

TOMS와 OMI 자료를 이용하여 산출된 대류권 오존 비교 분석

나선미 · 김재환[†]

부산대학교 대기과학과

Comparison between TOMS and OMI-derived Tropospheric Ozone

Sunmi Na and Jae-Hwan Kim[†]

Department of Atmospheric Science, Pusan National University

Abstract : This study compared between tropospheric column ozone by applying the SAM method to TOMS and OMI data for northern summer. Tropospheric ozone from the SAM represents a peak over the tropical Atlantic, where it is related with biomass burning. This feature is also seen in the distribution of the model and CO. Additionally, enhancement of the SAM ozone over the Middle East, and South and North America agrees well with the model and CO distribution. However, the SAM results show more ozone than the model results over the northern hemisphere, especially the ocean (e.g. the North Pacific and the North Atlantic). The tropospheric ozone distribution from OMI data shows more ozone than that from TOMS data. This can be caused by different viewing angle, sampling frequency, and a-priori ozone profiles between OMI and TOMS. The correlation between the SAM tropospheric ozone and CO is better than that between the model and CO in the tropics. However, that correlation is reversed in the mid-latitude.

Key Words : tropospheric ozone, TOMS, OMI, CO.

요약 : 본 연구에서는 TOMS와 OMI 위성 관측 자료를 SAM 방법에 적용하여 산출한 북반구 여름 동안의 남위 20°에서 북위 40° 지역의 대류권 오존을 공간적 분포와 오존양 차이 및 상관관계 측면에서 비교 및 분석하였다. SAM 방법을 OMI와 TOMS 자료에 적용한 대류권 오존 분포는 모델의 대류권 오존과 오존 전구물질인 CO 분포와 일치하였다. 적도 지역의 경우, 생태계 화재(biomass burning) 영향을 잘 보여주었으며, 중위도 지역의 경우, 중동 지역과 아라비아 해 및 북·남미 대륙의 특징을 잘 보여주었다. SAM 방법을 적용하여 산출한 대류권 오존 분포는 모델의 대류권 오존 분포의 양상과 유사하지만, SAM 방법의 대류권 오존 분포는 모델의 대류권 오존 보다 북반구에서 낮게 관측되었으며, 특히 북태평양과 북대서양과 같은 해양 지역에서 더 낮은 경향을 보였다. OMI 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존 분포는 TOMS 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존 분포보다 높게 나타났으며, 특히 biomass burning 영향을 받는 남반구 적도 지역에서 더 높게 관측되었다. 이러한 차이의 원인은 위성간의 위성각(viewing angle)과 자료 샘플링 빈도 및 a-priori ozone profile이 다르기 때문이라고 사료된다. CO와의 지역별 상관관계는 적도 지역의 경우 SAM 방법을 이용한 대류권 오존과 CO의 상관관계가 모델을 통한 대류권 오존과 CO의 상관관계보다 더 좋은 결과를 보이는 반면, 중위도 지역의 경우 모델과 CO의 상관관계가 더 좋은 결과를 보여주었다.

2006년 6월 19일 접수 ; 2006년 8월 18일 수리.

[†] 교신저자: 김재환(jaekim@pusan.ac.kr)

1. 서론

대류권 오존은 대기 화학적인 조성과 지구 온난화 및 대기질적인 측면에서 중요한 역할을 한다. 전지구적인 대류권 오존 분포를 이해하기 위하여 공간적·시간적 해상도가 높은 위성 자료가 요구되고 있지만, 전지구적인 대류권 오존 분포를 직접적으로 제공해 줄 자료가 거의 없다. 그래서 인공위성을 통한 오존 전량이나 성층권 오존 관측 자료를 이용한 간접적인 방법으로 대류권 오존을 산출하고 있다(Fishman *et al.*, 1990, 1996, 2003; Hudson and Thompson, 1998; Ziemke *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2006).

Scan-Angle Method(SAM) 방법(Kim *et al.*, 2001)을 제외한 대부분의 선행연구는 적도 지역의 성층권 오존은 같은 위도에서 경도에 따른 변화가 거의 없다고 가정하였다. 그러나 이러한 적도 지역의 성층권 오존의 경도별 구조는 현재까지 정확하게 밝혀지지 않았다. 그래서 본 연구는 부정확성을 가지고 있는 성층권 오존 구조에 대한 가정 없이 대류권 오존을 산출하는 SAM 방법을 이용하고자 한다.

SAM 방법을 비롯한 현재까지의 대부분의 선행연구들은 대류권 오존을 산출하기 위하여 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) 오존 전량 자료를 이용하였다. 그러나, TOMS 위성은 기기상 결함으로 2001년 이후의 자료는 오류를 내포하고 있기 때문에, 최근 관측을 시작한 Ozone Monitoring Instrument (OMI) 센서가 TOMS의 오존 전량 관측을 대체하고 있다. 본 연구는 선행연구에 사용되었던 TOMS와 최근 관측을 시작한 OMI 자료를 SAM 방법에 적용한 결과를

상호 비교하고자 한다. SAM 방법은 역학적인 영향을 받기 때문에, SAM 방법을 북반구 중위도까지 확장시켜 적용하기 위하여, 역학적인 영향이 적은 북반구 여름 기간(6-8월) 동안 관측된 자료를 이용하였다. 또한, SAM 방법을 적용한 결과를 GEOS-CHEM 모델의 대류권 오존 및 위성 관측 자료(CO, 화재빈도수)를 이용하여 비교 및 분석하였다.

2. 자료

본 연구에서는 대류권 오존을 산출하기 위하여 TOMS와 OMI 센서로부터 관측된 북반구 여름 동안의 오존 전량 자료를 이용하였다. TOMS는 Earth Probe (EP) 위성에 탑재되어 1996년 7월부터 관측을 시작하였다. EP 위성은 2001년 이후부터 기기상 결함으로 인하여 관측자료에 있어서 심각한 오류가 유발되므로, 지속적인 오존 관측을 위하여, OMI가 EOS-Aura 위성에 탑재되어 2004년 7월에 발사되었다. 본 연구는 1996년에서 2000년 기간의 6월에서 8월 동안의 TOMS 자료와 2005년 6월에서 8월 동안의 OMI 자료를 SAM 방법(Kim *et al.*, 2001)에 적용하여 대류권 오존을 산출하였다. TOMS와 OMI의 오존 전량 자료는 Goddard Space Flight Center (GSFC)의 Distributed Active Archive Center (DAAC)로부터 수집되었다.

본 연구에 사용된 TOMS와 OMI를 관측자료와 알고리즘 측면에서 비교 및 분석하였다(Table 1). Nadir scan position에서의 공간 해상도의 경우, TOMS는 50 × 50 km의 픽셀 크기를 가지는 반면, OMI는 13 × 24

Table 1. The comparison between TOMS and OMI.

| | TOMS | OMI |
|--|---|--|
| Satellite | Earth Probe (EP) | Aura |
| Orbit | 500 → 750 km(97/12 ~ current) | 705 km |
| Equator crossing time | 11:16 AM | 1:45 PM |
| Number of scan position | 35 | 60 |
| Viewing angle | ± 63° | ± 70° |
| Spatial resolution (at nadir scan position) | 50 × 50 km | 13 × 24 km |
| Number of sampling between 5°S and 5°N for 3-day | 33258 | 214170 |
| Applicable grid size to SAM | 15°longitude × 2°latitude | 7.5°longitude × 2°latitude |
| A-priori ozone profile | (layer, total ozone, 30°latitudinal interval) | (layer, total ozone, 10°latitudinal interval, month) |

km의 픽셀 크기를 관측하기 때문에 OMI는 TOMS 보다 공간 해상도가 더 뛰어나다. 자료 샘플링의 경우, OMI 자료는 TOMS 자료보다 샘플링 개수가 6배 정도 많다. OMI는 TOMS 보다 공간 해상도와 자료 샘플링의 측면에서 더 뛰어나기 때문에, SAM 방법을 적용할 수 있는 격자 크기는 TOMS의 경우보다 더 축소되었다 (Table 1). 그러므로, OMI 자료에 SAM 방법을 적용시킨 결과는 TOMS 자료에 적용시킨 경우보다 더 세밀한 현상을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

TOMS와 OMI는 알고리즘의 측면에서 Look-Up-Table (LUT)을 만들기 위한 A-Priori Ozone Profile (APOP)이 다르게 적용된다(Table 1). TOMS에 적용된 APOP는 고도와 오존전량 및 위도(30° 간격)의 함수인 반면, OMI에 적용된 APOP는 고도와 오존전량은 같으나 위도는 10° 간격으로 매월 바뀐다. 즉, APOP는 TOMS 알고리즘보다 OMI 알고리즘에서 더 세분화되어 적용된다. 두 알고리즘에서 가장 두드러진 APOP의 차이는 대류권 오존의 양이다. SAM 방법은 Look-up-table을 만드는데 사용된 APOP의 대류권 오존의 양의 영향을 받기 때문에(Kim *et al.*, 2001), TOMS와 OMI 자료를 SAM 방법에 적용한 결과는 서로 차이를 보일 것으로 예측된다.

TOMS와 OMI 위성 자료를 SAM 방법에 적용하여 산

출한 대류권 오존을 비교 및 분석하기 위하여 Goddard Earth Observing System chemical transport model (GEOS-CHEM) 모델을 통해 산출된 대류권 오존과 Measurements Of Pollution In The Troposphere (MOPITT) 위성의 CO 자료 및 Along Track Scanning Radiometer (ATSR) 위성의 화재 빈도수를 이용하였다. 본 연구는 GEOS-CHEM 모델을 이용하여 1997년 6월에서 8월의 경우에 모의된(simulated) 대류권 오존을 사용하였다. 또한, MOPITT 위성으로부터 관측된 1996년에서 2000년 기간의 6월에서 8월 동안의 CO 자료를 이용하였다. 적도 지역의 생태계 화재 (biomass burning) 발생이 대류권 오존에 미치는 영향을 알아보기 위하여, ATSR 위성으로부터 관측된 1996년에서 2000년 기간의 6월에서 8월 동안의 화재 빈도수 자료를 이용하였다.

3. 방법

Scan-angle method는 TOMS 위성의 scan angle을 이용하여 대류권 오존을 산출한다(Kim *et al.*, 2001). TOMS는 3도 간격으로 35개의 scan position에서 관측한다(Fig. 1). SAM은 1, 2, 3, 33, 34, 35번 scan position을 high scan position으로, 16, 17, 18, 19, 20

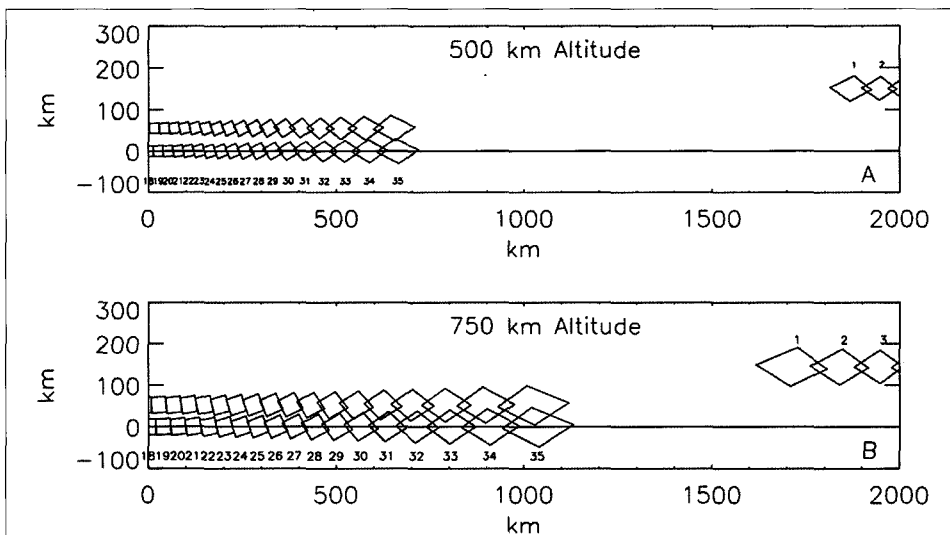


Fig. 1. Earth Probe TOMS instantaneous fields of view projected Earth's surface. The right portion (samples 18-35) of two consecutive scans are shown, and a portion of a scan from the previous orbit is also shown to illustrate the degree of inter-orbit coverage at the equator for: A) 500 km orbit altitude, and B) 750 km orbit altitude (McPeters *et al.*, 1998).

번 scan position을 nadir scan position으로 사용하였다. Nadir scan position에서 관측된 오존전량은 high scan position에서 관측된 오존전량보다 실제 값에 가까운 경향을 보인다. 예를 들면, 성층권 오존이 동일할 때, 실제 대류권 오존양이 TOMS에서 가정된 대류권 오존양보다 적을 경우, nadir scan position의 오존전량은 high scan position의 오존전량보다 더 적을 것이다. 반대의 경우, nadir scan position의 오존전량은 high scan position의 오존전량보다 더 많을 것이다. 이러한 원리를 이용하여 대류권 오존에 대한 nadir scan position과 high scan position의 오존양 차이(Diff)를 고도의 함수로 산출하였다(Fig. 2). Diff의 최대치는 5 km에서 나타나며, 대류권에서 크게 나타난다. 그러므로, nadir scan position과 high scan position의 오존전량 차이는 대류권 오존을 산출하는데 사용될 수 있다.

요약하면, nadir scan position과 high scan position의 오존전량 차이(Diff)는 대류권 오존에 기인하므로, SAM은 TOMS 위성의 scan position에 따른 오존전량 차이만을 이용하여 대류권 오존을 산출할 수 있다. 이러한 원리를 OMI의 경우에도 같이 적용하였다. 본 연구에서는 TOMS와 OMI의 nadir scan position과 high scan position에서 관측된 오존전량 차이와 대

류권 오존 배경 농도(32 DU)를 이용하여 대류권 오존을 산출하였다.

4. 결과 및 토의

1) 공간적 분포

북반구 여름 기간 동안 평균된 OMI와 TOMS 위성 자료를 SAM 방법에 적용하여 대류권 오존을 산출하였다(Fig. 3a-3b). 적도 지역의 대류권 오존은 남미 대륙, 남대서양과 남아프리카 대륙에 걸쳐 높게 관측된 반면(ridge), 청정한 태평양에서 낮게 나타났다(trough). 적도 지역에서 관측된 이와 같은 대류권 오존의 wave-1 패턴은 GEOS-CHEM 모델을 통해 산출된 적도 지역의 대류권 오존 분포와 일치한다(Fig. 3c). 남반구 건기에 해당되는 6-8월 기간 동안 남미와 남아프리카 대륙에 biomass burning이 발생하여(Fig. 4b) CO 등과 같은 오존 전구 물질이 생성되어(Fig. 4a) 대류권 오존이 높게 나타났다(Diab *et al.*, 1996; Ziemke *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2005).

SAM 방법과 모델을 통해 산출된 대류권 오존 분포는 모두 중동 지역과 아라비아 해에서 높게 나타났다. 이 지역의 대류권 오존은 광화학적 생성과 역학적인 요인 및 자연적·인위적인 발생 등의 복합적인 원인으로 생성되었다(Li *et al.*, 2001). SAM 방법을 통해 산출된 대류권 오존 분포는 북·남미 대륙에서도 높게 나타났지만, 적도 지역의 biomass burning 지역에서 관측된 오존양보다 낮다. CO의 분포 또한 중위도 지역보다 biomass burning 영향을 받는 적도 지역에서 더 높게 나타났다.

SAM 방법을 통해 산출된 대류권 오존 분포에서 관측된 특징들은 선행 연구 중 중위도까지 확장하여 분석한 대류권 오존 분포에서도 관측되었다(Fishman *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2006). 그러나, 지역별로 2가지의 차이점이 나타났다. 적도 지역의 경우, SAM 방법의 결과와 Liu *et al.*(2006)의 연구는 남아프리카 대륙에서 높은 대류권 오존이 관측된 반면, Fishman *et al.*(2003)의 연구는 북아프리카 대륙에서 높은 대류권 오존이 관측되었다. 중위도의 경우, 모델과 선행 연구를 통해 산출된 대류권 오존 분포는 북동아시아 지역에서

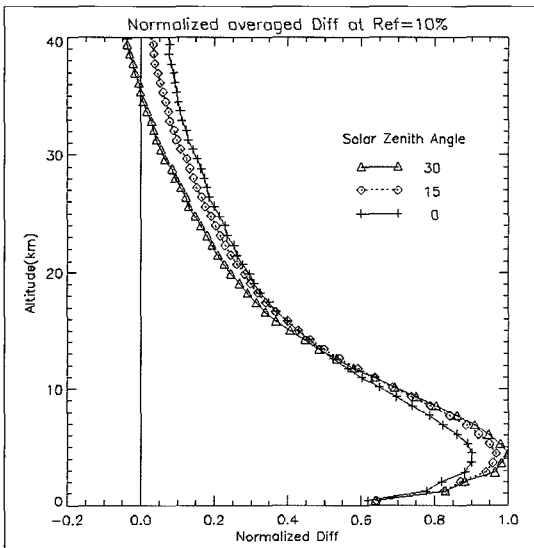


Fig. 2. The difference in the retrieved ozone between the nadir scan positions and the high scan positions (Diff). They are normalized to the peak difference at a solar zenith angle of 30°. The reflectivity and azimuth angle are 10% and 135°, respectively (Kim *et al.*, 2001).

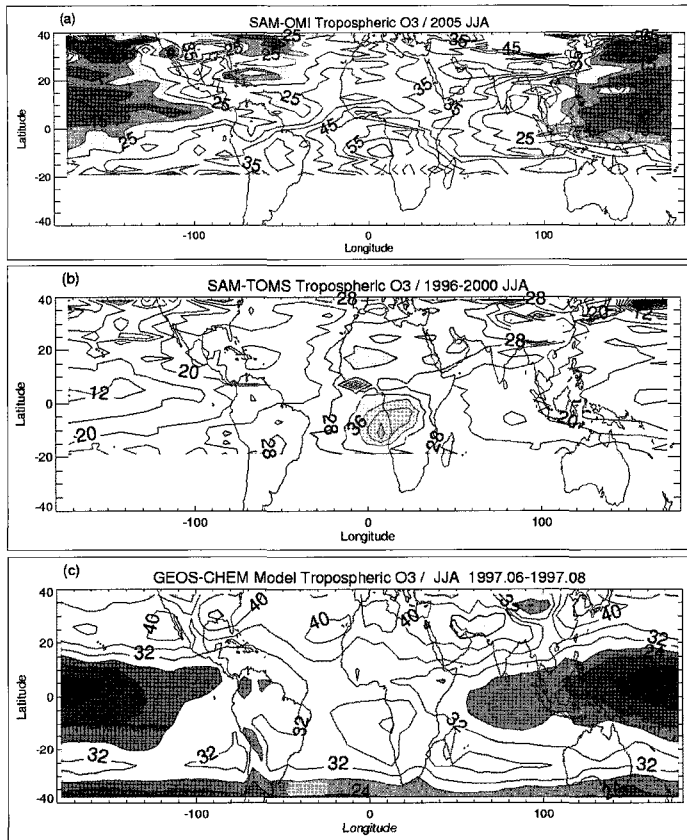


Fig. 3. The distribution of tropospheric ozone (DU) derived from (a) the SAM using OMI data for June-July-August (JJA) 2005, (b) the SAM using TOMS data for JJA 1996-2000, and (c) the GEOS-CHEM for JJA 1997. The contour interval of (a), (b), and (c) is 5 DU, 4 DU, and 4 DU, respectively.

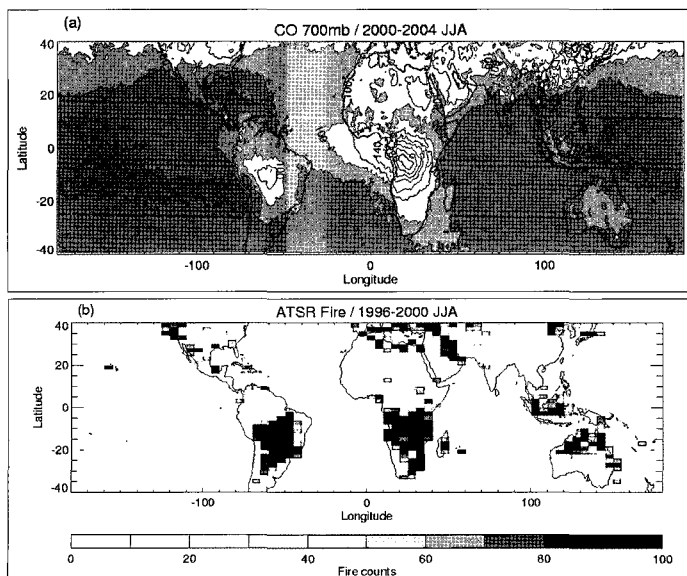


Fig. 4. The distribution of (a) CO mixing ratio (ppbv) at 700 mb measured from MOPITT for June-July-August (JJA) 2000-2004, and (b) fire counts measured from ATSR for JJA 1996-2000. The contour interval of (a) is 20 ppbv.

높게 관측되었다. 중국 대륙에서 산업활동에 의해 발생된 오염원이 수송되었기 때문으로 사료된다. SAM 방법은 지표 해발고도가 높은 관측 자료를 이용하지 않았기 때문에, SAM 방법을 이용하여 산출된 대류권 오존 분포(Fig. 3a-3b)에서 히말라야 산맥 및 중국 대륙 일부 지역에 대한 결과는 산출되지 않았으므로, 북동아시아 지역의 대류권 오존 특징이 관측되지 않았다.

2) 대류권 오존 차이

SAM 방법을 적용하여 산출한 대류권 오존 분포는 모델의 대류권 오존 분포의 양상과 비슷하게 나타났다. 그러나, 대류권 오존량의 측면에서 약간의 차이를 보인다. 그래서 본 연구는 SAM 방법과 모델의 대류권 오존량의 차이를 조사하였다(Fig. 5a-5c).

OMI 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존과 모델을

통하여 산출한 대류권 오존의 차이의 bias는 -3.9 ± 11.7 DU이다(Fig. 5a). 남반구 지역의 경우 양의 값을 가지는 반면, 북반구 지역의 경우 음의 값을 가진다. OMI 자료를 이용한 대류권 오존은 모델 결과보다 남반구 지역에서 높은 반면, 북반구 지역에서 낮은 경향을 보인다. TOMS 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존과 모델을 이용하여 산출한 대류권 오존 차이의 bias는 -9.5 ± 6.4 DU이다(Fig. 5b). 남대서양과 남아프리카 대륙의 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 음의 값을 가진다. TOMS 자료를 이용한 대류권 오존은 모델 결과보다 전반적으로 낮은 경향을 보인다. 특히 북반구 해양 지역인 북태평양과 북대서양에서 더 낮게 관측된다. OMI와 TOMS 위성 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존 분포 모두 모델의 대류권 오존 보다 북반구에서 낮게 관측되며, 특히 북태평양과 북대서양과 같은 해양 지역에서 더

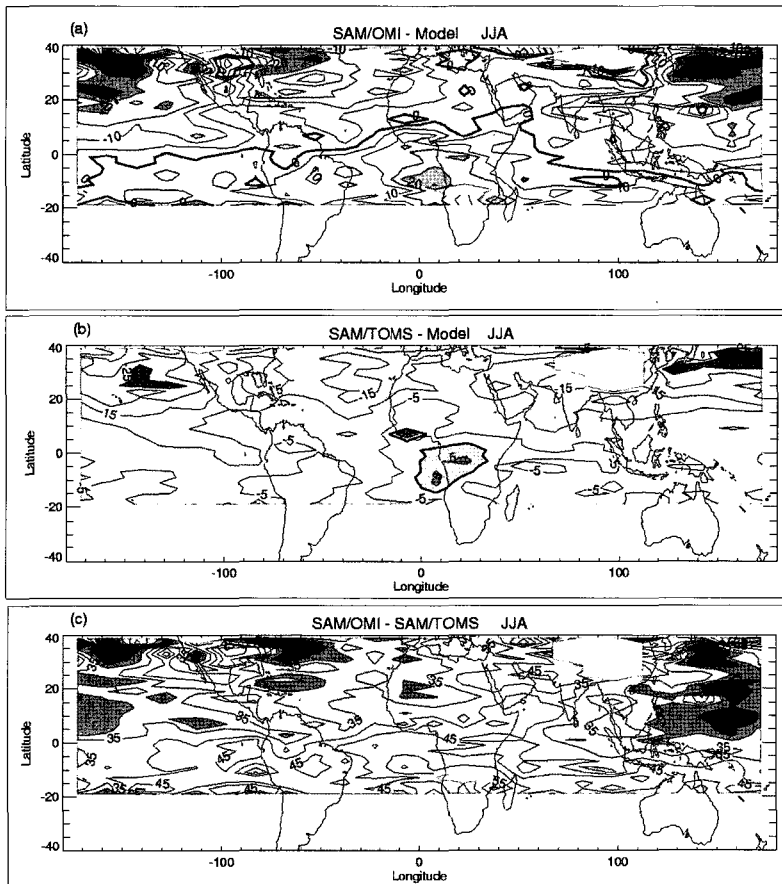


Fig. 5. The difference(DU) between tropospheric column ozone derived from (a) OMI and model, (b) TOMS and model, and (c) OMI and TOMS. The contour interval is 5 DU. The thick line indicates 0 DU.

Table 2. The correlation coefficient of CO and tropospheric ozone derived from the model and the SAM using TOMS and OMI data.

| | SAM-TOMS & CO | SAM-OMI & CO | Model & CO | TOMS & OMI |
|-------------|---------------|--------------|------------|------------|
| 20°S - 20°N | 0.67 | 0.60 | 0.58 | 0.85 |
| 20°S - 40°N | 0.54 | 0.41 | 0.57 | 0.74 |

낮은 경향을 보인다.

OMI 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존과 TOMS 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존의 차이의 bias는 37.3 ± 8.4 DU로써, 모든 지역에서 양의 값을 가진다 (Fig. 5c). 즉 다시 말하면 OMI 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존이 TOMS 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존보다 북반구 여름 기간 동안 높게 나타남을 의미한다. 특히 남반구 건기 동안 biomass burning 영향을 받는 남반구 적도 지역에서 더 높게 관측된다. 이러한 차이의 원인은 위성간의 위성각(viewing angle)과 자료 샘플링 빈도 및 a-priori ozone profile이 다르기 때문이라고 사료된다.

3) 상관관계

북반구 여름 기간 동안 SAM과 모델을 통해 산출된 대류권 오존과 오존 전구 물질인 CO의 상관관계를 지역별로 분석하였다(Table 2).

SAM 방법을 이용하여 산출한 대류권 오존과 CO의 적도 지역(남위20°-북위20°)의 상관관계는 북반구 중위도 지역이 포함된 지역(남위20°-북위40°)보다 더 높게 나타났다. 또한, TOMS 위성자료를 이용한 대류권 오존과 OMI 위성 자료를 이용한 대류권 오존의 상관관계도 중위도 지역보다 적도 지역에서 더 높게 나타났다. 그에 반해, 모델을 통해 산출된 대류권 오존과 CO의 상관관계는 지역에 상관없이 적도 지역과 중위도 지역에서 모두 동일한 상관계수를 가진다.

적도 지역의 경우 TOMS와 OMI 위성 자료를 이용한 대류권 오존과 CO의 상관관계가 모델과 CO의 상관관계보다 더 좋은 결과를 보이는 반면, 중위도 지역의 경우 모델과 CO의 상관관계가 더 좋은 결과를 보여준다.

TOMS 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존과 CO의 상관관계가 OMI 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존과의 상관관계보다 더 좋은 결과를 보여준다. 특히, 중위도 지역의 경우 TOMS를 이용한 대류권 오존과 CO의 상관관계에 비해, OMI 자료를 이용하여 산출한 대류

권 오존과 CO의 상관관계는 0.41로서 상대적으로 낮다. OMI 위성 자료를 이용한 대류권 오존 분포에서 북위 40° 부근 지역 결과값의 오류(noise) 때문으로 사료된다. 만일 OMI 위성 자료 샘플링을 증가시킨다면 CO와의 상관관계가 더 좋아질 것으로 사료된다.

5. 결론

선행연구에 사용되었던 TOMS 위성 관측 자료와 최근에 관측을 시작한 OMI 위성 관측 자료를 SAM 방법에 적용하여 북반구 여름 동안의 남위 20°에서 북위 40° 지역의 대류권 오존을 공간적 분포와 오존양 차이 및 상관관계 측면에서 비교 및 분석하였다.

적도 지역의 경우, SAM 방법을 OMI와 TOMS 자료에 적용한 결과는 biomass burning 영향을 잘 보여주었다. 이러한 특징은 모델의 대류권 오존과 오존 전구물질인 CO 분포에서도 나타났다. 중위도 지역의 경우, SAM 방법과 모델을 통해 산출된 대류권 오존 분포는 모두 중동 지역과 아라비아 해 및 북·남미 대륙에서 높게 관측되었다. 이와 같은 양상은 CO의 분포와 일치함을 보였다.

SAM 방법을 적용하여 산출한 대류권 오존 분포는 모델의 대류권 오존 분포의 양상과 비슷하게 나타났다. 그러나, SAM 방법을 통해 산출한 대류권 오존 분포는 모델의 대류권 오존 보다 북반구에서 낮게 관측되었으며, 특히 북태평양과 북대서양과 같은 해양 지역에서 더 낮은 경향을 보였다.

OMI 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존 분포는 TOMS 자료를 이용하여 산출한 대류권 오존 분포보다 높게 나타났으며, 특히 biomass burning 영향을 받는 남반구 적도 지역에서 더 높게 관측되었다. 이러한 차이의 원인은 위성간의 위성각(viewing angle)과 자료 샘플링 빈도 및 a-priori ozone profile이 다르기 때문이라고 사료된다.

CO와의 지역별 상관관계 분석에 있어서 적도 지역의 상관관계가 중위도 지역보다 더 좋은 상관관계를 보여주었다. 그러나, 모델 결과와 CO와의 상관관계는 지역에 상관없이 동일한 상관관계를 보여주었다. 적도 지역의 경우 SAM 방법을 이용한 대류권 오존과 CO의 상관관계가 모델을 통한 대류권 오존과 CO의 상관관계보다 더 좋은 결과를 보이는 반면, 중위도 지역의 경우 모델과 CO의 상관관계가 더 좋은 결과를 보여주었다.

SAM 방법을 TOMS와 OMI 자료에 적용한 결과는 공간적 분포의 측면에서 유사하였지만, 대류권 오존양의 측면에서 차이를 보였다. 그 원인은 각 위성에 적용된 a-priori ozone profile이 다르기 때문이라고 사료된다. 이 원인을 규명하기 위한 정량적인 계산은 향후 연구에서 복사전달모델을 이용하여 TOMS와 OMI 위성의 알고리즘에 적용된 a-priori ozone profile이 SAM 결과에 미치는 영향을 분석할 것이다.

사 사

본 연구는 기상청의 통신해양기상위성(COMS) 연구 과제에 의해 지원되었다.

참고문헌

- Diab, R. D., A. M. Thompson, M. Zunckel, G. J. R. Coetzee, J. Combrink, G. E. Bodeker, J. Fishman, F. Sokolic, D. P. McNamara, C. B. Archer, and D. Nganga, 1996. Vertical ozone distribution over southern Africa and adjacent oceans during SAFARI-92, *Journal of Geophysical Research*, 101: 23823-23833.
- Fishman, J., C. E. Watson, J. C. Larsen, and J. A. Logan, 1990. Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data, *Journal of Geophysical Research*, 95(4): 3599-3617.
- Fishman, J., V. G. Brackett, E. V. Browell, and W. B. Grant, 1996. Tropospheric ozone derived from TOMS/SBUV measurements during TRACE A, *Journal of Geophysical Research*, 101(19): 24,069-24,082.
- Fishman J., A. E. Wozniak, and J. K. Creilson, 2003. Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3: 893-907.
- Hudson, R. D. and A. M. Thompson, 1998. Tropical tropospheric ozone from total ozone mapping spectrometer by a modified residual method, *Journal of Geophysical Research*, 103(17): 22129-22145.
- Kim, J. H., M. J. Newchurch, and K. Han, 2001. Distribution of tropical tropospheric ozone determined directly from TOMS measurements, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(18): 2699-2708.
- Li, Q., et al., 2001. A tropospheric ozone maximum over the Middle East, *Geophysical Research Letters*, 28(17): 3235-3238.
- Liu, X., et al., 2006. First directly retrieved global distribution of tropospheric column ozone from GOME: Comparison with the GEOS-CHEM model, *Journal of Geophysical Research*, 111: D02308, doi:10.1029/2005JD006564.
- McPeters, R. D. and Co-authors, 1998. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide, NASA, 1998-206895.
- Ziemke, J. R., S. Chandra, and P. K. Bhartia, 1998. Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: The assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques, *Journal of Geophysical Research*, 103(17): 22,115-22,128.