20세기 유기탄소 에어로졸 배출량 변화에 따른 기후적 영향 분석

이 철·부경온·심성보·변영화

국립기상과학원 기후연구과

(2016년 5월 26일 접수, 2016년 9월 19일 수정, 2016년 9월 23일 게재 확정)

Impact of Fossil Fuel Organic Carbon Emission on the 20th Century Climate

Cheol Lee · KyungOn Boo · Sungbo Shim · Youngwha Byun

Climate Research Division, National Institute of Meteorological Science

(Received 26 May 2016, Revised 19 September 2016, Accepted 23 September 2016)

Abstract : Aerosols play the important role as scatter or absorb solar radiation, which consequently modifies the radiative balance of the atmosphere. Aerosol and its effects, especially its indirect effects, on climate have drawn increasing attention in recent years. Understanding of interactions of aerosols and climate is important to better prediction of future climate change. In this study, the direct and indirect effect of fossil fuel organic carbon aerosol (OC) and its impacts on the climate during the period of the early of 20th century (1901-1920) and the end of 20th century (1986-2005) were investigated. we examine changes in aerosol emission during 20th century. Using HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environmental Model version 2, Atmosphere and Ocean), historical experiments are carried out with and without anthropogenic aerosol emissions (HIST, FIXA) from 1860 to 2005. Fossil fuel organic carbon aerosol (OCFF) emission fixed at 1860 is added. Due to the large emission of OC, thick optical depth of the OC appears over Asia, western Europe and eastern north America. The direct effect due to increasing OC influences negative radiative effect at the surface, which leads to a cooling effect on the surface. The OC shows direct effect and indirect effect as well. The variation of total amount of clouds are affected by the OC aerosols emission.

Key Words : HadGEM2-AO, fossil fuel organic carbon, aerosol, cloud condensation nuclei

주요어 : HadGEM2-AO, 유기탄소, 에어로졸, 구름응결핵

1. 서론

최근 IPCC 5차 평가보고서에 따르면 기후변화의 주된 원인으로 산업발달로 인한 온실가스 배출과 인위적인 에어로졸 변화에 대한 중요성이 언급되었다(IPCC AR5, 2013). 인위적인 에어로졸은 대기조성의 변화뿐만 아니라 지표에 유입되는 복사강제력 및 기후변화에 영향을 주기 때문에 기후에 미치는 영향은 최근 수십년간 큰 관심을 끌고 있다.

에어로졸이 기후에 미치는 영향은 크게 직접효과와 간접효과로 나눌 수 있다. 직접효과는 태양복사량을 산란 및 반사시킴으로써 지표면에 도달하는 태양복사에너지를 감소시켜 대기의 연직온도구조에 영향을 미치는 것을 의미한다. 또한 강수량과 연관된 에어로졸-구름 상호작용의 효과를 간접효과라고 일컫는다. 에어로졸의 직/간접효과가 기후변화에 기여하는 영향력이 매우 클 것으로 생각되어, 최근 모델링 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있다. Zhang *et al.*(2012)에서는 전지구 모델(BCC_AGCM2.0.1)을 사용하여 동아시아 여름시기(6~8월)에 황산염, 검댕, 유기탄소 에어로졸의 직접효과에 대해 보고하였으며, 고해상도의 전지구 모델(HiGAM)을 사용한 Guo *et al.*(2013)에서는 인위적인 에어로졸 배출에 대한 강수와의 연관성에 대해 연구하였다. Wu *et al.*(2013)에서는 WRF-Chem모델을 사용하여 동아시아 여름 몬순시기를 2가지로 나누어 중국에서의 에어로졸에 의한 강수밴드의 이동에 대해 보고하였다.

에어로졸은 구름 물리과정에서 구름응결핵(Cloud Condensation Nuclei, CCN)으로 작용하여 구름의 광학적 특성을 바꾸고 알베도 및 복사유입량에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Twomey, 1974). 에어로졸의 또 다른 간접효과로는 많은 흡습성 에어로졸 입자들로 인해 작은 구름의 물방

울 수가 증가되고 구름표면에서 단파복사의 반사가 길어져 최종적으로 입사하는 복사에너지를 감소시켜 지구온도를 낮추는 역할을 한다(Albrecht, 1989; Veeffkind *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2014). 이러한 에어로졸의 냉각효과는 과거 20세기 동안 인위적 활동에 의해 배출량이 많았던 황산염에 의해 가장 크게 발생한 것으로 알려져 있다(Boo *et al.*, 2015). 그러나 황산염 외에 검댕(Black carbon), 유기탄소, 바이오매스 등도 기후에 영향을 미치는 중요한 요소이다(Sahu *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2014). 이 중에서 유기탄소 에어로졸은 화석연료(fossil fuel), 생물연료(biofuel burning)의 연소 배기가스, 천연 생체로부터 생성된 탄소 결합을 함유하는 화합물로 이루어진 복잡한 혼합물로서 산업혁명 이후 배출량이 증가하고 있다(IPCC AR4, 2007). 유기탄소 에어로졸은 태양복사에너지 확산에 의해 직접적으로 기후에 영향을 줄 수 있고 구름 응결핵으로 작용할 수 있고(Novakov and Penner, 1993; Saxena *et al.*, 1995), 이러한 인위적인 에어로졸에 의한 구름 응결핵 형성은 기후에 간접적으로 영향을 줄 수 있기 때문에 연구해야 할 대상이다. 유기탄소 에어로졸에 관한 연구는 대부분 검댕이나 바이오매스 등과 함께 통합적으로 보고된 바 있지만(Bond *et al.*, 2004; 2007; Cao *et al.*, 2006; Sahu *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014), 유기탄소 에어로졸의 영향만을 분석한 보고는 드물다. 따라서 에어로졸의 기후적 영향에 대한 이해를 높이기 위해 산업화 이후 지난 20세기동안 전지구에서 배출된 에어로졸의 주 성분 요소 중 유기탄소 에어로졸(Fossil fuel organic carbon)이 과거기후에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험 방법 및 처방자료

1) 실험방법

본 연구에 사용된 자료는 400년 제어적분실험을 통한 초기장을 사용하여 모든 에어로졸 강제력이 적용된 과거기후재현실험(Historical, 이하 HIST)과 모든 에어로졸 배출량을 산업화 이전 수준으로 고정시킨 실험(Fixed all aerosols, 이하 FIXA)이다(Baek *et al.*, 2013). 추가적으로 에어로졸 강제력 중 유기탄소 배출량만 산업화 이전수준으로 고정시킨 실험(Fixed Fossil fuel organic carbon, 이하 OCFF)을 수행하였다. 실험결과에 대한 유의미한 강제력에 대한 반응을 확인하기 위해 t-test를 사용하였다. HIST실험과 에어로졸 제어적분 실험(FIXA, OCFF)과의 비교를 통해 총 에어로졸 및 유기탄소 에어로졸의 변화에 따른 기온, 강수의 변화에 대해 증감지역을 분류하여 살펴보고 하였고, 각 변수 별 20세기 초(1901~1920년) 대비 20세기 말(1986~2005년)의 기간별로 평균하여 유기탄소 에어로졸의 직/간접적인 역할과 기후에 미치는 영향을 분석하였다.

과거기후재현실험의 적분에 사용한 모델은 영국 기상청에서 개발된 HadGEM2-AO이다(Collins *et al.*, 2011). 대기모델의 수평격자는 N96($1.875^\circ \times 1.25^\circ$, ~135km 간격, 192×145 격자)으로 이루어져 있으며 연직격자는 38층, 모델 고도는 약 40 km로 구성되어있다. 해양모델의 수평격자는 362(동서) $\times$ 216(남북)($1^\circ \times 1/3^\circ \sim 1^\circ$)로 이루어져 있으며 연직격자는 40층(~5328m)으로 구성되어 있다.

HadGEM2-AO은 6가지 종류(황산염, 검댕, 유기탄소, 바이오매스, 해염, 먼지)의 대류권 에어로졸을 다루며 인위적 에어로졸은 황산염, 검댕, 유기탄소, 바이오매스 배출량을 입력자료로 사용하고 자연적 에어로졸인 먼지, 해염은 모델 내에서 기상장에 의해 배출량이 모의된다(Bellouin *et al.*,

2007; Collins *et al.*, 2011). HadGEM2모델에서의 모든 에어로졸 특성은 검댕과 먼지를 제외하고 단 파복사와 장파복사의 흡수와 반사에 의한 직접효과와 이러한 직접효과에 따른 기온분포 및 구름의 일/이차 간접효과에 모두 기여하며 각각 구름 알베도와 강수효율을 고려한다.

2) 에어로졸 광학깊이의 변화

HadGEM2-AO의 HIST에 입력된 20세기동안 에어로졸 배출량은(Baek *et al.*, 2013) 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸로 구분된다. 먼지, 해염 배출량은 HadGEM2-AO내에서 계산되나 인위적 에어로졸은 IPCC AR5를 위한 권고안에 따라 입력된다. Jones *et al.*(2011)에서 네 가지 에어로졸 성분별 전지구 배출량을 볼 수 있는데 황산염 에어로졸이 가장 배출량이 크고 검댕, 유기탄소, 바이오매스 에어로졸의 배출량은 20세기동안 증가는 하나 절대량은 황산염 에어로졸에 비해 작다. 황산염 순환의 경우는 해양 생지화학모델로부터 나오는 디메틸황산(Dimethyl sulfate)의 배출을 사용하여 재현된다(Martin *et al.*, 2011). 에어로졸 배출량 증가에 따른 광학깊이의 변화를 6가지(해염, 먼지, 검댕, 유기탄소, 황산염, 바이오매스)의 성분에 대해 10년 단위로 살펴본 결과(Figure 1), 20세기 가장 배출량이 컸던 황산염 에어로졸의 광학깊이의 증가가 가장 뚜렷하다. 자연적 에어로졸인 해염 에어로졸 역시 광학깊이가 크나 20세기 동안 변화 경향은 매우 작다(Table 1). 황산염 에어로졸 광학깊이의 증가는 HIST실험과 OCFF실험에서 20세기 초 대비 20세기 말에 각각 110%/105% 증가하는 것으로 나타났다. Figure 1d에서는 HIST실험에서의 유기탄소 에어로졸의 변화를 나타냈다. 20세기 초부터 20세기 말까지 약 120% 정도 증가하는 모습을 보이고 있으나 그 절대량의 변화는 0.001 정도로 다른 에어로졸보다 광학깊이의 증가량이

Table 1. Changes in components of aerosol optical depth rate for each experiments between the period of the end of 20th (1986~2005) from the early of 20th (1901~1920).

Aerosols	HIST	OCFF	FIXA
Sulphate	110%	105%	10%
Seasalt	1.2%	1.1%	2.4%
Mineral Dust	2%	1.4%	-2.48%
Soot	71%	66%	0%
Biomass	56%	56%	7%
Fossil fuel organic carbon	120%	0%	0%

(a) HIST

(b) OCFF

(c) FIXA

(d) Fossil fuel organic carbon in HIST

■ Sulfate ■ Black carbon ■ Dust
■ Biomass ■ Fossil fuel organic carbon ■ Sea-salt

Figure 1. Changes in components of aerosol optical depth for three experiments.

(d) is changes in fossil fuel organic carbon in HIST.

매우 적음을 알 수 있다. 이러한 증가량은 남중국 부근에서 크게 기여하고 있다(Figure 2e).

Figure 1에서 보인 유기탄소 에어로졸과 황산

염 에어로졸의 광학깊이의 차이는 수평분포에서도 나타난다(Figure 2). 20세기 초 대비 20세기 말 총 에어로졸 광학깊이(Total aerosol optical depth)

Figure 2. Changes in total AOD between the period of 1986~2005 from 1901~1920. (a), (b) are HIST, OCFF, respectively. (c), (d) are HIST minus OCFF, HIST minus FIXA respectively. (e) is changes in fossil fuel organic carbon from historical experiment.

를 통해 지역별 증감을 확인 한 결과, HIST실험과 OCFF실험의 차이에 비해 HIST실험과 FIXA실험에서 북아메리카 동부지역을 제외하고 총 에어로졸이 크게 증가하였다. 그리고 HIST실험과 OCFF 실험의 총 에어로졸 증감 분포는 전지구적으로 매우 흡사하다(Figure 2a, 2b). 이는 HIST실험에서 황산염 에어로졸과 바이오파스 에어로졸의 증가가 크고 이에 반해 유기탄소 에어로졸의 변화는 상대적으로 적기 때문이다(Figure 1a, 1d). 아프리카 대륙의 유기탄소 에어로졸의 배출량 변화를 확인 하기 위해 총 에어로졸 배출에 대한 HIST실험과 OCFF실험간의 차이와 모든 에어로졸 강제력이

적용된 HIST실험에서의 유기탄소 에어로졸 변화만을 살펴보았다(Figure 2c, 2e). 두 실험 간의 차이에서는 유기탄소 에어로졸 배출량 변화뿐 아니라 모델 적분 시 모델에서 계산하는 해염과 먼지 에어로졸의 변화가 포함되어 유기탄소 에어로졸의 변화만을 보인 HIST실험과 지역적으로 차이를 보이고 있지만 아시아, 유럽 서쪽지역, 북아메리카 동부지역은 매우 흡사한 증감 분포를 나타낸다. 아시아대륙에서는 증가, 유럽 서쪽지역과 북아메리카 동부지역에서는 감소한다. 이 지역적인 증감 분포는 Bond *et al.*(2007)에서 제시한 것과 비슷하다. 아프리카 대륙에서 두 실험간의 차이와 HIST

실험과의 큰 차이를 보이는 주요인은 먼지 에어로졸이 관련된 것으로 보이는데 추가 조사가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 아시아 대륙과 유럽, 북아메리카 동부지역을 중심으로 HIST와 OCFE실험간의 차이를 통해 아시아부근에서의 유기탄소 에어로졸이 기후에 미치는 영향을 분석한다. HIST 실험의 20세기 말 유기탄소 에어로졸의 전지구 평균은 약 12Tg(Jones *et al.*, 2011)으로 이 값은 Bond *et al.*(2004)에서 1996년 기준으로 전지구에서 추정된 8.9Tg(불확실성범위: 4.3Tg-19.9Tg)와 비교하였을 때 불확실성범위에서 포함된다.

3. 실험결과

1) 기온 및 강수량 변화

과거기후 재현실험(HIST, OCFE, FIXA)의 적분 결과에 따르면 20세기 초(1901~1920년) 대비 20세기 말(1986~2005년) 전지구 기온변화는 각각 +0.67°C, +0.53°C, +1.06°C로 모든 에어로졸이 고정되고 온실가스 영향만 나타나는 FIXA의 기온 상승이 가장 크다(Table 2). HIST실험과 OCFE실험의 기온상승은 유사하게 모의되었다(Figure 3). 이는 전체 에어로졸에 비해 유기탄소 에어로졸의 전지구 기온상승에 미치는 영향이 매우 작음을 의미한다. 전지구평균 강수량의 변화 역시 기온상

승의 결과와 유사하다. HIST는 -0.16%, OCFE는 -0.24%, FIXA는 +1.15%의 변화율을 가지며 FIXA의 강수량 증가가 가장 크다. 각 실험간의 차이에서 살펴보았을 때 기온 및 강수변화 역시 HIST 실험과 OCFE실험은 거의 유사한 것으로 나타났다(Figure 3). HIST실험과 FIXA실험과의 차이에 대한 냉각효과 및 강수량 차이는 주로 황산염 에어로졸 배출량 증가에 기인한 것으로(Figure 1, Chen *et al.*, 2014) 분석되며, 상대적으로 OCFE배출량 증가에 따른 전지구 기온, 강수의 변화는 작다.

동아시아지역(15°N~65°N, 80°E~150°E)에서의 각 실험에 대한 기온, 강수의 변화는 HIST는 0.54°C, -1.53%, OCFE는 1.19°C, 3.63%, FIXA는 0.5°C, -0.66%이며, 전지구 평균값보다 큰 시그널을 나타낸다(Figure 3). OCFE실험에서 동아시아 지역의 두드러진 변화가 나타난 이유는 유기탄소 에어로졸의 주된 배출원이 동아시아지역이며(Figure 2e), 유기탄소 에어로졸이 응결핵 형성에 도움을 준 것으로 분석된다.

2) 복사강제력과 구름의 변화

20세기 초 대비 20세기 말 각 실험별 기온상승 및 강수량 증가를 이해하고자 지표면 단파복사(Net Down Surface Short Wave Flux) 및 장파복사(Net Down Surface Long Wave Flux)의 변화를 조사하였다. 단파 및 장파복사는 HIST, OCFE, FIXA 순으로 전지구 평균 $-1.68\text{Wm}^{-2}/+1.28\text{Wm}^{-2}$, $-1.73\text{Wm}^{-2}/+1.26\text{Wm}^{-2}$,

Table 2. Changes of global mean temperature (°C) and precipitation rate (%) of HadGEM2-AO between the period of 1986~2005 and 1901~1920.

Experiment	Temperature (°C)	Precipitation (%)
Historical	0.63	-0.16
Fixed OCFE	0.52	-0.24
Fixed all aerosol	1.04	1.15

Figure 3. Changes in global mean (a) temperature and (b) precipitation ($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) of HadGEM2-AO for 1860~2005. Redline is historical experiment (HIST) minus fixed all aerosols (FIXA) experiment. Blueline is historical experiment (HIST) minus fixed fossil fuel organic carbon experiment (OCFF). Solid, dashed lines mean global and east asia ($15^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) respectively.

$-0.33\text{Wm}^{-2}/+1.56\text{Wm}^{-2}$ 로 변화하였다. 각 실험 간의 차이를 통해 분석을 하였는데 이는 에어로졸 강제력 유무에 따라 대기와 해양에서의 반응하는 과정을 찾기 위함이다.

단파복사(장파복사)의 공간분포를 살펴본 결과, HIST와 OCFF실험의 차이에 비해 HIST와 FIXA 실험의 차이에서 전지구적으로 크게 감소(증가)하는 것으로 나타났다(Figure 4). 이는 황산염 에어로졸의 증감이 큰 영향을 준 결과이고, 직접효과뿐 아니라 구름응결핵으로 작용하는 간접효과에 의해 복사강제력에 큰 영향을 미치기 때문이다(Le Treut *et al.*, 1997). HIST실험과 OCFF실험간의 차이는 유기탄소 에어로졸 변화에 따른 반응하는 값이므로 유기탄소 에어로졸이 증가한 효과로 아시아 지역에서 단파복사가 감소하고, 유럽 서부지역과 북아메리카 동부지역에서는 유기탄소 에어로졸의 감소로 인해 단파복사가 감소하였다. HIST실험과 FIXA실험의 차이에서는 총 에어로졸에 대한 변화를 살펴보기 위함으로 앞에서 언급한 지역에서 더 강한 시그널을 보이고 있다(Figure 4a). 또한, 유기탄소 에어로졸은 일반적으로 입사하는 태양복사를 반사시켜 직접적인 냉각효과를 일으키는데(Bond

et al., 2011) 단파복사 증감지역인 아시아, 인도, 유럽동부, 북아메리카 서부지역에서 기온 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있고, 이는 유기탄소 에어로졸에 의한 직접효과이다(Figure 4a, 4c).

유기탄소 에어로졸은 태양복사에너지 확산에 의해 직접적으로 기후에 영향을 주고 구름응결핵으로 활동 한다(Novakov and Penner, 1993; Saxena *et al.*, 1995; Matsumoto *et al.*, 1997; Twohy *et al.*, 2005). Twomey(1977)에 따르면 일반적으로 수분양이 일정할 때, 구름 응결핵 역할을 하는 인위적인 에어로졸의 증가는 미세입자의 구름 방울(cloud droplet) 수농도를 증가시키고 구름 알베도를 증가시킨다. 미세한 크기의 구름방울 농도가 증가하게 되면 상대적으로 강수 강도를 강하게 할 것이며, 구름의 대기 중 체류시간을 증가시켜 구름의 운량은 증가한다(Albrecht, 1989). 이러한 구름 운량증가는 태양복사를 차단하여 지표로 향하는 단파복사 감소 효과를 일으키며 대기하층에서의 복사강제력 되먹임 효과를 일으켜 장파복사의 증가를 유발한다. 단파복사와 장파복사의 반대되는 현상은 제시한 각각의 수평장에서 잘 나타나고 있다(Figure 4a, 4b).

Figure 4. Changes in (a) net down short wave radiation flux (Wm^{-2}), (b) net down long wave radiation Flux (Wm^{-2}), (c) temperature between the period of 1986~2005 from 1901~1920. Left panel is HIST minus OCFF, right panel is HIST minus FIXA. Black dots are statistically significant at the 93% level.

강수량의 변화와 밀접한 연관성을 가진 총 구름의 변화(total cloud amount)에서 전지구 강수패턴과 매우 유사한 모습을 나타낸다(Figure 5a). HIST 실험과 OCFF실험과의 차이에서 유기탄소 에어로졸이 증가하는 아시아지역에서 운량이 증가하고 있으며, 유럽 서부지역과 북아메리카 동부지역에서는 이와 상반된다. 특히, 운량이 증가(감소)하

는 각각의 지역에서 강수가 증가(감소)하는 모습이 매우 뚜렷하게 나타나고 있으며, 해양에서 더욱 두드러졌다(Figure 5c). HIST실험과 FIXA실험과의 차이에서는 황산염 에어로졸의 큰 영향을 받아 HIST실험과 OCFF실험과의 차이보다 강한 시그널을 보이고 있으며 검댕이나 바이오매스 에어로졸의 변화에 따라 지역적으로 차이를 보이고 있

Figure 5. Changes in (a) total cloud amount (fraction), (b) stratus (fraction) and (c) precipitation between the period of 1986~2005 from 1901~1920. Left panel is HIST minus OCFF, right panel is HIST minus FIXA. Black dots are statistically significant at the 93% level.

다. 또한 운량 증감 지역은 장파복사의 증감지역과도 매우 유사하며 기온변화에 영향을 미치고 있다. 이러한 운량 변화에서 유기탄소 에어로졸의 간접효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

에어로졸과 밀접한 관계가 있는 하층운인 Stratus타입의 증감을 알아보기 위해 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 구름분

석법을 이용하여 구름의 광학 깊이와 상단고도에 따라 9가지 구름 종류로 구별하여 확인하였다(Figure 5b). 유기탄소 에어로졸의 증가가 나타나는 아시아지역에서의 Stratus의 증가는 유기탄소 에어로졸뿐 아니라 황산염 에어로졸의 반응도 포함되었으며 이러한 Stratus의 증가는 에어로졸이 유도하는 운량변화에 중요한 인자이다.

3) 동아시아

우리나라가 속해있는 동아시아 지역($15^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$)에서의 유기탄소 에어로졸의 반응을 HIST실험과 OCFF실험간의 차이를 통해 살펴 보았다(Figure 6). 화남지방에서의 유기탄소 에어로졸의 증가는 응결핵으로 작용하여 총 구름양을 증가시키며 Stratus의 증가와 함께 강수와 연결이 된다. 하지만 화중지방에서 동북쪽 방향으로는 에어로졸 감소가 보이지 않으나, 총 구름양과 강수

가 오히려 감소하는 모습을 보이고 있다. 에어로졸의 감소에 따른 구름입자 크기의 증가는 충돌/병합 효율을 높여 구름입자가 물방울로 성장하는 것을 도모하고(Rosenfeld, 2006) 잦은 강수로 인한 구름수명을 감소시킨다. 화중지방 부근에서는 에어로졸이 증가하는 모습을 나타내고 있는데 이는 모델에서 모의하는 강수효율이나 해양과의 상호작용에 따른 결과라고 생각되며 이 부분은 추가연구가 필요하다.

Figure 6. Changes in (a) aerosol optical depth, (b) total cloud amount (fraction) and (c) stratus (fraction), (d) precipitation (mm/day) between the period of 1986~2005 from 1901~1920 over east asia ($15^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$). All figures are HIST minus OCFF. Black dots are statistically significant at the 93% level.

5. 요약 및 토론

본 연구는 대기 중 총 에어로졸에서 1.38% 정도로 매우 적은 양을 차지하는 유기탄소 에어로졸이 산업화 이후 20세기 동안 과거기후에 미치는 영향을 평가하기 위해 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO를 사용하여 3가지 에어로졸 실험을 통해 유기탄소 에어로졸이 기후학적 변수들에 미치는 영향을 조사하였다. 20세기 초 대비 20세기 말 유기탄소 에어로졸 증감지역과 에어로졸 강제력 유무에 따라 대기와 해양에서의 반응하는 과정을 찾기 위해 실험 간의 차이를 통한 분석을 하였다. HIST실험과 OCF실험간의 총 에어로졸 분포 차이와 모든 에어로졸 강제력이 포함된 HIST실험에서의 유기탄소 에어로졸의 변화와의 비교를 하여 실험 적분기간 동안 유기탄소 에어로졸의 주요 배출지역이 아시아 지역임을 확인하였다. 또한, 유럽 서부지역과 북아메리카 동부지역에서의 유기탄소 에어로졸은 감소하였는데 유기탄소 에어로졸의 증감지역은 Bond *et al.*(2007)에서 제시한 것과 유사하였다.

HIST실험과 OCF의 실험에서의 기온 및 강수량 변화는 유사하게 모의되어 유기탄소 에어로졸의 전지구 온난화에 미치는 영향이 매우 적었다. HIST실험과 FIXA실험에서의 기온 및 강수량 차이는 황산염 에어로졸의 배출량 증가에 기인(Chen *et al.*, 2014)한 것으로 분석된다. 이는 황산염 에어로졸의 증감이 큰 영향을 주었으며 직접효과뿐 아니라 구름응결핵으로 작용하는 간접효과에 의해 복사강제력에 큰 영향을 미치기 때문이다. Cao *et al.*(2006)에 의하면 유기탄소 에어로졸은 주로 태양복사에너지 분산과 구름 응결핵에 영향을 미친다고 하였다. 앞서 Novakov and Penner(1993)에서는 유기탄소 에어로졸은 태양복사에너지 확산에 의해 직접적으로 기후에 영향을 줄 수 있고 구름을

결핵으로 작용할 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 유기탄소 에어로졸 증감 지역에서의 단파복사 변화는 유기탄소 에어로졸의 직접효과로 분석되었다. 또한, 구름응결핵으로 작용하여 운량 및 강수패턴 변화와 지표와 구름/대기와의 양의 되먹임 효과로 인해 장파복사가 증가하는 간접효과가 나타나는 것을 확인하였다. ISCCP 구름분석법을 사용하여 에어로졸과 관계가 있는 하층운인 Stratus를 살펴본 결과 유기탄소 에어로졸의 배출지역인 아시아지역에서 증가하는 간접효과가 나타났다.

향후 본 연구의 유기탄소 에어로졸의 변화와 기후변화를 보다 정확하게 평가하기 위해서는 다양한 에어로졸 화학실험을 통해 여러 모델 결과를 이용한 불확실성을 정량화하고 관측 자료를 추가함으로써 연구결과의 신뢰도를 높이는 것이 필요하며 이는 에어로졸이 기후에 미치는 영향을 이해하는데 많은 도움을 줄 것이다.

사사

이 연구는 'NIMR-2012-B-2(기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)'의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Albrecht, B., 1989, Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, 245, 1227-1230.
- Baek, H. J., Lee, J. h., Lee, H. S., Hyun, Y. K., Cho, C. H., Kwon, W. T., Marzin, C., Gan, S. Y., Kim, M. J., Choi, D. H., Lee, J. h., Lee, J. h., Boo, K. O., Kang, H. S., and Byun, Y. H., 2013, Climate Change in the 21st Century Simulated by HadGEM2-AO under Representative Concen-

- tration Pathways, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(5), 603-618, DOI:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Bellouin, N., Boucher, O., Haywood, J., Johnson, C., Jones, A., Rae, J., and Woodward, S., 2007, Improved representation of aerosols for HadGEM2. *Met Office Hadley Centre, Technical Note*, 73.
- Bond, T. C., Bhardwaj, E., Dong, R., Jogani, R., Jung, S., Roden, C., Streets, D. G., and Trautmann, N. M., 2007, Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000, *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2), GB2018, doi:10.1029/2006GB002840.
- Bond, T. C., Streets, D. G., Yarber, K. F., Nelson, S. M., Woo, J. H., and Klimont, Z., 2004, A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, *Journal of Geophysical Research*, 109(D14), doi:10.1029/2003JD003697.
- Bond, T. C., Zarzycki, C., Flanner, M. G., and Koch, D. M., 2011, Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1505-1525.
- Boo, K. O., Booth, B. B., Byun, Y. H., Lee, J. H., Cho, C. H., Shim, S. B., and Kim, K. T., 2015, Influence of aerosols in multi-decadal SST variability simulations over the North Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 120, 517-531, doi:10.1002/2014JD021933.
- Cao, G., Zhang, X., and Zheng, F., 2006, Inventory of black carbon and organic carbon emissions from china, *Atmospheric Environment*, 40(34), 6516-6527.
- Chen, J., Yin, Y., Xiao, H., and Chen, Q., 2014, A Numerical Investigation of the Impacts of Anthropogenic Sulfate Aerosol on Regional Climate in East Asia, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(3), DOI:10.1007/s13143-014-0026-5.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward, S., 2011, Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2, *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051-1075, doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- 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, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1521-1534.
- Jones, C. D., Hughes, J. K., Bellouin, N., Hardiman, S. C., Jones, G. S., Knight, J., Liddicoat, S., O'Connor, F. M., Andres, R. J., Bell, C., Boo, K. O., Bozzo, A., Butchart, N., Cadule, P., Corbin, K. D., Doutriaux-Boucher, M., Friedlingstein, P., Gornall, J., Gray, L., Halloran, P. R., Hurtt, G., Ingram, W. J., Lamarque, J. F., Law, R. M., Meinshausen, M., Osprey, S., Palin, E. J., Parsons Chini, L., Raddatz, T., Sanderson, M. G., Sellar, A. A., Schurer, A., Valdes, P., Wood, N., Woodward, S., Yoshioka, M., and Zerroukat, M., 2011, The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations, *Geoscientific Model Development*, 4(3), 543-570.
- Kim, H. J., Takata, K., Tanaka, K., Yamashima, R., Matsumoto, J., Saito, K., Takemura, T., and Yasunari, T., 2014, Regional climate effects according to different estimations of biogenic volatile organic compounds during the Asian summer monsoon, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(4), 423-435.
- Le Treut, H., Forichon, M., Boucher, O., and Li, Z. X.,

- 1998, Sulfate aerosol indirect effect and CO₂ greenhouse forcing: Equilibrium response of the LMD GCM and associated cloud feedbacks, *Journal of climate*, 11(7), 1673-1684.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O'Connor, F. M., Roberts, M. J., Rodriguez, J. M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M. E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S. H., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J. M., Falloon, P. D., Gedney, N., Gray, L. J., Hewitt, H. T., Hobson, M., Huddleston, M. R., Hughes, J., Ineson, I., Ingram, W. J., James, P. M., Johns, T. C., Johnson, C. E., Jones, A., Jones, C. P., Joshi, M. M., Keen, A. B., Liddicoat, S., Lock, A. P., Maidens, A. V., Manners, J. C., Milton, S. F., Rae, J. G. L., Ridley, J. K., Sellar, A., Senior, C. A., Totterdell, I. J., Verhoef, A., Vidale, P. L., and Wiltshire, A., 2011, The HadGEM2 family of Met Office United Model climate configurations, *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723-757, doi:10.5194/gmd-4-723-2011.
- Matsumoto, K., Tanaka, H., Nagao, I., and Ishizaka, Y., 1997, Contribution of particulate sulfate and organic carbon to cloud condensation nuclei in the marine atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 102(6), 655-658.
- Novakov, T. and Penner, J. E., 1993, Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei concentrations, *Nature*, 365, 823-826, doi:10.1038/365823a0.
- Rosenfeld, D., 2006, Aerosol-cloud interactions control of earth radiation and latent heat release budgets, *Solar Variability and Planetary Climates*, Springer, 149-157, doi:10.1007/s11214-006-9053-6.
- Sahu, L. K., Kondo, Y., Miyazaki, Y., Pongkiatkul, P., and Kim Oanh, N. T., 2011, Seasonal and diurnal variations of black carbon and organic carbon aerosols in Bangkok, *Journal of Geophysical Research*, 116(115), D15302, doi:10.1029/2010JD015563.
- Saxena, P., Hildeman, L. M., McMurry, P. H., and Seinfeld, J. H., 1995, Organics alter hygroscopic behavior of atmospheric particles, *Journal of Geophysical Research*, 100(D9), 18755-18770, doi:10.1029/95JD01835.
- Twomey, S., 1974, Pollution and the planetary albedo, *Atmospheric Environment* (1967), 8(12), 1251-1256.
- Twomey, S., 1977, The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(7), 1149-1152.
- Twohy, C. H., Anderson, J. R., and Crozier, P. A., 2005, Nitrogenated organic aerosols as cloud nuclei, *Geophysical Research Letter*, 32, L19805, doi:10.1029/2005GL023605.
- Veefkind, J., Van der Hage, J., and Ten Brink, H., 1996, Nephelometer derived and directly measured aerosol optical depth of the atmospheric boundary layer, *Atmospheric Research*, 41, 217-228.
- Wu, L., Su, H., and Jiang, J. H., 2013, Regional simulation of aerosol impacts on precipitation during the East Asian summer monsoon, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12), 6454-6467.
- Zhang, H., Wang, Z., Wang, Z., Liu, Q., Gong, S., Zhang, X., Shen, Z., Lu, P., Wei, X., Che, H., and Li, L., 2012, Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on East Asian climate using an interactive AGCM-aerosol coupled system, *Climate Dynamic*, 38, 1675-1693.

책임편집: 이은걸

영문교열: 조창현