20세기 에어로졸 배출량 증가가 동아시아 겨울철 기후에 미친 영향

라나리 · 심성보 · 부경온

국립기상과학원 기후연구과

(2015년 2월 26일 접수, 2015년 3월 2일 수정, 2015년 3월 26일 게재 확정)

Impact of the Increasing Aerosol Emissions on Wintertime Climate over East Asia during the 20th Century

Nary La · Sungbo Shim · Kyung-On Boo

Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research

(Received 26 February 2015, Revised 2 March 2015, Accepted 26 March 2015)

Abstract : This study investigates the direct and indirect effects of anthropogenic aerosols emission on East Asian climate during the winter (December-February) for the period of 1961-1990. Using a globally coupled climate model, HadGEM2-AO, we compare ensemble means between historical runs with and without aerosol emissions. During the 20th century the major contributions to the total Aerosol Optical Depth (AOD) over the East Asian region came more from anthropogenic aerosols than from natural aerosols. The increasing total AOD induces the negative radiative in a clear-sky condition, leading to cooling the surface. Indirect effect contributes to the increase in the total cloud fraction, resulting from the increased low-level stratus and stratocumulus clouds. Consequently, the net surface radiative flux becomes negative due to the direct and indirect effects of aerosols. Land surface cooling seems to enhance the land-sea pressure gradient in the East Asian wintertime climate, and the associated wind anomalies induce the regional wintertime precipitation amount changes over South China.

Key Words : Aerosol, direct effect, indirect effect, winter climate change, East Asian monsoon

주요어 : 에어로졸, 직접효과, 간접효과, 겨울철 기후변화, 동아시아몬순

1. 서론

IPCC(Intergovernmental panel on Climate Change) 4차 보고서에 따르면, 지구 온난화의 주된 원인으로 인간 활동에 의한 온실가스 배출 증가를 제시하고 있으며, 뿐만 아니라 이러한 온실

가스에 반하여 음의 강제력으로 작용하는 요인으로 에어로졸 효과를 언급하고 있다(IPCC, 2013). 태양으로부터 방출되는 복사에너지는 지구 대기를 통과하면서 대기에 흡수 산란되어 지표에 도달하게 되는데, 이 과정에서 에어로졸이 직접적으로 지표에 도달하는 태양복사를 감쇄시킬 뿐만 아

나라 간접적으로는 에어로졸 중 일부가 구름 응결핵(Cloud Condensation Nuclei, CCN)으로 작용하여 구름의 미세물리적 성질은 물론 역학적 발달과 강수효율을 변화시킴으로써 구름에 의한 태양복사의 반사 효율을 결정한다(Miller *et al.*, 1998; Lau *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006). 또한 구름 응결핵의 증가는 구름방울 수 농도가 증가하는 대신 구름방울 크기가 줄어들게 하여 결과적으로 구름의 반사도를 증가시키거나 구름방울 크기의 감소로 인한 강수 효율의 감소가 구름의 수명을 연장시킴으로써 지구 냉각화에 기여하는 것으로 알려져 있다. 최근 관측과 모델링 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있지만(Zhang *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014) 에어로졸의 복잡한 영향으로 기후변화 예측의 불확실성에 가장 큰 원인으로 지적되고 있다(IPCC, 2013). 이러한 이유는 구름과 에어로졸의 물리 화학적 성질에 대한 이해도가 낮을 뿐만 아니라 대기 중에 배출된 에어로졸이 온실가스와 다르게 생존 시간이 몇 시간에서 수 주정도로 짧고 지역 별로 생성, 변화, 소멸 등 과정이 다르기 때문에 시공간적으로 농도 분포와 특성이 크게 다르기 때문이다(Kim *et al.*, 2010).

특히, 동아시아 지역은 전 세계 인구의 60%가 밀집된 지역으로 20세기 중반 급격한 산업화로 온실가스와 더불어 대기 에어로졸이 급격히 증가하였으며(Tu *et al.*, 2005), 전 지구 기후시스템의 중요한 구성요소 중 하나로 동아시아 몬순 변동성과 밀접한 상관성을 가지고 있다(Lau and Li, 1984; Ding, 1994; Huang *et al.*, 2003, 2007; Chan and Li, 2004; Chang *et al.*, 2006; Lim *et al.*, 2012). 동아시아 겨울철 몬순은 대륙의 냉각에 따른 시베리아 고기압과 해양의 알류산 저기압이 우리나라를 중심으로 동서방향으로 위치하면서 발생하는 북서 및 북동풍에 의해 영향을 받는다. 더불어 서

태평양의 대규모 열대 대류에 의해 겨울 몬순 강수량이 영향을 받기도 하며(Chang and Lau, 1982; Lau and Boyle, 1987), 말레이시아, 인도네시아, 오스트레일리아의 강수량에도 영향을 주는 것으로 보고되었다(Chen *et al.*, 1991). 동아시아 겨울철 몬순이 강화되면 해수면 온도(Bueh and Ji, 1999), 몽골 고기압과 알류산 저기압의 강도, 유럽-아시아 대륙과 북태평양 사이의 압력 섭동의 규모, 겨울철 폭풍에 영향을 주게 된다(Pei and Li, 2007; Liu *et al.*, 2009).

이에 동아시아 지역 몬순순환에 대한 많은 연구가 증가하고 있으며, 본 연구에서는 몬순시스템에 미치는 에어로졸의 영향을 이해하고자 하였다. 최근 동아시아 지역에서 에어로졸이 기후에 미치는 영향에 대한 국 내외 연구가 증가하고 있지만, 에어로졸-구름 상호 작용에 의한 기후변화 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 에어로졸 강제력에 의해 동아시아 지역의 에어로졸의 물리과정과 구름 상호작용에 따른 복사강제력 변화가 동아시아 지역의 기온과 강수 및 대기 순환에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구에서는 PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)에서 제공하는 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 참여 모델 중 하나로, 영국 기상청 모델(Unified Model, UM)의 두 번째 버전인 HadGEM2(Hadley Centre Global Environment Model, version 2; Collins *et al.*, 2008) 대기-해양 모델을 이용하였다. HadGEM2-AO 모델의 대기 모델 분해능은 수평적으로 N96(~135 km 간격, 192×145 격자)이며 연직적으로 38층(최상층

~40km)으로 구성되었다. 해양 모델의 분해능은 동서방향으로 $1^{\circ}\sim 1/3^{\circ}$ (216개 격자)로 적도 부근에서 고분해능을 가지고 연직 40층으로 이루어져 있다(NIMR., 2011; Baek *et al.*, 2013). 모델에서 사용되는 에어로졸 구성성분은 총 6가지 성분으로 황산염(Sulfate), 검댕(Black carbon), 유기탄소(organic carbon), 바이오 매스(Biomass-burning), 해염(Sea-salt), 먼지 에어로졸(Mineral dust)로 분류되며, 황산염, 검댕, 유기탄소, 바이오 매스는 CMIP5 실험을 위한 Jones *et al.*(2011)의 자료를 사용하고 먼지 에어로졸, 해염입자의 대기 중 농도는 모델 적분과정에서 계산된다. 에어로졸 입력 자료는 월평균 간격으로 이루어져 있으며 5일 간격으로 내삽 되어 모델의 각 격자 값으로 사용되며, 모델에서 복사 플렉스를 바꾸는 방법은 두 가지로 직접효과는 Edwards and Slingo(1996)의 복사 방식을 표현하였으며, 간접효과를 추정하는 것은 Jones and Slingo(1996)와 Wood *et al.*(2002)에서 설명한다. 이 에어로졸 강제력은 단 장파의 복사 산란 및 흡수의 직접효과와 구름과의 상호작용으로 간접효과를 일으키며 기후에 영향을 준다. 이를 분석하기 위해 제어 실험(pre-industrial control)

의 100, 200, 300, 400, 500, 1000년의 결과를 각각의 초기장으로 사용한 과거기후모의실험(이하 HIST)와 에어로졸 고정실험(이하 FIXA)의 6개의 앙상블 자료를 사용하였다(Boo *et al.*, 2014)(Table 1). HIST 실험의 경우 온실가스, 에어로졸, 자연 강제력과 지면 사용량 변화 등 모든 강제력을 포함한 모의 결과이며 HIST 실험에서 에어로졸 배출량만 1860 년 수준으로 고정시킨 것이 에어로졸 강제력 고정 실험(FIXA)이다. 에어로졸의 영향을 살펴보기 위해 HIST 실험과 FIXA 실험의 앙상블 평균의 차이를 계산하였다(이하 AERO). 총 적분 기간은 1860년부터 2005년까지 총 146년이며 분석 영역은 $15^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ (Figure 1)이며, 1961년부터 1990년까지 총 30년에 대한 거

Table 1. Descriptions of forcing experiments in this study.

Experiment	Description
HIST	Include All forcing (GHGs, Aerosol, Natural, Land use change), 6members
FIXA	Aerosol fixed for HIST experiment at 1860 levels, 6members
AERO	HIST minus FIXA

Figure 1. Analysis domain and orography in this study.

울철(12월, 1월, 2월)에 대해 분석하였다. 모델 검증에 사용된 ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project) 자료는 1994년부터 2005년에 Total cloud fraction 변수와 구름의 타입 별 변수에 대해 사용하였다. John *et al.*(2011)에 의하면 ISCCP 자료는 남반구 대초원 지대에서 수집된 지상 레이더 관측에 비해 중층운이 다소 과다하게 분포하는 경향을 언급하였다.

3. 결과

1) 에어로졸 방출 및 광학두께 변화

에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)란 태양복사가 대기 상층에서 지표까지 도달하는 동안 대기의 여러 성분들에 의해 감쇄하게 되는데, 이 중 에어로졸에 의한 감쇄를 나타내는 파라미터를 말한다(Ramanathan *et al.*, 2001). 20세기 동안 동아시아지역 겨울철에 대해 총 에어로졸의 550 nm 파장대의 광학두께 변화량을 보면(Fig-

ure 2), 20세기 중반 이후 에어로졸 광학두께가 크게 증가하였다. 그림은 제시하지 않았으나, 20세기 중반 이후 AOD의 증가에 지배적으로 기여한 것은 황산염 에어로졸이며, 다른 성분의 광학두께는 황산염에 비해 20세기 동안 상대적으로 변화가 적었다. Figure 3은 1961년에서 1990년의 동아시아 겨울철에 대한 550 nm의 총 에어로졸 광학두께로 HIST 실험과 FIXA 실험의 차이인 AERO의 공간장이며, 에어로졸 주요 방출지역에서 최대값을 나타내고 있으며 남중국 해안 지역을 따라 북서태평양까지 증가하며 최대값은 0.2 이상으로 사천성 분지에 나타나는데 이는 지역의 소용돌이가 모이는 곳이다(Qi *et al.*, 2013). 20세기 중반 방출된 인위적인 에어로졸은 주요 방출지역인 중국 대륙뿐만 아니라 우리나라와 일본을 포함한 북서태평양 지역까지 영향을 주고 있다. Ramanathan *et al.*(2001)에 의하면 전지구적으로 550 nm의 총 에어로졸 광학두께의 매년 평균값은 $0.12(\pm 0.04)$ 을 가지는 반면 동아시아 지역 550 nm에서 총 광학두께의 겨울철 평균 최대값은 0.16으로 매우 높은

Figure 2. Time series in Total Aerosol Optical Depth changes at 550 nm in DJF for the period of 1900 to 2000 over East Asian. Thick line is ensemble mean and shading means ensemble spread of six simulations.

Figure 3. Total Aerosol Optical Depth differences at 550 nm in DJF during the period of 1961 to 1990 between HIST and FIXA (AERO).

값을 갖는다. 이는 동아시아 지역 겨울철에 인위적인 에어로졸이 많이 방출되고 있음을 의미한다. 이에 에어로졸의 기후적 영향을 이해하고자 AOD가 증가하는 1961년부터 1990년(30년)에 대해 분석을 하였다.

2) 에어로졸에 의한 구름 변화

구름은 구름의 상단고도, 깊이, 운량, 얼음 입자 유무 등에 따라 복사 강제력 및 강수에 미치는 프로세스가 크게 달라진다. 특히, 에어로졸 일부가 구름 응결핵으로 작용하여 구름의 입자 수를 증가시킴으로써 구름 물리과정에 중요한 영향을 미치게 되는데, 구름 물 함유량이 변하지 않는다면 구름 입자수의 증가는 구름입자 유효반경을 줄이는데 기여한다(NIMR, 2011). 결과적으로 구름의 반사도를 증가시키거나 구름방울 크기의 감소로 인한 강수 효율의 감소가 구름의 수명을 연장시킴으로써 지구 냉각화에 기여하는 것으로 알려져 있다. 따라서 동아시아 기후 변화를 이해하기 위해서 에어로졸과 구름 상호작용에 따른 구름특성 변화에 대해 살펴볼 필요가 있다.

먼저 동아시아 지역의 겨울철 구름 분포를 알아보기 위해 총 운량을 조사하였다(Figure 4). IS-CCP의 Total Cloud fraction 변수를 이용하였으며 자료의 기간이 짧아 1994년부터 2005년에 대해 사용하였다. 이를 HIST 실험과 FIXA 실험과 비교한 결과, 관측에 비해 모델은 남중국에서 과대모의하고 북중국에서는 과소모의 하지만 북동쪽으로 퍼져나가는 수평분포와 일본을 포함하는 북서태평양의 구름분포가 전반적으로 일치한다. 인위적인 에어로졸 영향을 나타내는 AERO는 대부분 해양 지역에서 구름의 양이 증가하는데(Figure 4d), 이는 에어로졸 주요 배출지역인 풍하측에 위치한 해양의 구름 입자농도를 증가시킴으로써 구름 양 증가에 기여하는 것으로 판단된다.

운량의 증가가 어느 고도에서 나타나는지 확인하기 위해 HadGEM2-AO 모델에서 사용되는 연직 7층(900 hPa, 740 hPa, 620 hPa, 500 hPa, 375 hPa, 245 hPa, 115 hPa)에 대해 나누어 조사하였다(Figure 5). 모델 결과로 동아시아 겨울철 구름 분포는 하층(900 hPa, 740 hPa)과 중층(620 hPa, 500 hPa, 375 hPa)이 지배적이며, 하층의 경우 에

Figure 4. DJF Climatology in Total Cloud Fraction (units: %) of (a) OBS (ISCCP) from 1994 to 2005, (b) all forcing (HIST), (c) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (d) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

어로졸 방출 지역과 남중국 해안에서 북서 태평양 까지 구름 양이 많으며, 중층은 북위 20–40도 사이에 구름이 분포한다. HIST 실험과 FIXA 실험의 차이인 AERO에서 900 hPa 운량 증가는 Figure 4d와 유사하게 나타나고 있으며, 이는 하층운의 증가가 전체 운량에 영향을 주고 있음을 의미한다.

ISCCP는 구름의 광학 깊이와 상단고도에 따라 총 9가지 구름 종류(CI: 권운, CS: 권층운, DC: 적운대류, AC: 고적운, AS: 고층운, NS: 난층운, CU: 적운, SC: 층적운, ST: 층운)로 구별하는데, ISCCP 분류법을 토대로 동아시아 지역의 겨울철

평균 분포를 관측자료와 비교하였다(Figure 6). 관측자료(1994–2005)에 의하면 동아시아 겨울철 동아시아 구름은 상층운 중 CI가 지배적이며 중층운 AC, AS, NS가 혼합되어 있고 하층운은 SC 형태가 지배적이다(Figure 6a). 이에 대해 HIST 실험의 경우 20세기 동안 겨울철 구름의 평균 변화를 살펴보면 중층운과 하층운에서 나타나는데, 중층운 보다는 하층운의 증가가 더 크고 특히 SC(층적운)와 ST(층운)로 나타났다(Figure 6b). FIXA 실험은 HIST 실험과 유사하게 나타나는데 인위적 에어로졸의 영향을 나타내는 AERO 에서 살펴보면 인위

Figure 5. Vertical distribution of Total Cloud Fraction (units: %) in DJF for the period of 1961 to 1990 for (a) all forcing (HIST), (b) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (c) HIST minus FIXA (AERO). Each level is to the left of each panel.

Figure 6. DJF cloud types (units: %) of Cirrus (CI), Cirrostratus (CS), Deep convection (DC), Altostratus (AS), Nimbostratus (NS), Cumulus (CU), Stratocumulus (SC), and Stratus (ST) for (a) OBS (ISCCP) from 1994 to 2005, (b) all forcing (HIST), (c) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (d) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

적인 에어로졸에 의해 구름의 깊이가 더 두꺼워지는 것은 하층운인 SC(층적운)와 ST(층운)임을 알 수 있다(Figure 6d).

3) 에어로졸 직, 간접효과에 의한 대기 복사량 변화

앞서 3.1과 3.2에서 언급한 것과 같이, 대기 중 방출된 에어로졸에 의한 직접 효과와 에어로졸-구름 상호작용에 의한 간접 효과에 대해 언급하였다. 이러한 에어로졸의 직, 간접적인 효과로 인

한 복사강제력 변화를 살펴 보았다. IPCC 5차 보고서에 따르면, 인위적인 에어로졸의 직, 간접적 효과에 의한 복사강제력은 각각 -0.5 Wm^{-2} 와 -0.7 Wm^{-2} 으로 보고된 바 있다. 이는 $-0.9 \sim -0.1 \text{ Wm}^{-2}$, $-0.8 \sim -0.3 \text{ Wm}^{-2}$ 의 불확실성을 가지고 있지만, 이산화탄소에 의한 온난화 효과($+1.66 \text{ Wm}^{-2}$)의 상당 부분을 상쇄 시킬 수 있는 양에 해당한다. 에어로졸에 의한 직접적인 복사강제력은 태양복사인 단파 및 장파 복사의 산란과 흡수로 인해 지구 복사 수지의 변화를 일으키며, 간접

Figure 6. (continued).

적인 복사강제력은 에어로졸 일부가 구름 응결핵으로 작용하여 구름 물리미세과정과 복사적 성질을 변화시켜 복사수지에 영향을 준다(Ramanathan *et al.*, 2005).

20세기 중반 인위적인 에어로졸 배출의 급격한 증가로 인해 동아시아 지역 겨울철 복사 수지의 변화를 살펴보았다(Figure 7, 8). 지면과 대기상단의 에어로졸 효과가 다르게 나타나기 때문에 지면과 대기상단으로 나누어 분석하였으며, 에어로졸 강제력에 의한 직, 간접 효과를 분류하여 비교하기 위해 3가지 조건으로 나누어 겨울철 평균 분포를 나타내었다. All-sky 조건에서 대기 상단의 경우

대기로 들어오는 단파복사량에서 나가는 단파복사량과 장파복사량을 제외하였고, 지면의 경우 지면으로 들어오는 단파복사량과 장파복사량을 합하였다. Clear-sky 조건은 구름에 의한 복사 효과는 제외되고 에어로졸의 직접적인 복사강제력 효과를 보고자 하였다. 대기 상단의 경우 들어오는 단파복사량에서 clear-sky 상태일 때 나가는 단파복사량을 제외하였으며, 지면의 경우 clear-sky 상태일 때 지면으로 들어오는 단파복사량에서 나가는 단파복사량을 제외한 후 지면으로 들어오는 장파복사량에서 지면에서 나가는 장파복사량을 제외하였다. Cloudy-sky 조건으로 구름에 의한 복사강

Figure 6. (continued).

제력 효과로 간접적인 복사강제력을 의미하며 all-sky 값과 clear-sky 값의 차이에서 계산 하였다.

모델의 두 실험(HIST, FIXA) 결과 대기 상단의 복사강제력(Figure 7)은 all-Sky 조건과 clear-sky 조건의 경우 동일 위도 대에서는 비슷한 복사강제력을 보이거나 all-sky에서는 북위 20~25도 부근의 중국 대륙은 같은 위도의 다른 지역보다 다소 낮은 복사강제력을 띄고 있다. 이는 cloudy-sky 조건을 통해 알 수 있는데, 에어로졸 주요 방출 지역에서 음의 복사강제력이 크며 북위 25도 부근인 남중국에서부터 북서태평양까지 복사강제력이 감소하고 있으며, 이는 하층 구름의 증가로 인한 반사효과

로 연관된다(Figure 4d, 5c, 6d). 인위적인 에어로졸의 효과를 나타내는 AERO에서 all-sky 조건을 보면 남중국 해안지역에서는 최대 -14 Wm^{-2} 의 강한 음의 복사강제력이 나타난다.

지표의 복사강제력(Figure 8)을 살펴본 결과, 대기상단에서 분석한 결과와 동일하다. 즉 인위적 에어로졸 배출원인 북위 25도 부근의 중국 대륙에서 복사강제력이 동일 위도 대보다 작고 이는 구름에 의한 것이고 에어로졸 배출과 연관된다(Figure 4). 대기상단(Figure 7)과 크게 다른 점은 AERO(Figure 8c)의 clear-sky 조건에서 중국대륙의 음의 복사강제력으로, 이는 인위적인 에어로

Figure 6. (continued).

줄이 Figure 3과 같이 지면과 가까운 대기 중에 존재하면서, 지면으로 들어오는 태양복사를 반사하는 것으로 판단된다. 상대적으로 cloudy-sky 조건의 음의 복사강제력은 육지보다 해양에서 크고 인위적인 에어로졸에 의해 하층운의 증가로 인하여 태양복사를 반사하여 -12 Wm^{-2} 의 음의 복사강제력이 나타난다. 인위적인 에어로졸의 직접 효과와 구름에 의한 간접 효과가 합쳐져서 AERO의 all-sky에서 보이는 것처럼 남중국 육지와 해양에서 약 -18 Wm^{-2} 의 강한 음의 복사강제력이 나타났다. 대기 상단과 지면의 복사강제력 변화에서 직접 효과는 AOD 변화와 같이 주요 방출지역 주변

에서 음의 복사강제력이 나타났으며 간접효과는 남중국 해안을 따라 구름변화와 밀접하게 관련이 나타난다.

4) 에어로졸에 의한 동아시아 기온 및 강수 변화

앞서 언급한 것과 같이 20세기 중반 인위적인 에어로졸이 동아시아 지역에서 급증하면서 하층운의 구름증가와 그로 인해 대기상단과 지면에서 음의 복사강제력을 야기한다. 이 영향으로 동아시아 지역 겨울철에 기온이 하강하는데 이는 Figure 9와 같이 나타났다. 동아시아 전역이 기온이 감소하는데 남중국에서는 기온이 약 1.8°C 감소 경향을

Figure 7. Net radiative flux at top of atmosphere (units: Wm^{-2}) in DJF for (a) all forcing (HIST), (b) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (c) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

보이며, 고위도로 갈수록 기온 감소 폭은 커져 약 2.6°C 의 기온 감소를 보였다. Liu *et al.* (2009)에 따르면 에어로졸은 지역적으로 각 성분 특성이 다른데, 황산염 에어로졸에 의한 기온 감소는 남중국에서 최대 1.2°C 의 감소가 나타났으며, 중국남부와 중부에서 다른 에어로졸 성분에 의해 0.6°C 감소를 보여 주었다. 본 연구결과는 Liu *et al.* (2009)의 남중국 지역의 성분별 에어로졸의 냉각효과를 합한 결과와 감소 정도가 유사하다. 이로부터 황산염 에어로졸의 냉각효과가 주요함을 알 수 있다. 육지의 강한 기온 감소에 따라 기압과 바람장의 패턴도 변한다(Figure 10). 20세기 동아시아 겨

울철의 해면 기압 평균장을 살펴보면(Figure 10a, b), 동아시아 대륙에는 시베리아 고기압이 위치하며 북서태평양 고위도에 알류산 저기압이 위치하여 있다. 동서방향의 기압 경도로 인해 대륙에서 해양으로 부는 겨울철 북서풍 계열의 바람이 대표적으로 나타난다. 에어로졸에 의해 아시아 대륙의 기온하강은 북위 40도 이남지역에서는 겨울철 대륙-해양 간 기압패턴을 더 강화시키는 것으로 판단된다(Figure 10c). 이 기압변화에 따라 남중국 연안지역을 따라 북서태평양까지 북동풍 계열의 바람이 나타났다. 한편 40도 이북 고위도 지역은 알류산 저기압이 상대적으로 약화되어 양의 아노말

Figure 8. Net radiative flux at surface (units: Wm^{-2}) in DJF for (a) all forcing (HIST), (b) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (c) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

리가 나타난다. Liu *et al.* (2009)에 의하면, 지면의 냉각효과에도 불구하고 겨울철 황산염 에어로졸 증가가 대류권 중, 상층의 온난화를 야기한다는 것과 연관된 것으로 보이나 이는 추가 조사가 필요하다. 알류산 저기압의 약화는(Figure 10c) 북위 25도 이상 지역에서 우세하게 불던 북서풍을 북풍방향의 바람으로 영향을 주고 있다.

20세기 중반 동아시아 겨울철 강수량은 대륙보다 해양이 많고, 남중국 해안 지역과 일본 열도 북쪽지역으로 최대 9 mmday^{-1} 이상의 강수량을 보인다(Figure 11). 인위적인 에어로졸 영향을 나타내는 AERO(Figure 11c)는 육지에서는 강수량이

감소하고 해양에서 증가가 뚜렷하다. 남중국 해안 지역에서 북서태평양까지 강수량이 많게는 0.6 mmday^{-1} 이상 증가한다. 에어로졸 방출지역인 남중국 대륙에서는 강수량이 감소 경향이 뚜렷한데 이는 남중국 연안의 북동풍 아노말리의 영향으로 보인다(Figure 10c). Liu *et al.* (2009)에서는 북위 40도 지역인 티벳 고원과 남서중국 지역에서는 대부분 감소하지만 남중국 연안지역을 따라 가장 눈에 띄는 증가를 보였다. 본 연구에서 그림으로 제시하지 않았지만 HadGEM2-AO 모델의 결과 대류성 강수와 대규모 강수 모두 북서태평양 지역에서 최대값을 나타낸 반면에 대륙에서는 강수 감소가

Figure 9. DJF climatology in temperature (units: °C) for (a) all forcing (HIST), (b) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (c) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

나타났다. 또한 대규모 강수보다 대륙성 강수의 영향이 더 컸으며, 최대 0.5 mmday^{-1} 의 증가를 보인 반면에 Liu *et al.* (2009)에서는 대규모 강수일 경

Figure 10. DJF climatology in 850 hPa wind (units: ms^{-1}) and MSLP (units: hPa) for (a) all forcing (HIST), (b) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (c) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

우 남중국 지역에서 최대 0.4 mmday^{-1} 를 초과하는 증가를 보여주며 총 강수량과 대규모 강수와 유사하였으며, 대륙성 강수의 경우 남중국 연안지역

Figure 11. DJF climatology in total precipitation (units: mmday^{-1}) for (a) all forcing (HIST), (b) fixed aerosol (FIXA) experiment, and (c) HIST minus FIXA (AERO) from 1961 to 1990.

을 따라 0.3 mmday^{-1} 증가하는 결과로 그 영향을 무시할 수 없다고 언급하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 HadGEM2-AO 모델을 이용하여 1961년부터 1990년까지 30년간 동아시아 지역의 겨울철(DJF)에 대해 에어로졸 강제력에 의한 직, 간접적인 효과로 기후에 미치는 영향을 살펴 보았다. HIST 실험은 1940년대부터 기온이 감소하는 추세를 보이며, 20세기 중반 이후 동아시아 지역의 산업화로 인해 에어로졸이 급증한 영향은 HIST 실험과 FIXA 실험의 차이로 계산된 AERO에서 뚜렷한데 실험에서 약 1.65°C 기온 감소로 나타났다.

동아시아 겨울철 총 에어로졸 광학두께의 변화는 20세기 동안 계속 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 이와 같은 경향은 황산염 에어로졸이 전체 에어로졸의 AOD 변화에 지배적이었다. 공간적으로는 북동중국 대륙을 중심으로 에어로졸 방출이 크게 나타나며 주요 방출 지역뿐만 아니라 우리나라와 일본을 포함한 북서태평양 지역까지 동쪽으로 이류됨을 확인 할 수 있었다. 이는 바람장에서 확인할 수 있듯이 북동풍 계열의 바람으로 인한 영향으로 판단된다.

에어로졸의 직, 간접효과를 보기 위한 복사량 분석에서 대기 상단과 지표면에서, 구름이 없는 상태와 구름이 있는 상태 및 두 가지를 포함하는 상태로 나누어 살펴 보았다. 대기상단의 경우 대부분이 에어로졸 증가에 의해 발생된 구름의 증가로 인한 음의 복사강제력이 남중국 해안을 따라 나타났다. 지면의 경우 주요 배출원에서 증가한 에어로졸로 인한 음의 복사강제력과 운량 증가로 인한 음의 복사강제력이 나타났다. 이에 에어로졸 배출 증가에 따른 총 구름량과 구름의 분포에 대해 살펴보았다. 모델은 ISCCP와 정량적인 차이는 있으나 대체적인 수평분포는 모의하고 있었다. 인위적인 에어로졸 효과를 나타내는 Figure 7d에서 해

안가와 해양에서 구름이 증가하는데 이는 해양에서 수증기 유입과 에어로졸이 응결핵으로 작용하여 구름의 양이 증가한 것으로 판단된다. 이러한 구름의 증가는 대부분 하층에 해당하는 층적운과 층운의 증가가 컸다. 주로 에어로졸이 지면에서 발생하여 지면과 가까운 대기 하층에 분포하게 되면서 하층운에 영향을 주고 있었다.

에어로졸 배출량 증가에 따라 동아시아 전역으로 기온 감소가 나타났으며 가장 기온 감소가 큰 지역은 남중국 지역으로 1.8°C 감소를 보였다. 동아시아의 기온 감소는 고위도 지역에서 대륙-해양 간의 기압패턴을 더 강화시키며, 이 기압변화로 남중국 연안을 따라 북서태평양까지 북동풍 바람이 나타났다. 이는 남중국 해안 지역에서 북서태평양지역에 많게는 0.6 mmday^{-1} 의 강수량 증가에 영향을 준다. 그러나 에어로졸 배출지역에서는 감소하는 것을 볼 수 있었다.

IPCC 4차 평가보고서에 따르면 에어로졸에 의한 직접, 1차 간접효과는 $-5.0 \pm 0.4 \text{ Wm}^{-2}$, $-0.70 [-0.3 \text{ to } -1.8] \text{ Wm}^{-2}$ 로 알려져 있다. 간접효과의 불확실성 범위는 직접효과보다 큰데 이는 현재 기후모델 간에 에어로졸에 따른 기후적 영향을 모의하는데 정량적으로 큰 차이가 있음을 의미한다. 또한 본 연구에 사용된 모델은 다른 모델에 비해 에어로졸-구름 상호작용에 의한 반응이 큰 모델로 보고되고 있어 본 연구의 정량적인 결과 해석에 주의하여야 한다. 향후 에어로졸에 의한 기후적 영향을 위해서는 좀 더 다양한 모델을 통한 분석이 요구되며 연직분포에 대한 다각적인 접근, 구름물리 미세과정에 의한 기후적 영향에 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

사사

이 연구는 “NIMR-2012-B-2(기후변화예측기술 지원 및 활용연구)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Baek, H. -J., and Coauthors, 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49, 603-618.
- Boo, K. -O., Booth, B. B.B., Byun, Y. -H., Lee, J., Cho, C., Shim, S., and Kim, K. -T. 2014, Influence of aerosols in multi-decadal SST variability simulations over the North Pacific, 2014JD021933, JGR (accepted).
- Bueh, C., and Ji, L. -R., 1999, Anomaly of East Asia winter monsoon and SST. *Chin. Sci. Bull.*, 44, 252-259.
- Chang, C. -P., and Lau, K. -M., 1982, Short-term planetary scale interaction over the tropic and mid-latitudes during northern winter. Part I: contrasts between active and inactive periods. *Mon. Wea. Rev.* 110, 933-946.
- Chang, C. P., Wang, Z., and Hendon, H., 2006, The Asian winter monsoon. *The Asian Monsoon*, Springer Berlin Heidelberg, 89-127pp.
- Chan, J. C. L., and Li, C. Y., 2004, The East Asia winter monsoon. *East Asian Monsoon*, Chang, C.P., Ed., World Scientific Publishing Co. Pet. Ltd., 54-106.
- Chen, L. -X., Zhu, Q. -G., Luo, H. -B., He, J. -H., Dongf, M., and co-author. 1991, *East Asia Monsoon*, Chinese Meteorological Press, Beijing, 362 pp.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boutcher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Se-

- nior, C., Totterdell, I., Woodward, S., Reichler, T., and Kim, J., 2008, Evaluation of the HadGEM2 model, *Hadley Centre Technical Note 74*.
- Ding, Y. H., 1994, *Monsoon over China*, Kluwer Academic Publishers, 420pp.
- Edwards, J. M., and Slingo, A., 1996, Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 122, 689-719.
- Guo, L., Highwood, E. J., Shaffrey, L. C., and Turner, A. G., 2013, The effect of regional changes in anthropogenic aerosols on rainfall of the East Asian summer monsoon, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1521-1534.
- Huang, R. H., Zhou, L. T., and Chen, W., 2003, The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 20(1), 55-69.
- Huang, R. H., Chen, J. L., and Huang, G., 2007, Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 24(6), 993-1023.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jiang, Y., Liu, X., Yang, X. -Q., and Wang, M., 2013, A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation, *Atmospheric Environment*, 70, 51-63.
- John M. Haynes, Christian Jakob, William B. Rossow, George Tselioudis, and Josephine Brown, 2011, Major Characteristics of Southern Ocean Cloud Regimes and Their Effects on the Energy Budget. *J. Climate*, 24, 5061-5080. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI4052.1>
- Jones, A., and Slingo, A., 1996, Predicting cloud-droplet effective radius and indirect sulphate aerosol forcing using a general circulation model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 122, 1573-1595.
- Jones, C. D., and Coauthors, 2011, The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci. Model dev.*, 4, 543-570, doi: 10.5194/gmd-4-543-2011.
- Kim, J., Lee, Y., and Shin, I. C., 2010, Policy Studies for Advancing Aerosol Research on Climate Change in Korea. *Atmosphere*, 20(1), 49-61 (in Korean).
- Kim, M. K., Lau, W K. M., Chin, M., Kim, K. M., Sud, Y. C., and Walker, G K., 2006, Atmospheric teleconnection over Eurasia induced by aerosol radiative forcing during boreal spring, *Journal of Climate*, 19, 4700-4718.
- Lau, K. M., and Li, M. T., 1984, The monsoon of East Asia and its global associations-A survey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65, 114-125.
- Lau, K. M., Kim, M. K., and Kim, K. M., 2006, Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct effects: the role of the Tibetan Plateau, *Climate Dynamics*, 26, 855-864.
- Lau, K. M., and Boyle, J. S., 1987, Tropical and extra tropical forcing of the large-scale circulation: a diagnostic study. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 400-428.
- Lim, S.-M., Yeh, S. -Y., and Kim, G. -R., 2012, Analysis on the Relationship between the Korean Temperature and the Atmospheric Circulation over the Northern Hemisphere during winter. *Atmosphere*, 22.2, 187-197 (in Korean).
- Liu, Yu., Sun, J., and Yang, B., 2009, The effects of black carbon and sulphate aerosols in China regions on East Asia monsoons. *Tellus*, 61(4), 642-656.
- Miller, R. L., and Tegen, I., 1998, Climate response to

- soil dust aerosols, *J. Climate*, 11, 3247-3267.
- NIMR, 2011, *Climate change scenario produced by NIMR in preparation of IPCC 5th assessment report* (in Korean).
- Pei, S. -Q., and Li, C. -Y., 2007, A further study on the East Asian winter monsoon and its influences. Part I: features of variation and anomaly. *Clim. Environ. Res.*, 12, 124-136.
- Qi, Y. L., Ge, J. M., and Huang, J. P., 2013, Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET, *Chin. Sci. Bull.*, 58, 2497-2506, doi:10.1007/s11434-013-5678-5.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T. and 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., and Sikka, D. R., 2005, Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *PNAS*, 102(15), 5326-5333.
- Smith, S., Andes, R., Conception, E., and Lurz, J., 2004, Historical sulfur dioxide emissions, 1850-2000: Methods and Results, *Tech. Rep.* 14537, Pacific Northwest National Laboratory.
- Song, F., Zhou, T., and Qian, Y., 2014, Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 596-603, doi: 10.1002/2013GL058705.
- Tu, J., Wang, H., Zhang, Z., Jin, X., and Li, W., 2005, Trends in chemical composition of precipitation in Nanjing, China during 1992-2003. *Atmos. Res.*, 73, 283-298.
- Wood, R., Irons, S., and Jonas, P. R., 2002, How important is the spectral ripening effect in stratiform boundary layer clouds? Studies using simple trajectory analysis, *J. Atmos. Sci.*, 59, 2681-2693.
- Wu, L., Su, H., and Jiang, J. H., 2013, Regional simulation of aerosol impacts on precipitation during the East Asian summer monsoon, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 6454-6467.
- Zhang, H., and Coauthors, 2012, Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on East Asian climate using an interactive AGCM-aerosol coupled system, *Clim. Dyn.*, 38, 1675-1693.
- <http://pcmdi9.llnl.gov>

책임 편집: 이경미
영문 교열: 조창현