

ORIGINAL ARTICLE

위성자료를 이용한 2001-2010년 동안의 동아시아 지역 에어로졸 직접복사강제력 분석

정지현 · 김학성* · 김준태 · 박용필 · 최현정¹⁾

한국교원대학교 지구과학교육과, ¹⁾한국과학영재학교

An Analysis of Aerosol Direct Radiative Forcing Using Satellite Data in East Asia During 2001-2010

Ji-Hyun Jeong, Hak-Sung Kim*, Joon-Tae Kim, Yong-Pil Park, Hyun-Jung Choi¹⁾

Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, Korea

¹⁾Korea Science Academy of KAIST, 105-47, Baekyanggwannmun-ro, Busanjin-gu, Busan 614-822, Korea

Abstract

The shortwave aerosol direct radiative forcing (SWARF) was analyzed using the Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES) data in the East Asian region from 2001 to 2010. In the Yellow Sea and the Korean Peninsula, located in the leeward side of China, significantly negative high SWARF at the top of atmosphere (TOA) occurs due to the long-range transport of anthropogenic (e.g. sulphate) and natural aerosols (e.g. mineral dust) from the East Asian continent. Conversely, eastern China has much higher levels of SWARF at the surface (SFC) due to anthropogenically emitted aerosol than in the Yellow Sea and the Korean Peninsula. Since the radiative forcing of aerosols in the atmosphere are different in type, aerosol types were classified into sea salt+sulphate, smoke, sulphate and dust by using satellite data. The analysis on the SWARF by the classified aerosol types indicated that sulphate occupies a predominant portion of the atmosphere in the Yellow Sea and the Korean Peninsula in the summer. In particular, the annual averages of the summer TOA SWARF increased in the Yellow Sea and the Korean Peninsula from 2001 to 2010.

Key words : Aerosol, CERES, SWARF, TOA, SFC, Variation and change

1. 서론

에어로졸은 공기 중에 떠 있는 0.001~100 μm 크기의 액체와 고체입자를 일컫는다. 이러한 에어로졸은 대기 중으로 직접 배출되거나 비산하여 떠다니는 1차 에어로졸과 가스 상 분자에서 핵화 및 응축과정으로 생성되고 성장하는 2차 에어로졸로 나누어진다. 발생

원에 따라서는 지표에서 배출된 광물성 먼지, 해염 에어로졸, 육지와 바다의 생물체에서 기원한 에어로졸, 화산분출에서 나오는 황염 및 분진성 에어로졸은 자연적 에어로졸이다. 반면 화석연료와 바이오매스의 연소로 발생하는 황화화합물, 유기화합물, 검댕 (black carbon), 그을음을 함유하는 에어로졸 및 산업공정, 노천채광과 같은 인간 활동으로 생성되는 에어로졸은

Received 24 May, 2013; Revised 23 July, 2013;

Accepted 29 July, 2013

*Corresponding author : Hak-Sung Kim, Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, Korea

Phone: +82-43-230-3777

E-mail: envir007@knue.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인위적 에어로졸로 구분한다(Binkowski 등, 2003).

기후에 영향을 미치는 구름과 에어로졸의 역할에 대해 최근 많은 연구가 진행되고 있지만, 아직까지는 기후변화 예측의 불확실성에 가장 큰 원인의 하나로 지적되고 있다(Albrecht, 1989; Kaufman 등, 2002; Hong 등, 2008). 대기 중 체류시간이 긴 온실기체의 농도 증가는 $+2.63(\pm 0.26) Wm^{-2}$ 의 복사강제력을 유발하고 있으며, 온실기체에 대한 복사강제력의 이해 수준은 매우 높다(IPCC, 2007). 그러나, 모델과 관측으로 파생된 총 직접 에어로졸 복사강제력은 $+0.5(\pm 0.4) Wm^{-2}$ 로 추정하고 있지만 과학적인 이해도가 낮은 수준이다(IPCC, 2007).

동아시아는 급격한 경제성장에 따른 화석 연료의 사용 증가로 인위적 발생 에어로졸의 배출이 급격히 증가하고 있으며, 봄철에 주로 발생하는 토양기원 에어로졸(황사)까지 대기 중으로 유입되고 있어 에어로졸의 시·공간적 분포가 매우 복잡하다(Kim 등, 2012a; Kim 등, 2012b; Kim 등, 2013). 동아시아 지역은 에어로졸 광학두께 자료로부터 전체적인 에어로졸이 증가하고 있지만, 대기 중 고체 입자상 에어로졸은 줄어들고 오히려 2차적으로 발생하는 미세 에어로졸은 증가하고 있다(Kim 등, 2013). 따라서, 인위적 발생 에어로졸들 간의 혼합이나 인위적 발생 에어로졸과 자연 발생적 에어로졸의 혼합으로 인해 에어로졸의 유형 분류나 소스, 싱크 및 분포를 산정하기가 쉽지 않다(Ichoku

등, 2004). 각각의 에어로졸별 직접 복사강제력은 총 직접 에어로졸 복사강제력과 비교하여 불확실성이 더 크다(IPCC, 2007). 동아시아 지역에서 에어로졸이 기후에 미치는 영향을 이해하고 그에 대한 배출량 통제 등을 위해서는 에어로졸 유형별 복사강제력을 산정할 필요가 있다.

본 연구에서는 2001년 1월부터 2010년 12월까지 장기간 Terra 위성의 CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System) 센서 단파복사 관측 자료를 이용하여 동아시아 지역에서 SWARF(Shortwave Aerosol Radiative Forcing)의 시·공간적 분포 특성을 조사하였다. 또한 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) 에어로졸 자료를 활용한 유형 분류 알고리즘으로 에어로졸 유형을 분류하고 SWARF와 상관 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 분석 대상 지역

본 연구 대상 지역은 위도 $30\sim 50^\circ N$, 경도 $100\sim 135^\circ E$ 의 동아시아 지역으로 자연적 발생 에어로졸과 인위적 발생 에어로졸이 혼합되어 있다(Fig. 1). 한반도 또는 동아시아 지역에서 장기적으로 에어로졸의 광역적 분포 변화에 따른 복사강제력을 분석하였다. 동아시아 지역은 에어로졸 분포가 시·공간적 변동성

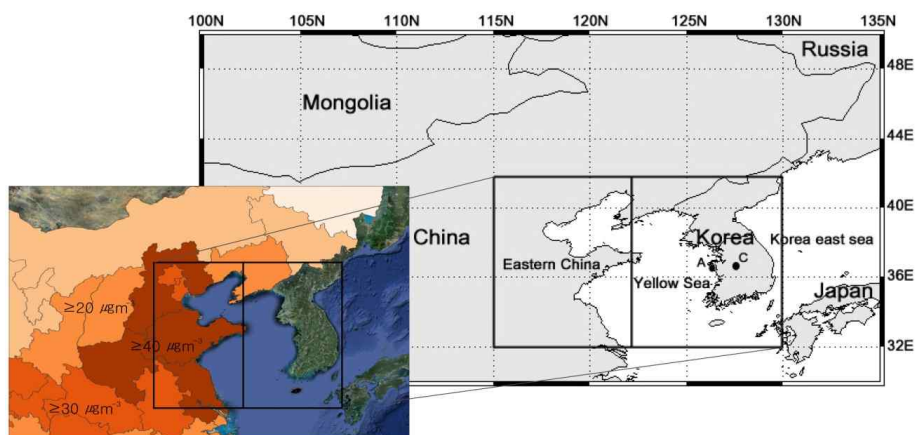


Fig. 1. The East Asian region (EA) is subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) according to the annual $PM_{2.5}$ exposure between 2008~2010 (Van Donkelaar et al., 2010).

이 매우 크고 중국 동부에서 광역적으로 배출된 인위적 대기오염 물질이 수 백 km의 장거리를 이동하여 동아시아 대륙의 풍하측에 위치해 있는 한국과 일본 등에 영향을 주고 있다(Kim 등, 2007; Kim 등, 2013).

위성관측과 대기 화학적 모델에 따라 산출한 중국의 연평균 PM_{2.5} 질량 농도 분포에서는 중국 동부지역이 연평균 40 μgm^{-3} 이상의 상대적으로 높은 PM_{2.5} 질량 농도를 나타내고 있다(Van Donkelaar 등, 2010). 특히, 인위적 에어로졸의 발생과 이동에 따른 복사강제력을 분석하기 위하여 한반도 주변 지역을 세분하였다. 한반도의 풍상측에 위치하며 주로 인위적 에어로졸의 발생이 많은 중국 동부 (115~122° E, 32~42° N), 그리고 그 풍하측에 위치한 황해와 한반도 (122~130° E, 32~42° N)로 구분하였다.

2.2. 분석 자료

Terra 위성에 탑재된 CERES 센서로 부터 에어로졸에 의해 대기 상단(TOA; Top of Atmosphere)에서 우주로 방출되는 단파복사, 그리고 지표면에서 산란·흡수되는 단파복사 자료를 사용했다. CERES SYN1deg (Synoptic Fluxes and Clouds) 데이터는 CERES 센서로 측정된 TOA 태양복사 플럭스, MODIS 센서에서 측정된 구름과 에어로졸의 상태, 지구정지궤도위성에서 얻어진 구름의 속성과 광대역 플럭스를 CERES 측정 기준에 맞추어 시간적 내삽을 하여 생성한다. 또한 데이터는 대기 중, 지표면, TOA 플럭스로 산출된다. TOA 플럭스는 전천 (all-sky), 청천 (clear-sky), 초기 하늘 (에어로졸을 제외한 청천), 그리고 에어로졸을 제외한 전천 상태로 분류하여 산출한다. TOA 플럭스는 3시간, 월별 3시간, 그리고 월별로 전 지구 범위를 1°×1°로 변환하여 나타낸다. 이렇게 산출된 플럭스 데이터는 청천과 전천 상태의 장파, 단파, 그리고 대기 창 범위로 제공된다. CERES에서 측정된 데이터는 전 지구 모델 ADMs (Atmospheric Dispersion Modelling System)를 통해 제공된다. ADMs는 0.55 μm 파장대에서 지표 부근 바람 속도와 총 에어로졸 광학 깊이를 고려하여 구성하였다.

TOA SWARF는 CERES_SYN1deg_Ed3A 데이터에서 얻은 전천, 청천일 때의 일별 태양복사플럭스 값을 사용하였다.

$$\text{TOA SWARF} = F_{\text{clr}} - F_{\text{all}} \tag{1}$$

식 (1)의 TOA SWARF는 1°×1° 영역으로 산출하였다. F_{clr} 은 에어로졸을 제거한 청천화소의 대기상단 태양복사플럭스, F_{all} 은 에어로졸을 포함한 대기상단 태양복사 플럭스를 의미한다. 따라서 대기 상단에서 에어로졸에 의해 산란되어 우주로 방출되는 태양복사 플럭스의 값을 TOA SWARF로 나타내었다.

SFC SWARF (Surface-Down SWARF, Surface-Up SWARF)는 CERES_EBAF-Surface_Ed2.6에서 얻어진 전천, 청천일 때의 월별 태양복사플럭스 값을 사용하였다.

$$\text{SFC-Down SWARF} = F_{\text{all}} - F_{\text{clr}} \tag{2}$$

$$\text{SFC-Up SWARF} = F_{\text{clr}} - F_{\text{all}} \tag{3}$$

식 (2), (3)을 이용하여 SFC-Down SWARF, SFC-Up SWARF 1°×1° 영역으로 산출하였다. SFC-Down SWARF은 대기 중에 존재하는 에어로졸과 구름에 의해 산란되거나 흡수되는 태양복사플럭스의 값을 나타낸다. 또한 SFC-Up SWARF는 지표면과 가까운 공기층에서 에어로졸에 의해 산란되거나 흡수되는 태양복사플럭스 값으로 나타낸다.

대기 중 에어로졸의 유형을 구분하고 각각의 에어로졸과 단파 에어로졸 직접복사강제력과의 상관관계를 분석하는 것이 필요하다. 에어로졸 유형을 구분하는 알고리즘은 에어로졸의 복사 흡수 특성과 에어로졸의 크기 분포에 관한 정보를 통해서 만들어 졌다 (Lee 등, 2007). Terra 위성 MODIS 센서로 부터 얻어진 에어로졸 광학 깊이(AOD; Aerosol Optical Depth) 자료, 에어로졸 크기 정보(AE; Ångström Exponent)와 Aura 위성의 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 센서로 얻어진 태양복사흡수도(AI; Aerosol Index) 자료를 이용하였다.

AOD와 AE는 MODIS 센서의 36개 채널 중 0.47~2.13 μm 사이의 7개 채널 (0.47 μm , 0.55 μm , 0.67 μm , 0.87 μm , 1.24 μm , 1.64 μm , 2.13 μm)을 이용하여 산출한다. 육상의 경우는 0.47 μm , 0.67 μm , 0.87 μm , 2.13 μm 등 5개의 파장대를 이용하며 해상에서는 7개 파장대

모두를 이용하여 AOD와 AE를 산출한다(Lee 등, 2007; Remer 등, 1998). 육상에서는 사막과 같이 높은 반사도를 가지는 지면과 구름을 제외하지만 해상은 육상과 비교하여 표면이 균질하고 반사도가 낮으므로 표면의 반사도는 고려하지 않는다. AOD와 AE는 Level 3 일평균 자료를 사용하였으며 이 자료는 위성의 직하점에서 약 $10 \times 10 \text{ km}^2$ 의 공간 해상도를 가진다.

AOD는 육지와 해양 위에서 연직대기(column)의 에어로졸 광학 깊이를 의미한다. $0.55 \mu\text{m}$ 파장에서 빛의 산란 정도를 측정하는 무차원 값으로 일반적으로 0~5의 범위이며 값이 클수록 대기 중 에어로졸이 많음을 나타낸다. AE는 대기 중 입자의 크기와 반비례하는 관계를 갖는 값으로 육지에서는 $0.47 \mu\text{m} / 0.67 \mu\text{m}$, 해양은 $0.55 \mu\text{m} / 0.87 \mu\text{m}$ 로 서로 다른 파장을 관측하여 산출한다. AE는 물리적으로 두 파장에서의 AOD 비율을 파장의 비율에 대한 지수로 나타내어 크기를 산출하는 지표이다.

AI는 에어로졸 지수로 $0.38 \mu\text{m}$ 에 대한 $0.34 \mu\text{m}$ 에서 관측된 복사 휘도의 비율 $((I_{0.34}/I_{0.38})_{meas})$ 과 $0.38 \mu\text{m}$ 에 대한 $0.34 \mu\text{m}$ 에서 레일리 대기를 가정하여 계산된 복사휘도 비율 $((I_{0.34}/I_{0.38})_{calc})$ 을 이용한다. 복사흡수성이 있는 흑탄소 입자나 광물성 먼지의 경우 $0.38 \mu\text{m}$ 에서 보다 $0.34 \mu\text{m}$ 에서 더 많은 복사를 흡수하므로 흑탄소 입자나 광물성 먼지와 같이 복사 흡수성이 큰 에어로졸은 AI 지수가 양의 큰 값을 나타내고, 복사 흡수성이 없는 황산염이나 해염은 AI가 음수 또는 0에 가까운 값을 보인다(Torres 등, 1998).

3. 결과 및 논의

3.1. 동아시아 지역의 에어로졸 공간 분포

에어로졸은 유형에 따라 크기, 농도, 화학적 조성이 다르며 복사강제력의 기여도도 다르다. Fig. 2는 2005~2010년 동안 동아시아에서 대기 중 에어로졸 유형을 분류하고, 유형에 따른 빈도 비율을 비교한 것이다. 동아시아 지역에서는 전체적으로 태양복사에 대한 비흡수성을 갖는 해염과 황산염 혼합물의 빈도 비율이 가장 높게 나타났다. 중국 동부 공업지대에서는 화석연료 연소로 배출된 SO_2 가 대기 중에서 일사량과 수증기의 작용으로 2차적인 흡습성 황산염이 만들어지게

된다(Kim 등, 2007; Kim 등, 2013; Myhre 등, 2004). 또한, 중국 내륙에서 미세한 크기를 갖는 스모크가 주로 생체 연소(biomass burning)로 인해 발생하고 있다(Kim 등, 2006). 중국 내륙 건조(사막) 지역과 내몽골 지역에서는 토양 입자로 구성된 비교적 크기가 큰 에어로졸인 먼지가 많다. 그러나, 황해와 한반도에서는 스모크와 황산염의 빈도 비율이 주요한 인위적 에어로졸 발생 지역인 중국 동부 지역보다 높게 나타나고 있다. 중국 동부의 풍하측에 위치한 황해와 한반도 지역은 서풍 기류에 의한 장거리 이동 영향을 지속적으로 받고 있다.

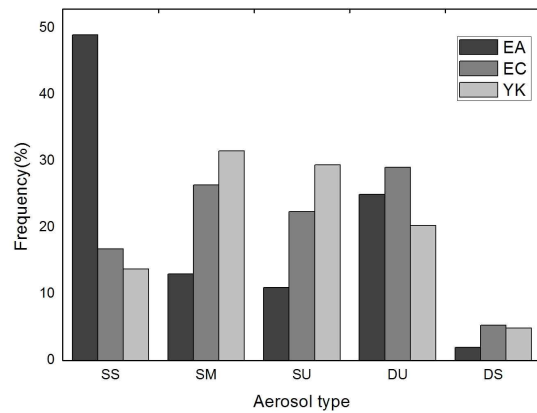


Fig. 2. Frequencies of aerosol types in East Asia (EA), which is subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) during 2005~2010 (SS; sea salt+sulphate, SM; smoke, SU; sulphate, DU; dust, and DS; dust+smoke).

Table 1은 2006~2010년 동안 매일 Terra 위성의 MODIS AOD, AE, 그리고 Aura 위성 OMI AI 자료를 활용하여 동아시아 지역에서 대기 중 에어로졸 유형을 해염+황산염, 스모크, 황산염, 먼지, 먼지+스모크의 5가지 유형으로 분류하고, 각각 에어로졸 유형에 따른 화소의 갯수를 나타낸 것이다. 동아시아에서는 전체적으로 계절에 상관없이 태양 복사에 대한 비흡수성 에어로졸인 해염과 황산염의 혼합물, 그리고 먼지와 같은 자연발생적 에어로졸 유형이 많다. 그리고 중국 동부에서는 봄과 겨울은 먼지, 여름은 황산염, 가을은 스모크에 의한 영향이 크게 나타나고 있다. 또한,

Table 1. Seasonal frequencies of classified aerosol types in East Asia (EA) which was subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) during 2006~2010 (SS; sea salt+sulphate, SM; smoke, SU; sulphate, DU; dust, and DS; dust+smoke)

		Aerosol type, Number of pixels							
		spring		summer		fall		winter	
EA	SS	120,481	SS	236,681	SS	218,288	SS	56,131	
	DU	60,246	DU	118,351	DU	109,159	DU	28,068	
	SM	40,188	SU	77,770	SM	59,007	SM	20,026	
	SU	20,069	SM	40,590	SU	50,146	SU	8,046	
	DS	9,393	DS	2,525	DS	6,381	DS	3,086	
EC	DU	9,267	SU	12,372	SM	7,934	DU	3,439	
	SM	4,094	SM	7,830	DU	6,772	SM	1,958	
	SS	3,317	SS	3,451	SS	6,720	SS	979	
	SU	1,524	DU	1,869	SU	5,984	SU	701	
	DS	1,488	DS	488	DS	1,848	DS	447	
YK	SM	7,687	SU	13,664	SM	8,646	DU	2,989	
	DU	5,284	SM	5,079	SU	6,716	SM	1,962	
	SU	3,266	SS	2,053	SS	4,559	SU	906	
	SS	2,909	DU	606	DU	2,533	SS	828	
	DS	1,588	DS	151	DS	151	DS	539	

황해와 한반도에서는 봄, 가을은 인위적 발생 에어로졸인 스모크의 영향을 받으며, 여름은 황산염, 겨울은 먼지의 발생 빈도가 높다.

특히 여름에는 중국 대륙의 황산염이 풍하측에 위치한 중국 동부, 황해와 한반도로 유입되고 북태평양 기단의 영향을 받아 대류권 하층에서 증가한 습도는 황산염의 성장을 돕게 되어 해염+황산염 또는 황산염의 형태로 발생되고 있다(Kim 등, 2007; Kim 등 2013). 중국기원 공기의 경우 많은 황산염 에어로졸을 포함하고 있어 이들 에어로졸의 흡습성장률이 상당히 높게 관측됨을 볼 수 있다.

3.2. 동아시아 지역에서 에어로졸 단파직접복사강제력의 분포

Fig. 3은 2001~2010년 동안 동아시아 지역에서 TOA SWARF를 평균한 것이다. 동아시아 지역 전체에 대한 10년 평균 TOA SWARF는 -32.63 Wm^{-2} 로 음의 복사강제력을 나타내고 있다. 동아시아에서 고위도일수록 음의 SWARF이 작아지고 있다. 동아시아 북부는 몽골과 중국 북부 내륙 건조지역으로 지표면에서 토양 기원 먼지가 대기 중으로 배출이 많은 지역이다. 대기 중 주로 조대 입자인 먼지는 복사에 대한 흡수성이 있기 때문에 복사의 산란과 반사의 강도가

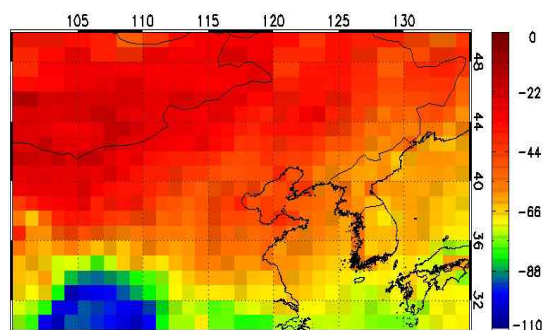


Fig. 3. Distributions of mean TOA SWARF in the East Asian region during 2001~2010.

작다(Won 등, 2004).

황산염이나 유기탄소 (OC; organic carbon)와 같은 에어로졸은 햇빛을 산란시키고 지표에 도달하는 태양 복사량을 줄여 결국 지표 냉각에 기여한다 (Ramanathan 등, 2001). 특히 황산염 에어로졸은 태양 복사 에너지를 강하게 반사시키면서 지표면에 도달하는 단파복사의 양을 줄이며 지표면 냉각을 유발한다(Tu 등, 2005; Ramanathan 등, 2005). 따라서, 동아시아에서 위도가 낮아질수록 대도시와 산업지역이 많이 분포하여 대기 중 인위적 에어로졸의 배출이 많다. 특히, 중국 남부 충칭 공업지역(30°N, 105°E 부근)에서

는 가장 큰 음의 복사강제력 (-99.52 Wm^{-2})을 나타내고 있다. 또한 중국 동부지역으로부터 동쪽으로 황해와 한반도 그리고 동해까지 음의 SWARF가 커지고 있다.

Table 2은 2006~2010년 동안 매일 Terra 위성의 MODIS AOD, AE, 그리고 Aura 위성 OMI AI 자료를 활용하여 동아시아 대기 중 에어로졸 유형을 해염+황산염, 스모크, 황산염, 먼지 등 4가지로 분류하고, 에어로졸 유형에 따른 TOA SWARF를 나타낸 것이다. 에어로졸 유형 중 먼지+스모크 혼합물은 빈도 비율이 동아시아 전체, 중국 동부, 황해와 한반도에서 각각 4.4% (27,556), 5.3% (5,166), 4.9% (4,316)로 측정 사례가 적어 분석에서 제외했다. 동아시아 전체적으로 에어로졸 유형에 따른 복사 강제력은 음의 값을 보이고 있다. 중국 동부에서는 황산염에 의한 TOA SWARF가 -2.83 Wm^{-2} 로 가장 큰 음의 복사강제력을 보이고 있다. 그리고 황해 및 한반도에서도 중국 동부보다는 작지만 황산염에 의한 TOA SWARF가 -2.13 Wm^{-2} 로 다른 에어로졸 유형보다 음의 복사강제력이 크게 나타난다. 아직까지 모델에 의해 산출되는 각각의 에어로졸별 복사 강제력에서도 총 직접 에어로졸 복사강제력과 비교하여 불확실성이 크다. 모델에 의해서도 황산염은 $-0.4(\pm 0.2) \text{ Wm}^{-2}$ 의 음의 복사강제력을 나타내고 있다(IPCC, 2007). 1980년대와 비교하여 2000년대 들어 동아시아 지역에서는 SO_2 , NO_x 등의 배출량이 크게 증가하였고, 중국뿐 아니라 한국과 일본을 포함하는 동아시아 지역의 오염 물질 농도가 증가하였다(Ohara 등, 2007).

Table 2. TOA SWARF values according to the classified aerosol types in East Asia (EA), which was subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) during 2006~2010 (SS; sea salt+sulphate, SM; smoke, SU; sulphate, DU; dust)

Area	SS	SM	SU	DU
	TOA SWARF (Wm^{-2}) (Number of pixels)			
EA	-3.13 (743,845)	-2.70 (199,864)	-2.68 (172,124)	-3.02 (371,961)
EC	-2.74 (16,424)	-2.66 (25,733)	-2.83 (21,984)	-2.71 (21,984)
YK	-1.66 (12,005)	-1.73 (27,297)	-2.13 (26,364)	-1.55 (17,391)

3.3. 동아시아 지역 에어로졸 단파직접복사강제력의 장기간 변화

Fig. 4는 2001~2010년 동안 동아시아에서 에어로졸 단파 직접복사강제력의 대기 상단(TOA SWARF), 대기 중(SFC-Down SWARF), 지표면(SFC-Up SWARF)의 연변화를 나타낸다. 대기 상단과 대기 중에서는 황해 및 한반도에서 음의 SWARF가 크게 나타난다. 특히 2003년에는 러시아의 산불에 의한 스모크가 동아시아에 광역적으로 영향을 주어서 동아시아 전체에서 SWARF가 크게 나타나는 변동을 보이고 있다(Lee 등, 2004).

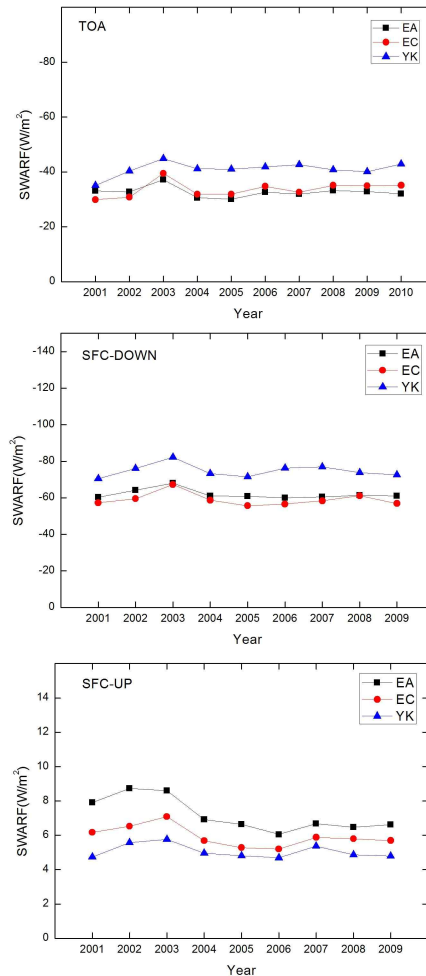


Fig. 4. Variations of yearly SWARF values in East Asia (EA), which was subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) during 2001~2010.

10년 평균 TOA SWARF와 SWARF-Down은 동아시아 전체에서 각각 -32.63 Wm^{-2} , -61.89 Wm^{-2} 그리고 중국 동부에서는 각각 -33.65 Wm^{-2} , -59.03 Wm^{-2} 이지만, 황해와 한반도에서는 각각 -41.06 Wm^{-2} , -74.95 Wm^{-2} 로 가장 크게 나타난다. 동아시아 북부의 몽골과 중국 내륙 건조지역에서 발생하는 토양 기원 먼지와 중국 동부 공업지대에서 배출되어 2차적으로 생성되는 황산염 등이 풍하측인 황해 및 한반도로 장거리 이동하여 영향을 주는 것으로 사료된다(Kim 등, 2007; Kim 등 2013). SFC-Up SWARF는 지표 부근 대기 중 에어로졸의 발생을 나타낸다. 황해와 한반도의 SFC-Up SWARF가 5.06 Wm^{-2} 로 중국 동부 지역 SFC-Up SWARF가 5.93 Wm^{-2} 보다 낮은 양의 복사강제력을 나타내고 있다. 태양 복사에 대한 비흡수성인 인위적 에어로졸의 배출이 중국 동부에서 높게 나타나고 있으며 풍하측인 황해와 한반도에서 낮게 나타나고 있다.

2001~2010년 동안 동아시아에서 SWARF의 월별 변동에서 동아시아 전체 SWARF는 여름에 커지는 특징을 보이고 있다(Fig. 5). 특히 SWARF는 7월에 가장 크다. 동아시아에서는 봄에 몽골지역과 중국 북부 내륙지역에서 모래폭풍의 발생과 광역적 이동으로 공기 중에 토양 기원 먼지의 분포가 증가함에도 불구하고 오히려 여름에 SWARF가 크게 나타나고 있다. 동아시아에서 여름에는 일사량이 증가하고 북태평양 기단의 영향으로 상대습도가 증가하여 1차적으로 배출된 SO_2 , NO_x 등 기체상 오염물질이 황산염, 질산염으로 흡습 성장된다(Kim 등, 2007; Kim 등 2013). 지역적으로 황해와 한반도에서는 7월에 TOA SWARF와 SFC-Down SWARF가 각각 -84.56 Wm^{-2} , -121.92 Wm^{-2} 로 가장 크며, 중국 동부에서는 각각 -64.29 Wm^{-2} , -94.84 Wm^{-2} 로 작게 나타나고 있다. 그러나 SFC-Up SWARF는 중국 동부가 7월에 9.18 Wm^{-2} 로 황해와 한반도의 8.27 Wm^{-2} 보다 크다. 인위적 대기오염 배출이 큰 중국 동부보다 황해와 한반도에서 대기 상단과 대기 중에서 더 큰 SWARF 수준을 보이는 것은 장거리 이동과 광역적 확산으로 황산염 등의 흡습성장의 기여 때문이다. 상대습도와 흡습성 에어로졸과 연관이 있으며 60% 정도 복사강제력의 차이를 초래한다(Myhre 등, 2004). 흡습성 에어로졸이 존

재하는 경우 흡습 성장에 따라 에어로졸의 광학적 성질이 변화하게 되는데, 상대습도에 따라 에어로졸 광학적 두께가 증가하여, SWARF이 크게 증가함을 밝혔다(Markowicz 등, 2003; Yoon 등, 2006).

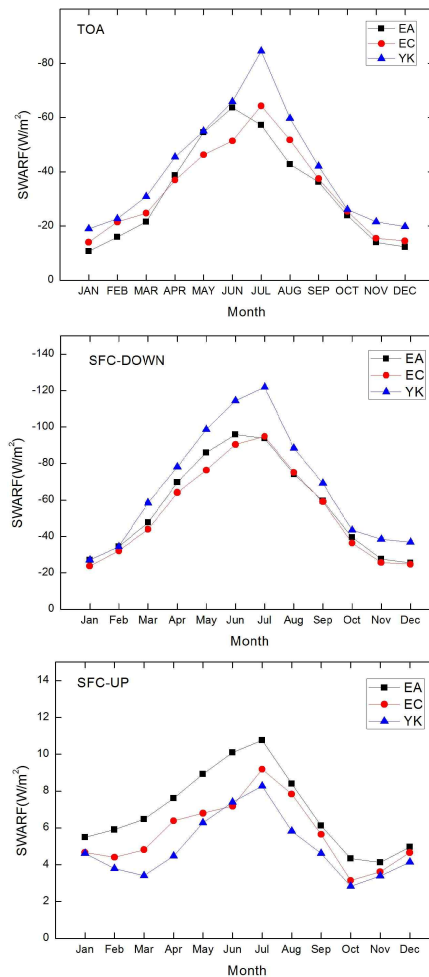


Fig. 5. Variations of monthly SWARF values in East Asia (EA), which was subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) during 2001~2010.

Fig. 6은 2001~2010년 동안 동아시아에서 대기 중 에어로졸에 의한 계절별 복사강제력 변화를 분석한 것이다. TOA SWARF는 계절변동에서 여름에 가장 큰 음의 값을 보이고 있었으며, 증가하는 변화 경향을 보이고 있다. 여름으로 들어서며 일사량과 수증기량

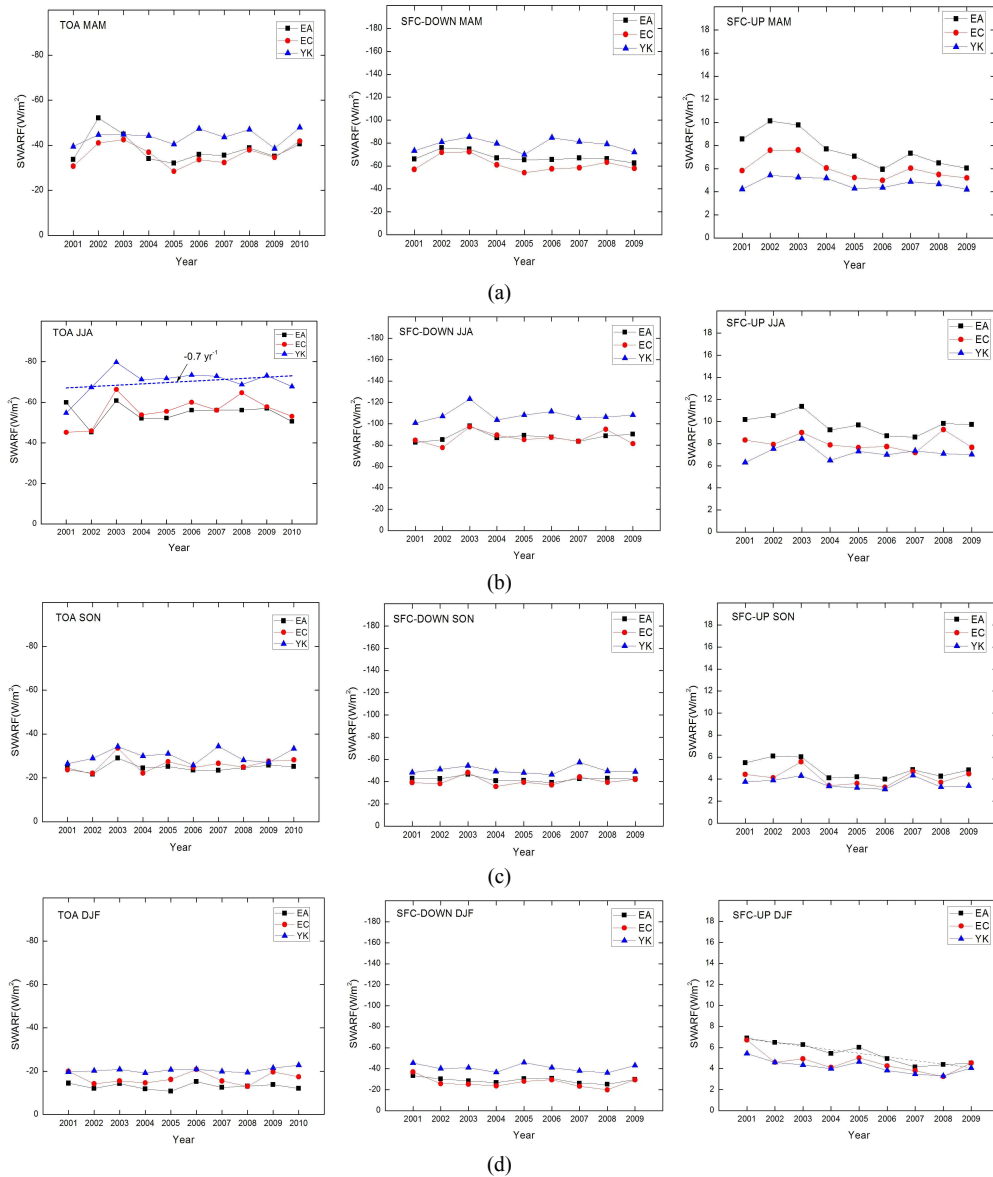


Fig. 6. Variations and trends of the seasonal SWARF values ((a) spring, (b) summer, (c) fall and (d) winter) in East Asia (EA) which was subdivided into eastern China (EC), the Yellow Sea and the Korean Peninsula (YK) during 2001~2010.

의 증가로 대기 중 황산염 발생이 촉진되어 풍하측인 황해 및 한반도에서 큰 음의 TOA SWARF이 나타나게 된다. 또한, 동아시아에서는 대기 중으로 에어로졸의 배출이 증가하고 있는데, 특히 여름에 에어로졸 증가에 따른 AOD 증가를 보이며 음의 복사강제력이 커지고 있다(Markowicz 등, 2003; Yoon 등, 2006).

SFC-Up SWARF는 여름에 가장 큰 값을 나타내고, TOA SWARF, SFC-Down SWARF와는 달리 지표 부근 에어로졸의 영향을 더 크게 받는다. 또한 9년 동안 동아시아에서는 SFC-Up SWARF가 봄, 가을, 겨울에 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 위성자료에서 산출된 AOD와 지상 질량 농도 관측을 비교했을

때 고체 입자상 에어로졸은 줄어들고 있지만, 대기 중에서 2차적으로 만들어지는 액체상 에어로졸은 증가하며, AE 자료를 분석했을 때 미세 입자의 비율이 커지는 것과 연계된다(Kim 등, 2013). 따라서 동아시아 지역 발생 에어로졸 중 태양복사 흡수성을 가진 황사의 비율은 작아지고 비흡수성을 가진 황산염과 같은 에어로졸의 비율이 커져 SFC-Up SWARF의 값이 작아짐을 의미 한다.

4. 결론

2001~2010년 동아시아 지역 에어로졸 단파 직접 복사강제력의 시·공간적 분포, 그리고 위성 자료를 활용하여 에어로졸 유형을 분류하여 SWARF와 상관을 분석하였다. 10년 평균에서는 동아시아지역 중 중국 남부 충청 공업지역에서 가장 큰 음의 복사강제력 (-99.52 Wm^{-2})을 보이고, 중국 동부지역으로부터 동쪽으로 황해와 한반도 그리고 동해까지 음의 SWARF가 커지고 있다.

동아시아 지역에서는 전체적으로 태양복사 비흡수 물질인 해염과 황산염 혼합물의 빈도 비율이 가장 높게 나타나고 있다. 또한, 동아시아 대륙의 풍하측에 위치한 황해 및 한반도 지역은 장거리 이동으로 스모크, 황산염의 빈도 비율이 높았다. 계절적으로는 중국 동부에서는 봄과 겨울에는 먼지, 여름에 황산염, 가을에는 스모크에 의한 영향이 크고, 황해와 한반도에서는 봄, 가을에는 인위적 발생 에어로졸인 스모크의 영향을 받으며, 여름에는 황산염, 겨울에는 먼지가 발생 빈도가 높았다.

동아시아 지역에서 에어로졸 유형별 단파직접복사 강제력을 분류한 결과 중국 동부에서는 황산염에 의한 TOA SWARF가 -2.83 Wm^{-2} 로 가장 큰 음의 복사강제력을 보이고 있다. 그리고 황해 및 한반도에서도 황산염에 의한 TOA SWARF가 -2.13 Wm^{-2} 로 다른 에어로졸 유형보다 음의 복사강제력이 크게 나타난다.

지표 부근의 에어로졸을 타나내는 SFC-Up SWARF은 중국 동부가 7월에 황해와 한반도 보다 큰 값을 보이고, 여름에 가장 큰 값을 나타낸다. SFC-Up SWARF가 감소하는 경향을 보이는 것은 동아시아 지역에서

발생하는 에어로졸 중 태양복사 흡수성을 가진 에어로졸의 비율은 작아지고 있지만 비흡수성을 가진 황산염과 같은 에어로졸의 비율이 커지고 있음을 시사한다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원(2012-0007035)을 받아 수행된 연구입니다.

참고 문헌

- Albrecht, B. A., 1989, Aerosol, cloud and microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, 245, 1227-1230.
- Binkowski, F. S., Roselle, S. J., 2003, Models-3 community multi-scale air quality (CMAQ) model aerosol component: 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, 108, 4183, doi:4110.1029/2001JD001409.
- Hong, S. C., Chung, I. U., Kim, H. J., Lee, K. T., Lee, J. B., 2008, Estimation of aerosol radiative forcing by AGCM, *Journal of the Environmental Sciences*, 17, 623-631.
- Ichoku C., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., Levy, R., 2004, Global aerosol remote sensing from MODIS, *Advances in Space Research*, 34, 820-827.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D., Boucher, O., 2002, A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419, 215-223.
- Kim, H. S., Byun, G. T., Chung, Y. S., Choi, H. J., Kim, M. J., 2012a, An analysis of aerosol mass concentrations and elemental constituents measured at Cheongwon depending on the backward trajectories of air parcel in East Asia in 2011, *Journal of the Environmental Sciences*, 21, 855-863.
- Kim, H. S., Chung, Y. S., Lee, S. G., 2012b, Characteristics of aerosol types during large-scale transport of air pollution over the Yellow Sea region and at Cheongwon,

- Korea, in 2008, *Environ. Monit. Assess.*, 184, 1973-1984.
- Kim, H. S., Chung, Y. S., Lee, S.G., 2013, Analysis of spatial and seasonal distributions of MODIS aerosol optical properties and ground-based measurements of mass concentrations in the Yellow Sea region in 2009, *Environ. Monit. Assess.*, 185, 369-382.
- Kim, J., Yoon, S. C., Jefferson, A. S., Kim, W., 2006, Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001, *Atmos. Environ.*, 40, 1550-1560.
- Kim, S. W., Yoon, S. C., Kim, J., Kim, S. Y., 2007, Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR and AERONET Sun/skyradiometer measurements, *Atmos. Environ.*, 41, 1634-651.
- Lee, J., Kim, J., Lee, H. C., Takemura, T., 2007, Classification of aerosol type from MODIS and OMI over east Asia, *J. Korean Met. Soc.*, 43, 343-357.
- Lee, K. H., Kim, J. E., Kim, Y. J., Kim, J., 2004, Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20, 603-613.
- Markowicz, K. M., Flatau, P. J., Vogelmann, A. M., Quinn, P. K., Welton, E. J., 2003, Clear-sky infrared aerosol radiative forcing at the surface and the top of the atmosphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, 2927-2948.
- Myhre, G., Myhre, G., Stordal, F., Berglen, T. F., Sundet, J. K., Isaksen, I. S. A., 2004, Uncertainties in the radiative forcing due to sulfate aerosols, *J. Atmos. Sci.*, 61, 485-498.
- NASA, 2012, http://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php/CERES_SYN1deg_Ed3A_Data_Quality_Summary; CERES_EBAF-Surface_Ed2.6r Data Quality summary.
- NASA, 2012, http://ceres.larc.nasa.gov/science_information.php/Data_Product_Processing_Flowchart; CERES Angular Directional Models (ADMs).
- Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Hayasaka, T., 2007, An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419-4444.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, T., Rosenfeld, D., 2001, Aerosols, climate and the hydrologic cycle, *Science*, 294, 2119-2124.
- Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J. T., Washington, W. M., Fu, Q., Sikka, D. R., Wild, M., 2005, Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 5326-5333.
- Remer, L. A., Tanré, D., Kaufman, Y. J., 1998, Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 005, NASA, 88 p.
- Torres, O., Bharatia, P. K., Herman, J. R., Ahmad, Z., Gleason, J., 1998, Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis, *J. Geophys. Res.*, 103, 17099-17110.
- Tu, J., Wang, H., Zhang, Z., Jin, X., Li, W., 2005, Trends in chemical composition of precipitation in Nanjing, China during 1992-2003, *Atmos. Res.*, 73, 283-298.
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., Villeneuve, P. J., 2010, Global Estimates of Exposure to Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-based Aerosol Optical Depth, *Environ. Health Persp.*, 118(6), 847 - 855.
- Won, J. G., Yoon, S. C., Kim, S. W., Jefferson, A., Dutton, E. G., Holben, B., 2004, Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurement at Gosan, Korea. *J. The meteorol. soc. Japan*, 82, 115-130.
- Yoon, S. C., Kim, S. W., Kim, J. Y., Sohn, B. J., Jefferson, A., Choi, S. J., Cha, D. H., Lee, D. K., Anderson, T. L., Doherty, S. J., Weber R. J., 2006, Enhanced water vapor in Asian dust layer: entrainment processes and implication for aerosol optical properties, *Atmo. Environ.*, 40, 2409-2421.