

시베리아 산불이 2003년 봄철 동아시아 오존 농도에 끼치는 영향 연구

박록진* · 정재인 · 윤대옥

서울대학교 지구환경과학부

(2009년 6월 4일 접수; 2009년 6월 26일 승인)

A study of the Effects of Siberian Wildfires on Ozone Concentrations over East Asia in Spring 2003

Rokjin J. Park, Jaemin I. Jeong and Daekook Youn

School of Earth and Environmental Science, Seoul National University, Seoul, 151-747, Korea

(Manuscript received 4 June 2009; in final form 26 June 2009)

Abstract

Global climate warming induced by long-lived greenhouse gases is expected to cause increases in wildfire frequencies and intensity in boreal forest regions of mid- and high-latitudes in the future. Siberian forest fires are one of important sources for air pollutants such as ozone and aerosols over East Asia. Thus an accurate quantification of forest fire influences on air quality is crucial, in particular considering its higher occurrences expected under the future warming climate conditions. We here use the 3-D global chemical transport model (GEOS-Chem) with the satellite constrained fire emissions to quantify Siberian fire effects on ozone concentrations in East Asia. Our focus is mainly on spring 2003 when the largest fires occurred over Siberia in the past decade. We first evaluated the model by comparing to the EANET observations. The model reproduced observed ozone concentrations in spring 2003 with the high R^2 of 0.77 but slightly underestimated by 20%. Enhancements in seasonal mean ozone concentrations were estimated from the difference in simulations with and without Siberian fires and amounted up to 24 ppbv over Siberia. Effects of Siberian fires also resulted in 3-10 ppbv increases in Korea and Japan. These increases account for about 5-15% of the ozone air quality standard of 60 ppbv in Korea, indicating a significant effect of Siberian fires on ozone concentrations. We found however that possible changes in regional meteorology due to Siberian fires may also affect air quality. Further study on the interaction between regional air quality and meteorology is necessary in the future.

Key words: ozone, Siberian forest fire, air quality, climate change

1. 서론

20세기 들어 급격한 산업화에 따른 과도한 온실기체의 배출은 격심한 기상이변과 같은 단기적인 영향뿐만 아니라 온도 상승, 강수량 변화, 해수면 상승 등의

장기간에 걸친 영향으로 나타나고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서에 지난 100년간 지구의 평균 기온이 0.74°C 상승하였고 이러한 기온의 상승은 가속도가 붙어 금세기 말에 이르러서는 최대 6.4°C 까지 이를 것이며 해수면 역시 최대 59 cm 상승할 것이라 예측하였다 (IPCC, 2007).

최근 연구 결과들은 지구온난화로 인한 기상조건의 변화가 산불 발생을 점차 증가시킴을 보여주고 있다. Westerling *et al.* (2006)과 Malevsky-Malevich *et al.* (2008)은 기상 조건의 통계 분석을 통해 지표 대기 온도의 상승이 산불 발생의 빈도, 강도 및 기간과 밀접한

*Corresponding Author: Rokjin J. Park, Atmospheric Chemistry Modeling Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea.
Phone: +82-2-880-6715, fax: +82-2-883-4972
E-mail: rjpark@snu.ac.kr

양의 상관관계가 있음을 보였다. Soja *et al.*(2007)은 과거 시베리아에서 발생한 산불 조사를 통해 1990년대의 산불 발생 면적이 1980년대 보다 평균 29% 증가하였음을 보였다. 또한 Balzter *et al.*(2007)은 향후 지구온난화로 인해 시베리아 산불의 빈도가 증가할 것임을 발표하였다.

산불은 일산화탄소(CO), 휘발성 유기화합물(VOCs) 그리고 질소산화물(NOx) 등 대류권 오존 생성에 기여하는 전구 기체들을 배출한다. 배출된 전구 기체들은 대기중에서 복잡한 광화학적 반응을 통해서 주요한 대기오염 물질인 오존 생성에 기여한다. 산불에 의해 증가한 대류권 오존은 인간의 호흡기 질환 및 농작물의 성장에도 심각한 피해를 끼치는 것으로 알려져 있다 (Crutzen *et al.*, 1979; Bowman and Johnston, 2005; Park *et al.*, 2006). 또한 대류권 오존은 OH의 생성원으로써 대기화학반응에 중요한 요소를 차지하며 이산화탄소(CO₂)와 메탄(CH₄)에 이어 세 번째로 중요한 온난화 기체로 알려져 있다 (IPCC, 2007).

본 연구에서는 3차원 대기화학수송모델과 위성에서 관측한 산불 정보를 이용하여 산불에 의한 오염물질 배출이 주요한 대기오염물질인 동아시아 오존 농도에 끼치는 영향을 정량적으로 산정하였다. 2장에서는 본 연구에서 사용한 모델과 산불 자료에 대해 설명하였으며 모델 검증 및 산불로 인한 대기질 영향 산정을 3장과 4장에 기술하였다. 마지막으로 요약과 결론을 5장에 기술하였다.

2. 모델 및 자료

2.1 3차원 대기화학 수송 모델

본 연구에서는 전지구 3차원 대기 화학 수송 모델인 GEOS-Chem(version 7-04-10)을 사용하였다 (Park *et al.*, 2006). GEOS-Chem은 대기에서 오존을 포함한 여러 기체상의 화학물질들과 황산염, 질산염을 포함한 무기 에어로솔, 탄소 성분 에어로솔 그리고 해염과 먼지입자와 같은 다양한 종류의 에어로졸의 시간적 공간적 분포를 모사한다 (Bey *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2004). GEOS-Chem은 지금까지 대류권의 화학조성, 대기오염, 전 지구적 기후변화 등에 관한 광범위한 대기화학문제들 뿐만 아니라 인도네시아, 시베리아, 북미 등에서 발생한 산불에 대해서도 적용되어 그 성능이 입증되었다 (Duncan *et al.*, 2003; Generoso *et al.*,

2007; Pfister *et al.*, 2008).

GEOS-Chem을 운용하는데 필요한 3차원 전 지구 기상자료는 미국 NASA의 GMAO 그룹에서 생산한 자료동화 기상자료를 사용하였다. 사용한 기상자료는 매 6시간 간격으로 모델에 공급되고 있으며, 기상장의 수평격자는 위경도 1°×1°, 수직으로는 55개의 층을 가지고 있다. 본 연구에서는 계산 시간의 효율을 위해 수평격자를 2°×2.5° 그리고 연직으로 30층으로 조정하여 사용하였다.

GEOS-Chem은 80가지 이상의 화학종과 300개 이상의 반응식을 포함하며 오존 모의를 위해 GEOS-Chem을 이용한 여러 연구들이 진행되었다 (Bey *et al.*, 2001; Fiore *et al.*, 2002, Hudman *et al.*, 2004). GEOS-Chem의 구체적인 화학모사에는 오존-NOx-VOC-Oxidant 화학구조를 적용하였으며 비균질 화학반응 (heterogenous chemistry)과 대기복사 및 광화학반응에 끼치는 에어로졸의 영향을 Park *et al.*(2004)에서 기술한대로 수행하였다. 동아시아 스스 방출자료는 Streets *et al.* (2003)에 의해 기체 및 에어로졸의 오염원 별로 상세하게 개발된 자료를 이용하였다.

2.2 동아시아 산불 배출량 자료의 시공간적 분포

본 연구에서 사용한 산불 배출량 자료는 위성에서 탐지한 산불의 발생 횟수와 면적, 그리고 식생 모델을 기반으로 1°×1°의 수평격자로 제공되는 전구 산불 배출 데이터베이스 GFEDv2 (Global Fire Emissions Database version 2; Giglio *et al.*, 2006; van der Werf *et al.*, 2006) 자료에 Andreae and Merlet(2001)에 의해 구한 식생별 배출 계수를 적용시킨 것이다.

일반적으로 산불로 인해 배출된 오염 물질은 모델에 적용시킬 때 지표층에 할당하거나 혹은 대기 경계층 내에 균등하게 배분시키는 방식을 사용한다. 하지만 실제 산불이 발생하게 되면 강한 열기로 인해 대기 경계층 보다 높은 고도까지 연무가 상승하게 된다 (Fromm *et al.*, 2005; Mazzoni *et al.*, 2007). 따라서 본 연구에서는 시베리아 산불의 풍하측 지역인 일본에서 연무의 이동 고도에 대한 라이다 관측 자료를 기반으로 산불의 배출 고도를 4.5 km까지 확장시켜 적용하였다 (Mattis *et al.*, 2003; Murayama *et al.*, 2004; Jeong *et al.*, 2008).

그림 1은 GFEDv2 산불 배출량 자료를 기반해서 얻은 동아시아 dry-mass burned 자료로서 1997년부터

2006년까지 봄철 기간(4월부터 6월까지) 동안의 산불 배출량을 나타낸다. 동아시아에서 발생하는 산불은 주로 위도 50°N-60°N, 경도 100°E-130°E 사이의 시베리아 지역에서 발생하였다. 또한 지난 10년간의 산불 자료를 비교하였을 때 2003년 봄철이 다른 해에 비해 적게는 3배, 많게는 10배 이상 많은 양의 오염물질이 산불로 인해 배출한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 2003년 봄철 시베리아에서 발생한 강한 산불로 인한 오염 물질이 동아시아 대기질, 특히 지상 오존 농도에 끼친 영향에 대해 살펴보고자 한다.

3. 모델 검증

GEOS-Chem으로부터 산출된 모델의 결과에 대한 검증과 영향 산정을 위해서 EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia)과 남한 내 환경부 대기오염 자동측정망에서 관측한 시간별 지상 오존 농

도 자료를 이용하였으며 관측 지점을 그림 2에 표시하였다. EANET 관측은 동아시아에서 산성우의 침적을 이해하기 위해 1998년부터 시작하였으며 대부분의 관측소들이 국지적인 오염원에 의한 영향을 제거하기 위해서 섬이나 산악 등의 청정 지역에 위치한다. 반면 남한의 환경부 자동측정망은 대부분 도시에 위치하며 대기오염실태를 파악하고 있다.

주간에 비해 야간 대기경계층의 고도는 크게 낮아진다. 하지만 전구 모델의 경우 연직 격자가 촘촘하지 않아 야간 혼합층 모의에 불확실성이 크며 그로인해 야간 오존 모의에 어려움이 있다 (Fiore *et al.*, 2002). 따라서 본 연구에서는 관측과 모델의 오존 농도에 있어서 주간(1300-1700 LST) 동안의 값만 사용하였다.

그림 3은 본 연구의 분석 기간인 2003년 4월에서 6월까지의 EANET에서 지상 오존 농도의 월평균 관측값과 모델값에 대한 산포도를 나타낸 것이다. 지상 오

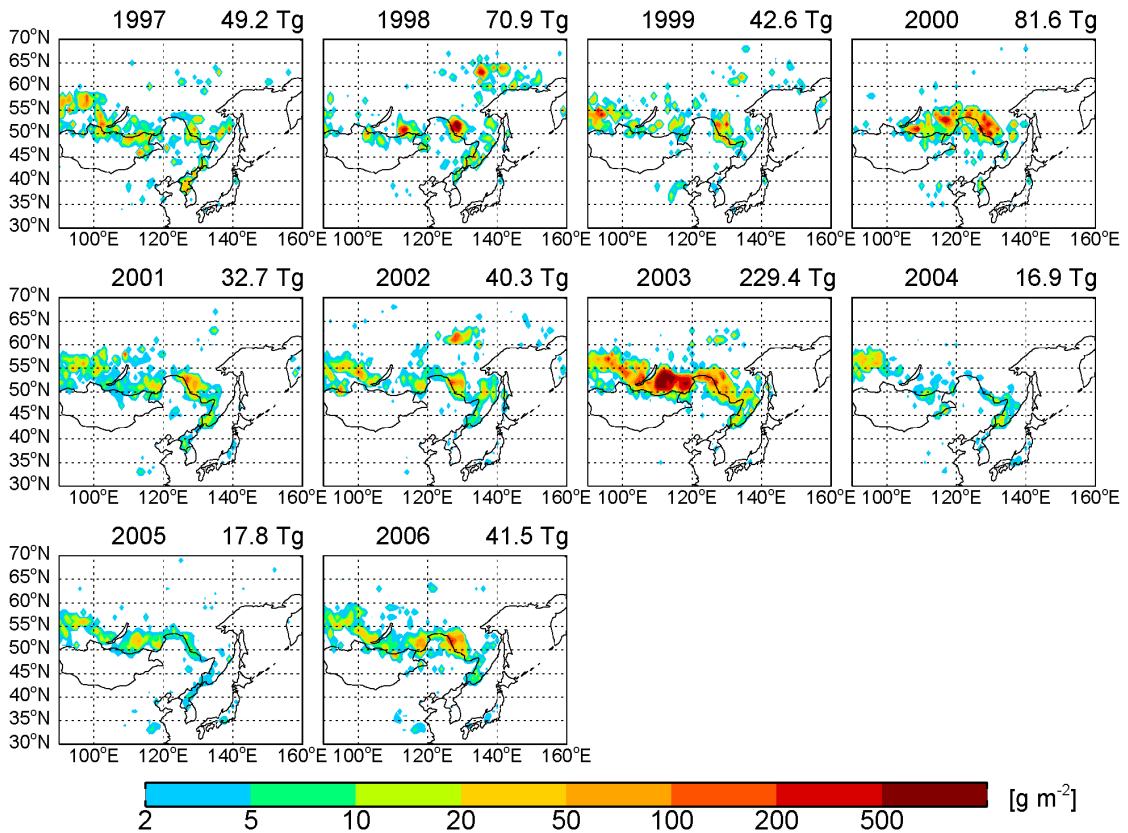


Fig. 1. Estimated dry mass burned data of the GFEDv2 inventory from forest fires over East Asia in April-Jun for 1997 - 2006. The domain total values are shown in the upper right corner of each panel.

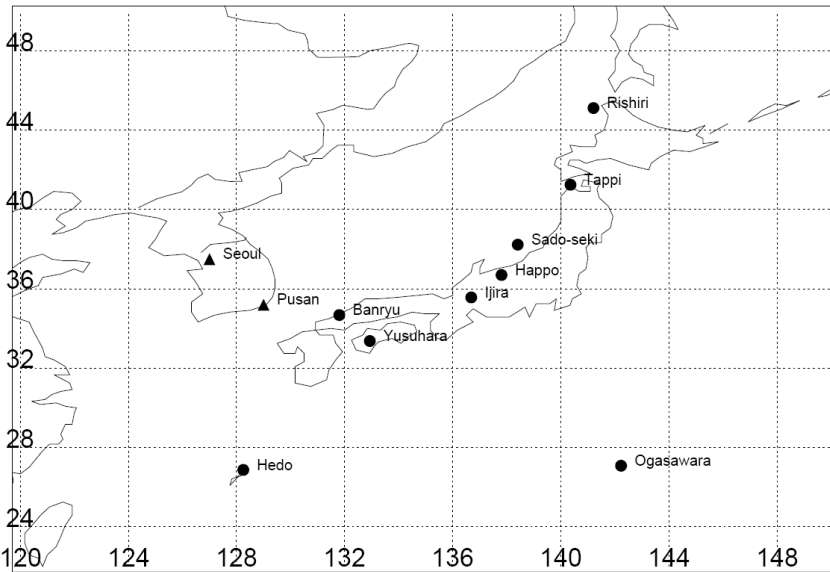


Fig. 2. Sites from the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET, circles) and air quality monitoring stations operated by the Korea Ministry of Environment (KME, triangles) in 2003.

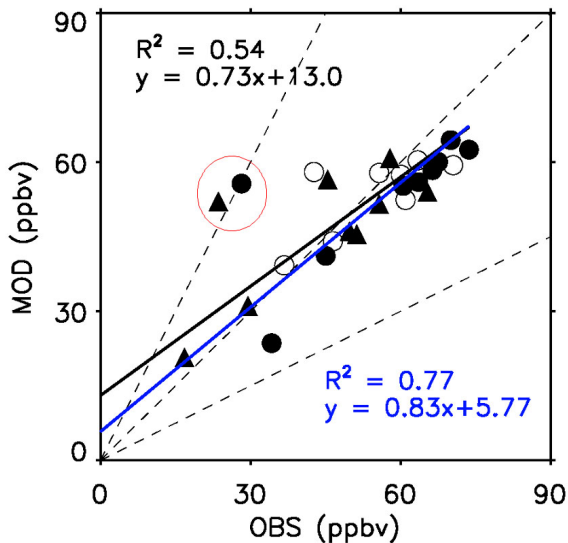


Fig. 3. Scatter plots of the observed and the simulated monthly mean daytime ozone concentrations at EANET sites in April 2003 (open circles), May 2003 (closed circles) and June 2003 (triangles). Reduced major axis regressions for the ensemble of the all data (black thick line) and excluding the Yusuhara site in May and June 2003 data (blue thick line) are shown; R^2 and regression equations are shown inset. Dashed lines denote a factor of 2 departure.

존 농도의 경우 관측과 모델간의 결정계수(R^2)는 0.54 이고 회귀 곡선 기울기는 0.73으로 약 30% 과소 모의

하는 것으로 나타났으며 모델은 13 ppbv 정도의 bias 를 가지는 것으로 조사되었다. 관측과 모델의 가장 큰 차이를 보인 지점은 Yusuhara 관측소로 그림 3에 붉은 원으로 표시하였다. 두 값은 Yusuhara의 2003년 5월과 6월에 해당하는 결과로 주변 Banryu에서 관측한 농도에 비해 약 절반 정도의 값을 보였다. 하지만 Banryu 지점에 비해 Yusuhara 지점이 특별히 낮은 관측값을 가지는 이유는 발견하지 못하였다. 본 연구의 회귀분석에서 Yusuhara 지점의 5, 6월 관측값을 제외한다면 관측과 모델간의 R^2 는 0.77, 그리고 회귀 곡선 기울기는 0.83으로 증가하는 것으로 조사되었고 GEOS-Chem 모델의 오존 모의 수준이 향상됨을 보였다.

4. 시베리아 산불이 동아시아 오존 농도에 끼치는 영향

지난 10년간 시베리아에서 발생한 가장 강한 산불인 2003년 봄철 산불이 동아시아의 지상 오존 농도에 끼친 영향을 산정하기 위해 모델의 기준 및 민감도 실험을 실시하였다. 기준 실험의 경우 GEOS-Chem에 GFEDv2의 산불 배출자료를 고려한 모의 결과이며 민감도 실험의 경우는 GFEDv2의 배출자료를 시베리아 지역에서 완전히 제거한 모의실험이다. 두 실험 결과의 차이를 통해서 2003년 시베리아에서 발생한 산불

에 의한 동아시아 오존 농도 영향 및 장거리 이동 범위를 파악하였다. 또한 오존 농도의 대기환경 기준과의 비교를 통해 산불이 지역 대기질 오존 농도에 끼치는 영향을 수치화 하였다.

그림 4는 2003년 4월에서 6월까지 3개월 동안 GEOS-Chem으로 모의한 평균 지상 오존 농도의 공간 분포를 나타낸 것이다. 앞서 관측과 모델과의 비교에 서처럼 1300-1700 LST의 결과만 고려하였다. 시베리아 산불에 의해 증가한 오존 농도 역시 그림 4에서 보였다. 오존 농도의 경우 중국 동부 지역과 시베리아 지역에서 고농도 값이 나타났다. 중국 동부 지역에서의 고농도 오존은 인위적인 오염물질 배출로 인한 다량의 오존 전구물질에 의한 것이며 시베리아 지역에서의 고농도 오존은 산불에 기인한 것이다. 산불에 의한 봄철 오존 농도는 시베리아 지역에서 최대 24 ppbv가 증가하였고, 한반도와 일본, 그리고 만주 지역으로는 3-10 ppbv가 증가하였다. 이는 한반도에서 오존의 8시간 대기환경 기준치가 60 ppbv임을 감안할 때 (환경부, 2008), 환경 기준치 대비 풍하측 지역에서 약 5-15%에 해당하는 증가량을 나타낸다.

그림 5는 Sado-seki와 Banryu의 EANET 관측소 및 서울과 부산의 환경부 대기오염 자동측정망에서 관측한 지상 오존 농도와 GEOS-Chem의 모의 결과에 대해 2003년 4월에서 6월까지 일별 변화를 나타낸 것이다. GEOS-Chem 모의의 경우 산불 배출에 의한 기준

실험 외에 산불 배출을 배제한 민감도 실험을 함께 나타냈다. EANET 관측 지점인 Sado-seki와 Banryu의 경우 GEOS-Chem 모의 결과가 관측과 비교하여 농도 및 일별 변화를 유사하게 모의하였다. 그에 반해 서울과 부산의 경우 GEOS-Chem이 지상 오존 농도를 과대 모의하였다. 서울과 부산은 자동차 등의 인위적인 오염물질의 배출량이 많은 곳으로 VOC-limited 환경으로 알려져 있으나 (박주연과 김용표, 2002), $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 모의 격자를 가지는 GEOS-Chem의 NOx 농도는 배출량의 불확실성과 넓은 수평 격자로 인해 남한의 고농도 NOx 모의에는 한계가 있으며 그로 인해 오존 농도의 과대 모의로 나타난 것으로 사료된다. 향후 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 혹은 $0.5^{\circ} \times 0.667^{\circ}$ 의 조밀한 수평 격자를 가지는 GEOS-Chem을 사용하게 되면 남한 오존 농도의 과대 모의는 개선되리라 예상된다.

산불 배출의 민감도 실험 결과 2003년 5월 10일에서 25일 사이 남한의 오존 농도가 산불 배출을 배제한 경우에 비해 약 10-15 ppbv 증가하였다. 이는 Lee *et al.*(2005)의 선행연구에서 제시한 2003년 5월 광주에서 측정된 높은 AOD가 나타난 기간과 동일하다. 또한 이 기간의 종관패턴은 NOAA의 HYSPLIT 모델 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html>)을 이용하여 산불에서 발생된 오염 물질이 종관 흐름을 타고 남한으로 이동함을 확인하였다. 민감도 실험 결과는 강한 산불이 발생할 경우 남한 내 일별 오존 농도는 환경

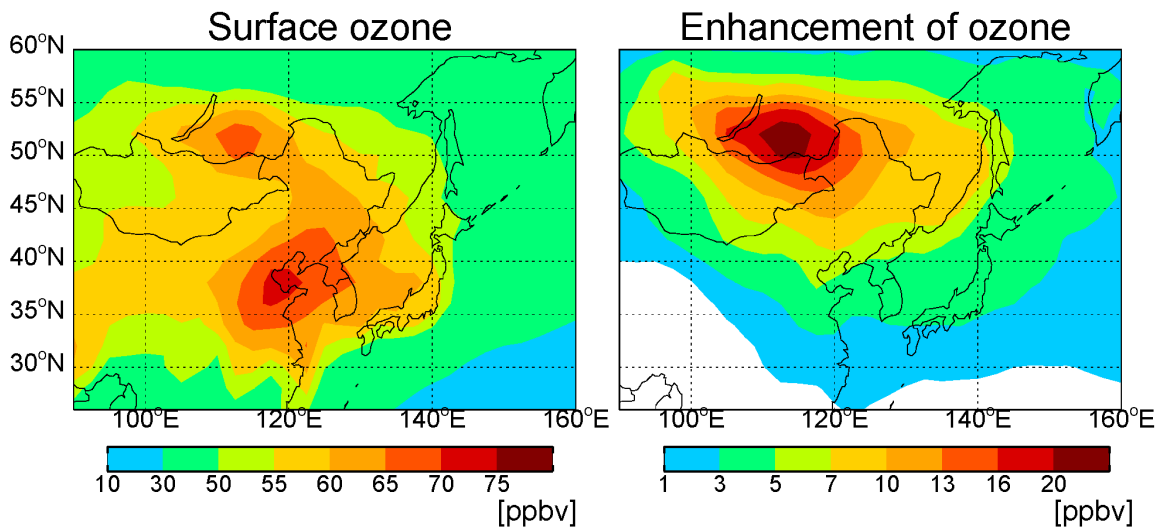


Fig. 4. Spatial distributions of the simulated three-month mean and enhancements daytime ozone concentrations at the surface. The enhancements in daytime ozone concentrations due to the Siberian forest fires were computed by subtracting the simulation without the fire emissions from the standard simulation.

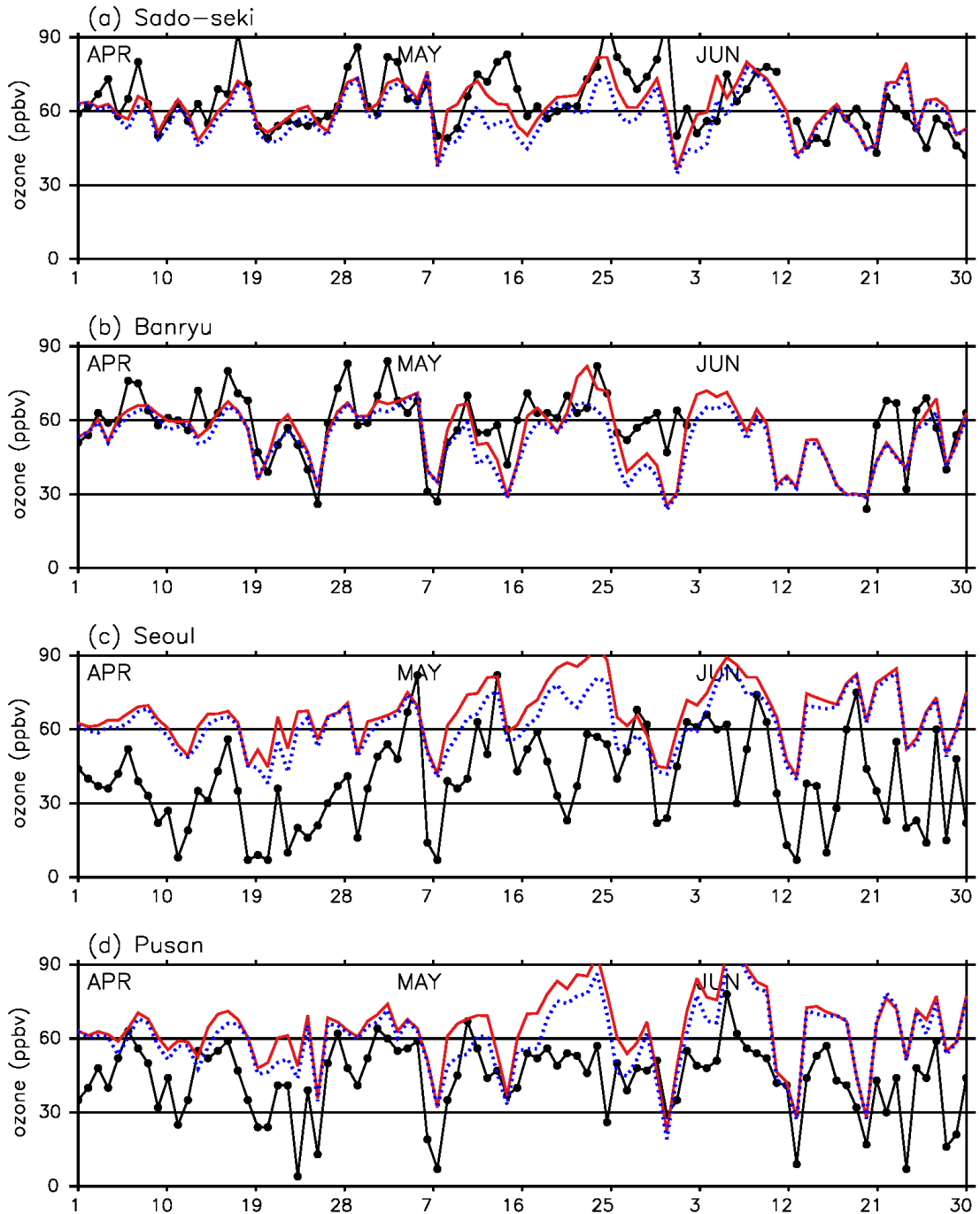


Fig. 5. Time series of daytime mean observed (black thin line) and simulated surface ozone concentrations with the forest fire emissions (red thin line) and without forest fire emissions (blue dot line) at (a) Sado-seki, (b) Banryu sites of the EANET, and (c) Seoul, (d) Pusan sites of the South Korea.

기준치 대비 약 30% 증가되는 효과를 보였으며 이는 오염에 의한 봄철 대기환경을 정확히 모의하기 위해서

산불의 고려가 반드시 필요함을 의미한다.

강한 산불이 발생했던 2003년 봄철과 다른 해 봄철

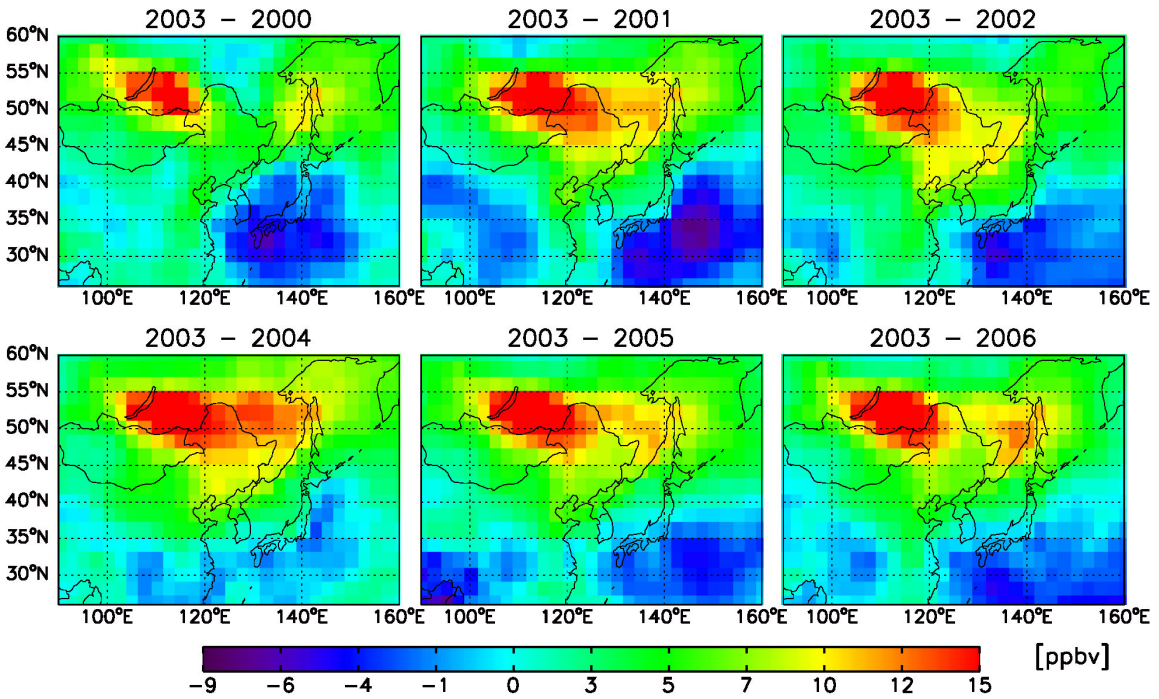


Fig. 6. Differences in three-month averaged daytime surface ozone concentrations between the year 2003 and the years 2000 to 2006.

동안의 동아시아에서 오존 농도의 변화를 살펴보기 위해 2000년에서 2006년까지 봄철 오존 모의를 수행하였다. 그림 6은 GEOS-Chem으로 모의한 2003년 봄철 기간(4월에서 6월까지)의 지상 오존 농도와 2000년부터 2006년까지 봄철 기간의 지상 오존 농도와의 차이를 나타낸 것이다. 2003년 봄철의 경우 산불이 발생하면서 나온 다량의 개스상 오염물질로 인해 다른 해에 비해 시베리아 지역에서의 상대적으로 높은 지상 오존 농도를 보였다. 시베리아 지역은 2003년 봄철에 평년에 비해 약 10-20 ppbv의 지상 오존 농도의 증가를 보였으며 동아시아에서 위도 40°N-60°N의 넓은 영역에서 장거리 수송된 오염 물질로 인해 지상 오존 농도의 증가 경향을 보였다.

하지만 2003년 봄철의 경우, 강한 산불로 인해 방출된 다량의 오존 전구물질에도 불구하고 일본 남부 지역에서 평년에 비해 약 2-8 ppbv 정도 상대적으로 낮은 오존 농도를 보였다. 낮은 농도의 원인으로는 첫째, 중국, 한반도, 일본 등 다량의 인위적인 오염원의 배출 지역이 아닌 그 외의 풍하측 지역에서는 NO_x-VOC-Hydrocarbon 화학반응에 의한 오존 농도의 증가보다 산불과 함께 동반되는 다량의 탄소 성분 에어로솔로

인해 태양빛이 산란되어 광해리 반응이 줄어들게 되는 등 대기중에서 광화학 반응의 감소에 의한 영향으로 볼 수 있다. 둘째, 탄소 성분 에어로솔에 의한 대기 복사 강제력의 변화는 대기의 안정도를 변화시켜 지역 기상장의 변화 및 그로인한 지역 기후에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 산불에 의해 영향을 받은 기상장이 오존 농도 감소의 원인으로 유추할 수 있다. 그러나 GEOS-Chem에서 사용하는 기상장은 자료 동화된 것으로 이미 산불로 인한 기상장의 변화가 반영되었고 에어로솔 영향 역시 고려된 것이기에 오존 감소 원인에 대한 정확한 결론을 내리기는 쉽지 않다. 따라서 산불에 의한 기상장의 변화 및 에어로솔에 의한 광화학 반응 감소가 오존 농도 변화에 끼치는 영향을 파악하기 위해서는 기후 모델을 이용하여 산불에서 발생된 오염물질 배출에 대한 민감도 실험을 통해 오존 변화의 세밀한 분석이 요구된다.

5. 요약 및 결론

2003년 봄철 시베리아에서는 최근 10년 이래로 가장 강력한 산불이 발생했다. 본 연구에서는 전지구 3차

원 대기화학 모델인 GEOS-Chem과 인공위성에서 관측한 산불 배출량 자료를 이용하여 동아시아에서 시베리아 산불에 의한 지상 오존 농도의 영향을 산정하였다.

모델 결과의 검증과 오존 농도의 영향 산정을 위해 EANET과 환경부 대기오염 자동측정망에서 관측한 오존 농도를 이용하였으며 관측과 비교하였을 때 GEOS-Chem 오존 모의는 0.77의 R^2 와 0.83의 회귀 곡선 기울기를 보였다 (Yusuhara 제외). 다만 배출량의 불확실성과 넓은 수평 격자로 인해 남한 내 오존 농도는 과대 모의하였다.

산불의 민감도 실험 결과 2003년 봄철기간 동안 시베리아에서는 산불에 의해 최대 24 ppbv의 오존 농도가 증가하였다. 또한 한반도와 일본을 포함한 풍하측 지역에서는 약 3-10 ppbv가 증가하였다. 풍하측 지역에서의 오존 증가량은 한반도에서 8시간 대기 환경 기준치의 약 5-15%에 해당하는 것으로 조사되었다. 특히 강한 산불이 발생할 경우 남한 내 일별 오존 농도는 환경기준치 대비 약 30%가 증가되었으며, 이는 봄철 대기환경 모사에서 산불에 의한 영향이 중요함을 나타낸다.

2003년 봄철의 경우, 일본 남부 지역에서 평년에 비해 약 2-8 ppbv 정도 상대적으로 낮은 지상 오존 농도를 보였다. 오존 농도 감소의 원인으로는 산불에 의해 배출된 다량의 탄소 성분 에어로솔로 인해 대기중 광화학 반응의 감소와 기상장 변화에 의한 것으로 유추할 수 있다. 그러나, GEOS-Chem에서 사용된 기상장은 자료동화된 것으로 이미 산불의 영향이 기상장에 반영된 것이다. 따라서 오존 감소에 대한 보다 정확한 분석을 위해서는 기후모델을 이용하여 산불로 인한 오염물질 배출이 지역 기상장 및 오존 농도 변화에 끼치는 영향에 대한 분석이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2008-331-C00284).

참고문헌

박주연, 김용표, 2002: 서울시에서의 최적 오존 저감 대책: OZIPR을 이용한 사례 연구. *한국대기환경학회지*, **16**,

427-433.

환경부, 2008: 환경통계연감, 750 pp.

Andreae, M. O., and P. Merlet, 2001: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Glob. Biogeochem. Cyc.*, **15**, 955-966.

Balzter, H., F. Gerard, C. George, G. Weedon, W. Grey, B. Combal, E. Bartholome, S. Bartalev, and S. Los, 2007: Coupling of vegetation growing season anomalies and fire activity with hemispheric and regional-scale climate patterns in central and east Siberia. *J. Clim.*, **20**, 3713-29

Bey I., D. J. Jacob, R. M. Yantosca, J. A. Logan, B. Field, A. M. Fiore, Q. Li, H. Liu, L. J. Mickley, and M. Schultz, 2001: Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. *J. Geophys. Res.*, **106**, 23,073-23,096.

Bowman, D. M. J. S., and F. H. Johnston, 2005: Wildfire smoke, fire management, and human health. *EcoHealth*, **2**, 76-80.

Crutzen, P. J., L. E. Heidt, P. K. Krasnec, W. H. Pollack, and W. Seiler, 1979: Biomass burning as a source of atmospheric CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl, and COS. *Nature*, **282**, 253-279.

Duncan, B. N., I. Bey, M. Chin, L. J. Mickley, T. D. Fairlie, R. V. Martin, and H. Matsueda, 2003: Indonesian wildfires of 1997: impact on tropospheric chemistry. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4458. doi:10.1029/2002JD003195.

Fiore, A. M., D. J. Jacob, I. Bey, R. M. Yantosca, B. D. Field, A. C. Fusco, and J. G. Wilkinson, 2002: Background ozone over the United States in summer: origin, trend, and contribution to pollution episodes. *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JD000982.

Fromm, M., R. Bevilacqua, R. Servranckx, J. Rosen, J. P. Thayer, J. Herman, and D. Larko, 2005: Pyro-cumulonimbus injection of smoke to the stratosphere: observations and impact of a super blowup in northwestern Canada on 3- August 1998. *J. Geophys. Res.*, **110**, D08205. doi:10.1029/2004JD005350.

Generoso, S., I. Bey, J. L. Attié, and F. M. Bréon, 2007: A satellite-and model based assessment of the 2003 Russian fires: impact on the Arctic region. *J. Geophys. Res.*, **112**, D15302. doi:10.1029/2006JD008344.

Giglio, L., G. R. van der Werf, J. T. Randerson, G. J. Collatz, and P. S. Kasibhatla, 2006: Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 11091-11141.

Hudman, R. C., D. J. Jacob, O. C. Cooper, M. J. Evans, C. L. Heald, R. J. Park, F. Fehsenfeld, F. Flocke, J. Holloway, G. Hubler, K. Kita, M. Koike, Y. Kondo, A. Neuman, J. Nowak, S. Oltmans, D. Parrish, J. M. Roberts, and T. Ryerson, 2004: Ozone production in transpacific Asian pollution plumes and implications for ozone air quality in California. *J. Geophys. Res.*, **109**, D23S10. doi:10.1029/

- 2004JD004974.
- IPCC, 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
- Jeong, J. I., R. J. Park, and D. Youn, 2008: Effects of Siberian forest fires on air quality in East Asia during May 2003 and its climate implication. *Atmos. Environ.*, **42**, 8910-8922.
- Lee, K. H., J. E. Kim, Y. J. Kim, J. Kim, and W. Von Hoyningen-Huene, 2005: Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003. *Atmos. Environ.*, **39**, 85-9.
- Malevsky-Malevich, S. P., E. K. Molkontin, E. D. Nadyozhina, and O. B. Shklyarevich, 2008: An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the twenty-first century. *Clim. Change*, **86**, 463-474, DOI 10.1007/s10584-007-9295-7.
- Mattis, I., A. Ansmann, U. Wandinger, and D. Müller, 2003: Unexpectedly high aerosol load in the free troposphere over central Europe in spring/summer 2003. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(22), 2178. doi:10.1029/2003GL018442.
- Mazzoni, D., J. A. Logan, D. Diner, R. Kahn, L. Tong, and Q. Li, 2007: A datamining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements. *Remote Sens. Environ.*, **107**, 138-48.
- Murayama, T., D. Müller, K. Wada, A. Shimziu, M. Sekiguchi, and T. Tsukamoto, 2004: Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multiwavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23103. doi:10.1029/2004GL021105.
- Park, R. J., D. J. Jacob, B. D. Field, R. M. Yantosca, and M. Chin, 2004: Natural and transboundary pollution influences on sulfate-nitrate-ammonium aerosols in the United States: implications for policy. *J. Geophys. Res.*, **109**, D15204.
- _____, _____, N. Kumar, and R. M. Yantosca, 2006: Regional visibility statistics in the United States: natural and transboundary pollution influences, and implications for the Regional Haze Rule. *Atmos. Environ.*, **40**, 5405-5423.
- Pfister, G. G., P. G. Hess, L. K. Emmons, P. J. Rasch, and F. M. Vitt, 2008: Impact of the summer 2004 Alaska fires on top of the atmosphere clear-sky radiation fluxes. *J. Geophys. Res.*, **113**, D02204. doi: 10.1029/2007JD008797.
- Soja, A. J., N. M. Tchepakova, N. H. F. French, M. D. Flannigan, H. H. Shugart, B. J. Stocks, A. I. Sukhinin, E. I. Parfenova, F. S. Chapin, and P. W. Stackhouse, 2007: Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global and Planet. Change*, **56**, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.028.
- Streets D. G., T. C. Bond, G. R. Carmichael, S. D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S. M. Nelson, N. Y. Tsai, M. Q. Wang, J.-H. Woo, and K. F. Yarber, 2003: An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla, and A. F. Arellano, 2006: Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3423-441.
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan, and T. W. Swetnam, 2006: Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science*, **313**, 940-943.