Jour. Korean Earth Science Society, v. 34, no. 7, p. 662–668, December 2013
http://dx.doi.org/10.5467/JKESS.2013.34.7.662
ISSN 1225-6692 (printed edition)
ISSN 2287-4518 (electronic edition)

기후-대기화학모델이 모의한 엘니뇨가 대류권 오존에 미치는 영향

문병권[1,*] · 예상욱[2] · 박록진[3] · 송창근[4] · 윤대옥[5]

[1]전북대학교 과학교육학부/융합과학연구소, 561-756, 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567
[2]한양대학교 해양융합과학과, 426-792, 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55
[3]서울대학교 지구환경과학부, 151-742, 서울특별시 관악구 관악로 1
[4]국립환경과학원 기후변화연구과, 404-708, 인천광역시 서구 환경로 42
[5]충북대학교 과학교육과, 361-763, 충청북도 청주시 흥덕구 내수동로 52

Effects of the El Niño on Tropospheric Ozone in a Simulation using a Climate-Chemistry Model

Byung-Kwon Moon[1,*], Sang-Wook Yeh[2], Rokjin J. Park[3], Chang-Keun Song[4], and Daeok Youn[5]

[1]Division of Science Education / Institute of Fusion Science, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea
[2]Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Gyeonggi 426-792, Korea
[3]School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
[4]Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea
[5]Department of Science Education, Chungbuk National Univerisity, Chungbuk 361-763, Korea

Abstract: We examine the effects of El Niño on tropospheric ozone through the simulation of a Climate-Chemistry model for a 40-year period (1971-2010). The Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis reveals that the tropospheric ozone concentration in the central-eastern Pacific decreases when the El Niño occurs, which is consistent with the observation. However, the increase of ozone over Indian Ocean-Indonesia regions is weak in the simulation compared to the observations. We analyze details of the 2006 El Niño event to understand the mechanism that caused the change of ozone due to El Niño. It is found that enhanced convection as well as higher water vapor followed by shortened lifetime has led to lower the tropospheric ozone. Downward motion induced by the changes of atmospheric circulation due to sea surface temperature forcing, together with the decrease of water vapor, has brought ozone produced in the upper troposphere over the Indian Ocean

Keywords: climate model, global atmospheric chemistry model, tropospheric ozone, El Niño

요 약: 기후-전구대기화학모델을 이용하여 엘니뇨가 대류권 오존에 미치는 영향을 분석하였다. 40년간(1971-2010) 대류권 오존을 EOF 분석한 결과에서 열대 중앙-동태평양에서 오존의 감소가 관측과 유사하게 잘 모의되었다. 그러나 인도양-인도네시아 부근의 오존 증가는 관측에 비해 약하게 모의되었다. 엘니뇨에 의한 오존변동 과정을 이해하기 위하여

*Corresponding author: moonbk@jbnu.ac.kr
Tel: +82-63-270-2824
Fax: +82-63-270-2802

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.

2006년 엘니뇨의 경우를 좀 더 자세히 분석하였다. 엘니뇨의 발생 시 중앙-동태평양의 오존 감소는 활발해진 상승운동과 그에 따른 수증기량 증가로 오존의 체류시간이 짧아졌음에 기인하였다. 해수면 온도 강제력으로 유도된 하강기류 편차와 수증기 감소로 인도양 대류권 상층 오존이 증가하였다.

주요어: 기후모델, 전구대기화학모델, 대류권 오존, 엘니뇨

서 론

열대 동태평양의 해수면 온도가 평년에 비해 상승하는 현상인 엘니뇨는 기후시스템 내의 대표적 경년변동(주기: 2~6년) 현상으로, 전지구 규모의 기후변동을 초래한다(Philander, 1990; Ropelewski and Halpert, 1987). 평년 열대 태평양에는 서쪽에 따뜻한 온난해수역(warmpool region), 동쪽에 차가운 한랭혀(cold tongue)가 분포하여 동서방향으로 수온 경도가 존재한다. 그런데 엘니뇨가 발생하면 한랭혀가 약화되면서 열대 동태평양에 양의 해수면 온도 편차가 나타나고, 평년 서태평양에서 나타나는 활발한 상승운동 영역이 동쪽으로 치우쳐 중태평양까지 이동하게 된다. 이와 더불어 동태평양과 서태평양에 각각 양과 음의 강수량 편차가 나타난다. 라니냐 시기는 대체로 반대의 상황이 나타나는데 서태평양의 대류활동이 평년보다 더 강하게 나타난다. 엘니뇨가 전구 기후에 미치는 영향은 여러 연구에서 다뤄져왔다(Cha, 2007; Jang and Ha, 2008; Seol, 2001; Wang et al., 2000).

엘니뇨가 전지구 기후변동에 영향을 주는 것뿐 아니라 대류권 오존 분포에 영향을 준다는 연구가 있다(Chandra et al., 1998; Fujiwara et al., 1999; Thompson et al., 2001; Ziemke and Chandra, 2003). Chandra et al. (1998)은 위성 관측자료를 이용하여 1997/98 엘니뇨시기에 나타난 대류권 오존 변화를 분석하였다. 그들은 엘니뇨 발생으로 열대 동태평양에서 4-8DU (Dobson units)의 대류권 오존의 감소가, 서태평양에서 10-20DU의 증가가 있음을 제시하였다. 이런 변화의 원인으로 앞서 언급한 엘니뇨 시기의 대류활동 변화 및 대규모 순환의 변화, 그리고 인도네시아 지역이 건조해지면서 빈번하게 발생하는 산불 등이 제시되었다.

Ziemke and Chadra (2003)은 장기간(1970-2001) 위성 관측 자료를 이용하여 엘니뇨/라니냐 변동이 열대 대류권의 오존 변동을 일으키는 주된 요인임을 제시하였고, Ziemke et al. (2010)은 대류권 오존 자료를 이용하여 시간에 따른 El Niño-Southern Oscillation (ENSO, 엔소) 변동을 나타내는 엔소 인덱스를 새롭게 정의하였다.

관측 자료를 이용한 연구와 더불어 전구대기화학모델이 모의한 엘니뇨와 대류권 오존의 관계를 분석한 결과들이 제시되었다(Sudo and Takahashi, 2001; Peters et al., 2001; Zeng and Pyle, 2005; Doherty et al., 2006). Doherty et al. (2006)는 연구에서 사용한 모델이 엘니뇨와 오존분포의 관계를 관측과 유사하게 모의하였지만, 인도네시아와 서태평양의 오존 증가량이 관측에 비해 작게 모의함을 제시하였다.

대류권 오존은 인간 건강과 식생에 악영향을 주는 오염 물질이면서 동시에 지구복사 에너지를 흡수하는 온실기체로서 지구 기후에 영향을 준다. 모델링 연구에 의하면 여름철 북반구 중위도 오염지역에서 대류권 오존에 의해 기온이 약 0.5°C 상승한다고 한다(Shindell et al., 2006). 따라서 대류권 오존 분포와 기후변동과의 관련성을 이해하는 것은 대기질의 문제뿐 아니라 기후변화와 연관된 중요한 일이라 할 수 있다. 우리는 이 연구에서 최근 새롭게 개발된 기후모델과 전구대기화학모델을 오프라인(off-line)으로 접합된 모델링 시스템을 이용하여 엘니뇨와 대류권 오존의 관련성을 찾고자 하였다.

모델과 실험방법

이 연구는 엘니뇨와 대류권 오존의 관련성을 모의하기 위해 기후모델과 전구대기화학모델을 함께 사용하였다. 기후모델은 NCAR CAM3 (Collins et al., 2006)으로 지면모델인 CLM3 (Dickinson et al., 2006)을 포함하고 있다. CAM3은 유한 체적 역학 코어(finite volume dynamical core)로 구성되며, 수평해상도는 2°(경도)×2.5°(위도) 이며, 26개 층을 가지고 있다. 해양과 해빙은 관측 자료를 이용하여 경계조건으로 처방되며 각각 해수면 온도와 해빙 비율(sea ice fraction)이 사용된다(Rayner et al., 2003).

전구대기화학모델은 미국 하버드대학교에서 개발한 GEOS-Chem 모델을 사용하였다(Park et al., 2004). GEOS-Chem은 대기 중의 화학반응과 화학물질의 수송 등을 모의하기 위해 개발되었으며, 이때 필요한 기상 변수(바람, 기온, 습도 등)는 입력 변수로 처방

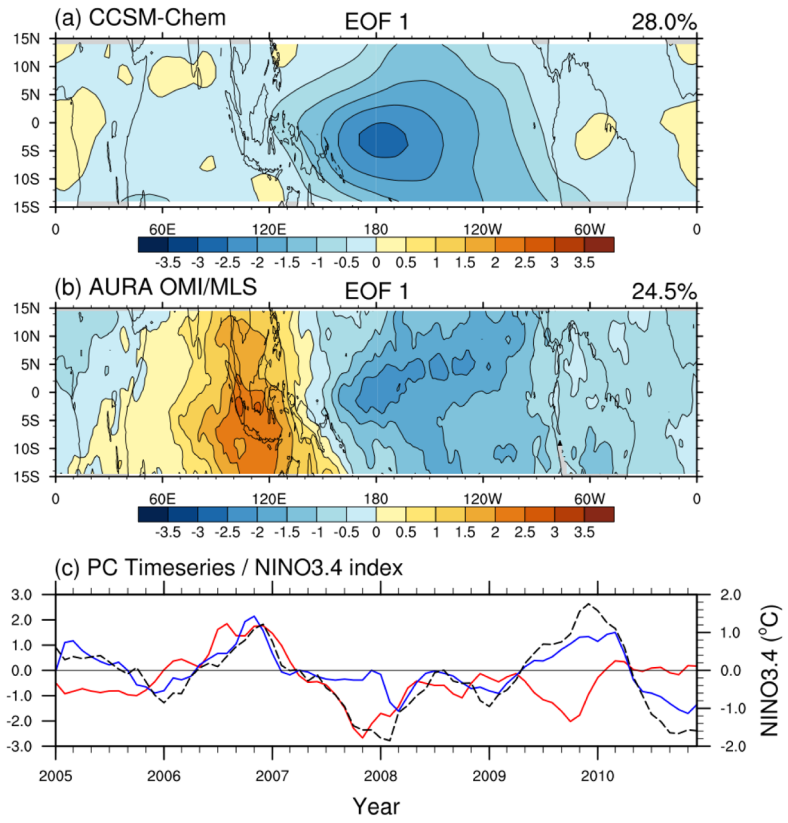

Fig. 1. The first EOF patterns of tropospheric ozone from (a) model simulation and (b) AURA OMI/MSL. (c) Corresponding PC time series (red: model, blue: AURA OMI/MSL) and NINO3.4 index (dashed).

된다. 이 화학모델은 본래 NASA GMAO(Global Modeling and Assimilation Office)에서 개발한 자료동화를 이용하는데, 이 연구에서는 CAM3 기상장을 이용할 수 있게 약간 수정된 버전을 사용한다. 이때 기후모델이 생산한 자료를 화학모델에 적합하게 변환해 주는 off-line 접합자를 개발하여 이용하였다. 수정된 전구화학모델과 CAM3을 이용한 모델링 시스템은 이미 시베리아 산불이 기상에 미치는 영향이나 화산분출의 영향 등을 모의하는데 활용된 연구가 있다(Moon et al., 2011; Youn et al., 2011).

우리는 먼저 관측 해수면 온도를 경계조건으로 처방하여 CAM3을 실행하고 모의된 자료를 off-line 접합자를 이용하여 대기화학모델이 필요한 입력 자료로 변환하였다. 적분기간은 1971-2010년간이며, 해수면 온도는 NOAA OISSTv2 (Reynolds et al., 2002)을 이용하였다. 초기값으로는 1960년부터 적분하여 얻은 1971년 1월 1일 대기상태를 사용하여 기후모델이 충분한 스핀업 기간을 거치도록 구성하였다. 이후 생산된 대기 변수를 이용하여 대기화학모델을 수행하였다. 대기화학 모델을 수행할 때 필요한 바이오매스 연소(biomass burning)에 의한 배출량과 인위적 배출량(anthropogenic emission)은 계절적 변화는 있지만, 경년변화는 포함시키지 않았다.

엘니뇨와 대류권 오존 분포

Fig. 1은 모델이 모의한 열대지역 대류권 오존을 경험적 직교함수(EOF: Empirical Orthogonal Function) 분석의 결과를 보인 것이다. 모델의 모의 성능을 비교하기 위해 AURA 위성에 탑재된 OMI와 MLS 센서로 관측한 자료의 결과를 함께 제시하였다. AURA OMI/MLS 오존 자료는 2004년 10월부터 최근까지 제공된다(http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/cloud_slice/index.html). 이때 EOF 분석은 1971-2010년 동안 실시하였다. 또한 시간에 따른 모드 변동과 엘니뇨 발달 과정을 비교하기 위해 PC (principal component) 시계열과 함께 NINO3.4 지수를 함께 나타냈다.

먼저 모델은 날짜 변경선 부근에 음의 편차와 아프리카 부근에 약한 양의 편차를 보이고 있으며 전체 변동성의 28.0%을 차지하고 있다(Fig. 1a). PC 시계열과 NINO3.4 지수를 비교한 것(Fig. 1c)을 이용하면, 모델은 엘니뇨가 발생할 때 180° 부근을 중심으로 전체 태평양에서 대류권 오존이 감소한다는 것을 알 수 있다. 반면에 대류권 오존이 증가하는 지역은 매우 한정되고 약하게 나타남을 알 수 있다. 관측자료를 이용한 결과에는 중태평양에 나타나는 강한 음의 편차와 인도네시아를 중심으로 인도양과 서태평양에 걸쳐 양의 편차가 두드러지게 나타나며 전체 변동성의 24.5%을 차지한다(Fig. 1b). 이들 결과는 엘니뇨가 발생할 때 대류권 오존은 중태평양에서 감소하고, 인도네시아 지역에서 증가한다는 이전 연구결과와 어느 정도 일치한다(Ziemke and Chandra, 2003).

EOF 모드를 통해 살펴본 모델은 인도네시아 지역의 변동성을 관측에 비해 약하게 모의하고 있지만, 어떤 특정한 엘니뇨 시기에는 관측과 유사한 특징을 보인다. 우리는 이것을 Fig. 1c에 보인 PC 시계열에서 유추할 수 있는데, 2006년 엘니뇨의 경우에 모델과 관측의 PC 시계열이 거의 일치하고 있어 이 시기는 모델이 관측을 대체로 잘 모의하고 있다고 생각할 수 있다.

이것을 확인하기 위해 2006년 10월의 모델이 모의한 오존 연직 분포를 Fig. 2에 나타냈다. 오존은 적도부근(10°S-10°N)을 평균한 값이며, 엘니뇨 시기의 특징을 나타내기 위해 평년시기(normal condition)인 2005년 10월의 값을 뺀 결과이다. 이 값은 월평균을 빼서 구한 편차와 큰 차이가 없었다. Fig. 2는 2006년 엘니뇨에 의해 나타나는 오존의 동서방향 변화를 잘 보여주고 있다. 대류권 오존은 120°E을 기준으로 서쪽의 열대 지역의 오존은 증가하고, 동쪽은 전반적으로 감소하였다. 앞에서 논의한 바와 같이 이 특징은 이런 분포는 Chandra et al. (2009)이 제시한 결과와 매우 비슷한 것이다. 특히 남아메리카에서 오존의 감소도 그들의 결과와 비슷하게 나타나고 있다.

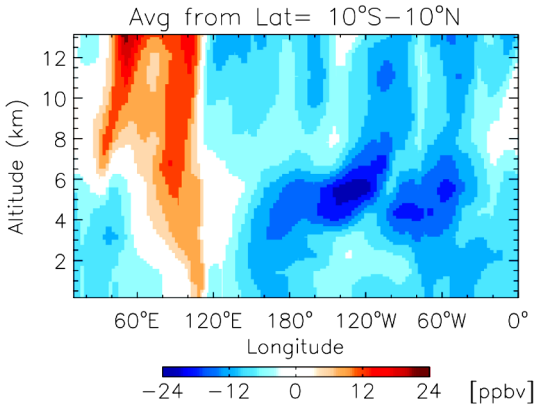

Fig. 2. Longitude-altitude cross section of simulated ozone difference (averaged between 10°S-10°N). The difference is calculated as October 2006 minus October 2005.

오존변동 메커니즘

Sudo and Takahashi (2001)은 모델 실험을 통해 1997/98 엘니뇨 발생에 따른 대류권 오존 변동을 분석하였다. 그들에 따르면 엘니뇨가 발달하면서 활발한 대류활동 영역이 중태평양과 동태평양으로 이동과 함께 나타나는 대기순환 변화가 오존변화의 원인이 된다는 것이다. 대기순환과 오존 변동의 관계를 간단히 설명하면, 먼저 상승운동이 활발해지면 상대적으로 낮은 농도의 오존을 포함하는 하층 공기가 상층으로 수송돼 대류권 오존 농도를 감소시키는 것을 들 수 있다. 게다가 대류활동으로 인한 수증기(H_2O) 증가는 들뜬 상태의 산소원자(O^1D)와 결합하여 하이드록실 라디칼(OH)을 생성시키는 반응 $O^1D+H_2O \rightarrow 2OH$을 통해 오존 농도를 감소시킨다. 이와 같이 대류권 수증기는 오존을 파괴시키는 요인으로 작용하므로(Kley et al., 1996), 엘니뇨에 따른 대류활동과 수증기 변화를 살펴보는 것이 필요하다.

Fig. 3은 2006년 엘니뇨시기에 기후 모델에서 모의된 대류활동에 의한 구름질량속(cloud mass flux) 변화와 대기 순환 변화를 함께 나타낸 것이다. 중태평양과 동태평양에 보이는 강한 양의 질량속이 이 지역의 상승 기류와 함께 잘 일치하고 있으며 습윤한 대기를 나타내고 있다. 반면에 60°E-110°E 지역은 강한 하강기류와 음의 구름질량속이 있으며 인도네시아와 인도양이 건조함을 나타나고 있다. 엘니뇨가 유도하는 이런 대기 순환의 변화는 관측과 잘 일치하는 특징으로 모델이 해수면 온도 강제력에 잘 반응하고 있음을 의미한다.

Fig. 2와 Fig. 3을 비교하면 구름질량속의 변화와 오존의 변화가 서로 관련된 것처럼 보인다. 특히 인도양의 상층 약 12 km의 오존 증가는 음의 구름질량속과 잘 일치하고 있다. 반면에 동태평양의 구름질량속이 최대가 나타는 영역은 오존 감소가 큰 지역

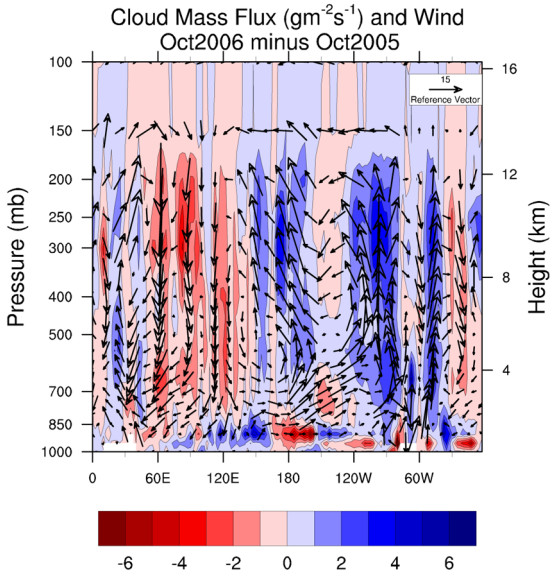

Fig. 3. Simulated differences of the cloud mass flux ($gm^{-2}s^{-1}$) (shaded), wind vector of zonal and vertical velocity (scaled) between Oct 2006 and Oct 2005 averaged over 10^{o}S-10^{o}N.

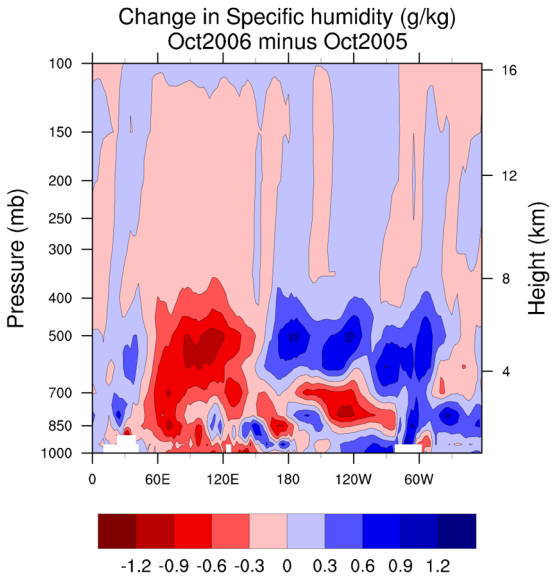

Fig. 4. Longitude-altitude cross section of the difference of the simulated specific humidity between Oct 2006 and Oct 2005.

(110°W, 6 km)보다 더 상층인 9 km 고도에서 나타나고 있다. 다시 말하면, 대류권 오존의 증가의 최대는 하강기류가 강한 고도에서 나타나지만, 오존의 감소는 상승기류가 강한 곳보다 더 하층에 나타나고 있다. 이런 차이점을 나타나게 하는 원인을 찾기 위해 Fig. 4에 모델이 모의한 비습 변화를 나타냈다. 예상하듯이 대류활동이 활발한 지역에서 비습이 증가하고, 하강기류가 강한 곳에서 감소하고 있다. 특히 대류활동이 강화된 중앙-동태평양에서 오존 감소와 수증기 증가 영역이 잘 일치하고 있다. 여기서 수증기 증가는 엘니뇨 발생에 따른 수온 증가로 해수의 증발이 강화되면서 수증기가 상승운동에 의해 활발하게 중상층으로 수송되었기 때문일 것이다. Fig. 3에서 보인 구름질량속의 경우는 최대 상승기류 영역과 오존 감소는 일치하지 않았지만, 인도양 상층의 최대 하강기류 영역과 오존의 증가가 잘 일치하였다. 그러나 수증기 변화는 오존 증가보다는 태평양 하층에 나타나는 오존 감소 영역이 수증기 증가 영역과 잘 일치하고 있다.

다시 말하면, 엘니뇨 변화에 따른 오존 증가와 감소는 각각 강한 하강 기류와 수증기 증가와 관련돼 나타난다. 이런 차이가 나타나는 원인은 아직 분명치 않다. Sudo and Takahashi (2001)은 모델링 연구에서 1997/98 엘니뇨시 나타난 인도양 상층의 오존 증가의 원인으로 성층권 오존이 유입되었을 가능성에 대해 언급하였다. 우리는 인도양 상층의 성층권 오존의 유입이 그 원인인지 파악하기 위해 성층권에서 유입되는 오존속의 변화를 살폈지만 큰 차이를 얻지는 못했다(not shown). 이 문제를 해결하기 위해서는 대류권 오존 생성 및 소멸 반응에 참여하는 다른 화학물질의 분석이 필요할 것이다.

요약 및 논의

기후변동 중 대표적 경년변동 현상인 엘니뇨가 대류권 오존에 미치는 영향을 기후모델과 전구대기화학모델을 함께 사용하여 모의하였다. 기후모델은 NCAR CAM3를 사용하였으며, 대기화학모델은 하버드대학의 GEOS-Chem을 이용하였다. 먼저 관측 해수면 온도를 경계조건으로 처방한 기후모델을 수행하여 얻은 자료를 변환하여 대기화학모델을 구동하기 위한 기상변수를 생산하였다. 이후 고정된 인위적 배출량과 바이오매스 연소에 의한 배출량을 고정시킨 조건에서 대기화학모델을 수행하여 얻은 오존 변화를 분석하였다.

대류권 오존을 EOF한 결과에서 모델은 엘니뇨에 따른 중앙-동태평양의 오존 감소를 관측과 유사하게 모의하는 것을 알 수 있었다. 그러나 관측과 비교하

여 인도네시아의 오존 변동이 약하게 나타났는데, 모델의 이런 특징은 Doherty et al. (2006)에서도 비슷하게 모의되었다. 그들은 이것과 연관하여 경년 변화를 하는 바이오매스 연소 배출량을 대기화학모델에 처방하면 인도네시아의 오존 변화가 좀 더 두드러지게 나타나면서 모델의 문제점이 개선되는 결과를 제시하였다. 인도네시아 지역의 오존변화와 바이오매스 연소와의 관련성은 이후 Chandra et al. (2009)에 좀 더 자세히 다뤄졌다. 그들에 따르면 엘니뇨에 의해 나타나는 인도네시아 지역의 대류권 오존 변화는 바이오매스 연소에 기인한 것과 기상 상태의 변화에 기인한 것이 각각 4-6DU와 4-8DU로 비슷하다는 것을 제시하고 있다. 그런데 그들은 바이오매스 연소에 의한 오존 반응이 국지적으로 나타남을 주장하였다. 다시 말하면, 이런 효과는 인도네시아 지역에 한정되며, 오스트레일리아 서부 지역에서는 역학적 효과가 지배적이라는 것이다. 이 결과를 고려하면, 모델에서 인도네시아와 서태평양에서 오존 변화가 약하게 모의되는 것이 단지 계절변화만 있는 바이오매스 배출량을 사용하였기 때문만은 아니라는 추측을 할 수 있다. 엘니뇨와 대류권 오존의 관계에서 바이오매스 연소의 영향에 대한 연구는 Loyola et al. (2006)에서 자세히 논의되고 있다.

우리는 모델이 AURA OMI/MSL 관측 자료를 이용한 EOF 결과와 유사하게 나타나는 2006년 엘니뇨 시기를 분석하여 엘니뇨가 오존 분포에 미치는 영향을 좀 더 자세히 살폈다. 엘니뇨가 발생하면서 중앙-동태평양에서 오존이 감소하는 경우는 활발해진 대류활동에 따른 수증기 증가가 원인으로 작용하였다. 수증기는 들뜬 상태의 산소원자(O^1D)와 반응하여 하이드록실 라디칼(OH)을 생성하면서 오존 파괴를 촉진시키게 된다. 수증기는 주로 중층(4-8 km 범위)에서 증가하여 오존의 체류시간을 짧게 만들고 파괴시키는 것으로 모의되었다. 엘니뇨시기에 인도네시아-인도양 지역에 하강 기류 편차가 나타나는데, CAM3도 2006년 엘니뇨에 나타나는 이 지역의 하강기류를 잘 모의하였다. 이와 더불어 이 지역 대류권의 오존은 증가하였다. 여기서 주목할 점은 중앙-동태평양의 오존 감소가 대류권 중층에서 주로 나타나는 반면, 오존 증가는 6 km 보다 더 상층에 집중돼 나타나는 점이다. 이런 차이점의 원인으로 성층권의 영향을 고려하여 분석하였지만 의미 있는 결과는 얻지 못했다(not shown). 대류권 오존 반응에 참여하는 NO_x(=NO+NO_2), CO, HNO_3 등의 화학물질과 바이오매스 연소, 대류활동의 영향 등에 대한 자세한 분석이 필요할 것이다.

이 연구에서 사용된 모델링 시스템은 기존 연구와 다르게 기후모델과 대기화학모델이 off-line 접합자를 통해 연결되는 구조를 갖는다. 이 구조는 기상과 대기화학 과정이 서로 상호작용하는 현실을 정확하게 반영하지 못하는 단점이 있다. 그러나 두 모델을 각각 독립적으로 실행시키므로 매우 복잡하고 정밀한 물리역학적/화학적 과정이 포함된 모델을 사용할 수 있다는 이점이 있다. 또한 이 시스템은 기상과 대기화학 과정의 상호작용과 관련된 민감도 실험을 구현하기 쉽다. 이에 대한 좋은 예로 최근 들어 주목받는 지구온난화와 관련한 엘니뇨의 변화를 들 수 있다(Yeh et al., 2009). 전형적인 엘니뇨와 다른 해수면 온도 분포가 발달하면 강수 분포, 대류활동 분포 등이 변화돼 결국 대류권 오존에도 이전과 다른 영향이 나타날 것이다. 현재 이에 대한 연구를 진행 중에 있다.

사 사

This study was financially supported by National Institute of Environmental Research (NIER). 논문의 여러 오류를 수정할 수 있도록 검토하고 조언을 주신 이은정 박사와 익명의 심사자께 감사드립니다.

References

Cha, E.J., 2007, El Niño-Southern Oscillation, Indian Ocean dipole mode, a relationship between the two phenomena, and their impact on the climate over the Korean Peninsular. Journal of Korean Earth Science Society, 28, 35-44. (in Korean)

Chandra, S. Ziemke, J.R., Min, W., and Read, W.G., 1998, Effects of 1997-1998 El Niño on tropospheric ozone and water vapor. Geophysical Research Letter, 25, 3867-3870.

Chandra, S., Ziemke, J.R., Duncan, B.N., Diehl, T.L., Livesey, N.J., and Froidevaux, L., 2009, Effects of the 2006 El Niño on tropospheric ozone and carbon monoxide: implications for dynamics and biomass burning. Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 4239-4249.

Collins, W.D. and Coauthors, 2006, The community climate system model version 3 (CCSM3). Journal of Climate, 19, 2122-2143.

Dickinson, R.E., and Coauthors, 2006, The Community

Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. Journal of Climate, 19, 2302-2324.

Doherty, R.M., Stevenson, D.S., Johnson, C.E., Collins, W.J., and Sanderson, M.J., 2006, Tropospheric ozone and El Niño-Southern Oscillation: Influence of atmospheric dynamics, biomass burning emissions, and future climate change. Journal of Geophysical Research, 111, D19304, doi:10.1029/ 2005JD006849.

Fujiwara, M., Kita, K., Kawakami, S., Ogawa, T., Komala, N., Saraspriya, S., and Suripto, A., 1999, Tropospheric ozone enhancements during the indonesian forest fire events in 1994 and 1997 as revealed by ground-based observatons. Geophysics Research Letter, 26, 2417-2420.

Jang, S.R. and Ha, K.J., 2008, On the relationship between typhoon intensity and formation region: effect of developing and decaying ENSO. Journal of Korean Earth Science Society, 29, 29-44. (in Korean)

Kley, D., Crutzen, P.J., Smith, H.G.J., Vömel, H., Oltmans, S.J., Crassl, H., and Ramanathan, V., 1996, Observations of near-zero ozone concentrations over the convective Pacific: Effects on air chemistry. Science, 274, 230-233.

Loyola, D., Valks, P., Ruppert, T., Richter, A., Wagner, T., Thomas, W., van der A. R., and Meisner, R., 2006, The 1997 El Niño impact on clouds, water vapour, aerosols and reactive trace gases in the troposphere, as measured by the Global Ozone Monitoring Experiment. Advanced in Geosciences, 6, 267-272.

Moon, B.K, Youn, D., Park, R.J., Yeh, S.W., Kim, W.M., Kim, Y.H., Jeong, J.I., Woo, J.H., Im, E.G., and Song, C.K., 2011, Meteorological responses to Mt. Baekdu Volcanic eruption over East Asia in an offline global climate-chemistry model: a pilot study. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 47, 345-351.

Park, R.J., Jacob, D.J, Field, B.D., Yantosca, R.M., and Chin, M., 2004, Natural and trans-boundary pollution influences on sulfate-nitrate-ammo nium aerosols in the United States: implications for policy. Journal of Geophysics, 109, D15204, doi:10.1029/2003JD004473.

Peters, W., Krol, M., Dentener, F., and Lelieveld, J., 2001, Identification of an El Niño Southern Oscillation signal in a multiyear global simulation of tropospheric ozone. Journal of Geophysical Research, 106, 10389-10402.

Philander, S.G.H., 1990, El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, USA, 293 p.

Rayner, N.A., and Coauthors, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. Journal of Geophysical Research, 108, 4407, doi:10.1029/2002JD 002670.

Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., and Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate. Journal of climate, 15, 1609-1625.

Ropelewski, C.F. and Halpert, M.S., 1987, Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation, Monthly Weather Review, 115, 1606-1626.

Seol, D.I., 2001, Long-term variations of troposphere-stratosphere mean meridional circulation. Journal of Korean Earth Science Society, 22, 415-422. (in Korean)

Shindell, D., Faluvegi, G., Lacis, A., Hansen, J., Ruedy, R., and Aguilar, E., 2006, Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change. Journal of Geophysical Research. 111, D08302, doi:10.1029/ 2005JD006348.

Sudo, K. and Takahashi, M., 2001, Simulation of tropospheric ozone changes during 1997-1998 El Nino: Meteorological impact on tropospheric phtochemistry. Geophysical Research Letter, 28, 4091-4094.

Thompson, A.M., Witte, J.C., Hudson, R.D., Guo, H., Herman, J.R., and Fujiwara, M., 2001, Tropical tropospheric ozone and biomass burning. Science, 291, 2128-2132.

Wang, B., Wu, R., and Fu, X., 2000, Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? Journal of Climate, 13, 1517-1536.

Yeh, S.W., Kug, J.S., Dewitte, B., Kwon, M.H., Kirtman, B.P., and Jin, F.F., 2009, El Niño in a changing climate. Nature, 461, 511-514, doi:10.1038/nature08316.

Youn, D., Park, R.J., Jeong, J.I., Moon, B.K., Yeh, S.W., Kim, Y.H., Woo, J.H., Im, E.G., Jeong, J.H., Lee, S.J, and Song, C.K., 2011, Impact of aerosols on regional meteorology due to Siberian forest fires in May 2003. Atmospheric Environment, 45, 1407-1412.

Zeng, G. and Pyle, J.A., 2005, Influence of El Niño Southern Oscillation on stratosphere/troposphere exchange and the global tropospheric ozone budget. Geophysical Research Letter, 32, L01814, doi:10.1029/2004GL 021353.

Ziemke, J.R., Chandra, S., Oman, L.D., and Bhartia, P.K., 2010, A new ENSO index derived from satellite measurements of column ozone. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 3711-3721.

Ziemke, J.R. and Chandra, S., 2003, La Niña and El Niño-induced variabilities of ozone in the tropical lower atmosphere during 1970-2001. Geophysical Research Letter, 30, 1142, doi:10.1029/2002GL016387.

2013년 10월 29일 접수
2013년 11월 8일 수정원고 접수
2013년 11월 18일 채택