.0e-5)
    xno2 = -1,         (PPM,  default =     2.3e-5)
    lwp = 0.0,
    nre = 8,
    jaer = 1,
    iaer = -1,
    zout = 0, 100,
    iout = 11,
    nstr = 4,
 /
```

Fig. 2. Example of 'INPUT' file namelist in SBDART model.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2. Types and descriptions of input files available by user

Input file	Description
atms.dat	atmospheric profile
aerosol.dat	aerosol information
albedo.dat	spectral surface albedo
filter.dat	sensor filter function
solar.dat	solar spectrum
usrcld.dat	cloud vertical profile

지표 및 대기상단의 복사강제력은($DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$) 에어로졸이 있는 경우의 복사플럭스와 에어로졸이 없는 경우(즉, AOD=0)의 복사플럭스의 차로 계산이 되며, 각 복사강제력은 net flux 즉 'downward flux ($F^{\downarrow}$) - upward flux ($F^{\uparrow}$)'로 계산된다. 또한 대기 중의 직접적 복사강제력($DARF_{ATM}$)은 대기상단(TOA)의 직접적 복사강제력과 지표(SFC)의 직접적 복사강제력의 차로 계산된다. 이를 계산식으로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 F는 대기 중 에어로졸이 있는 경우의 복사플럭스를 나타내며, $F_{w/o}$는 에어로졸이 없는 경우의 복사플럭스를 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 에어로졸 농도의 시공간적 변화 경향

3.1.1. 연변화

제주지역에서 에어로졸의 시간적 변화 경향을 살펴보기 위하여 연변화, 월/계절변화, 주중/주말변화, 시간변화를 분석하였다. 이용된 자료는 과거 10여 년간(2001~2014년) 대기질 측정지점(이도동, 연동, 동홍동)의 시간별 PM_{10} 농도자료와 최근 5년간(2010~2014년) 애월 대기오염집중측정소의 시간별 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도 및 고산측정소의 3일 간격 $PM_{2.5}$, PM_{10} 화학성분 농도자료이다. 먼저 대기질 측정지점에서 PM_{10} 농도의 연변화를 보면(Fig. 3, Table 3), 지점별로는 이도동(평균 45.3 $\mu g/m^3$)에서 가장 높고 다음으로 연동(43.1 $\mu g/m^3$), 동홍동(39.9 $\mu g/m^3$) 순으로 나타났는데, 이는 2014년 12월 기준 인구 수 순위와 일치하게 나타났다(각각 58,648명, 42,833명, 22,225명). 또한 3 곳 모두 연구기간동안 PM_{10} 농도는 높고 낮음을 반복하였으며, 특히 모든 지점에서 2010년에 가장 높은 농도를(특히 이도동에서 52.4 $\mu g/m^3$), 2012년에 가장 낮은 농도를 기록하였다(특히 동홍동에서 30.5 $\mu g/m^3$). 이것은 2010년에 발생한 황사의 영향으로 PM_{10} 농도가 증가한 것으로 추정되며(예, 2010년 3월 황사, 동홍동에서 최고 2,985 $\mu g/m^3$), 2012년에는 많은 양의 강수량으로 인한 세정효과(wash-out)의 영향으로 PM_{10} 농도가 감소한 것으로 추정된다(박연희 등, 2016의 그림 3 참고). 또한 2012년에는 황사가 우리나라로 유입될 수 있는 북서풍보다 남풍계열의 바람이 많이 불어 황사의 영향이 아주 적었던 것으로 보고된 바 있다(국립기상과학원, 2012).

대기질 측정지점 3 곳(이도동, 연동, 동홍동)에 대하여 PM_{10} 농도의 연평균 증가율을 계산하기 위하여 MK 검정법을 수행해 본 결과(그림 제외), 연구기간동안 연평균 증가율은 이도동에서 -0.17 $\mu g/m^3$로 미세하게 감소하였으며, 동홍동에서 +0.14

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$\mu g/m^3$로 미세하게 증가함을 알 수 있었다. 반면, 연동은 측정된 자료의 기간이 10년이 넘지 않아 신뢰성이 낮기 때문에 연평균 증가율 계산에서 제외하였다.

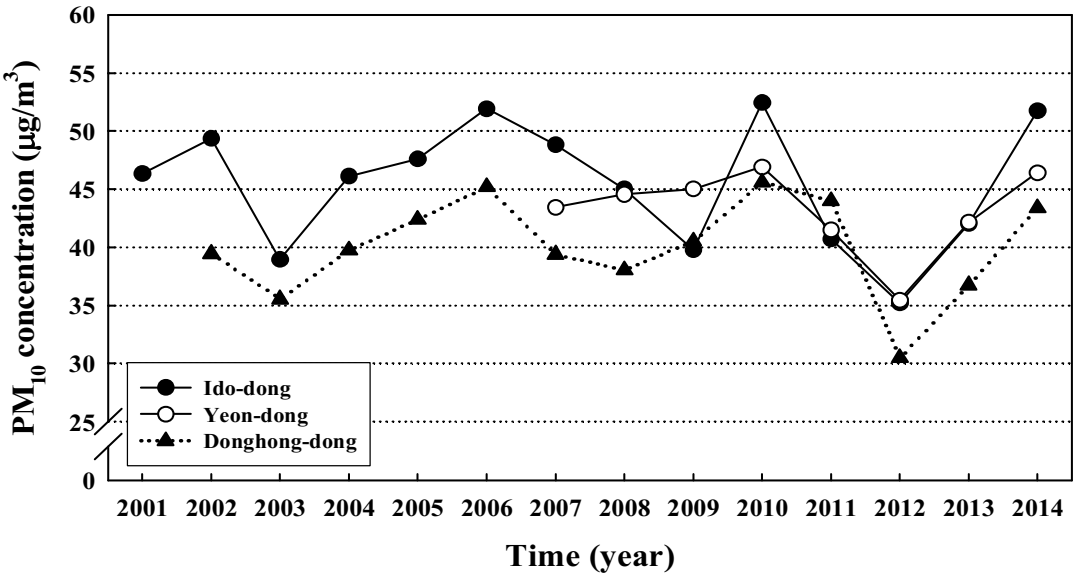


Fig. 3. Annual variations in the mean PM_{10} concentrations observed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 3. A statistical summary of PM_{10} concentration ($\mu g/m^3$) at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) in Jeju during the study period (2001-2014)

Year	Ido-dong	Yeon-dong	Donghong-dong
2001	46.3±56.0[a] 2-647[b]	-[c]	-
2002	49.3±68.2 1-1060	-	39.4±37.6 1-879
2003	38.9±27.8 1-249	-	35.5±25.0 0-260
2004	46.1±34.4 1-685	-	39.7±29.7 0-382
2005	47.6±38.4 0-780	-	42.4±31.9 0-462
2006	51.9±38.4 3-429	-	45.2±31.2 0-308
2007	48.8±52.6 1-995	43.4±65.8 0-1948	39.4±43.4 0-999
2008	45.0±33.0 1-537	44.5±38.4 1-672	38.0±34.5 0-848
2009	39.8±33.0 1-510	45.0±37.9 1-580	40.5±31.0 1-461
2010	52.4±72.7 1-2533	46.9±72.2 0-2857	45.6±79.5 1-2985
2011	40.7±36.8 1-663	41.5±49.8 1-961	44.0±53.1 1-1027
2012	35.2±28.8 1-258	35.4±26.0 1-278	30.5±23.4 1-199
2013	42.0±31.5 0-290	42.2±31.4 1-290	36.7±26.9 3-272
2014	51.7±36.9 0-366	46.2±30.1 0-326	41.8±29.8 3-310
Total	45.3±44.6 0-2533	43.1±46.8 0-2857	39.9±39.8 0-2985

[a]Mean±standard deviation.

[b]Min-Max

[c]Not measured.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

애월 지점에서는 $PM_{2.5}$ 화학성분별 농도의 연변화는 water-soluble 성분의 농도가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 insolulble, sea-salt, BC 순으로 나타났다(Fig. 4(a)). 고산 지점 $PM_{2.5}$, PM_{10}의 경우 water-soluble 성분의 농도가 높게 나타났으며, sea-salt 성분은 비교적 매우 낮게 나타났다(Figs. 4(b), (c)). 고산 지점의 에어로졸 화학성분 중 Water-soluble 성분은 2012년에 가장 높은 농도를 보였는데, 이것은 2012년의 많은 강수에 의해 입자가 흡습성장하여 농도가 증가한 것으로 추정된다(박종성 등, 2015; Yan et al., 2009). 한편, 고산 지점의 PM_{10} water-soluble은 $PM_{2.5}$ 즉 2.5 ㎛ 이하의 크기를 가진 입자가 지배적인 것으로 나타났는데(2012년에 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율이 최대 83%), 이는 water-soluble 성분의 가장 많은 부분을 차지하는 SO_4^{2-}와 NH_4^+ 이온이 대부분 미세입자(2.5 ㎛ 이하) 영역에 존재하기 때문이다(강공언 등, 2008). 반면 sea-salt 성분은 주로 조대입자(2.5~10 ㎛) 영역에 속하기 때문에 PM_{10} 농도에 비해 $PM_{2.5}$의 농도가 매우 낮게(20% 이내) 나타났다(홍상범 등, 2011).

서울을 대상으로 한 선행연구와 비교하면(송상근과 손장호, 2014), 애월 및 고산 지점의 $PM_{2.5}$의 경우 sea-salt 성분을 제외한 모든 성분(water-soluble, insoluble, BC)의 농도가 서울지점의 50% 이내의 농도를 나타내고 있는 반면 sea-salt 농도는 서울지점(0.8 ㎍/m^3)에 비해 유사하거나 높게 나타났다(애월 및 고산 지점에서 각각 1.43, 0.81 ㎍/m^3). 이는 4 면이 바다로 둘러싸여 있는 제주지역의 지리적 특성 때문인 것으로 사료된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

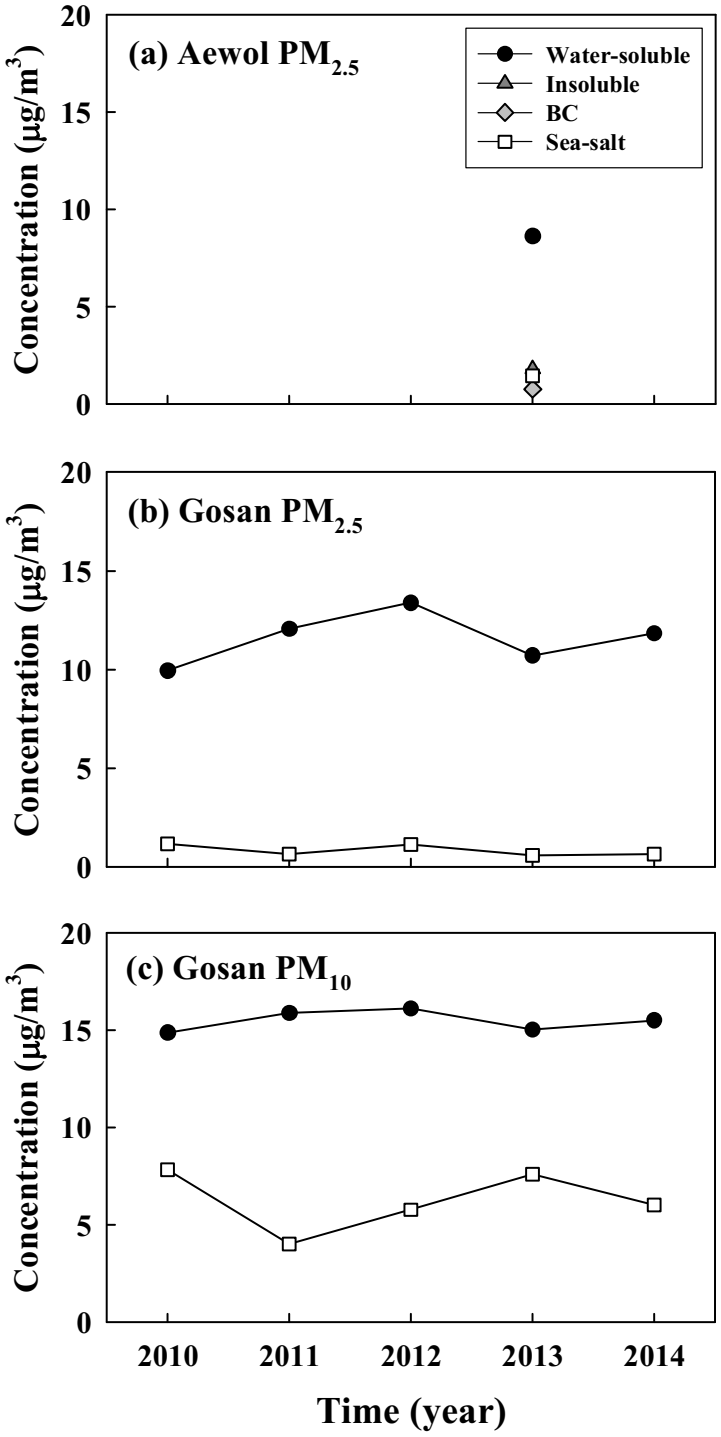


Fig. 4. Annual variations in the mean concentrations of aerosol chemical components in (a) $PM_{2.5}$ observed at Aewol site and in (b) $PM_{2.5}$ and (c) PM_{10} observed at Gosan site during 2010-2014.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.2. 월/계절 변화

Fig. 5는 대기질 측정지점 3곳(이도동, 연동, 동홍동)에서 관측한 PM_{10} 농도의 월/계절변화를 나타낸 것이다. 모든 지점에서 PM_{10} 농도는 3~5월, 즉 봄철에 가장 높은 농도를 보이고 6~9월, 즉 여름철 혹은 초가을에 가장 낮은 농도를 보였다. 이는 봄철에 잦은 황사에 의해 PM_{10} 농도가 증가하였으며, 여름철에 많은 강수량에 의한 세정효과와 많은 일사량으로 인한 대기혼합고의 상승이 PM_{10} 농도 감소에 기여한 것으로 추정된다(박연희 등, 2016; 이시혜 등, 2008; 한국환경정책·평가 연구원, 2012).

애월 지점에서 $PM_{2.5}$ 화학성분별 농도의 월/계절변화는 sea-salt를 제외한 대부분의 화학성분이 봄철(5월에 총 21.2 $\mu g/m^3$)에 높게 관측되었으며, 가을철에 낮게 관측되었다(특히 10월에 총 8.2 $\mu g/m^3$)(Fig. 6(a)). 봄철의 높은 농도는 대기질 측정지점과 마찬가지로 황사의 영향인 것으로 사료된다. 반면 일반적으로 풍속이 강하고 강수량이 적은 겨울철에 높은 농도를 보이는 sea-salt 성분은 여름철 혹은 이른 가을철(7~9월)에 높은 농도를 보였는데(홍상범 등, 2011), 이는 2013년 7~9월 기간에 평년대비 매우 적었던 강수량이 sea-salt 농도 증가에 기인한 것으로 사료된다. 예를 들어, 2013년 7월에 제주지역은 평년대비 4%의 강수량을 기록하였고, 8월과 9월에 각각 전국평균 평년대비 60%, 16%로 매우 적은 강수량이 관측된 바 있다(기상청, 2014).

고산 지점(2010~2014년) $PM_{2.5}$와 PM_{10} 화학성분별 농도의 월/계절변화에서 water-soluble 성분은 봄철뿐만 아니라 겨울철과 6월에도 높은 농도를 보였다(Figs. 6(b), (c)). 일반적으로 겨울철에는 복사가열이 약해지면서 대기혼합고가 낮아질 뿐만 아니라 난방연료의 사용량이 증가하면서 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도가 증가한다(한국환경정책·평가 연구원, 2012). 이외에도 연구기간 중 1월에 베이징을 중심으로 심각한 수준(993 $\mu g/m^3$)의 스모그 현상이 발생하였고(2013년) 2월에는 연무사례(2011년) 및 전국에서 최대 75시간 계속된 초미세먼지주의보 사례(2014년), 6월에는 평년대비 50% 강수량을 기록한 바(2014년), 월평균 농도 증가에 일부 영향을 주었을 것으로 보인다(기상청, 2015). 고산 지점에서 sea-salt 성분은 풍속이 강하고 강수량이 적은 겨울철에 가장 높은 농도를 보이는 일반적인 특성을 잘 나타냈으며, 2013년 여름철

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

적었던 강수량에 의해 여름철 농도가 비교적 높게 나타났다(특히 PM_{10}).

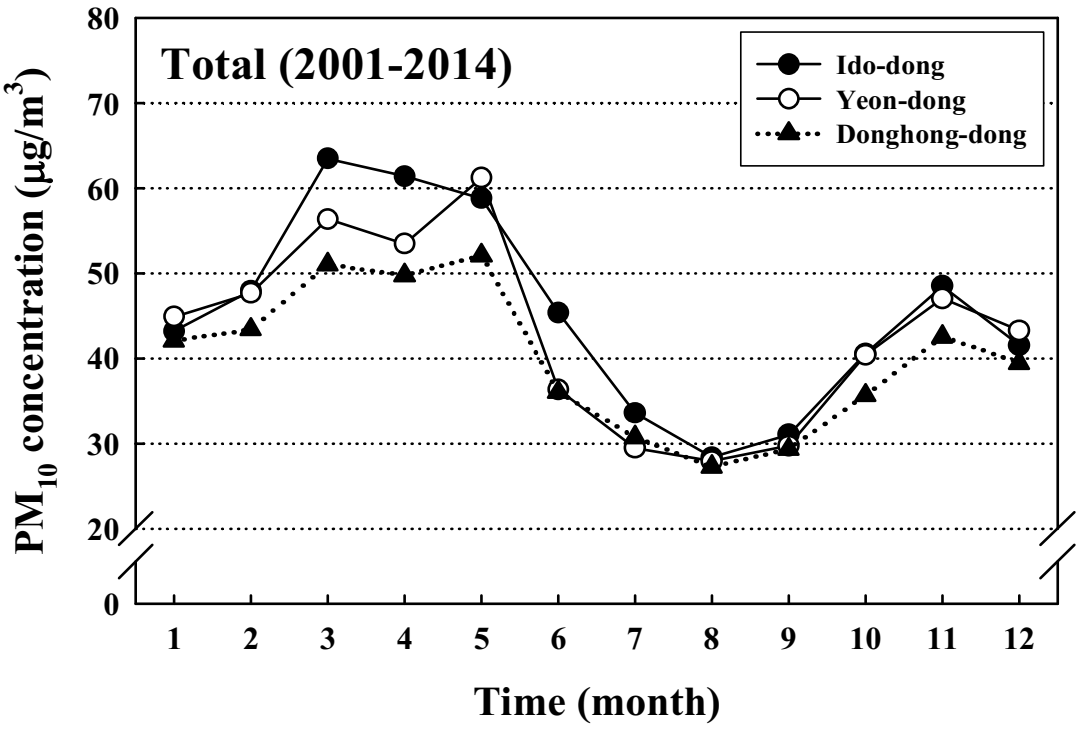


Fig. 5. Same as Fig. 3 but for the monthly mean concentrations of PM_{10}.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

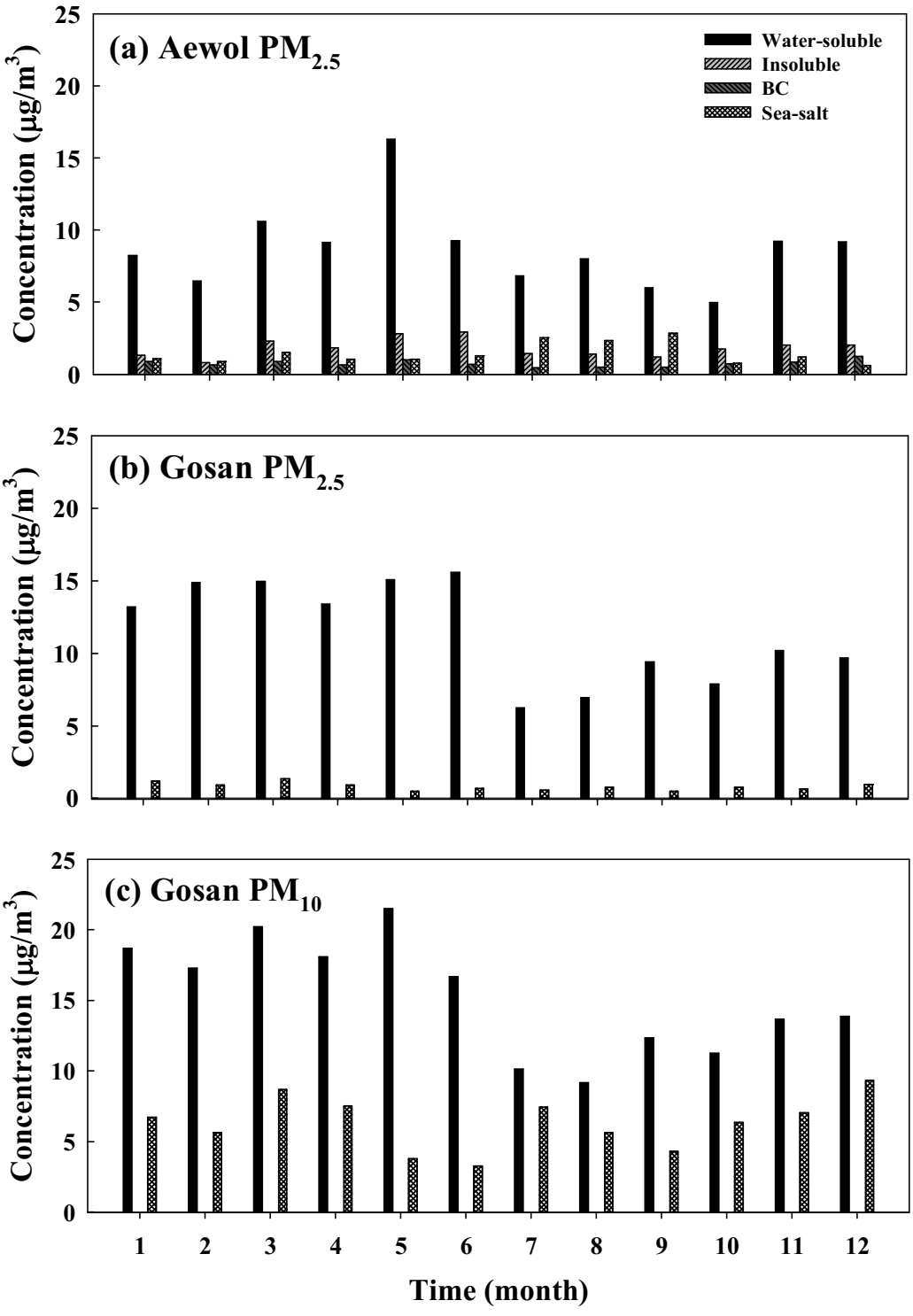


Fig. 6. Same as Fig. 4 but for the monthly mean concentrations of aerosol chemical components.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.3. 주중/주말 및 시간 변화

일반적으로 오염물질의 주중/주말의 농도 변화는 자연적인 요인보다 산업 활동 등의 인위적인 요인으로 인해 발생한다(Cerveny and Coakley, 2002). 본 연구에서는 월요일부터 금요일까지를 주중, 토요일과 일요일을 주말로 구분하여 주중/주말의 농도 변화를 살펴보았으며, 하루 24시간 동안의 농도변화 즉, 시간변화를 살펴보았다. 대기질 측정지점 3 곳(이도동, 연동, 동홍동)에서 PM_{10} 농도의 주중/주말 변화는 모두 주중에 주말보다 미세하게 높은 농도를 나타내었다(Fig. 7). 이는 일반적인 도시 지역의 주중/주말 농도 특성으로 제주지역 내 도시지역에 위치한 대기질 측정지점 3 곳은 주중이 주말에 비해 인위적 산업 활동(많은 교통량 등)이 많아 주중의 농도가 주말에 비해 상대적으로 높은 것으로 보인다(전병일, 2010; 이수정 등, 2016; Qin et al., 2004). 하지만 주중과 주말의 PM_{10} 농도의 차이가 크지 않은 것은 주말에도 주중만큼 차량이동 등의 인위적 활동이 많았을 가능성이 있으며, 제주지역 내에 주로 주중에 가동되는 공장 등 공업지역이 많지 않기 때문이라고 추정된다.

대기질 측정지점에서 PM_{10} 농도의 시간변화는 모든 지점에서 2번의 농도 peak를 나타내는 유사한 패턴을 보였다. 농도의 peak는 약 7~10시와 약 17~21시 사이의 농도가 증가하면서 나타났는데 이는 모두 출·퇴근 시간대(rush hour)와 일치함을 알 수 있었다(Fig. 8). 앞서 설명한 것과 마찬가지로 대기질 측정지점은 모두 도시지역에 위치해 있어 많은 차량의 영향(차량에서 배출되는 오염물질, 차량 운행으로 인한 도로 재비산(再飛散) 먼지)으로 출·퇴근 시간대에 PM_{10} 농도가 눈에 띄게 증가한 것으로 추정된다(전병일, 2010; 한국환경정책·평가 연구원, 2012).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

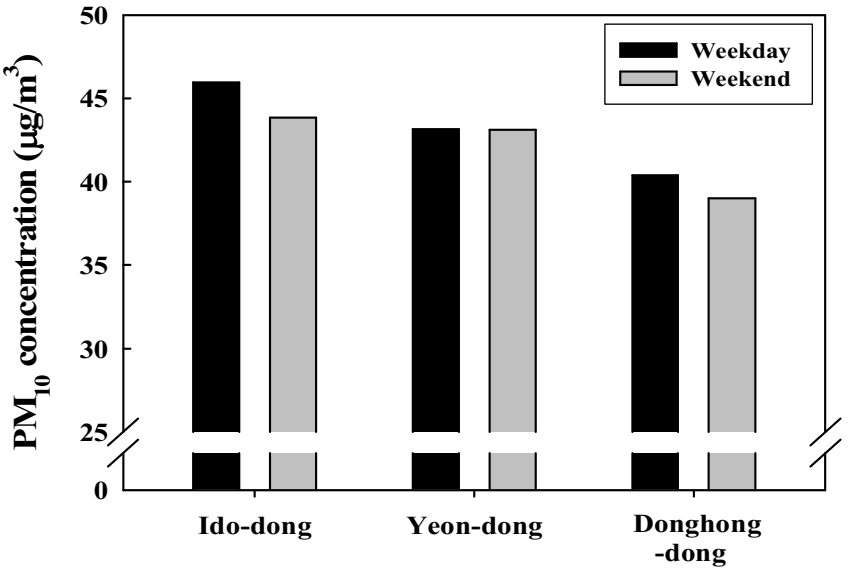


Fig. 7. Weekday and weekend variations in the mean PM_{10} concentrations observed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014.

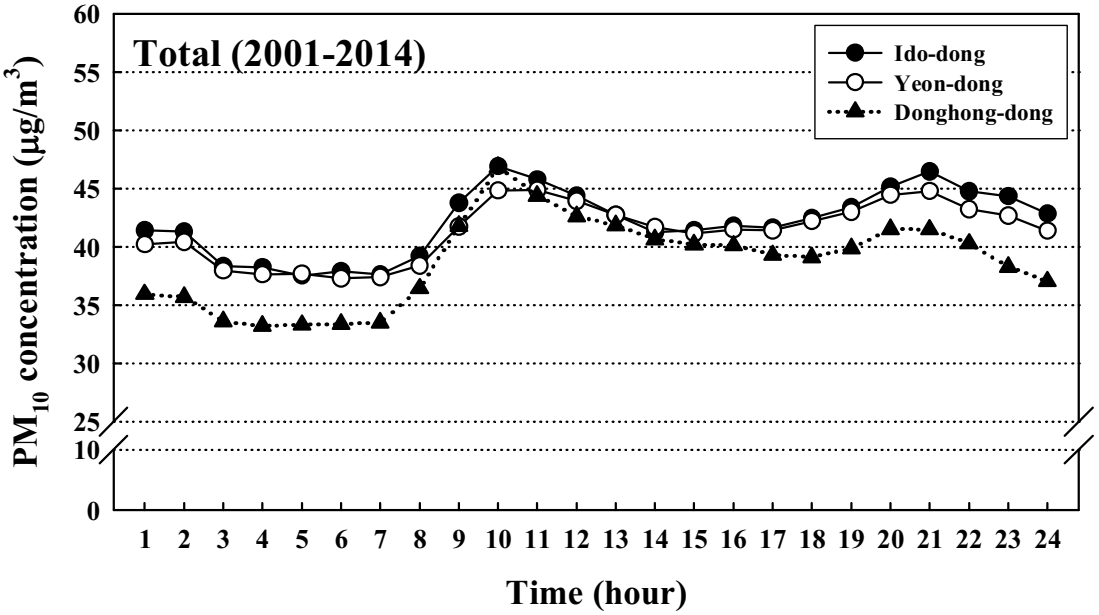


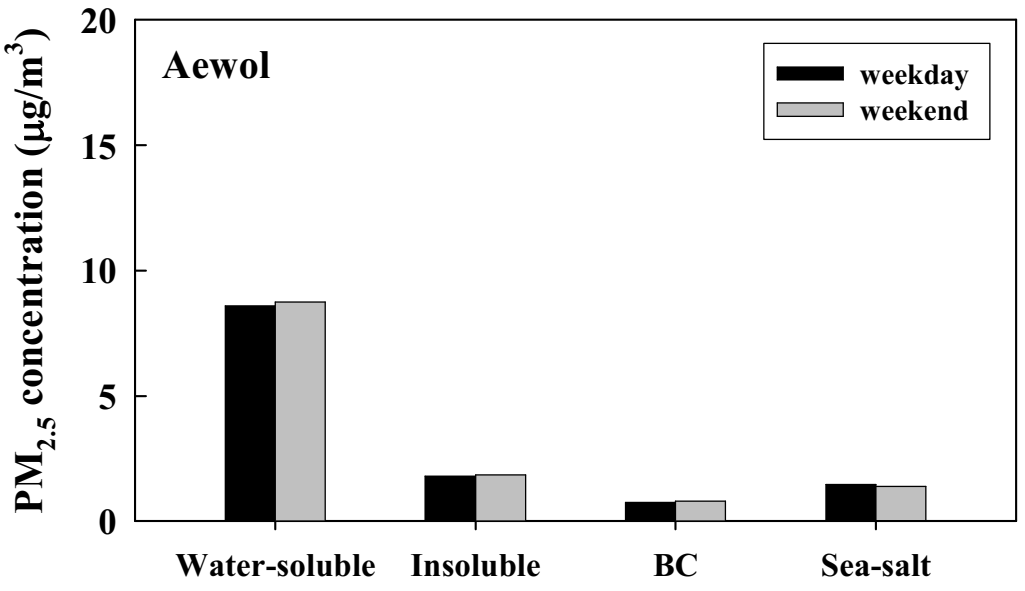
Fig. 8. Diurnal variations in the mean PM_{10} concentrations observed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

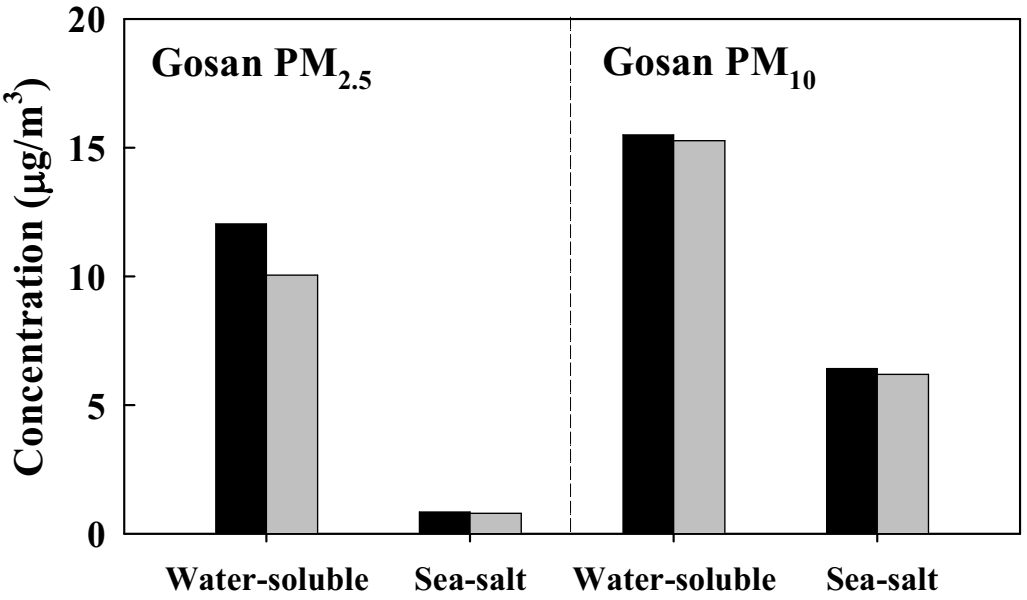
애월 지점에서 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도의 주중/주말 변화(Fig. 9(a))는 sea-salt 성분을 제외한 모든 성분에서 주말의 농도가 주중의 농도보다 매우 유사하게 나타났는데, 이는 인위적 배출원이 적어 농도변화가 크지 않은 배경 혹은 시골 지역의 일반적인 특성을 잘 나타낸 것으로 보인다. 반면, 고산 지점의 $PM_{2.5}$, PM_{10} 화학성분 농도의 경우는 배경지점임에도 불구하고 주중의 농도가 주말에 농도에 비해 높게 관측되었다(Figs. 9(b), (c)). 고산 지점에서의 각 연도별(2010~2014년) $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 총 질량농도의 주중/주말변화를 살펴본 결과(그림 제외), 2010년과 2011년의 경우 주말의 농도가 주중에 비해 높게 나타난 반면(특히 2010년에 PM_{10}의 경우 7.1 $\mu g/m^3$ 차이, 그림 제외), 2012~2014년의 경우 주중의 농도가 주말에 농도에 비해 높게 나타났다(특히 2014년에 PM_{10}의 경우 7.9 $\mu g/m^3$ 차이, 그림 제외). 이는 최근으로 올수록 고산 지점 부근의 주중 관광객 증가(차량이동 증가) 등에 따른 화석연료 사용이 증가하였을 가능성이 있다.

에어로졸 화학성분별 시간변화는 고산지점에서 시간별 자료의 부재로 인해 애월 지점의 $PM_{2.5}$에 대해서만 분석하였다(Fig. 10). 대기질 측정지점에서는 농도의 시간에 따른 변화(peak 등)가 눈에 띄게 보이는 반면, 애월 지점에서는 모든 화학성분별 농도의 시간변화 폭이 크지 않았다. 애월 지점은 넓은 초지에 위치해 있어 차량 배출가스와 같은 화석연료 연소의 영향을 비교적 적게 받은 것으로 추정된다. 한편, 하루 중 낮 시간(14~15시 혹은 18시)에 가장 높은 농도를 보였는데, 이것은 오후시간대에 광화학 반응이 활발히 일어나기 때문에 높은 농도를 보인 것으로 사료된다(Shon et al., 2013). 예를 들어, water-soluble 성분은 주로 태양복사가 존재하는 오후시간대에 water-soluble 성분 중 NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+의 전구물질인 HNO_3, SO_2, NH_3의 기체와 입자사이의 광화학 반응에 의해 생성된다(Shon et al., 2013).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a)



(b)

Fig. 9. Weekday and weekend variations in the mean concentrations of aerosol chemical components in (a) $PM_{2.5}$ at Aewol site in 2013 and in (b) $PM_{2.5}$ and (c) PM_{10} at Gosan site in 2010-2014.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

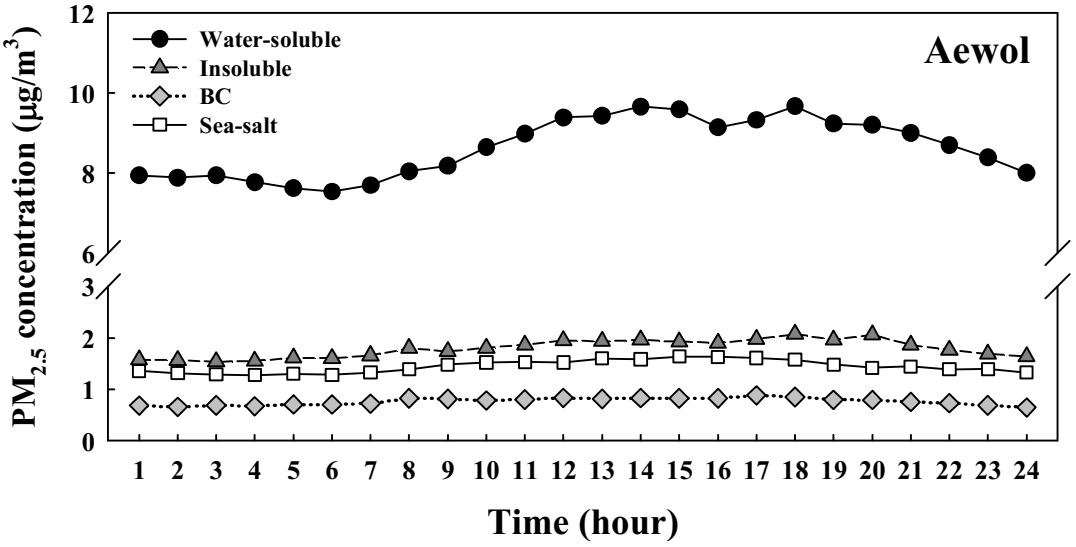


Fig. 10. Diurnal variations in the mean concentrations of aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ observed at Aewol site in 2013.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2. 에어로졸 화학성분별 광학특성

본 연구에서는 에어로졸 광학모델인 OPAC 모델 수행을 통해 시골(애월) 및 배경지점(고산)에서 주간의 에어로졸 화학성분별 광학특성(흡수(σ_{ab}), 산란(σ_{sc}), 소산계수(σ_{ex}), SSA, AOD (τ_{500}))을 산출하였다. Table 4는 애월 지점의 $PM_{2.5}$ 화학성분별 광학특성(흡수, 산란, 소산계수) 및 농도를 계절변화로 나타낸 것으로 전반적으로 계절과 상관없이 water-soluble 성분이 가장 높게 나타났으며(특히, 산란계수에서 85~94%의 기여도), 다음으로 insoluble, sea-salt, BC 순으로 나타났다(BC의 흡수계수 제외). BC 성분의 경우, 태양복사의 가시광선과 근적외선을 잘 흡수하는 성질이 있어 농도가 가장 낮음에도 불구하고 흡수계수의 값이 가장 높게 나타났다(송상근과 손장호, 2014). 대부분의 화학성분들이 봄철에 높은 농도와 광학특성 값을 나타낸 반면 sea-salt 성분의 농도 및 광학특성은 여름철에 가장 높게 나타났다. 이는 농도 월변화에서 설명했듯이 2013년 여름철 및 이른 가을철에 평년대비 강수량이 매우 적었기 때문인 것으로 보인다(기상청, 2014). 한편 sea-salt 성분은 흡수계수에서 매우 작은 기여도를 보였다(<0.001 Mm^{-1}).

고산 지점에서 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10}의 화학성분별 광학특성 및 농도의 계절변화는 각각 Table 5과 Table 6에 나타냈으며, 모든 광학특성은 계절과 상관없이 sea-salt에 비하여 water-soluble 성분이 높게 나타났다($PM_{2.5}$ 산란 또는 소산계수에서 최대 58배). 전체 연구기간(2010~2014년)에 대하여 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10}의 water-soluble 성분은 봄철에 가장 높게 나타난 반면, sea-salt 성분은 겨울철에 가장 높게 나타났다. 이는 봄철 황사에 의해 높은 농도를 나타내는 water-soluble 성분과 겨울철 적은 강수와 강한 풍속에 의해 높은 농도를 나타내는 sea-salt 성분의 일반적인 특성으로 인하여 광학특성(산란, 소산계수) 값 또한 높아진 것으로 판단된다(송상근과 손장호, 2014; 기상청, 2014). 한편 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} water-soluble의 광학특성은 농도변화(2012년에 가장 높음)와 달리 2014년에 가장 높게 나타났다. 이는 상대습도 조건의 차이로, 2014년은 다른 연도에 비해 높은 상대습도(80%)의 조건으로 광학특성을 산출하였는데, 상대습도는 water-soluble 입자를 흡습 성장시켜 에어로졸 산란 및 소산 계수를 증가시킨다(박종성 등, 2015; Yan et al., 2009).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 4. Concentrations of aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ and their optical properties at a wavelength of 500 nm estimated by OPAC model at the Aewol site in 2013

Component	Concentration ($\mu g/m^3$)				Optical property		
	Spring	Summer	Fall	Winter	σ_{ab} (Mm^{-1})	σ_{sc} (Mm^{-1})	σ_{ex} (Mm^{-1})
Water-soluble	14±12[a]	8.1±8.0	7.2±6.4	8.9±9.2	1.43/0.85/0.76/0.94[b]	129/79.8/48.2/54.9	130/80.7/49.0/55.8
Insoluble	2.4±1.6	1.7±1.5	1.7±1.2	1.6±1.4	0.24/0.17/0.17/0.16	0.62/0.45/0.44/0.41	0.86/0.62/0.62/0.57
BC	0.9±0.6	0.6±0.4	0.7±0.5	1.1±1.1	7.49/4.54/6.01/9.12	2.18/1.32/1.75/2.66	9.67/5.87/7.77/11.8
Sea-salt	1.3±0.7	2.3±1.0	1.6±1.4	0.9±0.4	< 0.001	5.87/12.4/6.36/3.18	5.87/12.4/6.36/3.18

[a] Mean±standard deviation.

[b] Spring/summer/fall/winter values.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5. Concentrations of aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ and their optical properties at a wavelength of 500 nm estimated by OPAC model at the Gosan in 2010-2014

Year	Component	Concentration ($\mu g/m^3$)				Optical property		
		Spring	Summer	Fall	Winter	σ_{ab} (Mm^{-1})	σ_{sc} (Mm^{-1})	σ_{ex} (Mm^{-1})
2010	Water-soluble	12±5.8	10±8.4	9.6±8.6	7.7±6.2	1.23/1.05/1.01/0.81*	77.7/66.2/63.7/51.2	78.9/67.3/64.8/52.1
	Sea-salt	1.2±1.6	0.6±0.2	0.8±0.7	1.9±1.9	< 0.001	4.63/2.25/3.06/7.50	4.63/2.25/3.06/7.50
2011	Water-soluble	11±5.6	9.3±7.5	11±6.1	16±12	1.18/1.25/1.13/1.64	74.1/78.9/71.4/103	75.3/80.1/72.6/105
	Sea-salt	0.7±0.5	0.5±0.5	0.6±0.5	0.7±0.4	< 0.001	2.66/1.81/2.37/2.79	2.66/1.81/2.37/2.79
2012	Water-soluble	19±13	8.6±5.6	11±7.5	17±13	1.95/0.91/1.15/1.78	123/57.1/72.4/112	125/58.1/73.5/114
	Sea-salt	1.1±0.5	1.5±0.9	1.1±0.7	1.0±0.8	< 0.001	4.12/5.82/4.21/3.74	4.12/5.82/4.21/3.74
2013	Water-soluble	18±13.4	6.3±4.1	6.4±3.8	11±10	1.93/0.66/0.67/1.18	122/41.9/42.3/74.5	124/42.6/43.0/75.6
	Sea-salt	0.9±0.8	0.4±0.3	0.2±0.1	0.9±0.9	< 0.001	3.40/1.55/0.94/3.28	3.40/1.55/0.94/3.28
2014	Water-soluble	16±10	16±7.8	7.4±3.8	11±11	1.68/1.65/0.78/1.12	127/126/59.7/85.4	130/127/60.4/86.5
	Sea-salt	0.7±0.3	0.5±0.4	0.5±0.6	0.8±0.5	< 0.001	3.04/2.18/2.51/3.78	3.04/2.18/2.51/3.78
Total	Water-soluble	15±9.8	9.5±6.9	9.0±6.5	12±11	1.53/1.00/0.94/1.26	101/67.3/61.8/84.1	103/68.3/62.8/85.4
	Sea-salt	0.9±0.9	0.7±0.6	0.6±0.6	1.0±1.1	< 0.001	3.49/2.68/2.59/4.10	3.49/2.68/2.59/4.10

[a] Mean±standard deviation.

[b] Spring/summer/fall/winter values.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6. Same as Table 5 but for aerosol chemical components in PM_{10}

Year	Component	Concentration ($\mu g/m^3$)				Optical property		
		Spring	Summer	Fall	Winter	σ_{ab} (Mm^{-1})	σ_{sc} (Mm^{-1})	σ_{ex} (Mm^{-1})
2010	Water-soluble	17±12	11±9.3	14±12	15±12	1.8/1.25/1.52/1.46*	114/78.9/95.6/92.15	116/80.2/97.0/93.5
	Sea-salt	9.6±10	5.4±3.8	6.6±6.3	8.9±6.6	< 0.001	36.8/20.3/25.9/34.1	36.8/20.3/25.9/34.1
2011	Water-soluble	18±10	12±8.6	13±6.4	17±13	2.04/1.41/1.41/1.81	128/89.2/89.1/113.8	131/90.4/90.6/116
	Sea-salt	3.7±2.8	3.7±2.6	4.5±3.2	4.2±3.1	< 0.001	15.2/18.0/17.3/16.9	15.2/18.0/17.3/16.9
2012	Water-soluble	22±12	10±5.9	12±8.6	20±15	2.44/1.08/1.33/2	154/68.0/84.0/126	156/69.1/85.3/128
	Sea-salt	5.4±3.9	5.0±3.2	6.8±4.4	5.9±4.8	< 0.001	21.2/20.1/27.2/23.9	21.2/20.1/27.2/23.9
2013	Water-soluble	23±17	12±8	10±5.8	14±12	2.58/1.38/1.11/1.51	163/87.0/69.9/95.4	166/88.4/71.0/96.9
	Sea-salt	7.8±6.9	9.0±8.2	5.9±4.8	7.5±6.2	< 0.001	28.2/39.2/23.2/30.4	28.2/39.2/23.2/30.4
2014	Water-soluble	20±14	13±9.8	11±6.0	17±13	2.36/1.95/1.11/1.78	180/149/84.4/135	183/150.7/85.5/137
	Sea-salt	4.5±3.9	3.0±2.3	5.9±5.5	10±10	< 0.001	21.4/14.0/27.6/47.9	21.4/14.0/27.6/47.9
Total	Water-soluble	20±13	12±8.3	12±8.7	16±13	2.24/1.39/1.30/1.70	147/92.7/84.9/113	150/94.1/86.2/115
	Sea-salt	6.2±6.5	5.4±5.3	6.1±5.1	7.5±7.2	< 0.001	24.6/23.7/24.8/31.9	24.6/23.7/24.8/31.9

[a] Mean±standard deviation.

[b] Spring/summer/fall/winter values.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

에어로졸 광학특성 중 AOD는 대기 중 에어로졸에 의한 복사의 감쇠(산란 또는 흡수) 정도를 나타내는 지표로서 광학특성 중 일반적으로 복사영향을 정량화하기 위하여 분석하는 변수이다. 본 연구에서는 연구대상지점에서의 AOD를 자세히 살펴보고자 월/계절 변화 및 시간변화를 분석하였다. 먼저 애월 및 고산 지점에서 에어로졸 화학성분별 AOD (500 nm)의 월/계절 변화는 Fig. 11에 나타냈다. AOD는 애월과 고산 지점에서 모두 sea-salt를 제외한 모든 화학성분이 봄철(특히 애월 지점에서 $PM_{2.5}$ water-soluble 성분의 AOD 값이 5월에 0.36)에 가장 높게 나타났으며 water-soluble 성분이 지배적인 것으로 나타났다(전체 화학성분의 51~80%). Sea-salt 성분의 AOD 값은 농도변화와 마찬가지로 애월 지점에서는 여름철에, 고산 지점에서는 겨울철에 높은 값을 나타냈다. 애월 지점의 5월(월평균 상대습도 85%)은 3, 4월(각각 75%, 71%)에 비해 높은 상대습도를 나타내 water-soluble 성분의 흡습 성장으로 인해 높은 AOD 값을 나타냈다(5월 상대습도 70%일 경우 AOD 값에 비해 0.13 증가(그림 제외)).

Fig. 12은 애월 지점에서 하루 중 주간의 화학성분별 AOD (500 nm) 및 농도의 시간변화를 나타낸 것이다. 각 화학성분별 AOD의 시간변화는 모두 봄철에 가장 큰 값을 보였으며, 봄철과 여름철의 오전을 제외한 모든 시간대에 대하여 농도변화와 매우 유사한 경향을 보였다. 또한 AOD는 대부분 낮(약 12~15시)에 peak를 보였는데(특히, water-soluble 성분), 이것은 태양복사가 가장 강한 낮에 광화학반응이 활발해져 농도가 높아지고 그에 따라 AOD의 값이 커진 것으로 사료된다(특히, water-soluble 성분)(Shon et al., 2013). 봄철과 여름철의 오전에는 상대습도가 비교적 높아 농도의 흡습성장에 의해 AOD 값이 증가한 것으로 보인다. 특히 여름철 6시(상대습도 91%)에는 상대습도가 70%일 때의 AOD 값과 비교시, 전체 화학성분에 대하여 AOD 값이 0.17 증가한 것으로 추정되었다(그림 제외). 한편, BC 성분의 AOD의 경우, 차량이동 등과 같은 인위적인 요인에 의해 오전에 높은 값을 보인다는 선행연구의 결과와는 달리(Allen et al., 1999; Kondo et al., 2014), 애월 지점은 시골 지역에 위치해 있어 차량 등 인위적인 요인의 영향이 적기 때문에 이러한 경향을 보이지 않았다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

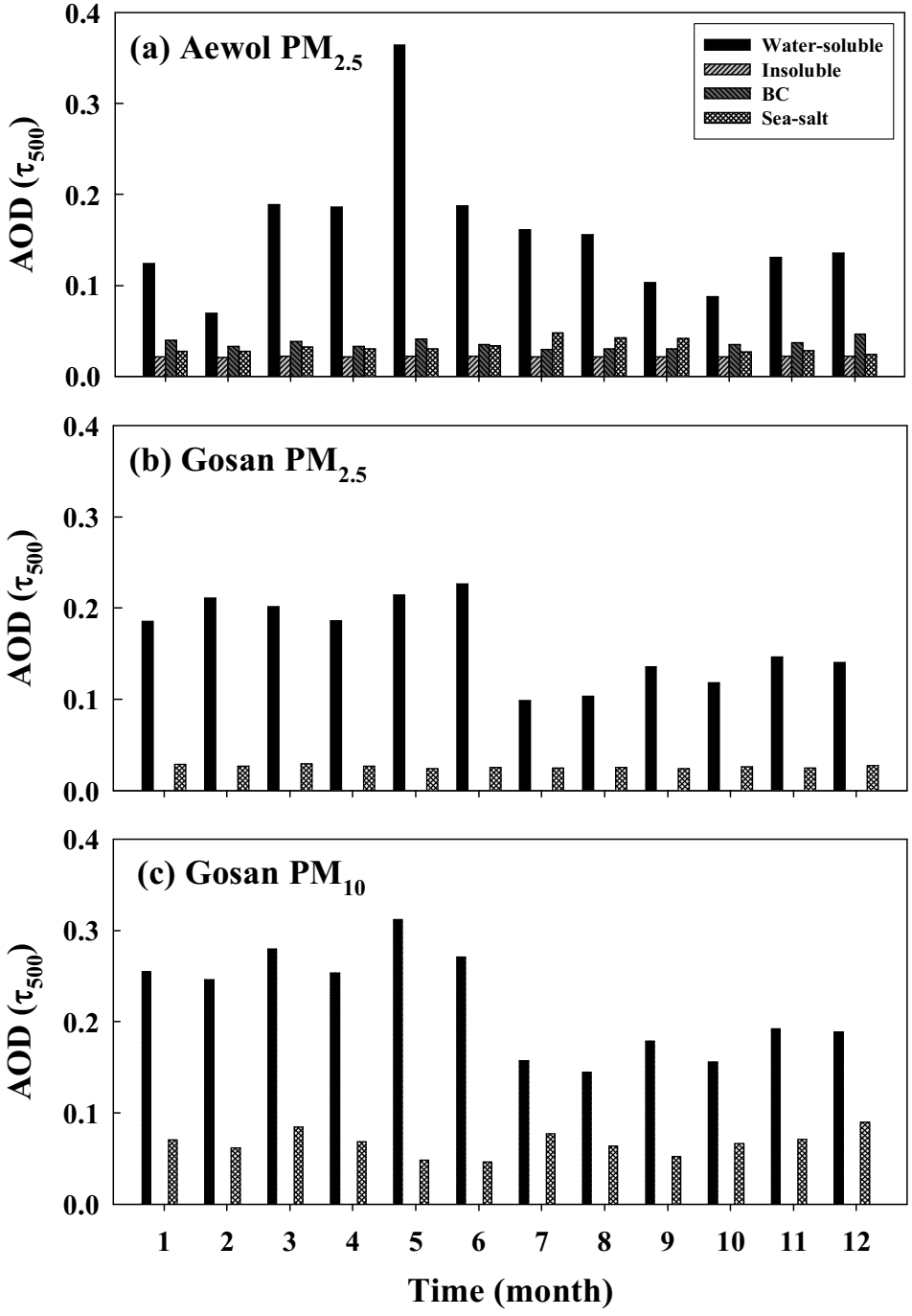


Fig. 11. Monthly variations of AOD at a wavelength of 500 nm for each aerosol chemical component in (a) $PM_{2.5}$ at the Aewol site in 2013 and in (b) $PM_{2.5}$ and (c) PM_{10} at Gosan site in 2010-2014.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

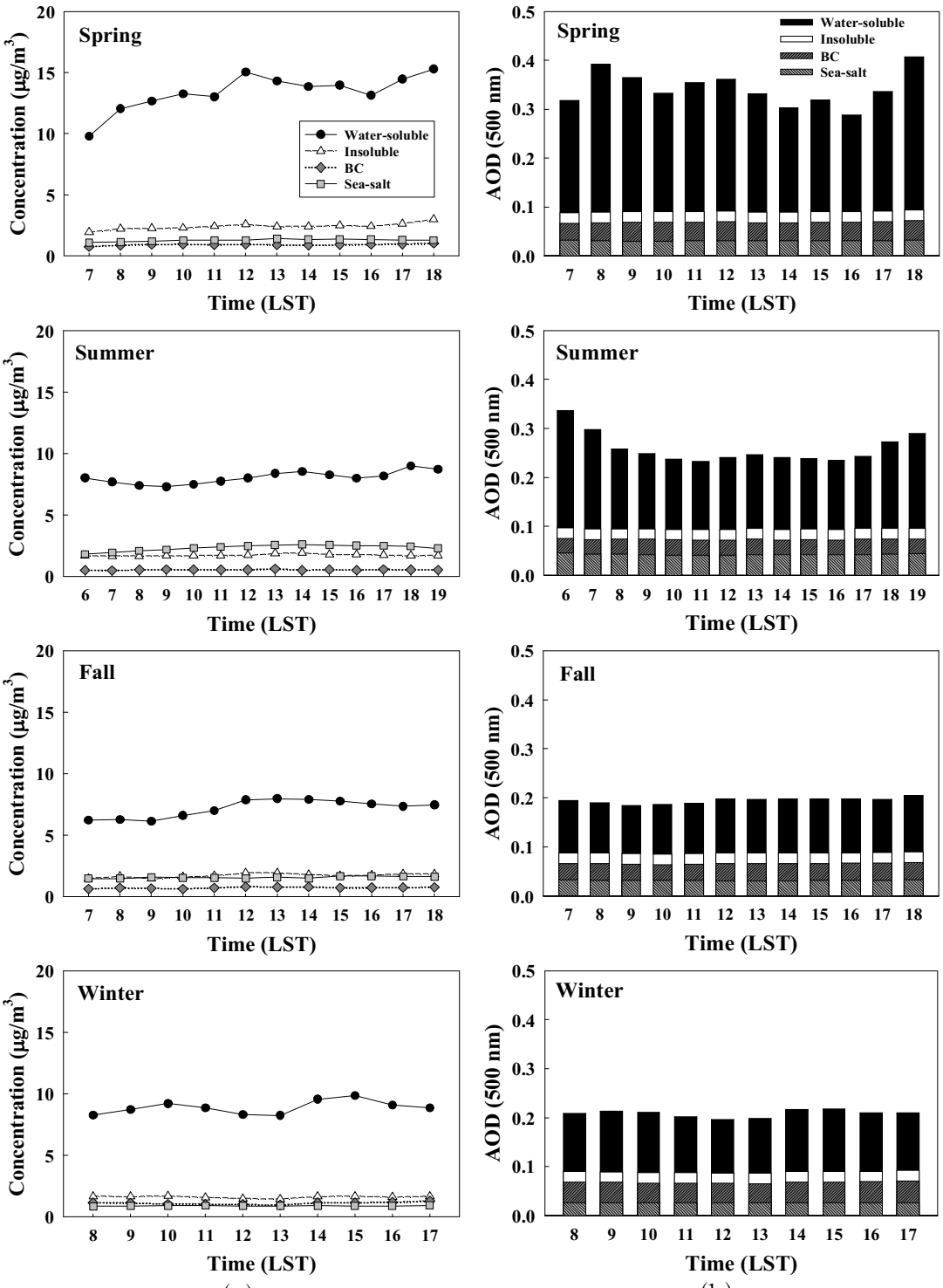


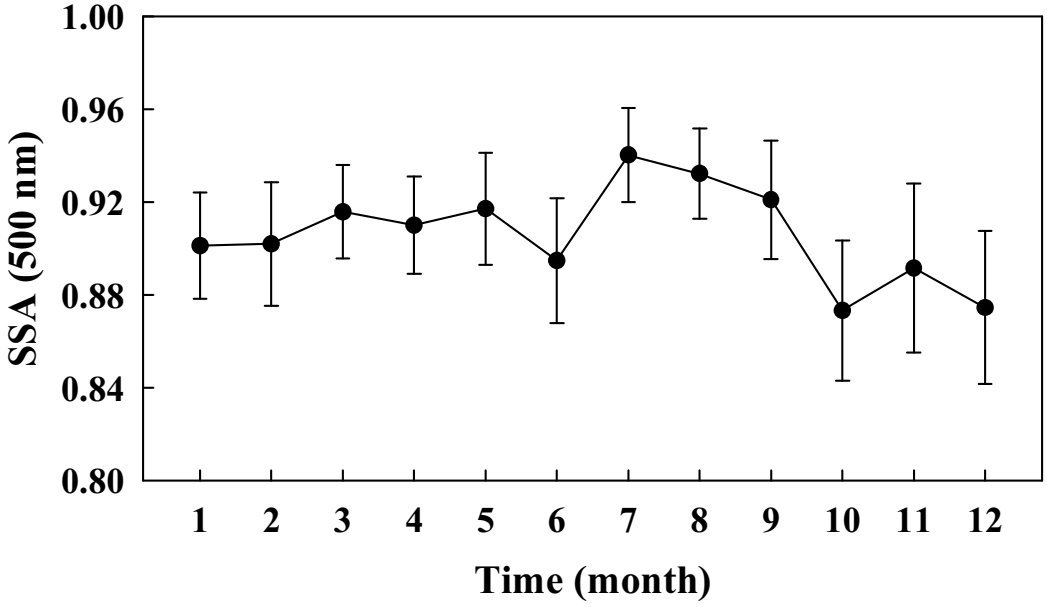
Fig. 12. Diurnal variations of (a) concentrations ($\mu g/m^3$) and (b) aerosol optical depth (AOD) at 500 nm for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ during four seasons in 2013.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

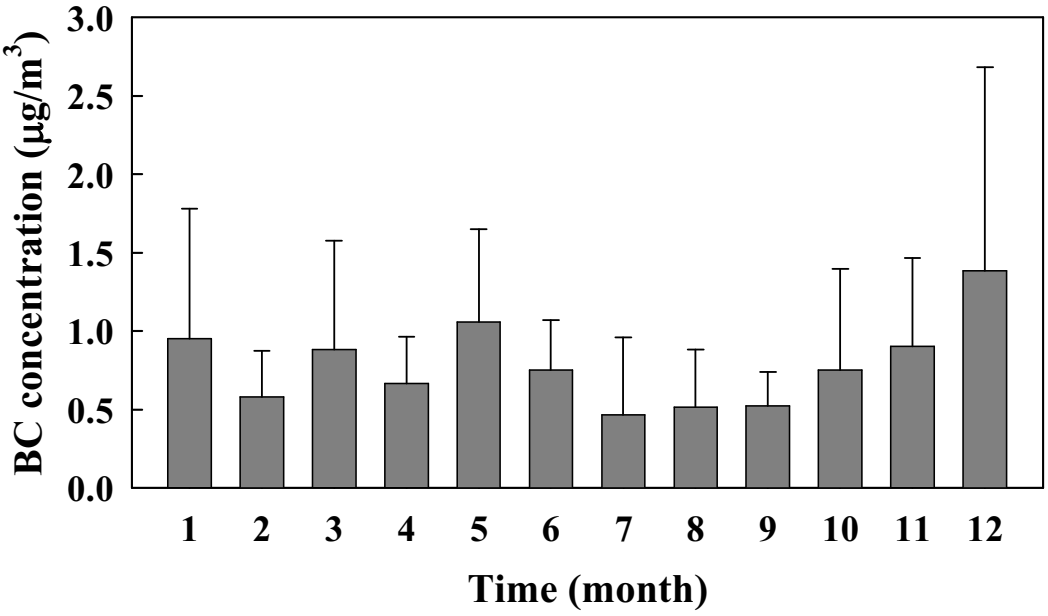
광학특성 중 SSA는 소산되는 복사에 대하여 산란과 흡수 계수의 상대적인 기여도를 측정하는 지수로서, 산란계수과 소산계수(산란계수와 흡수계수의 합)의 비로 나타내며 일반적으로 SSA는 흡수의 영향을 결정하는 핵심 매개 변수이다(Alam et al., 2011; Adesina et al., 2014; Rudra et al., 2016). 즉 SSA 값이 크면 상대적으로 흡수가 작아지고 반대로 SSA 값이 작아지면 흡수가 커진다. 본 연구에서는 흡수에 대한 SSA의 영향을 살펴보기 위하여 에어로졸 화학성분 중 태양복사 흡수와 가장 관련이 있는 BC 성분의 농도와 비교하였다(Fig. 13). 즉, BC 성분의 농도 자료가 있는 애월 지점에 대해서만 분석을 수행하였으며, SSA는 OPAC 모델을 통해 추정된 500 nm 파장의 값을 이용하였다.

그 결과, 애월 지점에서 500 nm의 SSA는 7월에 가장 크고(0.94) 10월과 12월에 작게 나타났으며(0.87), BC 성분의 농도는 12월에 가장 높고(1.39 $\mu g/m^3$) 7월에 가장 낮게 나타났다(0.47 $\mu g/m^3$). 또한 7~12월 동안 SSA 값이 감소하는 경향을 보일 때 BC 성분의 농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 보아 애월 지점에서 SSA와 BC 성분의 농도는 반비례함을 보였다. 반면 BC 성분의 농도가 낮지 않음에도 불구하고 SSA가 크게 나타난 5월에는 산란계수가 높은 water-soluble 성분의 농도가 매우 높아(19.41 $\mu g/m^3$) SSA 값이 크게 나타났으며, 반대로 BC 성분의 농도가 높지 않지만 SSA가 작게 나타난 10월에는 water-soluble 성분의 농도가 매우 낮아(5.67 $\mu g/m^3$) SSA 값이 작게 추정되었을 가능성이 있다(그림 제외). 이와 같이 BC 성분 농도가 높을 때(작을 때) SSA가 작아지는(커지는) 패턴은 여러 선행연구에서도 유사하게 나타났다(Panicker et al., 2010; Singh et al., 2010). 예를 들어, 인도의 Delhi 도시에서는 8월에 가장 높은 SSA 값(0.89)을 보임과 동시에 가장 낮은 BC 농도(3.26 $\mu g/m^3$)를 보였으며, 겨울철에 가장 낮은 SSA 값(0.74), 가장 높은 BC 농도(16.7 $\mu g/m^3$)를 보였다(Singh et al., 2010).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a)



(b)

Fig. 13. Monthly variations of (a) single scattering albedo (SSA) estimated by the OPAC model and (b) black carbon (BC) concentration in Aewol during 2013. The vertical bars denote the standard deviation from the mean values.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

애월 지점에서의 OPAC 모델의 결과를 검증하기 위하여 NASA AERONET (Aerosol Robotic Network, http://aeronet.gsfc.nasa.gov/)에서 제공받은 선포토미터(sun photometer)의 AOD (500 nm) 시간별 관측값을 이용하여, OPAC 모델의 AOD 산출 결과(4가지 화학성분에 대한 각 AOD (500 nm)의 합)와 비교 검증하였다(Fig. 14). AERONET의 AOD 자료는 구름 효과 제거와 자료 처리 과정을 거친 Level 2.0 자료를 이용하였으며, 애월 지점에 해당하는 AOD 자료를 얻을 수 없으므로 애월 지점과 가장 근접한 고산(수월봉) 측정소(Gosan_SNU) (33°17′N, 126°9′E)의 AOD 값을 이용하였다. 그 결과, OPAC을 통해 추정된 AOD 값이 AERONET의 AOD 값보다 크게(회귀직선 기울기 0.590) 산출되었으며, 상관계수(r)는 각각 0.89로 0.01 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. OPAC 모델의 AOD 값이 AERONET의 AOD 값에 비해 더 크게 나타난 이유는 OPAC 모델의 입력자료로 이용된 에어로졸 농도가 AERONET 선포터미터 관측시의 농도보다 높았기 때문인 것으로 사료된다(송상근과 손장호, 2014).

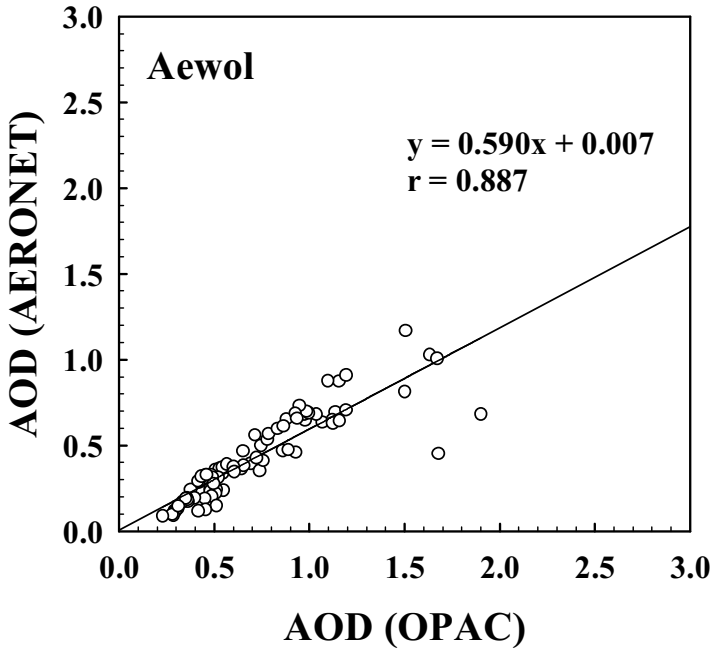


Fig. 14. Comparison of hourly AOD between the OPAC model and Sun photometer observation (at the Gosan site) provided by the AERONET program (http://aeronet.gsfc.nasa.gov/).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.3. 에어로졸 화학성분에 따른 기후환경변화 영향

3.3.1. 복사강제력 영향 추정

본 연구에서는 애월 및 고산 지점에서 에어로졸 화학성분별 광학특성을 이용하여 에어로졸 화학성분에 따른 복사강제력(DARF)을 산출 및 분석하였다. 먼저, 애월 지점에서 연구기간동안(2013년) 지표(SFC), 대기상단(TOA), 대기 중(ATM)의 주간의 총(total) 복사강제력은 SFC, TOA에서 각각 -65, -25 W/m^{2}로 산출되었으며 ATM에서는 +40 W/m^{2}로 산출되었다. 4 가지 화학성분 중 가장 기여도가 큰 water-soluble 성분의 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 각각 -30, -24, +5.9 W/m^{2}로 산출되었으며, 다음으로 기여도가 큰 BC 성분의 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 각각 -21, +5.7, +27 W/m^{2}로 산출되었다. Insoluble 성분은 SFC, TOA, ATM에서 각각 총 복사강제력의 13%, 5.2%, 17%의 기여도를 차지하였으며, sea-salt 성분은 각각 음의 총 복사강제력 중 11%, 21%, 1.4%의 기여도를 차지하였다.

월평균 복사강제력을 살펴보면(Table 7), SFC, TOA에서의 복사강제력은 봄철에 가장 크고(특히 5월에 각각 -97, -40 W/m^2) 가을철 또는 겨울철에 가장 작게 나타났다(각각 10월에 -52 W/m^2, 2월에 -17 W/m^2). ATM에서는 5월에 가장 크고(+58 W/m^2) 11월에 가장 작게 나타났다(+33 W/m^2). Water-soluble 성분의 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 5월에 각각 -59, -46, +13 W/m^{2}로 가장 크고 2월에 -17, -14, +3.1 W/m^{2}로 가장 작게 나타난 반면, BC 성분은 5월에 각각 -28, +8.2, +37 W/m^{2}로 가장 크고 8월 또는 11월에 -18, -4.5, +23 W/m^{2}으로 가장 작게 나타났다. 참고로 야간을 포함한 모든 시간(24 시간)의 총 복사강제력(Table 7)은 SFC, TOA, ATM에서 각각 -34, -14, +21 W/m^{2}로 주간 복사강제력의 50%에 불과했다. SFC, TOA, ATM에서 월평균 복사강제력은 봄철에 가장 크고(특히 5월에 -60, -25, +34 W/m^2) 늦은 여름 또는 겨울철에 가장 작게 나타났다(각각 -21, -6.7, +14 W/m^2). Insoluble과 sea-salt 성분은 SFC와 TOA에서 주간과 유사한 기여도 수준을 보였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 7. Monthly variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Aewol site in Jeju from January to December 2013

	Water-soluble			Insoluble			BC			Sea-salt			Total		
Month	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM
Jan	-26.18 (-10.22)	-21.01 (-8.20)	5.17 (2.02)	-7.96 (-3.11)	-1.89 (-0.74)	6.08 (2.37)	-21.88 (-8.54)	5.31 (2.07)	27.19 (10.61)	-6.39 (-2.62)	-6.00 (-2.46)	0.39 (0.16)	-62.41 (-24.49)	-23.58 (-9.32)	38.83 (15.16)
Feb	-17.09 (-6.80)	-14.04 (-5.60)	3.05 (1.21)	-8.55 (-3.41)	-1.94 (-0.78)	6.61 (2.64)	-20.23 (-8.08)	5.02 (2.03)	25.25 (10.11)	-6.75 (-2.51)	-6.31 (-2.35)	0.44 (0.16)	-52.61 (-20.81)	-17.26 (-6.70)	35.35 (14.11)
Mar	-35.89 (-18.50)	-28.31 (-14.56)	7.57 (3.94)	-8.79 (-4.52)	-1.73 (-0.89)	7.07 (3.63)	-23.39 (-12.03)	6.31 (3.25)	29.7 (15.27)	-7.40 (-3.65)	-6.88 (-3.39)	0.53 (0.27)	-75.47 (-38.71)	-30.61 (-15.59)	44.86 (23.11)
Apr	-33.62 (-22.43)	-26.79 (-13.40)	6.83 (9.04)	-9.41 (-4.75)	-1.71 (-0.87)	7.70 (3.89)	-22.13 (-11.17)	6.22 (3.15)	28.35 (14.32)	-7.15 (-3.63)	-6.60 (-3.35)	0.55 (0.27)	-72.31 (-41.99)	-28.88 (-14.47)	43.43 (27.52)
May	-58.53 (-35.22)	-45.94 (-25.04)	12.60 (10.19)	-9.78 (-5.22)	-1.64 (-0.90)	8.14 (4.32)	-28.39 (-15.09)	8.19 (4.39)	36.58 (19.48)	-7.46 (-4.07)	-6.86 (-3.77)	0.59 (0.30)	-104.2 (-59.61)	-46.25 (-25.32)	57.91 (34.29)
Jun	-37.30 (-23.31)	-30.22 (-18.89)	7.08 (4.42)	-8.89 (-5.55)	-1.55 (-0.97)	7.34 (4.59)	-21.63 (-13.52)	6.23 (3.89)	27.86 (17.41)	-7.56 (-4.83)	-6.98 (-4.45)	0.59 (0.37)	-75.39 (-47.22)	-32.52 (-20.42)	42.87 (26.80)
Jul	-27.81 (-15.72)	-22.75 (-12.86)	5.05 (2.86)	-8.56 (-4.84)	-1.55 (-0.88)	7.01 (3.96)	-18.27 (-10.33)	5.29 (2.99)	23.55 (13.32)	-9.73 (-5.41)	-8.89 (-4.94)	0.84 (0.47)	-64.36 (-36.30)	-27.91 (-15.70)	36.45 (20.60)
Aug	-29.24 (-17.46)	-23.92 (-14.31)	5.31 (3.15)	-8.19 (-4.91)	-1.51 (-0.91)	6.68 (4.00)	-18.06 (-10.81)	5.14 (3.08)	23.20 (13.89)	-8.52 (-5.10)	-7.83 (-4.68)	0.70 (0.42)	-64.01 (-38.28)	-28.12 (-16.82)	35.89 (21.46)
Sep	-24.61 (-11.94)	-19.99 (-9.71)	4.61 (2.24)	-8.75 (-4.25)	-1.73 (-0.84)	7.03 (3.41)	-19.03 (-9.24)	5.21 (2.53)	24.23 (11.76)	-9.29 (-4.50)	-8.57 (-4.14)	0.73 (0.35)	-61.68 (-29.92)	-25.08 (-12.16)	36.60 (17.76)
Oct	-18.96 (-9.39)	-15.44 (-7.65)	3.53 (1.75)	-7.85 (-3.89)	-1.67 (-0.82)	6.18 (3.06)	-19.21 (-9.51)	4.97 (2.46)	24.17 (11.97)	-5.93 (-3.01)	-5.54 (-2.82)	0.39 (0.20)	-51.94 (-25.81)	-17.67 (-8.83)	34.27 (16.98)
Nov	-23.68 (-11.69)	-18.86 (-9.31)	4.82 (2.38)	-7.06 (-3.48)	-1.61 (-0.80)	5.45 (2.69)	-18.28 (-9.02)	4.48 (2.21)	22.76 (11.23)	-5.67 (-2.79)	-5.31 (-2.61)	0.36 (0.18)	-54.69 (-26.98)	-21.31 (-10.50)	33.39 (16.48)
Dec	-25.81 (-11.14)	-20.58 (-8.88)	5.23 (2.26)	-7.89 (-3.38)	-1.88 (-0.81)	6.00 (2.57)	-24.12 (-10.29)	5.87 (2.5)	29.99 (12.80)	-5.60 (-2.36)	-5.28 (-2.22)	0.33 (0.14)	-63.42 (-27.17)	-21.88 (-9.41)	41.55 (17.76)
Annual	-30.04 (-15.87)	-24.10 (-12.1)	5.94 (3.76)	-8.42 (-4.22)	-1.68 (-0.84)	6.74 (3.37)	-21.03 (-10.53)	5.66 (2.84)	26.68 (13.37)	-7.35 (-3.69)	-6.80 (-3.42)	0.55 (0.27)	-66.84 (-34.31)	-26.93 (-13.53)	39.91 (20.78)

[a]Values represent the DARF for each aerosol chemical component calculated by the SBDART model during the day (07:00-18:00 LST in spring, 06:00-19:00 LST in summer, 07:00-18:00 LST in fall, and 08:00-17:00 LST in winter).

[b]Values in parenthesis represent the DARF for each aerosol chemical component estimated for 24 hours.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

고산 지점의 $PM_{2.5}$, PM_{10} 에어로졸 화학성분에 따른 복사강제력은 Table 8에 나타내었다. 고산 지점에서 연구기간동안(2010~2014년) $PM_{2.5}$ water-soluble 성분의 복사강제력은 2014년에 SFC, TOA, ATM에서 각각 -48, -38, +11 W/m^{2}로 가장 크고 2010년에 SFC, TOA에서 각각 -38, -30, +8.7 W/m^{2}로 가장 작게 산출되었다(농도변화 경향과 유사). 또한 연구기간동안(2010~2014년) 계절 평균 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 봄철에 각각 -52, -40, +13 W/m^{2}로 가장 크고 가을철에 각각 -3.9, -29, +7.7 W/m^{2}로 가장 작은 값을 보였다. 하지만 가장 값이 크고 작은 월은 각각 6월(-58, -44, +14 W/m^2)과 7월(-28, -22, +6.1 W/m^2)로 추정되었다. 한편, $PM_{2.5}$의 sea-salt 성분에 의한 복사강제력은 2010년 또는 2012년에 SFC, TOA에서 각각 -7.6, -7.0, +0.63 W/m^{2}로 가장 크고 2013년에 각각 -6.8, -6.3 W/m^{2}로 가장 작게 산출되었다. 월평균 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 1월 또는 3월에 각각 -8.0, -7.4, +0.67 W/m^{2}로 가장 크고 5월 또는 7월에 각각 -6.6, -6.0, +0.53 W/m^{2}으로 가장 작게 산출되었다.

PM_{10} water-soluble 성분의 복사강제력은 2014년에 SFC, TOA, ATM에서 각각 -62, -48, +14 W/m^{2}로 가장 크고 2010년에 각각 -50, -39, +12 W/m^{2}로 가장 작게 나타났으며 월평균 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 5월에 각각 -74, -55, +19 W/m^{2}로 가장 크고 8월에 각각 -39, -30, +9.1 W/m^{2}로 가장 작게 산출되었다. 한편, sea-salt 성분의 복사강제력은 2013년에 각각 -15, -13, +1.6 W/m^{2}로 가장 크고 2011년에 -11, -10, +1.1 W/m^{2}로 가장 작게 나타났으며 월평균 복사강제력은 12월에(ATM은 7월) -17, -16, +1.8 W/m^{2}로 가장 크고 6월에 -10, -8.8, +1.1 W/m^{2}으로 가장 작게 산출되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 8. Monthly variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ and PM_{10} at the Gosan site in Jeju during 2010-2014 (12:00 LST)

		$PM_{2.5}$						PM_{10}					
		Water-soluble			Sea-salt			Water-soluble			Sea-salt		
Year	Month	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM	SFC	TOA	ATM
Total	Jan	-46.39	-36.94	9.45	-7.97	-7.38	0.58	-59.13	-46.57	12.56	-15.58	-14.13	1.45
(2010-2014)	Feb	-50.26	-38.95	11.31	-7.58	-7.00	0.57	-57.82	-44.50	13.32	-13.82	-12.46	1.36
	Mar	-51.62	-39.40	12.22	-7.98	-7.31	0.67	-66.62	-49.82	16.81	-15.07	-13.33	1.74
	Apr	-50.88	-39.25	11.63	-7.22	-6.62	0.61	-65.75	-49.90	15.85	-13.16	-11.54	1.62
	May	-54.79	-41.70	13.09	-6.55	-6.02	0.53	-74.02	-54.71	19.30	-10.36	-9.20	1.17
	Jun	-57.76	-44.25	13.52	-6.71	-6.13	0.58	-66.98	-50.55	16.43	-9.97	-8.84	1.13
	Jul	-27.72	-21.64	6.08	-6.56	-6.02	0.54	-42.53	-32.72	9.81	-12.88	-11.12	1.76
	Aug	-29.54	-22.96	6.59	-6.84	-6.27	0.57	-39.05	-29.96	9.10	-12.43	-10.92	1.51
	Sep	-37.42	-29.18	8.24	-6.71	-6.18	0.52	-47.18	-36.34	10.84	-11.65	-10.40	1.25
	Oct	-33.44	-26.59	6.85	-7.21	-6.66	0.55	-42.52	-33.46	9.05	-14.08	-12.59	1.49
	Nov	-39.88	-31.98	7.90	-7.06	-6.56	0.50	-49.27	-39.01	10.27	-15.13	-13.65	1.47
	Dec	-36.86	-29.71	7.15	-7.55	-7.02	0.53	-46.34	-36.87	9.47	-17.16	-15.59	1.57
2010	Total	-38.29	-29.85	8.74	-7.64	-7.01	0.63	-50.28	-38.56	11.72	-14.25	-12.69	1.56
2011	Total	-44.17	-34.38	9.95	-6.95	-6.41	0.54	-56.26	-43.03	13.23	-11.48	-10.33	1.14
2012	Total	-46.74	-36.21	10.52	-7.63	-7.01	0.62	-54.57	-41.63	12.94	-13.20	-11.80	1.40
2013	Total	-39.37	-30.43	8.94	-6.83	-6.32	0.57	-52.16	-39.80	12.35	-14.61	-13.00	1.61
2014	Total	-47.79	-37.84	9.95	-7.11	-6.56	0.55	-62.05	-48.35	13.70	-13.84	-12.35	1.49

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

애월 지점에서 화학성분에 따른 복사강제력의 시간변화는 SFC와 TOA에 대하여 분석하였다(각각 Fig. 15와 Fig. 16). 먼저 SFC에서 시간별 복사강제력은 계절 또는 화학성분과 상관없이 모두 복사가열이 가장 잘 일어나는 낮(12~14시)에 가장 크게 나타났다(Fig. 15). 예를 들어 봄철에는 12시까지 점차 증가하다 12시에 총 -101 W/m^{2}로 가장 큰 복사강제력을 나타냈으며, 이후 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 광화학반응이 활발한 낮 동안에 농도(특히 water-soluble 성분)가 증가함에 따라 복사강제력 또한 증가한 것으로 보인다. SFC에서 water-soluble 성분에 의한 복사강제력은 봄철 12시에 최대 -53 W/m^{2}로 추정되었으며, 4 계절 중 water-soluble의 기여도는 총 복사강제력의 49~52%로 화학성분 중 가장 큰 기여도를 나타냈고 다음으로 BC 성분의 기여도(28~31%)가 높게 나타났다. 한편, TOA의 시간별 복사강제력은 SFC와 마찬가지로 계절과 상관없이 낮(특히 봄철 12시에 음의복사강제력은 -49 W/m^2, 양의 복사강제력은 +9.6 W/m^2)에 가장 크게 나타났다(insoluble 제외)(Fig. 16). TOA에서 음의 복사강제력 중 water-soluble은 57~83%로 가장 큰 기여도를 나타냈으며 BC 성분은 TOA에서 양의 복사강제력을 나타냈다(12시에 최대 9.6 W/m^2). TOA에서 insoluble 성분은 낮 시간(12~13시)에 낮은 복사강제력을 나타냈다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

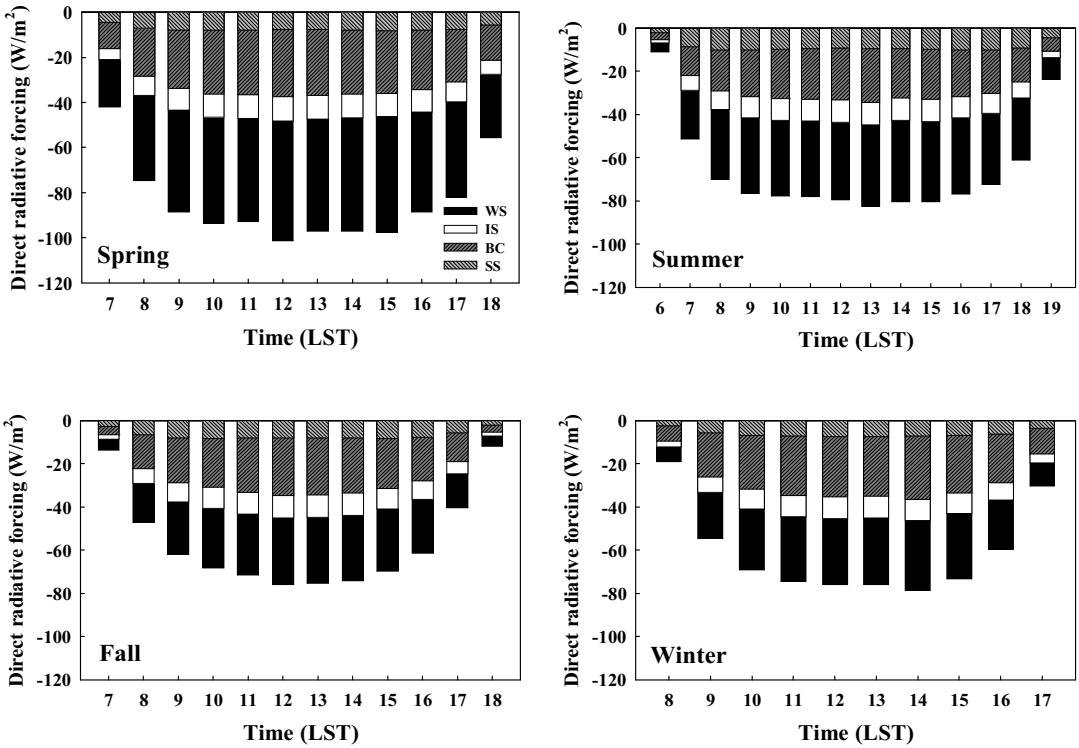


Fig. 15. Diurnal variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) at the surface (SFC) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ during four seasons in 2013. WS: water-soluble, IS: insoluble, BC: black carbon, and SS: sea-salt.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

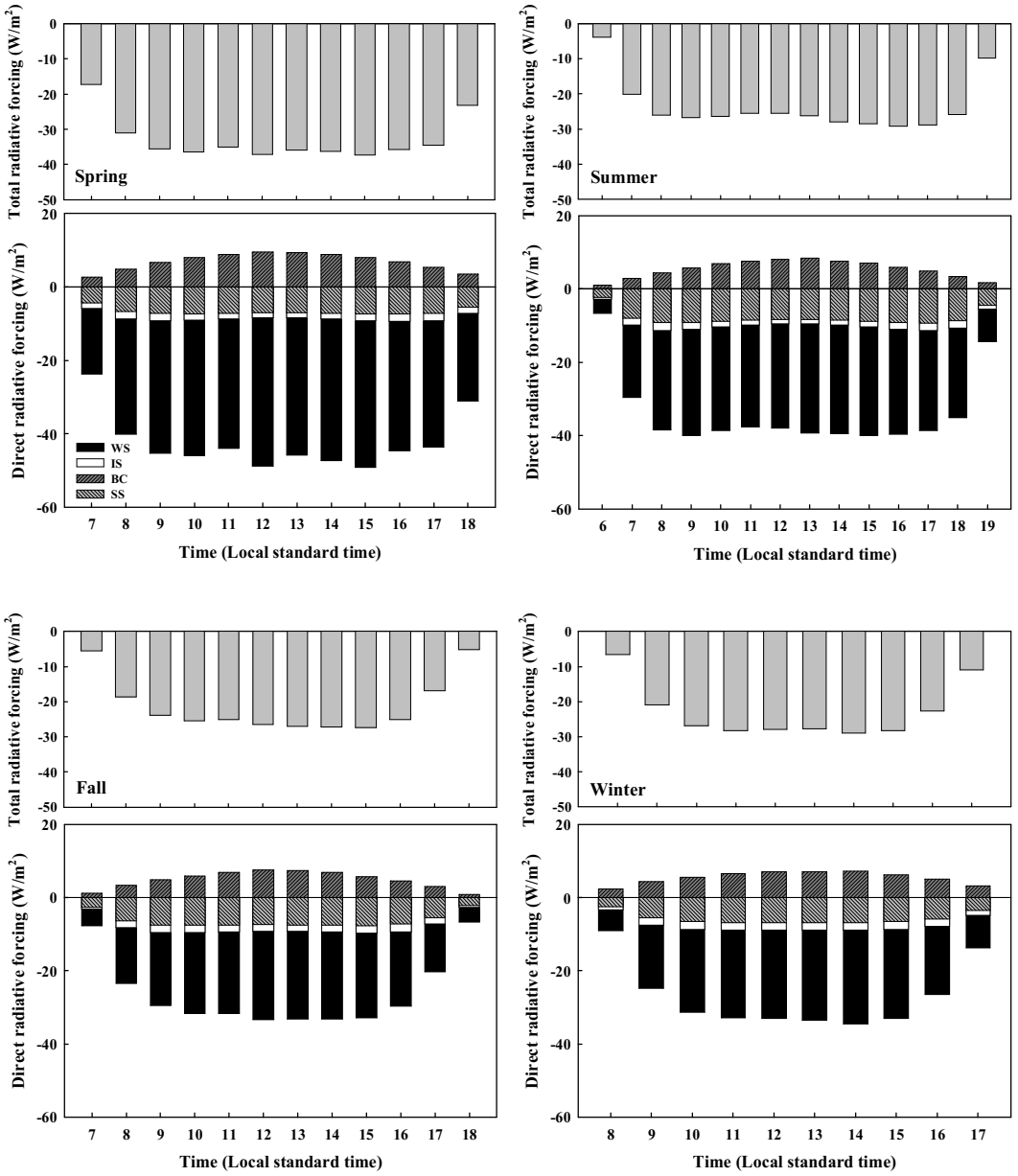


Fig. 16. Diurnal variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) at the TOA for each aerosol chemical component and total net DARF in $PM_{2.5}$ during four seasons in 2013. WS: water-soluble, IS: insoluble, BC: black carbon, and SS: sea-salt.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 9는 여러 다른 나라에서 산출된 SFC, TOA의 복사강제력과 애월 및 고산 지점에서 산출된 복사강제력을 비교한 표이다. 먼저, 애월 지점과 여러 선행연구 결과의 비교시, 배경지역에서 에어로졸 복사강제력의 경우 SFC에서 -16 (Arabian Sea)~-31 W/m^2 (India, Bay of Bengal), TOA에서 -8.3 (South Korea, Gosan)~-16 W/m^2 (Gosan)으로 연구기간, 파장 등의 조건의 차이가 있는 것을 고려하면 애월 지점에서의 총 복사강제력(SFC, TOA에서 각각 -21~-60 W/m^2, -6.7~-25 W/m^2)과 비교적 유사하게 산출된 것으로 판단된다 (Takamura et al., 2007; Kim et al., 2010; Ramachandran, 2005; Kedia et al. 2010). 또한, 배경지역의 에어로졸 화학성분에 따른 복사강제력은 SFC와 TOA에서 water-soluble과 BC 성분 모두 애월 지점에서 산출된 복사강제력과 유사하거나 조금 낮게 산출되었다(Kim et al., 2006; Yoon and Kim, 2006).

선행 연구의 결과 중 도시지역의 에어로졸 복사강제력은 TOA에서는 -7 (Pakistan, Karachi)~-35 W/m^2 (Pakistan, Karachi)으로 애월 지점과 비교적 유사하거나 큰 값을 보였으나 SFC에서는 -41 (India, Ahmedabad)~-96 W/m^2 (Pakistan, Karachi)으로 약 2배가량 크게 산출되었다(Alam et al., 2011; Ganguly and Jayaraman, 2006). 한편, 도시지역에서 BC 성분의 경우 SFC에서 -14.1 (India, Pune)~-33 W/m^2 (India, Hyderabad)으로 애월 지점에 비해 최대 4배가량 높게 나타났으며 TOA에서는 +3.1 (India, Pune)~+9 W/m^2 (India, Hyderabad)으로 유사하거나 최대 4.5배가량 높게 추정되었다(Badarinath and Latha, 2006; Panicker et al., 2010). 한편 도시지역에서 dust 성분의 복사강제력을 산출한 선행연구의 결과, SFC에서 -50~-194 W/m^2, TOA에서 -7~-35 W/m^{2}로 애월 지점에 비해 매우 높은 복사강제력 값이 산출되었다(Alam et al., 2014). 반면 고산 지점의 $PM_{2.5}$, PM_{10} 화학성분별 복사강제력은 시간별 농도 자료가 없어 낮 시간대를 대표하는 12시를 대상으로 복사강제력을 산출하였기 때문에 배경지점을 대상으로 한 선행연구에 비하여 높은 값을 나타냈다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 9. Comparison of direct aerosol radiative forcing (DARF) between different studies

Location	Study period (wavelength, mm)	Type	$DARF_{SFC}$ (W/m^2)	$DARF_{TOA}$ (W/m^2)	Reference
Aewol, South Korea	2013 (0.3-4.0)	$PM_{2.5}$ Total Water-soluble Insoluble BC Sea-salt	-20.8 to -59.6 -6.8 to -35.2 -3.1 to -5.6 -8.1 to -15.1 -2.4 to -5.4	-6.7 to -25.3 -5.6 to -25.0 -0.7 to -1.0 +2.0 to +4.4 -2.2 to -4.9	This study (24 hour)
Gosan, South Korea	2010~2014 (0.3-4.0)	$PM_{2.5}$ water-soluble PM_{10} water-soluble $PM_{2.5}$ sea-salt PM_{10} sea-salt	-27.7 to -57.8 -39.1 to -74.0 -6.5 to -8.0 -10.0 to -15.6	-21.6 to -44.2 -30.0 to -54.7 -6.0 to -7.4 -8.8 to -14.1	This study (12 LST)
Gosan, South Korea	11-13 Apr 2001 (0.55)	Water-soluble	-4.3 to -9.6	-2.7 to -7.3	Yoon and Kim, 2006
Gosan, South Korea	Apr 2001 (0.285-4.0)	Water-soluble BC	-10.3 -10.1	-	Kim et al., 2006
Gosan, South Korea	Mar 2005	Aerosol	-20.8±9.0	-8.3±5.3	Takamura et al., 2007
Gosan, South Korea	2001~2008 (0.2-5.0)	Aerosol	-28±9.2	-16±4.4	Kim et al., 2010
Bay of Bengal, India	Feb~Mar 2001 (0.4-0.85)	Aerosol	-31	-9	Ramachandran, 2005
Arabian Sea Bay of Bengal, India	Mar~Apr 2006 (0.25-4.0)	Aerosol Aerosol	-16 -22.4	-11 -12.0	Kedia et al., 2010
Hyderabad, India	Jan-May 2003	BC	-33	+9	Badarinath and Latha, 2006
Pune, India	Oct 2004 to May 2005 (0.3-3.0)	BC	-14.1 to -19.5	+3.1 to +3.9	Panicker et al., 2010
Ahmedabad, India	2002-2005 (0.25-4.0)	Aerosol	-41±11 to -63±10	-22±3 to -26±3	Ganguly and Jayaraman, 2006
Karachi, Pakistan	Aug 2006 to Jul 2007 (0.3-4.0)	Aerosol	-56 to -96	-7 to -35	Alam et al., 2011
Lahore, Pakistan	Mar 2012 (0.3-4.0)	Dust	-50 to -194	-31 to -105	Alam et al., 2014

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.3.2. 대기 복사가열율 추정

대기 복사가열율(HR, heating rate)은 에어로졸에 의한 흡수로 인해 대기 중에 포획된 에너지의 양을 나타내는 척도로(Koren et al., 2008), 본 연구에서는 대기 중(지표와 대기경계층 높이 사이)의 각 에어로졸 화학성분에 따른 대기 복사가열율을 추정하였다. 연구기간동안 애월 및 고산 지점에서 에어로졸 화학성분에 따른 대기 복사가열율은 복사강제력을 구하는 방법과 마찬가지로 에어로졸이 있는 경우와 에어로졸이 없는 경우의 복사가열율의 차를 통해 산정하였다. 그 결과, 애월 지점에서 화학성분에 따른 평균 복사가열율은 water-soluble, insoluble, BC, sea-salt 성분에 대하여 각각 0.32, 0.49, 1.99, 0.003 K/day로 추정되었으며 sea-salt 성분의 경우 겨울철에 매우 작은 값으로 추정되었다(< 0.01 K/day)(Table 10). sea-salt 성분을 제외한 대부분의 화학성분에 따른 복사가열율은 봄철(특히 5월에 water-soluble, insoluble, BC 성분에 대하여 각각 0.43, 0.51, 2.22 K/day)에 큰 값을 나타냈으며 sea-salt 성분의 복사가열율은 여름철에 큰 값을 나타냈다(특히 7월에 0.009 K/day)(Table 10). 높은 복사가열율은 각 화학성분별 높은 농도 혹은 높은 대기흡수에 기인한 것으로 사료된다.

고산 지점의 경우(Table 11), $PM_{2.5}$의 복사가열율은 2012년에 가장 크게 나타났으며(water-soluble, sea-salt 성분에 대하여 각각 0.62, 0.01 K/day), 전체 연구기간 중 water-soluble 성분은 봄철 혹은 이른 여름철(특히 6월에 0.802 K/day)에 크게 나타나고 sea-salt 성분은 봄철 혹은 여름철에 가장 큰 값(3~8월에 약 0.01 K/day)을 보였다. PM_{10}의 복사가열율은 water-soluble 성분은 2014년에(0.80 K/day), sea-salt 성분은 2013년에 가장 크게 나타났다(0.033 K/day). 또한 전체 연구기간 중 PM_{10}의 water-soluble 성분은 봄철에 가장 크게 나타나고(특히 5월에 1.19 K/day) sea-salt 성분은 여름철에 가장 크게 나타났다(특히 7월에 0.05 K/day). 고산 지점에서의 복사가열율 또한 각 화학성분별 농도 또는 대기흡수에 기인한 것으로 사료된다.

선행연구에서 대기 복사가열율은 Gosan에서 2001년~2008년에 1.5~3.0 K/day (Kim et al., 2010), Egypt의 Cairo에서 2001년 10월~2006년 3월에 평균 1.3~2.8 K/day (El-Metwally et al., 2011), India의 Hyderabad에서 2008~2009년에 1.6~

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.0 K/day (Sinha et al., 2013), India의 Pune에서 2004~2009년에 0.6~1.4 K/day (Kumar and Devara, 2012)로 추정된 바 있다. 본 연구에서 애월 및 고산 지점의 대기 복사가열율은 선행연구의 결과와 비교적 유사한 값을 나타냈다.

애월 지점의 각 화학성분별 가열율 효율(Heating rate efficiency, K/day per unit AOD)에 대하여 산출한 결과(Fig. 17), BC 성분에 의한 가열율 효율이 약 50 K/day per unit AOD (r=0.848)로 가장 높게 나타났으며, water-soluble 성분의 가열율 효율이 약 1.33 K/day per unit AOD (r=0.767)으로 나타났다. Insoluble과 sea-salt 성분의 경우 각각 33.1, 0.25 K/day per unit AOD 값을 나타냈으나 매우 약한 상관관계(각각 r=0.299, 0.436)를 보였다. 고산의 경우, $PM_{2.5}$의 water-soluble 성분에 따른 가열율 효율은 3.31~3.89 K/day per unit AOD (r=0.98~0.99), sea-salt 성분에 따른 가열율 효율은 0.34~0.72 K/day per unit AOD (r=0.42~0.77)로 나타났다. 한편 고산 PM_{10}의 경우 water-soluble 성분의 가열율 효율은 3.30~3.81 K/day per unit AOD (r=0.98), sea-salt 성분의 가열율 효율은 0.34~0.56 K/day per unit AOD (r=0.75~0.80)으로 비교적 높은 상관관계를 나타냈다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 10. Monthly variations of heating rate (HR, K/day) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Aewol site during the year 2013

Month	Water-soluble	Insoluble	BC	Sea-salt
January	0.288	0.437	2.024	<0.001
February	0.161	0.477	1.881	0.001
March	0.430	0.511	2.216	0.002
April	0.338	0.558	2.118	0.005
May	0.676	0.590	2.735	0.007
June	0.388	0.532	2.082	0.005
July	0.270	0.508	1.760	0.009
August	0.284	0.484	1.734	0.007
September	0.250	0.508	1.809	0.005
October	0.190	0.446	1.802	0.001
November	0.272	0.392	1.695	<0.001
December	0.294	0.432	2.232	<0.001
Annual	0.323	0.487	1.991	0.003

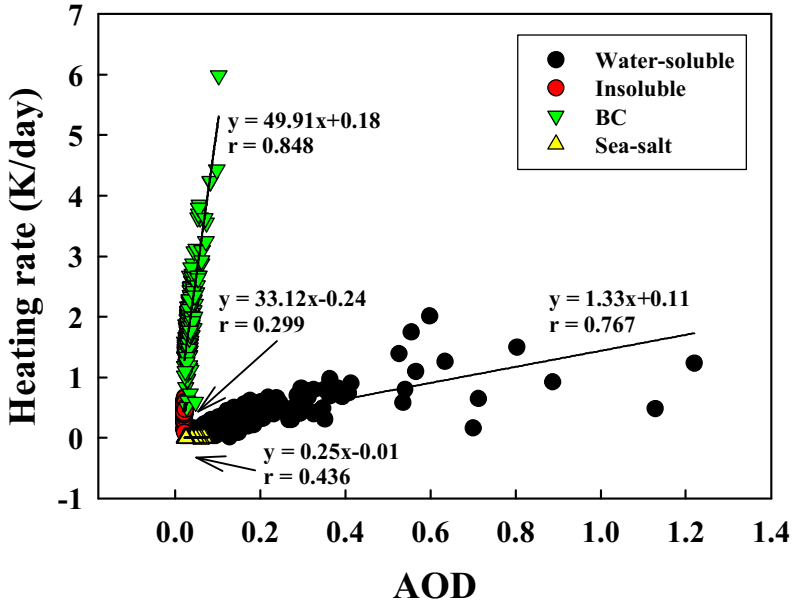


Fig. 17. Hourly variations of atmospheric heating rate and scattered plots of heating rate per unit AOD (heating rate efficiency = regression slopes) for each aerosol chemical component in at the Aewol site $PM_{2.5}$ from January to December 2013.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 11. Monthly variations of heating rate (HR, K/day) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ and PM_{10} at the Gosan site during 2010-2014

		$PM_{2.5}$		PM_{10}	
Year	Month	Water-soluble	Sea-salt	Water-soluble	Sea-salt
Total	Jan	0.534	0.005	0.722	0.017
(2010-2014)	Feb	0.662	0.006	0.787	0.022
	Mar	0.728	0.010	1.022	0.039
	Apr	0.684	0.010	0.951	0.042
	May	0.783	0.009	1.187	0.029
	Jun	0.802	0.010	0.991	0.028
	Jul	0.351	0.009	0.579	0.052
	Aug	0.383	0.010	0.539	0.040
	Sep	0.478	0.007	0.639	0.027
	Oct	0.386	0.007	0.519	0.028
	Nov	0.441	0.004	0.585	0.021
	Dec	0.396	0.003	0.536	0.016
2010	Total	0.510	0.008	0.695	0.032
2011	Total	0.580	0.007	0.788	0.021
2012	Total	0.617	0.009	0.772	0.028
2013	Total	0.525	0.006	0.736	0.033
2014	Total	0.566	0.007	0.798	0.028

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

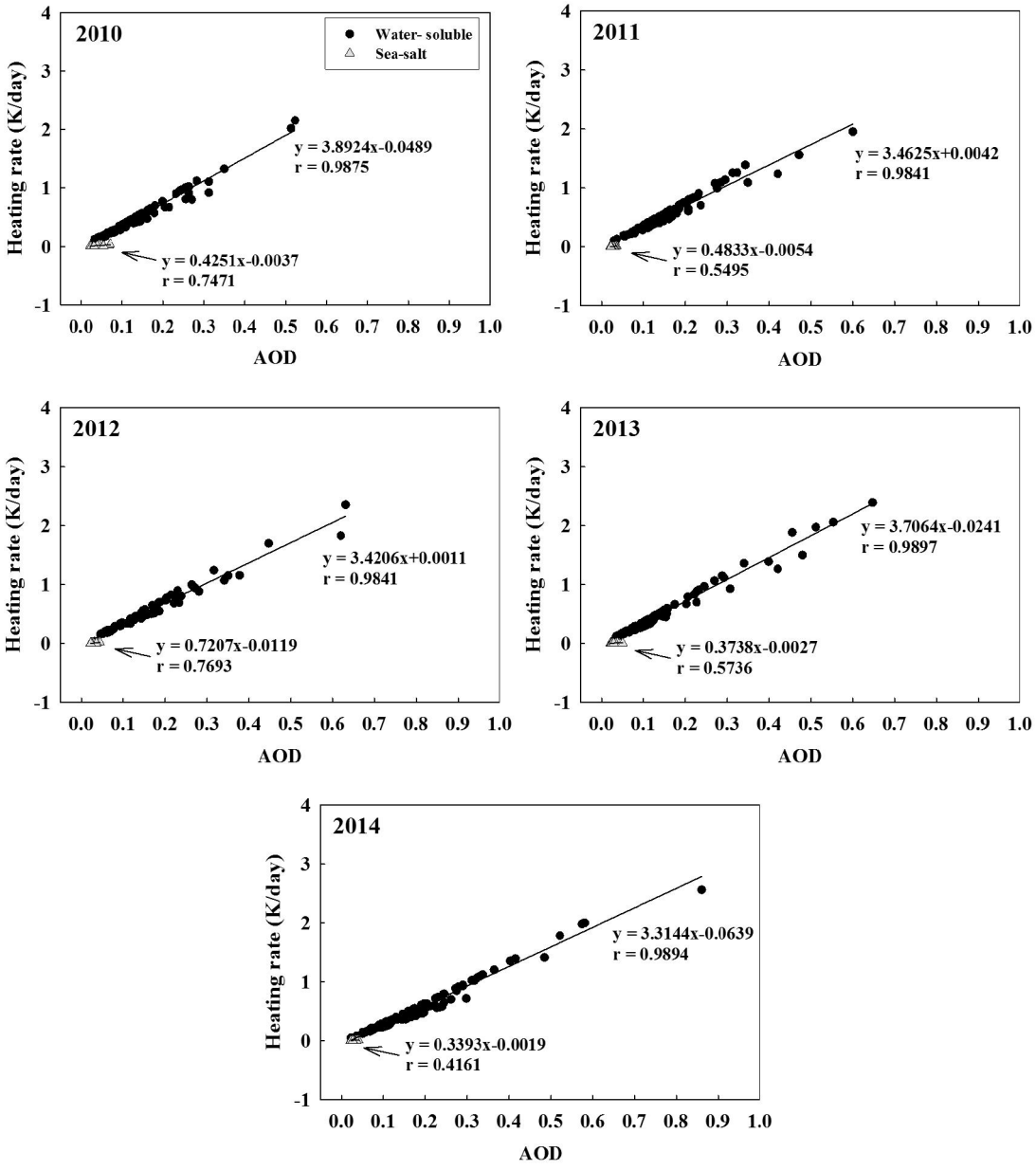


Fig. 18. Daily variations of atmospheric heating rate and scattered plots of heating rate per unit AOD (heating rate efficiency = regression slopes) for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Gosan site during 2010-2014.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

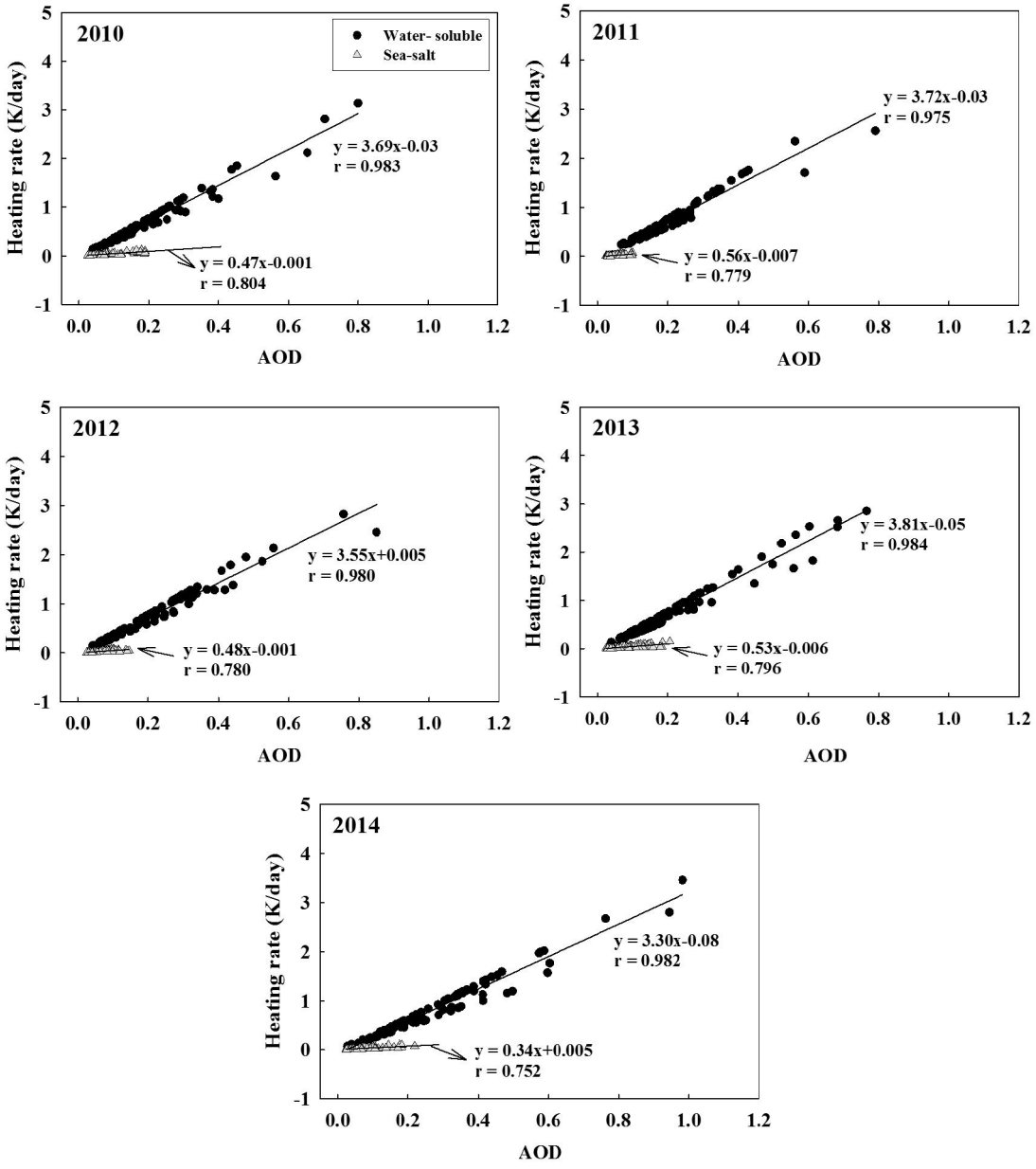


Fig. 19. Same as Fig. 18 but for each aerosol chemical component in PM_{10}.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ. 요약 및 결론

본 연구에서는 연구기간동안 대기질 측정지점의 시간별 PM_{10} 농도(2001~2014년)와 애월 대기오염집중측정소의 시간별 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도(2013년), 고산측정소의 약 3일 간격 $PM_{2.5}$, PM_{10}의 화학성분 농도(2010~2014년) 자료를 이용하여 에어로졸의 농도 및 화학성분 농도의 변화 경향을 분석하였으며(연변화, 월/계절변화, 시간변화), 애월 및 고산 지점의 에어로졸 화학성분 농도를 이용하여 애월 및 고산 지점의 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성(OPAC 모델 이용) 및 복사강제력(SBDART 모델 이용)을 산출하였다.

1) 전반적으로 대기질 측정지점의 PM_{10} 농도는 증가와 감소를 반복하였으며 최근 2010~2014년 동안 농도가 급변하는 모습을 볼 수 있었다. 월/계절변화에서는 봄철에 농도가 높고, 여름철에 농도가 낮게 나타났는데 이는 봄철 황사의 영향과 여름철 많은 강수량/일사량 등 기상요소의 영향인 것으로 판단된다. 도시지역인 대기질 측정지점에서는 주중의 농도가 주말의 농도보다 미세하지만 높게 나타났으며 하루 중 출·퇴근 시간에 농도가 증가하는 모습을 보였다. 애월 및 고산 지점의 에어로졸 화학성분별 농도는 대부분 봄철에 가장 높은 농도를 보인 반면, sea-salt 성분의 농도는 강수량이 적고 풍속이 강한 겨울철(혹은 2013년 여름철)에 높게 관측되었다. 또한 애월 지점에서는 주중의 농도와 주말의 농도가 유사하게 나타나는 시골/배경 지점의 일반적인 농도변화 특성을 잘 나타낸 반면, 고산 지점은 배경 지점임에도 불구하고 주중의 농도가 높게 나타났다. 이는 주중의 관광객 증가 등에 따른 화석연료의 연소가 증가하였을 가능성이 있으며, 이러한 결과는 차후 연구가 필요한 것으로 판단된다. 한편 애월 지점의 $PM_{2.5}$ 시간별 화학성분 농도는 오후에 높은 농도를 보였는데 이것은 태양복사가 강하게 존재하는 오후시간대에 광화학 반응이 활발해져 농도가 증가한 것으로 판단된다(특히, water-soluble 성분).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2) 광학모델(OPAC) 수행을 통해 산출된 에어로졸 화학성분별 광학특성(흡수·산란·소산계수, AOD)은 애월 및 고산 지점에서 모두 water-soluble 성분의 기여도가 가장 큰 것으로 나타났으며(BC의 흡수계수 제외), 각 화학성분별 광학특성의 시간적 변화경향은 각 화학성분 농도의 변화경향과 유사하게 나타났다. 특히 AOD의 경우 농도와 마찬가지로 봄철에 가장 높게 나타났고(sea-salt 성분 제외), 하루 중 낮(12~15시)에 가장 큰 값을 보였다. 한편, SSA는 흡수의 영향을 결정하는 핵심 매개 변수로 흡수에 가장 관련이 있는 BC 성분의 농도와 반비례하는 관계를 보였다.

3) 대기복사전달모델(SBDART)을 통하여 산출된 애월 지점(2013년)의 $PM_{2.5}$ 총 복사강제력은 SFC, TOA에서 각각 -65, -25 W/m^{2}로 산출되었으며 ATM에서는 +40 W/m^{2}로 산출되었다. 월평균 복사강제력은 농도가 높은 봄철에 가장 크고(특히 5월) 가을철 또는 겨울철에 가장 작게 나타났다. 화학성분 중 기여도가 가장 큰 water-soluble 성분의 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 각각 -30, -24, +5.9 W/m^{2}로 산출되었으며, 다음으로 기여도가 큰 BC 성분의 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 각각 -21, +5.7, +27 W/m^{2}로 산출되었다. 한편, SFC, TOA에서 시간별 복사강제력은 계절 또는 화학성분과 상관없이 모두 낮에 가장 크게 나타났는데(TOA의 insoluble 제외), 이는 광화학반응이 활발한 낮 동안에 농도(특히 water-soluble 성분)가 증가함에 따라 복사강제력 또한 증가한 것으로 보인다.

고산 지점에서 연구기간동안(2010~2014년) $PM_{2.5}$ 및 PM_{10}의 water-soluble 성분에 따른 복사강제력은 2014년에 SFC, TOA, ATM에서 각각 -48, -38, +11 W/m^2, 각각 -62, -48, +14 W/m^{2}로 가장 크고, 2010년에 각각 -38, -30, +8.7 W/m^2, 각각 -50, -39, +12 W/m^{2}로 가장 작게 산출되었다. 한편, 월/계절별 복사강제력은 SFC, TOA, ATM에서 농도가 높은 봄철에 가장 크고 가을철에 가장 작은 값을 보였다. sea-salt 성분의 경우, water-soluble에 비해 매우 작게 산출되었다. 이외에도, 애월 지점에서 시간별 복사강제력은 SFC, TOA에서 모두 계절 또는 화학성분과 상관없이 모두 복사가열이 가장 잘 일어나는 낮(12~14시)에 가장 크게 나타났다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

본 연구를 통해 제주지역 내 대기질 측정지점 3곳(이도동, 연동, 동홍동)와 시골(애월) 및 배경지점(고산)에서 에어로졸 농도 또는 화학성분 농도의 시간적 변화를 분석하였으며, 시골/배경지점에서 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성 및 기후환경변화(복사강제력, 복사가열율)을 산출하였다. 도시지역에 속하는 대기질 측정지점에서는 자연적 에어로졸뿐만 아니라 차량배출가스 등 인위적 에어로졸의 영향이 큰 것으로 보이며, 시골/배경지점에서는 도시지역에 비하여 영향을 덜 받는 것으로 보인다. 또한 에어로졸의 농도변화는 강수량, 일사량, 풍속 등 기상요소의 영향이 중요한 것으로 판단되며, 에어로졸 화학성분별 광학특성 및 복사강제력은 각 화학성분의 농도 그리고 농도 변화에 기인한 기상요소들이 중요한 것으로 분석되었다. 하지만 제주지역 내 에어로졸 농도의 시공간적 변화 또는 화학성분별 광학특성 및 기후환경변화를 상세하게 분석하기에는 관측망 부족 그리고 시간별 자료의 부재로 많은 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 제주지역 내 에어로졸 관측망 확충이 요구되며, 에어로졸 광학특성 및 복사강제력에 대하여 보다 정확한 분석을 위하여 여러 기상조건의 영향(민감도 평가 등)을 분석하고 같은 조건에서의 공간적 비교(도시 지역과의 비교)를 할 필요가 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참 고 문 헌

강공언, 김남송, 이현주, 2008, 익산지역에서 봄철 비황사기간 중 입경별 대기먼지농도와 이온조성, 한국환경보건학회지, 34(4), 300-210.

국립기상과학원, 2012, 2012년도 황사보고서, 11-1360395-000347-01, 대한민국.

기상청, 2014~2015, 기상연보 2013~2014, 대한민국.

김지아, 진형아, 김철희, 2007, 부산 지역 미세먼지 농도의 시간변동 특성 및 기상인자 분석을 통한 먼지생성 해석, 한국환경과학회지, 16(10), 1157-1167.

박다정, 안준영, 신혜정, 배민석, 2014, PILS-TOC 및 GC/MS-TD를 이용한 서울시 대기 중 초미세먼지(PM2.5) 유기탄소의 특성 분석, 한국대기환경학회지, 30(5), 461-476.

박연희, 송상근, 이수정, 김석우, 한승범, 2016, 제주지역 미세먼지의 장기변동 및 농도변화에 관한 국지기상 분석, 한국환경과학회지, 25(1), 107-125.

박종성, 박승명, 송인호, 신혜정, 홍유덕, 2015, 에어로졸의 광학 및 화학 특성 준실시간 모니터링을 통한 서울지역 시정 감쇄 분석, 한국대기환경학회지, 31(4), 319-329.

배현주, 2014, 서울시 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 단기노출로 인한 사망영향, 한국환경보건학회지, 40(5), 346-354.

송상근과 손장호, 2014, 서울지역 시간별 에어로솔 자료를 이용한 화학성분별 광학특성 및 직접 복사강제력의 시간 변화 분석, 한국대기환경학회지, 30(1), 1-17.

이수정, 송상근, 박연희, 2016, 최근 제주도 도심과 배경지점에서의 CO2 농도 변화 및 복사강제력 영향 연구, 한국환경과학회지, 25(7), 973-987.

이시혜, 김영성, 김상우, 윤순창, 2008, 서울과 고산의 에어로졸 화학성분과 광학특성의 계절변화, 한국대기환경학회지, 24(4), 470-482.

전병일, 2010, 부산지역 PM_{10}과 $PM_{2.5}$농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 한국환경

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

과학회지, 19(8), 1013-1023.

한국환경정책·평가 연구원, 2012, 초미세먼지(PM2.5)의 건강영향 평가 및 관리정책 연구Ⅰ, 연구보고서 2013-03, 1-209.

홍상범, 정덕상, 이순봉, 이동은 ,신승희, 강창희, 2011, 제주도 해안과 산간 지역 대기 에어러솔의 이온조성 비교, 한국분석과학회지, 24(1), 24-37.

환경부, 2002~2015, 대기환경연보 2001~2014, 대한민국.

Adesina, A.J., Kumar, K. R., Sivakumar, V., Griffith, D., 2014, Direct radiative forcing of urban aerosols over Pretoria (25.75 °S, 28.28 °E) using AERONET Sunphotometer data: First scientific results and environmental impact, Journal of Environmental Sciences, 26(12), 2459-2474.

Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T., 2011, Aerosol optical properties and radiative forcing over mega-city Karachi, Atmospheric Research, 101, 773-782.

Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T., Subhan, F., 2014, Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia, Remote Sensing of Environment, 143, 216-227.

Albrecht, B.A., 1989, Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness, Science, 245, 1227-1230.

Allen, G.A., Lawrence, J., Koutrakis, P., 1999, Field validation of a semi-continuous method for aerosol black carbon (aethalometer) and temporal patterns of summertime hourly black carbon measurements in southwestern PA, Atmospheric Environment, 33 (5), 817-823.

Anttila, P., Tuovinen, J. P., 2010, Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007, Atmospheric Environment, 44, 30-41.

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.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Bae, M.S., 2011, Seasonal estimation of organic mass to organic carbon (OM/OC ratio), Proceedings of 49th meeting of Korean Society for Atmospheric Environment.

Cerveny, R. S., Coakley, K. J., 2002, weekly cycle in atmospheric carbon dioxide, Geophysical Research Letters, 29(2), 15-1-15-4.

Clements, N., Hannigan, M. P., Miller, S. L., Peel, J. L., Milford, J. B., 2016, Comparisons of urban and rural $PM_{10-2.5}$ and $PM_{2.5}$ mass concentrations and semi-volatile fractions in northeastern Colorado, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 7469-7484.

El-Metwally, M., Alfaro, S.C., Wahab, M.M.A., Favez, O., Mohamed, Z., Chatenet, B., 2011, Aerosol properties and associated radiative effects over Cairo (Egypt), Atmospheric Research, 99(2), 263-276.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, R. Van Dorland, 2007, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ganguly, D., Jayaraman, A., 2006, Physical and optical properties of aerosols over an urban location in western India: Implications for shortwave radiative forcing, Journal of Geophysical Research, 111, D24207.

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.

Janssen, N. A. H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C., Cassee, F. R., 2013,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Short-term effects of PM2.5, PM10 and PM2.5-10 on daily mortality in the Netherlands, Science of the Total Environment , 20-26.

Kaskaoustis, D.G., Kambezidis, H.D., Hatzianastassiou, N., Kosmopoulos, P.G., Badarinath, V.S., 2007, Aerosol climatology: on the discrimination of aerosol types over four AERONET sites, Atmospheric Chemistry and Physics, 7, 6357-6411.

Kedia, S., Ramachandran, S., Kumar, A., Sarin, M.M., 2010, Spatiotemporal gradients in aerosol radiative forcing and heating rate over Bay of Bengal and Arabian Sea derived on the basis of optical, physical, and chemical properties, Journal of Geophysical Research, 115, D07205.

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.

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(2), 279-287.

Kondo, M.C., Mizes, C., Lee, J., Burstyn, I., 2014, Black carbon concentrations in a goods-movement neighborhood of Philadelphia, PA, Environmental Monitoring and Assessment, 186(7), 4605-4618.

Koren, I., Martins, J. V., Remer, L. A., Afargan, H., 2008, Smoke Invigoration Versus Inhibition of Clouds over the Amazon, Science, 321(5891), 946-9.

Kumar, S., Devara, P.C.S., 2012, A long-term study of aerosol modulation of atmospheric and surface solar heating over Pune, India, Tellus Series B, Chemical and physical meteorology, 64, 1-13.

Panicker, A.S., Pandithurai, G., Safai, P.D., Dipu, S., Lee, D.-I., 2010, On the contribution of black carbon to the composite aerosol radiative forcing over an urban environment, Atmospheric Environment, 44, 3066-3070.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Pilson, M. E. Q., 1998, An Introduction to the Chemistry of the Sea, Prentice Hall, New Jersey, 431 pp.

Qin, Y., Tonnesen, G.S., Wang, Z., 2004, Weekend/weekday differences of ozone, NO_x, Co, VOCs, PM_{10} and the light scatter during ozone season in southern California, Atmospheric Environment, 38, 3069-3087.

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, D19S01.

Ramachandran, S., 2005, Aerosol radiative forcing over Bay of Bengal and Chennai: Comparison with maritime, continental, and urban aerosol models, Journal of Geophysical Research, 110, D21206.

Ramana, M. V., V. Ramanathan, Y. Feng, S-C. Yoon, S-W. Kim, G. R. Carmichael, J. J. Schauer, 2010, Warming influenced by the ratio of black carbon to sulphate and the black-carbon source, Nature Geoscience, 8(8), 542-545.

Ramanathan, V., G. Carmichael, 2008, Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geoscience, 1, 221-227.

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.

Rudra P. Pokhrel, Nick L. Wagner, Justin M. Langridge, Daniel A. Lack, Thilina Jayarathne, Elizabeth A. Stone, Chelsea E. Stockwell, Robert J. Yokelson, Shane M. Murphy, 2016, Parameterization of single-scattering albedo (SSA) and absorption Ångström exponent (AAE) with EC/OC for aerosol emissions from biomass burning,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 9549-9561.

Samoli, E., Stafoggia, M., Rodopoulou, S., Ostro, B., Declercq, C., Alessandrini, E., Díaz, J., Karanasiou, A., Kelessis, A. G., Le Tertre A., Pandolfi, P., Randi, G., Scarinzi, C., Zauli-Sajani, S., Katsouyanni, K., Forastiere, F., 2013, Associations between fine and coarse particles and mortality in Mediterranean cities: results from the MED-PARTICLES project, Environmental Health Perspectives, 121, 932-938.

Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2006, Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change, 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, 1232 pp.

Shon, Z.-H., S. Ghosh, K.-H. Kim, S.-K. Song, K. Jung, N.-J. Kim, 2013, Analysis of water-soluble ions and their precursor gases over diurnal cycle, Atmospheric Research, 132-133, 309-321.

Simmonds, P. G., Derwent, R. G., Manning, A. L., Spain, G., 2004, Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003, Atmospheric Environment, 38, 4769-4778.

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.

Sinha, P.R., Dumka, U.C., Manchanda, R.K., Kaskaoutis, D.G., Sreenivasan, S., Moorthy, K.K., Suresh, S.S., 2013, Contrasting aerosol characteristics and radiative forcing over Hyderabad, India due to seasonal mesoscale and synoptic-scale processes, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 139(671), 434-450.

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, 112, D22S36.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Twomey, S., 1977, The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, Journal of the Atmospheric Sciences., 34, 1149-1152.

Yan, P., Pan, X., Tang, J., Zhou, X., Zhang, R., Zeng, L., 2009, Hygroscopic growth of aerosol scattering coefficient: A comparative analysis between urban and suburban sites at winter in Beijing, Particuology, 7, 1, 52 - 60.

Yoon, S.C., Kim, J.Y., 2006, Influences of relative humidity on aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during ACE-Asia, Atmospheric Environment, 40, 4328-4338.

Yu, H., Kaufman, Y.J., Chin, M., Feingold, G., Remer, L.A., Anderson, T.L., Balkanski, Y., Bellouin, N., Boucher, O., Christopher, S., DeCola, P., Kahn, R., Koch, D., Loeb, N., Reddy, M.S., Schulz, M., Takemura, T., Zhou, M., 2006, A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing, Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 613-666.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Temporal and Spatial Variations in Aerosol Concentrations and the Impact of Different Aerosol Chemical Components on Direct Radiative Forcing in Jeju Area

Yeon-Hee Park

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

Abstract

In this study, the temporal and spatial variations of PM_{10} concentration and aerosol ($PM_{2.5}$ and/or PM_{10}) chemical components (water-soluble, insoluble, black carbon (BC), and sea-salt) were analyzed at three air quality monitoring sites (Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong) during 2001-2014 and Aewol/Gosan sites during 2010-2014, respectively. This study also calculated optical properties using the OPAC model and direct radiative forcing using the SBDART model according to aerosol chemical components at Aewol and Gosan sites.

Overall, the PM_{10} concentration of three air quality monitoring sites were highest in spring and lowest in summer. Also, the weekday PM_{10}

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

concentrations were higher than the weekend concentrations and the diurnal variations of PM_{10} concentration showed an increasing trend during rush hour (morning and evening traffic). Meanwhile, the aerosol chemical components at Aewol and Gosan sites, for most aerosol components, reached its peak during spring. $PM_{2.5}$ chemical components did not change much during the day, but it showed high concentration during the daytime in Aewol due to increased photochemical activity (Especially for the water-soluble).

Optical properties (absorption coefficient, scattering coefficient, extinction coefficient, and aerosol optical depth (AOD)) exhibited the highest contribution in water-soluble component at Aewol and Gosan site (except for absorbing BC). The temporal variations of the optical properties for all the aerosol components were similar to those of their concentrations. In particular, the monthly variations of AOD for most of the aerosol components (except for sea-salt) were highest in spring and reached the maximum value during the daytime. Meanwhile single scattering albedo (SSA) was inversely proportional to BC components.

The total mean DARFs (direct aerosol radiative forcing) of $PM_{2.5}$ derived over Aewol site (2013) were -65, -25, and +40 W/m^2 at the SFC (surface), TOA (top of atmosphere), and in the ATM (atmosphere), respectively. The impacts of the water-soluble component on the $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, and $DARF_{ATM}$, which was the most dominant among 4 chemical components, was -30, -24, and +5.9 W/m^2, respectively. In the case of BC, its negative or positive impacts on the $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, and $DARF_{ATM}$ was -21, +5.7, +27 W/m^2, respectively. Meanwhile, at Gosan site (2010-2014), the impacts of the water-soluble component of $PM_{2.5}$ and PM_{10} on the $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, and $DARF_{ATM}$ were highest in 2014 (-48, -38, +11 W/m^2 and -62, -48, +14 W/m^2, respectively) and the lowest in 2010 (-38, -30, +8.7 W/m^2 and -50, -39, +12 W/m^2, respectively). On the other hand, in case of sea-salt component, it showed a very small value compared to that of the

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

water-soluble.

This study confirmed the aerosol concentration and the impacts of aerosol chemical components on the optical properties or DARF tend to vary according to the time scales. Future studies should analyze the influence of the environmental conditions (e.g. RH) and spatial comparison (urban and remote/rural areas) on optical properties or DARF to better understand the regional or local behavior of the radiative effects of aerosols.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY