

TOMS 오존전량의 시공간 변동; 전구적인 추세 및 연직 분포

유정문* · 정은주

이화여자대학교 과학교육과, 120-750 서울특별시 서대문구 대현동 11-1

Temporal and Spatial Variability of the TOMS Total Ozone; Global Trends and Profiles

Jung-Moon Yoo* and Eun-Joo Jeong

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

Abstract: Using monthly total ozone data obtained from a Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) onboard the Nimbus-7 and Earth Probe satellite, this study examined the trend in the total amount of global ozone during two periods: from 1979-1992 [Early period] and 1997-2002 [Latter period]. The Annual average of total ozone during the Early period was globally reduced by about 10 DU compared to the amount during the Latter, except in some areas between the equator and 20 N. Global trends of total ozone showed a decrease of -6.30 DU/decade during 1979-1992, and an increase of 0.12 DU/decade during 1997-2002. Its enhancement during the Latter period was especially noticeable in tropical areas. The EOF analyses of total ozone from this period indicated signs of temporal/spatial variability, associated with the phenomena of Quasi-Biennial Oscillation (QBO), Quasi-Triennial Oscillation (QTO), El Niño Southern Oscillation (ENSO), and volcanic eruption. Seasonal profiles of tropospheric ozone in the tropics obtained from ozonesondes, showed the spatial pattern of zonal wavenumber one. Overall, this study may be useful in analyzing possible causes in the variations of stratospheric and tropospheric ozone.

Keywords: Total Ozone, TOMS, Trends, EOF, QBO, QTO, ENSO, Tropospheric Ozone

요약: TOMS 월별 오존전량의 전구 자료를 이용하여, 두 기간(전기: 1979-1992년, 후기: 1997-2002년)에 대한 오존전량 추세 및 시공간 변동을 지역과 해륙 분포에 따라 상호비교하였다. 전기에 비하여 후기의 오존전량이 0-20 N 일부 지역을 제외하고 전지구적으로 10 DU 정도 감소하였다. 오존전량의 추세는 전구적으로 전자 기간에 감소(-6.30 DU/decade)를 나타냈다. 후자 기간의 오존 증가 경향은 열대 지역에서 현저하였다. 1997-2002년 기간의 오존전량에 대한 경험적교합수 분석은 준2년 진동(QBO), 준3년 진동(QTO), 엘니뇨(ENSO), 그리고 화산폭발과 관련된 시공간 변동을 반영하였다. 열대 지역에서 대류권 오존의 연직 분포는 동서방향에서 파수 1의 형태를 보였다. 본 연구는 기후 및 환경 변화와 관련된 성층권과 대류권 오존 변화의 원인 규명에 도움을 줄 수 있다.

주요어: TOMS, 오존전량, 추세, 경험적교합수, 준2년 진동, 준3년 진동, 대류권 오존, 엘니뇨

서론

오존전량의 시공간 변동은 자외선 및 대기오염 중감과 관련하여 인간 활동과 생태계에 많은 변화를 줄 수 있어서(e.g., 유정문과 이해란, 2000), 엘니뇨/라니냐나 지구온난화와 같은 기후 변화와 함께 주요 관심사가 되고 있다. 오존홀 등의 기후 변화 문제를

다국적으로 해결하기 위한, 1987년 몬트리얼 의정서와 같은 국제 협약에도 불구하고 2003년은 남극 오존홀의 면적과 오존 감소량에 있어 관측 사상 두 번째로 큰 해로 기록되었다(김준 등, 2004). 이러한 오존전량 변화의 감시를 위하여는 위성,존데, 지상관측시스템, 레이저 광선, 항공기 등에서 관측된 자료가 사용될 수 있다. 특히 기존의 지상 관측 시스템에서의 자료는 시공간적으로 제한되어 있으므로, 이러한 문제없이 정보를 고르게 제공하는 위성관측 자료의 활용이 요구되고 있다(유정문과 배정남, 1999).

*Corresponding author: yjm@mm.ewha.ac.kr
Tel: 82-2-3277-2710
Fax: 82-2-3277-2684

Earth Probe 위성에 탑재된 Total Ozone Mapping Spectrometer(TOMS)는 태양복사 자외선 영역(312.5-380 nm) 내의 여섯 개 파장에서 대기에 의해 산란된 복사(SBUV; Solar Backscattered Ultra Violet)를 이용하여 오존전량을 측정하여 왔다(e.g., Bowman et al., 1985). TOMS 자료를 기초로 Stolarski et al. (1986)은 남극의 봄철에 오존홀을 확인하였다. 한편, TOMS 자료는 오존전량의 변동 경향(Kerr, 1991), 그리고 오존전량과 하부 성층권 온도 사이의 상관(유정문과 이해란, 2000) 등의 국내외 다수의 선행 연구에서 사용된 바 있다. 현재는 TOMS 뿐만 아니라 Ozone Monitoring Instrument(OMI), Global Ozone Monitoring Experiment(GOME) 등의 많은 위성 관측망에 의해서도 오존에 대한 지속적인 감시가 이루어지고 있다.

대류권 오존을 관측하기 위하여는 TOMS 오존전량 자료에서 SAGE, SBUV, HALOE, MLS 등에서 측정된 성층권 오존값을 제거하는 방법(Fishman et al., 1987; Ziemke et al., 1998; Thompson and Hudson 1999; Kim et al., 2003) 그리고 오존존대를 이용하는 방법이 있다. 열대 지역의 대류권 오존에 관한 선행 연구에서 Kim et al.(1996, 1998)은 대류권 오존의 변동 원인을 생물 자원 연소와 연계하여 조사한 바 있다. 또한 Thompson et al.(2003)은 열대 지역의 대류권 오존의 연직 분포에서 나타나는 동서방향 파수(zonal wavenumber) 1의 현상을 1998-2000년 기간의 봄과 가을 오존존대 자료를 사용하여 밝힌 바 있다.

본 연구의 목적은 전구적으로 1979년-1992년과 1997년-2002년 두 기간의 오존전량 추세를 비교하고, 오존의 시공간 변동을 분석하는데 있다. 추세 분석에서 전자 기간에 대하여는 유정문과 전원선(2000)의 선행 연구 결과, 그리고 후자 기간에 대하여는 본 연구에서 유도된 결과를 사용하였다. 또한 전구를 세분화한 지역에 대하여 경험직교함수 분석을 실시함으로써 오존전량의 시공간 변동과 원격효과도 조사하였으며, 남반구 열대 지역의 오존존대 자료를 이용하여(e.g., Thompson et al., 2003), 대류권 오존의 계절별 변화를 분석하였다.

자료 및 방법

위성관측 TOMS 오존전량

본 연구에서는 오존전량의 경년 변화 및 시공간

변동을 조사하기 위하여 Earth Probe 위성에 탑재된 TOMS 분광계에서 유도된 1997년 1월-2002년 12월 기간의 월평균 자료를 사용하였다. 이 자료는 Goddard Space Flight Center(GSFC)의 Distributed Active Archive Center(DAAC)로부터 수집되었다. 전지구적으로 오존의 양을 측정하는 TOMS는 1978년에 Nimbus-7 위성과 1994년에 Meteor-3 위성에 탑재되었다. 이 분광계는 1996년 8월 17일에서 1997년 6월 29일까지 일본의 Advanced Earth Observing Satellite(ADEOS), 그리고 1996년 7월 2일에서 현재까지는 Earth Probe 위성에 장착되어 자료를 제공하여 왔다. 이 분광계의 오존 관측 원리는 지구 대기로부터 위성으로 반사된 태양 복사의 자외선 분포를 통해 오존 농도를 간접적으로 측정하는 것이다. TOMS는 자외선이 지표면에서 후방 산란되는 것을 1 nm 폭의 6 개 파장대 중에 오존 흡수대(313 nm, 318 nm, 331 nm)에서 측정하여 오존전량을 산출한다.

Nimbus-7과 Meteor-3 위성들에서의 오존 관측을 지속하기 위하여, Earth Probe 위성이 1996년 6월에 발사되었다. Earth Probe는 515 km 고도의 저궤도를 사용하므로 고해상도와 함께 구름을 제거한 이미지를 제공할 수 있다. 이로 인해 위성에 탑재된 TOMS 기기를 이용하여 대류권 내의 자외선 흡수 에어러솔에 대한 관측이 가능하다. 이 위성의 발사 시에는 이미 더 높은 궤도를 들고 있는 ADEOS로부터 제공되는 자료와 함께 더 정확한 자료를 수집하고자 했으나, 1997년 6월에 ADEOS의 기능 상실로 인해 그 궤도를 1997년 12월 13일 이후에 740 km 고도로 재조정하였다. Earth Probe 위성은 주기 99.65분, 궤도 경사 98.385°, 최저점 관측 넓이 39 km²의 극궤도 위성으로 하루에 지구의 대부분을 관측하고 있다.

오존전량은 고도에 따른 오존 분포에 관계없이 오존의 수 밀도를 고도에 대해 누적시킨 양으로, 오존 분자가 주로 재분배를 이루는 하부 성층권 순환에 의해 좌우된다(e.g., 유정문과 이해란, 2000). 오존전량의 단위로 DU (Dobson)가 사용되는데, 1 DU는 0°C와 1기압 상태에서 순수한 오존 0.01 mm 두께에 상당하는 양으로 m·atm·cm(milli-atmosphere-centimeters)와 같은 값을 나타낸다.

본 연구에서는 1997년 1월-2002년 12월 기간의 Earth Probe/TOMS 복사계로부터 유도된 월평균 오존전량 자료를 분석하였다. 이와 유사하게 유정문과 이해란(2000)이 Nimbus-7/TOMS의 월평균 오존전량

자료를 이용하여 1979년 1월-1992년 12월 기간에 대하여 이미 분석한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 두 기간 간에 계절별 및 연평균의 오존전량 증감 경향을 중심으로 조사하였다. 두 기간의 오존전량 자료들은 동일하게 전구(60 S-60 N) 지역에 대하여 위·경도 2°×3°의 격자로 정리된 후에 비교되었다. 본 연구에서는 오존전량에 대한 시계열 및 경험직교함수(e.g., Kutzbach, 1967) 분석을 위하여, 이 자료가 사계절 기간에 항상 존재하는 60 N-60 S 지역을 전구로 가정하였다. 전구 자료는 지역에 따라 열대(30 S-30 N), 북반구, 남반구, 한반도 지역(34-40 N, 123-132 E), 해륙 분포(해양, 육지, 해양과 육지)에 따라 세분화되어 오존전량 아노말리의 시계열 분석에 사용되었다. 한편, 유정문과 전원선(2000)은 Nimbus-7/TOMS의 오존전량 자료를 이용하여 1979년 1월-1992년 12월 기간에 대하여 시계열 분석을 이미 시도한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 두 기간 간에 오존 추세 변동 차이를 강조하여 분석하였다.

월별 오존전량에 대한 시공간 변동을 조사하기 위하여 한반도 지역을 포함한 태평양, 대서양 등 Table 1에서 제시된 여덟 개 지역을 대상으로 오존의 월평균값 그리고 아노말리(anomaly)의 시계열에 대하여 각각 경험직교함수 분석을 실시하였다. 경험직교함수 분석 결과는 일반적으로 조사대상 지역의 크기에 의

존한다. 월평균값이나 아노말리값은 관측소마다 전기간(즉, 72개월)에 대한 평균값이 제거된 후, 다시 해당기간에 대한 표준편차로 나눔으로써 정규화(normalization)되었다. 또한 위도에 따른 면적 변화의 효과를 고려하기 위하여, 각 자료의 해당 위도(ϕ)의 $\cos\phi$ 값을 곱한 결과가 경험직교함수 및 시계열 분석을 위한 최종 입력 자료로 사용되었다.

열대 지방의 오존 연직 분포

열대 지역에서 대류권 오존은 대기의 화학적, 역학적 측면에서 생성되는 물질이므로, 그것의 연직 분포 자료는 대기 순환에 관한 정보를 제공한다(Thompson et al., 2003). 대류권의 상층 및 성층권에 존재하는 오존은 온실 기체로서 복사 강제력과 잠재 기후 변화에 주된 역할을 하므로, 더욱이 오존 연직 분포 자료는 이러한 문제를 정확하게 이해하는데 필요하다(WMO/SPARC, 1991).

열대 지역에서 대류권 오존 연직 분포를 조사하기 위하여, 1998년 1월-2003년 12월 기간에 관측된 여덟 개 지점의 오존 존재 자료를 이용하였다. 남반구 열대 지역에 위치하고 있는 이들 지점에 대한 위도와 경도 정보를 Table 2에 제시하였다. 이들 자료는 National Aeronautics and Space Administration(NASA), Goddard Space Flight Center(GSFC)의 Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch의 Southern Hemispheric

Table 1. Percentage of total variance explained by the first 4 EOF's of the TOMS ozone data for the period 1997-2002. The words of 'Pac' and 'Atl' stand for the Pacific and Atlantic oceans, respectively. The values in parentheses represent the error bars of eigenvalues, according to the formula of North et al. (1982). The 'N' in the first column means total number of spatial grid array in a given domain. Error bar = $\lambda(2/N)^{-1/2}$, where λ is eigenvalue

Classification	Domain	Mode of mean ozone				Mode of anomaly ozone			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Pac 1 N - 1181	20S-60N, 48E-168W	46.0 (1.89)	32.0 (1.32)	11.6 (0.48)	3.5 (0.14)	41.7 (1.71)	22.3 (0.92)	12.5 (0.51)	4.3 (0.18)
Pac 2 N - 2651	60S-60N, 120E-78W	44.6 (1.23)	28.6 (0.79)	12.3 (0.34)	4.8 (0.13)	32.0 (0.88)	21.6 (0.59)	11.9 (0.33)	5.5 (0.15)
Pac 3 N - 1467	30S-30N, 120E-78W	45.7 (1.69)	31.7 (1.17)	12.4 (0.46)	3.3 (0.12)	43.3 (1.60)	26.0 (0.96)	11.1 (0.41)	4.3 (0.16)
Pac 4 N - 1031	20S-20N, 120E-78W	54.3 (2.39)	26.6 (1.71)	10.5 (0.46)	2.8 (0.12)	56.3 (2.48)	20.3 (0.89)	9.6 (0.42)	4.3 (0.19)
Atl 1 N - 1349	60S-60N, 90W-22E	46.9 (1.80)	29.4 (1.13)	8.3 (0.32)	4.9 (0.19)	28.1 (1.08)	20.7 (0.80)	10.9 (0.42)	7.8 (0.30)
Atl 2 N - 591	30S-30N, 90W-10E	44.7 (2.60)	40.9 (2.38)	7.6 (0.44)	3.1 (0.18)	42.9 (2.50)	28.9 (1.68)	12.1 (0.70)	3.8 (0.22)
Tropics N - 3720	30S-30N	42.9 (0.99)	34.5 (0.80)	11.1 (0.26)	2.3 (0.05)	38.9 (0.90)	26.1 (0.61)	11.9 (0.28)	3.8 (0.09)
Global N - 7320	60S-60N	45.7 (0.76)	27.6 (0.46)	10.0 (0.17)	4.3 (0.07)	28.7 (0.47)	20.6 (0.34)	10.3 (0.24)	4.0 (0.07)

Table 2. Location of SHADOZ, used in this study

Geographical Name	Latitude (°)	Longitude (°)
Pago Pago, Am. Samoa	14.23 S	170.56 W
San Cristobal, Galapagos	0.92 S	89.60 W
Natal, Brazil	5.42 S	35.38 W
Ascension Island	7.98 S	14.42 W
Nairobi, Kenya	1.27 S	36.80 E
La Reunion	21.06 S	55.48 E
Wankocok, Indonesia	7.57 S	112.65 E
Suva, Fiji	18.13 S	178.40 E

Additional Ozone sondes (SHADOZ) 관측에서 수집되었다(<http://croc.gsfc.nasa.gov/shadoz>).

본 연구에서는 수집된 지표로부터 고도 17 km 까지의 오존 관측 자료를 0.25 km 간격으로 내·외삽한 후에 최종 입력자료로 이용하였다. 다음에 사계절 자료로 나누어, 일대 지역의 오존 연직 분포와 계절별 오존의 연직 변동에 대해 조사하였다. SHADOZ 관측에서는 고도에 따른 ppbv 또는 ppbv(part per billion volume) 단위의 오존값을 제공한다.

한편, 1998-2000년의 자료를 사용하여 봄과 가을에 대한 일대 지역에서의 대양권 오존 연직 분포를 보고한 바 있는 Thompson et al.(2003) 결과는 본 연구에서 유도된 1998-2003년 기간의 계절별 오존 연직 분포와 비교될 수 있다.

오존 전량의 기후값 및 경년 변화

월평균 기후값

1997-2002년 기간(i.e. 기간B)의 EP/TOMS 관측으로부터 본 연구에서 유도된 오존전량과 1979-1992년 기간(i.e. 기간A)의 Nimbus-7/TOMS 관측으로부터 유도된 오존전량(유정분과 이해란, 2000) 사이의 차(i.e. 기간A-기간B)를 계절별 및 연평균 분포로 조사하였다(Fig. 1).

봄에는 기간A에 비하여, 기간B의 오존전량이 전지구적으로 대략 10 DU 감소하였고, 북미, 북반구 고위도에서는 최대 20 DU까지 감소하였다. 반역에 오존전량이 적도-20 N 위도대의 대부분의 지역에서 증가

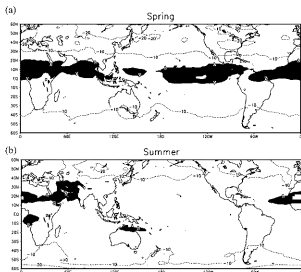


Fig. 1. Climatological TOMS total ozone difference (DU) between two periods of 1979-1992 in (a) spring (March-May), (b) summer (June-August), (c) fall (September-November), (d) winter (December-February), and (e) annual. Contour interval is 10 DU.

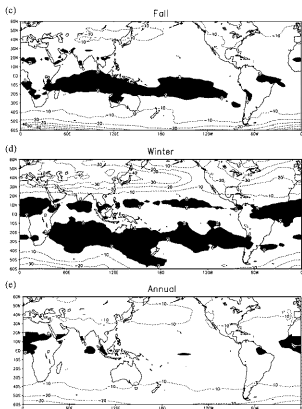


Fig. 1. Continued.

하였다(Fig. 1a).

오존전량이 여름에는 봄과 유사하게 양반구의 고위도에서 약 10 DU 만큼 감소하였다(Fig. 1b). 남반구 고위도 지역에서는 20 DU까지 감소하는 지역도 나타났다. 오존이 증가한 지역은 봄에 비하여 다소 복잡하였으며, 10-30 N 위도대의 일부 지역, 일부 아프리카 지역 그리고 일부 오스트레일리아 지역에서 나타났다.

선행 연구 기간(기간A)에 비하여 본 연구 기간(기간B)에 오존전량이 봄과 여름에는 주로 북반구 열대 지역에서 증가하였으나, 가을에는 주로 남반구 열대

지역에서 증가하였다(Fig. 1c). 한편, 오존전량이 남반구의 50-60 S 지역에서 최대 60 DU까지 감소하였다.

위도에 따른 오존전량의 증감 변동 폭이 계절별 중에서 겨울에 가장 크게 나타났다(Fig. 1d). 오존 증가 지역이 15 N의 이남부터 남반구 지역의 전반에 걸쳐 광범위하게 나타났다. 오존전량이 남반구 고위도 지역(60 S)에서 최대 30 DU, 그리고 15 N 이북의 북반구에서 최대 40 DU까지 감소하였다. 선행 연구 기간에 비하여 본 연구 기간의 오존전량 감소는 북반구에서 겨울에 40 DU, 그리고 남반구에서는 가을에 60 DU로 현저하였다(Figs. 1c-d). 오존전량 증가는

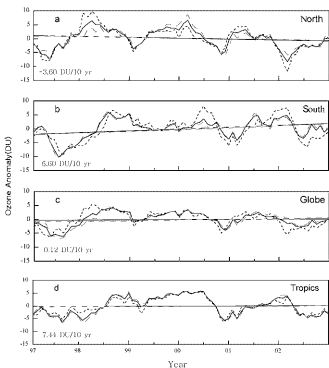


Fig. 2. Time series of monthly TOMS total ozone anomaly (DU) during 1997-2002 averaged over (a) northern hemisphere, (b) southern hemisphere, (c) globe, and (d) tropics. Each region is subdivided by ocean (long dashed), land (short dashed), and the ocean and land (solid), respectively. The trend values over the ocean and land, and three regression lines are given in each panel.

사계절 중 겨울에 적도 및 남반구에서 뚜렷하였다.

두 기간의 오존전량 연평균 분포들을 상호 비교해 보면, 기간A에 비하여 기간B의 오존전량이 전지구적으로 10 DU 정도 감소한 반면에, 0-20°N의 아프리카, 남아메리카, 인도네시아를 포함하여 일부 지역에서는 다소 증가하였다(Fig. 1c). 다시 말해, 1979-1992년에 비하여 1997-2002년 기간의 오존전량이 전지구적으로 감소하였으나, 적도 부근의 일부 지역에서 증가하였다.

오존전량의 계절 변화

북반구, 남반구, 전구 지역, 열대 지역, 그리고 한

반도 부근 지역에서 각각 1997-2002년 기간의 오존전량의 아노말리에 대한 경년변화를 조사하였다(Figs. 2-3 and Table 3). 또한 이 결과를 1979-1992년 기간의 선행 연구 결과(유정분과 권원주, 2000)와 비교 분석하였다.

유정분과 권원주(2000) 결과에 의하면, 오존전량 아노말리값은 기간A에 북반구(-6.23 DU/decade), 남반구(-6.60 DU/decade), 전지구(-6.30 DU/decade), 그리고 열대 지역(-2.15 DU/decade)에서 모두 감소 추세를 보였다. 이 값은 기간B의 경우에 북반구에서 감소 추세(-3.60 DU/decade), 남반구에서 증가 추세(6.60 DU/decade), 열대 지역에서 증가 추세(7.44

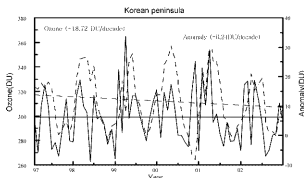


Fig. 3. Time series of monthly mean TOMS data (dashed) and their anomalies (solid) during 1997-2002 over the Korean peninsula for total ozone. The trend values of the monthly mean data and their anomalies are shown in each panel.

DU/decade)를 보였으며, 전지구적으로는 증가 추세(0.12 DU/decade)를 보였다.

오존전량 아노말리값이 기간A에 전지구의 육지(-6.25 DU/decade), 해양(-6.32 DU/decade), 그리고 해양과 육지(-6.30 DU/decade)에서 모두 감소하였다(유정분 과천원선, 2000). 반면, 이 값은 기간B 경우에 전지구의 육지에서는 기간A와 유사하게 감소 경향(-1.92

DU/decade)을 보였으나, 해양에서는 기간A과 다르게 증가 경향(2.88 DU/decade)을 보였다. 기간B에서의 오존전량 아노말리는 해양의 경향을 따라 증가 추세(0.12 DU/decade)를 보였다. 요약하면, 오존전량이 1992-1997년을 기점으로 감소에서 증가로 전환되었다고 보고한 김준 등(2004) 연구와 일치하였다.

오존은 엘니뇨가 발생한 1997년 4월-1998년 6월 기간에 열대 지역에서 뚜렷하게 감소하였고, 약한 엘니뇨가 발생한 2002년 4-12월에 다시 감소하였다(Fig. 2d and Table 4). 반면, 오존은 라니냐가 발생한 기간(1998년 7월-2000년 6월)에는 증가하였다.

한반도에서의 오존전량 아노말리값에 대한 경년변화는 기간B에서 북반구(-3.60 DU/decade)와 같은 강

Table 3. Linear trend (DU/decade⁻¹) of monthly ozone and ozone anomaly over northern and southern hemispheres, the globe, the tropics and the Korean Peninsula for the period from January 1997 to December 2002.

Region	Ozone (DU/decade ⁻¹)
	Anomaly
Northern	
Ocean	-2.64
Land	-4.80
Ocean & Land	-3.60
Southern	
Ocean	5.04
Land	6.96
Ocean & Land	6.60
Globe	
Ocean	2.88
Land	-1.92
Ocean & Land	0.12
Tropics	
Ocean	0.60
Land	1.44
Ocean & Land	7.44
Korean Peninsula	-0.24

Table 4. The list of cold (La Niña) and warm (El Niño) episodes during the period from January 1997 to December 2002 (National Centers for Environmental Prediction/Climate Prediction Center, NCEP/PCP, 2004; http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensyvars.html). Weak periods are designated as C- or W-, moderate strength periods as C or W, strong periods as W+ or C+, and neutral periods as N.

	JFM	AMJ	JAS	OND
1997	N	W	W-	W-
1998	W-	W	C-	C
1999	C-	C	C-	C
2000	C	C-	N	C-
2001	C-	N	N	N
2002	N	W-	W	W

소 추세(-0.24 DU/decade)를 보였다(Fig. 3 and Table 3). 한반도의 경우에 기간A의 감소 경향(-9.80 DU/decade)과 비하여(유정문과 전원선, 2000) 기간B의 감소 경향(-0.24 DU/decade)은 현저하게 약화되었다.

오존전량에 대한 시공간 변동

전구 지역, 열대 지역, 한반도를 포함한 태평양 내 지역, 대서양 두 지역에 대해 경험직교합수 분석으로 산출된 오존전량의 고유벡터값을 Table 1에 제시하였다. North et al.(1982)의 기준을 따를 때, 이 표에서 제시된 모든 고유벡터값들은 각 모드별로 오차 한계를 벗어나 통계적으로 유의하게 서로 분리되어 있었다. 다시 말해, 표에서 연속된 두 모드의 분산값들 사이의 차는 팔호내의 값을 초과하였다.

여덟 개 지역에서의 월평균 오존전량에 대한 경험직교합수 분석들에서 모드1이 가장 큰 값(42.9-54.3%)을 보였고, 이 모드의 시계열은 연주기 형태를 보였다(Table 1). 이러한 경향은 20 S-20 N 태평양 지역에 대한 값(54.3%)에서 가장 뚜렷하였다. 연주기가 제거된 월평균 오존전량의 아노말리값에 대한 모드1은 20 S-20 N 태평양 지역(56.3%)을 제외하고 월평균에 대한 분석값보다 작았다(28.7-43.4%). 20 S-20 N 태평양 지역에서 아노말리 변동이 큰 이유는 열대 지역에서의 오존전량은 연주기에 비하여 준2년 진동(Quasi-Biennial Oscillation; QBO)과 준3년 진동(Quasi-Triennial Oscillation; QTO), 그리고 엘니뇨/라니냐 등의 요소에 의해 복합적으로 결정되기 때문으로 추정된다. 이러한 현상 외에 오존전량의 변동은 화산 활동과도 높은 상관성을 보이는 것으로 조사되었다(e.g., Appenzeller et al., 2000; Bodeker et al., 2001; Harris et al., 2001; Weiss et al., 2001).

오존의 평균값

여덟 개 지역 중에 전구 및 열대 태평양 지역에서의 월평균 오존전량에 대한 경험직교합수 분석의 공간분포와 그에 해당하는 주성분 진폭 시계열을 제시하였다(Figs. 4-5). 주성분 진폭 시계열들은 대부분의 지역에서 공통적으로 모드1과 모드2에서 연주기, 모드3에서 QBO, 그리고 모드4에서는 ENSO와 반년 주기를 보였다.

전구 지역의 월평균 오존전량에 대한 경험직교합수 분석에 의하면, 총 분산의 45.7%를 설명하는 모드1의 공간분포 및 시계열에서 오존 변동이 연주기와

함께 직접적인 성층권 순환의 영향으로 대략 20-60 N과 20 N 이남 지역들 간에 음의 상관성을 보였다(Fig. 4a). 오존변동의 기울기가 30 N에서 크게 나타나는 이유는 이 지역 상층의 제트기류 때문인 것으로 추정된다(e.g., 유정문과 김소현, 1998).

오존전량의 분포는 위도와 계절에 따라 바뀌는데, 북반구의 경우 오존 최대값이 중·고위도 지역에서 낮은 겨울과 이른 봄 사이에 관측되었다(본 연구에서 보이지 않음). 이러한 분포의 특징은 파동의 연직 전파와 이에 따른 성층권 자오 순환의 변동으로 설명되었다(e.g., 백선균, 2002). 성층권 오존의 생성 지역은 태양 자외선이 가장 강한 열대 지역 상공이다. 이곳으로부터 성층권의 비단열적 자오 순환(Brewer-Dobson 순환; Brewer, 1949)을 통해 고위도로 수송되는 오존이 중·고위도역에서 오존전량의 계절 변동을 유발한다(e.g., London, 1985; Tung and Yang, 1988).

한편, 선형 파동 이론에 의하면, 대류권에서의 간섭에 의한 파동의 상층 전파는 성층권에서 동풍이 우세할 때 억제되고, 서풍이 우세할 때 증폭된다(Chamey and Drazin, 1961; Andrews et al., 1987). 탁월풍이 성층권의 여름에 동풍, 그리고 겨울에는 서풍이므로 대류권의 파동 간섭은 겨울철에만 성층권으로 전파된다. 이러한 메커니즘과 관련하여 Brewer-Dobson 순환이 계절 변동을 보이므로, 오존 최대값은 겨울, 그리고 최소값은 여름에 나타난다(Rosenlof and Holton, 1993). 본 연구에서도 백선균(2002) 결과와 유사하게, 오존 최대값이 북반구 중위도에서 늦겨울과 봄, 그리고 최소값이 가을에 나타났다(Fig. 4a).

엘니뇨에 의한 전구적인 오존전량 변동은 약 1% 정도이지만(Shiotani, 1992; Zerefos et al., 1992, 1994; Randel and Cobb, 1994), 그 변동은 지역적으로 상당히 클 수 있다. 예를 들면, 열대 지역에서의 오존전량은 엘니뇨의 최성기인 1998년 2월과 2001년 2월에 크게 감소하였다(Fig. 4a). 반면, 한반도를 포함한 중위도 지역에서는 오존전량이 엘니뇨 시기에 증가하였다. 오존이 2001년 2월에 감소한 이유는 DR Congo 지역(4 S, 25 E)에 위치한 Nyamuragira 화산 폭발과 관련이 있는 것으로 추정된다. 본 연구 기간(1997-2002년)에 가장 많은 이산화황(1100 kt)을 분출한 Nyamuragira 화산의 폭발(1998년 10월 17일) 후 약 2년이 경과한 2001년 2월에 적도 이남의 열대 지역에서 오존전량이 감소하였다.

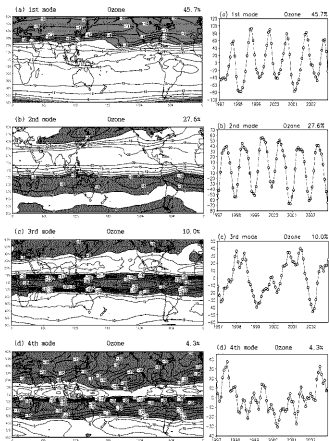


Fig. 4. The EOFs of the covariance matrix in left panel and corresponding principal component time series in right panel of monthly mean total ozone anomalies over the global (60 S-60 N) region of (1) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3, and (d) mode 4. The time series in the right side represent the projections of the ozone patterns at each time on the EOF patterns shown in the left side.

화산 폭발사에는 성층권에 유입된 이산화황(15%)과 황산(85%)이 혼합되어 형성된 에어로졸 입자가 성층권으로 오존전반을 감소시킬 수 있다(Herman and McPeters, 1993). 화산 폭발과 관련된 열적 변화에서 복사 강제력은 $-3 \sim -4 \text{ Wm}^{-2}$ 이며, 2-3년간 지속될 수 있다(IPCC, 1995). 이 경우에 태양복사의 변화

로 인한 복사강제력은 $+0.3 \text{ Wm}^{-2}$ 로 추정되었다. 이러한 복사 강제력에 대한 일시적 변동이 십년 단위의 시간 규모에서 관측되고 있는 기후 변동의 일부를 설명하는데 중요한 요소일 수 있다(유정분과 이해란, 2000). 이러한 사실은 1963년 발생한 인도네시아 Agung의 폭발 이후 처음으로 보고되었다(Pitcock,

1965; Grams and Fiocco, 1967). 북반구 중위도에서 관측된 1992-1993년의 이례적으로 낮은 오존전량은 필리핀 피나투보 화산 폭발(1991년 6월 12일-16일) 후 2년 경과하여 나타났고, 멕시코의 엘치촌 화산 폭발(1982년 3월 28일-5월 4일) 후 1년이 지난 1983년에 관측되었다.

총 분산의 27.6%를 설명하는 모드2의 공간 분포에서 오존 변동이 50-60 S의 대부분 지역, 10-30 S, 40-60 N의 일부 지역과 그 외의 지역 간에 음의 상관관계를 보였다(Fig. 4b). 오존 변동의 기울기가 적도와 30 N 부근에서 컸다. 이 모드의 시계열은 모드1과 유사하게 연주기를 보였다. 오존 변동이 30-50 S 지역에서는 미약하였다. 이 모드에서 오존 최대값은 북반구에서 40-60 N의 일부 지역을 제외하고 여름에 나타났고, 최소값은 겨울에 나타났습니다.

총 분산의 10.0%를 설명하는 모드3의 공간 분포에서 오존 변동이 남북 파동 형태를 보였다(Fig. 4c). 오존 변동의 기울기가 10 S와 10 N 부근에서 컸다. 이 모드의 시계열은 약 23개월 주기의 QBO와 약 36개월 주기의 QTO를 보였다. 일반적으로 열대 지역에서 23-36개월 주기로 성층권에서 풍향이 동풍에서 서풍으로 변화한다. 오존 최대값은 50 hPa의 고도에서 풍계가 동풍에서 서풍으로 바뀔 때 나타났습니다.

총 분산의 4.3%를 설명하는 모드4의 공간 분포에서 오존 변동이 대체로 0-10 N의 열대 지역과 그 외의 지역 간에 음의 상관관계가 나타나는 남북 파동 형태를 보였다(Fig. 4d). 오존 변동이 열대 지역의 동태평양과 인도네시아 부근 난수역 간에 시소 형태를 보였다. 오존이 남반구 열대 동태평양 지역에서 엘니뇨 기간(1997년 4월-1998년 6월) 중 1997년 8월에 상당히 감소하였다. 반면에, 오존이 이 지역에서 라니냐 기간(1998년 7월-2000년 6월, 2000년 10월, 2001년 3월) 중 2000년 4월에 증가하였다.

오존이 11년 태양 활동 주기 중 태양 흑점 수가 상대적으로 많았던 2000년 4월에 열대 수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)을 제외한 열대 지역에서 증가하였다(Fig. 4d; Coughlin and Tung, 2004). Willett(1962)은 오존전량과 태양 주기의 관계를 밝혔으며, 최근에는 성층권 오존과 태양 활동의 영향에 관한 메커니즘이 기후 모형을 이용한 연구 결과로부터 제시되었다(Shindell et al., 1999). 이 결과에 따르면, 상부 성층권에서의 오존은 11년 주기의 태양 활동에 의해 변동하였으며, 태양 흑점의 증가시에 자외

선 증가로 인해 열대 상층에서 오존 생성이 활발하였다. 오존전량은 태양 흑점이 150개 증가하면 1.5 DU 증가하였다(WMO/NASA, 1988). 또한 태양 활동의 변화는 상부 대류권-하부 성층권의 순환을 변화시킴으로써 QBO와 관련되어 오존 변화에 영향을 줄 수 있다(Labitzke and van Loon, 1988, 1989; Tinsley, 1988).

열대 태평양 지역(20 S-20 N, 120-78 E, Table 1에서 Pac 4)에 대한 월평균 오존전량의 분석에 의하면, 총 분산의 54.3%를 설명하는 모드1의 공간 분포에서 오존 변동은 전 지역에서 같은 증감 방향을 보였으며, 그 기울기가 10 S와 10 N에서 컸다(Fig. 5a). 이 모드의 시계열은 연주기를 보였다. 오존 최대값은 주로 8월과 9월에, 그리고 최소값은 1월에 나타났습니다. 오존이 열대 동태평양에서 엘니뇨 최성기인 1998년 1월에 뚜렷하게 감소하였고, DR Congo 지역에서 1998년 10월 17일에 발생한 Nyamuragira 화산 폭발의 영향으로 2001년 2월에 상당히 감소한 것으로 추정되었다. 반면, 오존은 라니냐가 강했던 1999년 9월에 열대 동태평양에서 증가하였다.

총 분산의 26.6%를 설명하는 모드2의 공간 분포에서 오존 변동 경향은 적도를 중심으로 남북 대비로 나타났으며, 시계열은 연주기 형태를 보였다(Fig. 5b). 적도 이북의 열대 지역에서 오존의 최대값은 주로 봄에, 그리고 최소값은 가을에 나타났습니다. 오존이 10-20 S 위도의 열대 동태평양 지역에서 1998년 11월과 2001년 11월에 상당히 증가하였다.

총 분산의 10.5%를 설명하는 모드3의 공간 분포에서, 오존 변동이 5 S-5 N 지역과 그 외의 지역 간에 음의 상관관계를 보였다(Fig. 5c). 오존 변동의 기울기가 5-10 N, 5-10 S에서 컸고, 시계열은 약 23개월 주기의 QBO와 약 36개월 주기의 QTO를 보였다. 오존 최대값이 적도 부근에서 서풍이 강하게 부는 1997년 3월, 1999년 2월, 2002년 2월에 나타났습니다. 오존 최소값은 2000년 9월과 10월, 2001년 4월에 나타났습니다.

총 분산의 2.8%를 설명하는 모드4의 공간 분포는 중간 대류권 열적 상태에 관한 Yulaeva and Wallace (1994)의 연구에서 밝혀진 아령 모양의 엘니뇨 모드를 반영하였다(Fig. 5d). 강한 엘니뇨가 발생한 시기(1997년 7월-1998년 4월)에 오존이 양반구의 아열대(10-20 N, 10-20 S)의 열대 동태평양에서 현저하게 감소하였고, 열대 서태평양에서 증가하였다. 반면, 오존이 라니냐 최성기인 2000년 2월에 열대 동태평양에

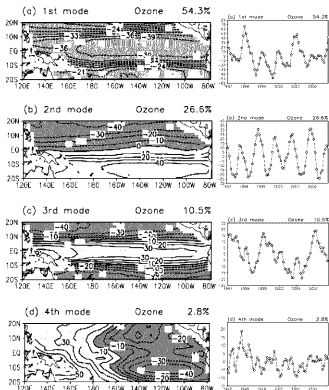


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for the Pacific Ocean of (20 S-20 N, 120 E-78 E) (Pac 4).

서 증가하였고, 열대 서태평양에서 감소하였다. ENSO와 관련하여 오존이 열대 동태평양에서 감소(증가)하면 열대 서태평양에서 증가(감소)하는 시소 형태를 보였다. 이 모드의 시계열은 반년 주기를 보였다.

오존전량의 아노말리

Figs. 6 and 8에서는 해방 지역의 월평균 오존전량 아노말리값에 대한 경험적고함수 분석의 공간분포와 그에 해당하는 주성분 전폭 시계열을 제시하였다. 대체로 모드1은 QBO와 ENSO, 모드2는 QBO, 그리고 모드4는 ENSO 형태를 보였다.

전구 지역의 월평균 오존전량 아노말리값에 대한

경험적고함수 분석에서 총 분산의 28.7%를 설명하는 모드1의 공간분포는 오존 변동에 있어서 15 N-40 S와 그 외의 지역 간에 음의 상관관계를 보였다(Fig. 6a). 오존 변동의 기온기가 10 N-20 N 지역에서 컸다. 오존이 열대 지역에서 엔니뇨 최성기인 1998년 1월에, 그리고 DR Congo지역에서 1998년 10월 17일에 발생한 Nyamuragira 화산 폭발의 영향으로 2001년 2월에 상당히 감소한 것으로 추정되었다. 추가하면, 오존이 열대 지역에서 라니냐 최성기인 1999년 1월 경에 증가하였다.

총 분산의 20.6%를 설명하는 모드2의 공간 분포에서, 오존 변동은 전반적으로 10 N-10 S 지역과 그 외

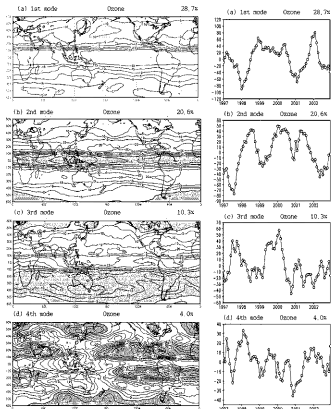


Fig. 6. The EOFs of the covariance matrix in left panel and corresponding principal component time series in right panel of monthly mean total ozone anomalies over the global (60 S-60 N) region of (1) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3, and (d) mode 4. The time series in the right side represent the projections of the ozone patterns at each time on the EOF patterns shown in the left side.

의 지역 간에 대비되는 경향을 보였다(Fig. 6b). 오존 변동의 기온기가 10 S와 10 N 위도에서 있다. 이 모드의 시계열은 약 18-20개월 주기의 QBO를 보였다. 오존이 10 N-10 S 열대 지역에서 1997년 8월에 현저하게 증가한 반면에, 2000년 1월에는 감소하였다.

오존 변동은 열대 지역에서 QBO에 의해 주로 결정되어진다(Funk and Garnham, 1962; Ramanathan, 1963; Angell and Korshover, 1973). 열대 대기에서

의 이러한 역학적 진동은 중위도 지역의 오존 변동에도 영향을 주는데(Bowman, 1989; Zerefos et al., 1992; Shiotani, 1992; Ziemke et al., 1997), 이는 열대 지역의 상공에서 광화학적으로 생성된 오존이 성층권 순환을 통해 중위도로 수송되기 때문이다(백선균, 2002).

총 분산의 10.3%를 설명하는 모드3의 공간분포는 40 N-10 S지역과 그 외의 지역 간에 대차 옴의 상관

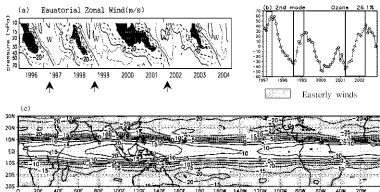


Fig. 7. (a) Time-height section of the monthly-mean zonal wind component near the equator in m/s , showing the QBO signal of alternating the westerly and easterly winds, (b) ozone anomaly in the Tropics of the second mode time series and QBO period. And (c) ozone anomaly in the Tropics of the second mode covariance matrix. The symbols 'arrow' in Fig. (c) indicate the periods which total ozone maxima occur and westerly shear phases at 70 hPa begin.

을 보였다(Fig. 6c). 이 모드의 시계열은 태양 주기를 반영하는 것으로 추정되었다. 다시 말해, 오존이 11년 태양 활동 주기에서 태양 흑점 수가 가장 많았던 2000년 초에 10 S 이북의 열대 지역에서 증가하였다(Coughlin and Tung, 2004; see their Fig. 3).

총 분산의 4.0%를 설명하는 모드4의 공간분포에서 오존 변동이 적도를 기준으로 남북에서 대칭되는 형태를 보였으며, 이러한 특징은 열대 동태평양에서 원저하였다(Fig. 6d). 해당 시계열을 함께 고려할 때, 오존이 강한 엘니뇨 기간(1997년 7월-1998년 3월)에 열대 동태평양의 10 S와 10 N 지역에서 상당히 감소하였고, 열대 서태평양에서는 증가하였다. 이러한 열대의 동서 태평양 지역에서 나타나는 시소 형태는 엘니뇨와 관련되어 있는 것으로 여러 선행 연구에서도 조사되었다(c.g. Zerefos et al., 1982; van Loon et al., 1982; Quiroz, 1983; Bojkov, 1987; Komhyr et al., 1998). 강한 엘니뇨의 발생 후에 해당 지역의 오존권량은 감소하는 것으로 보고되었다(c.g., Bojkov, 1987), 엘니뇨에 의한 오존 권량 변화는 열대 지역에서 동서 평균에서 약 1%의 감소를 나타냈으나, 특정 지역(열대 동태평양 및 서태평양)에서는 2-3%의 추가적인 감소를 보였다(Shiotani, 1992; Zerefos et al., 1992, 1994; Ramdel and Cobb, 1994).

QBO와 QTO에 의한 적도에서의 오존 증감을 열대

지역에서 오존권량 이노말리의 총 분산의 26.1%를 설명하는 모드2의 시공간 분포와 연계하여 조사하였다(Figs. 7b-c). 이 모드의 시계열은 준2년 주기의 QBO와 준3년 주기의 QTO를 보였다(Figs. 7b). 본 연구의 Fig. 7a는 적도를 중심으로 약 2년 주기로 동풍과 서풍이 교대로 바뀌는 QBO와 약 3년 주기로 동풍과 서풍이 교대로 바뀌는 QTO를 보여준다(see also Karim, 2004). QBO에서는 대략 2년 주기, 그리고 QTO에서는 대략 3년 주기로 동풍과 서풍이 교대로 지표면으로 하강하며, 이들 바람장은 1개월당 위도 5° 정도 이동한다. 오존 최대값은 적도의 70 hPa 고도에서 서풍이 시작되는 시기인 1997년 6월, 1999년 3월, 그리고 2002년 5월에 나타났다(Fig. 7). 오존이 10 N-10 S 지역에서 2000년 1월과 2001년 4월에 걸쳐서 증가한 반면에, 1997년 6월과 8월에는 증가하였다.

열대 태평양 지역(20 S-20 N, 120-78 E; Pac 4)의 월평균 오존권량 이노말리값에 대한 분석에서 총 분산의 56.3%를 설명하는 모드1의 공간분포는 오존 변동에 있어서 모든 지역에서 동일한 경향을 보였다(Fig. 8a). 오존 변동의 기동기는 10-20 N에서 컸다. 오존이 10 N-10 S의 동태평양 지역에서 엘니뇨의 최성기인 1998년 1월에 뚜렷하게 감소하였고, DR Congo 지역에서 1998년 10월 17일에 발생한 Nyamurajira

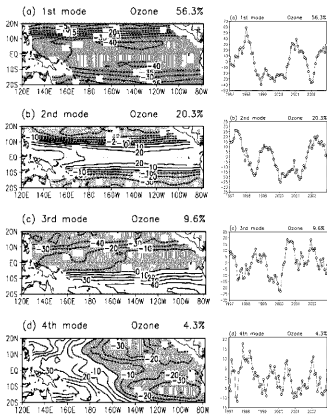


Fig. 8. Same as in Fig. 6 except for the Pacific Ocean of (20 S-20 N, 120 E-78 E) (Pac 4).

화산 폭발의 영향으로 2001년 2월에도 상당히 감소한 것으로 추정되었다. 반면, 오존이 10 N-10 S의 동태평양 지역에서 라니냐의 최성기인 1999년 1월에 뚜렷하게 증가하였다.

총 분산의 20.3%를 설명하는 모드2의 공간 분포에서, 오존 변동은 10 S-10 N 위도대와 다른 지역 간에 음의 상관을 보였다(Fig. 8b). 오존 변동의 기온기는 10 N 위도대에서 가장 컸다. 공간 분포를 함께 고려할 때, 이 모드의 시계열은 약 23개월 주기의 QBO와 약 36개월 주기의 QTO를 보였다. 적도 지역에서

오존은 QBO에 의해 주로 결정된다(Funk and Gamham, 1962; Ramanathan, 1963; Angell and Korshover, 1973). 오존이 적도 부근에서 1997년 5월에 증가한 반면에, 2000년 2월에는 많이 감소하였다.

총 분산의 9.6%를 설명하는 모드3의 공간 분포에서, 오존 변동은 10 S를 기준으로 남북 대비를 보였다(Fig. 8c). 오존 변동의 기온기는 10 S 부근에서 컸다. 오존이 열대 태평양에서 태양 흑점 수가 가장 많았던 2000년 초에 현저하게 증가하여, 오존 변동과 태양주기의 유의적인 상관 가능성이 나타났다.

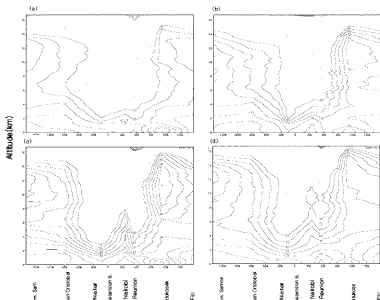


Fig. 9. Vertical profiles of tropical tropospheric ozone in (a) spring (March-May), (b) summer (June-August), (c) fall (September-November), and (d) winter (December-February). Contour interval is 5 ppbv.

총 분산의 4.3%를 설명하는 모드4의 공간 분포에서, 오존 변동이 남미 변경선의 동쪽과 서쪽에서 대비되어 나타났으며, 엘니노 기간(1997년 7월-1998년 3월)에는 열대 동태평양에서 오존이 뚜렷하게 감소하였다(Fig. 8d). 오존 변동 경향은 열대 동서 태평양에서 서로 상반되는 시소 현상, 그리고 열대 동태평양에서는 남쪽으로 이렇 형태를 보였다. 이는 ENSO와 관련이 있으며, 엘니노 기간에는 대류 활동으로 인한 집열 방출로 대류권계면은 높아지고, 이때 오존 농도가 높은 공기의 하부 성층권 유입과 단일평창을 통한 열적 효과로 인하여 오존농도가 감소한다(Shiotani, 1992; Hoinka et al., 1996; Kayano, 1997; Ahn and Shin, 1998).

열대 지방의 오존 연직 분포

1998-2003년 기간에 남반구 열대 지역의 이륙 개 지점(Table 2)에서 관측된 오존농도 자료를 이용하여,

이 지역에서의 계절별 오존 연직 분포를 조사하였다(Fig. 9). 오존 최대값은 Natal, Ascension Is., Nairobi, 그리고 La Reunion 지역의 7 km 고도에서, 그리고 최소값은 Am. Samoa, W. Atukosk, 그리고 Fiji 지역의 지표면에서 나타났다. 열대 지역에서 대류권 오존의 연직 분포는 동서방향 파수(zonal wavenumber) 1의 공간 변동 형태를 보였다.

한편, Thompson et al.(2002a)는 1998-2000년 기간에 남반구 열대 지역의 이륙 개 지점에서 관측된 오존농도 자료를 이용하여 이 지역에서의 봄과 가을의 대류권 오존 변동이 일년 내내 10-15 DU 간폭을 가진 동서방향 파수 1의 형태로 나타남을 보인 바 있다. 열대 지역에서 대류권 오존은 생분 자원 연소, 대류, 성층권대류권 상호작용(Stratosphere-Troposphere Exchange, STE), 번개, 대규모 순환(Walker and Hadley Circulations), 그리고 엘니노 등의 복합적인 영향으로 변화할 수 있다(Thompson et al., 2003).

열대 지역 대류권 오존의 계절별 연직 분포에서, 오존 최소값은 봄(3-5월)에 (Fig. 9a), 최대값은 가을(9-11월)에 나타났다(Fig. 9c). 본 연구에서의 최대값과 최소값은 각각 Kim et al.(1998)과 Thompson et al.(2003) 결과와 일치하였다. 봄의 대류권 오존 연직 분포는 상대적으로 단기간(3년) 조사인(Thompson et al., 2003; see their Fig. 4a) 결과와 유사하였다(Fig. 9a). 봄에 대류권 오존 농도는 다른 계절에 비하여 가장 낮았다. 봄철 오존 최대값은 Natal, Ascension Is., Nairobi, 그리고 La Reunion 지역에서 50 ppbv, 그리고 Watukosek 지역의 상부 대류권에서 나타나는 오존 최소값은 25 ppbv이었다. 열대 서태평양 지역(100 E)에서의 오존은 17 km 고도에서 하강할수록 감소하여, 지표면 부근에서는 20 ppbv 이하의 낮은 값을 보였다. 본 연구에서 가파른 오존 경도와 조밀한 등오존선으로 정의되는 봄철에 선행 연구 결과(Thompson et al., 2003; see their Fig. 4a)와 유사하게 16 km 고도에서 나타났다. 대류권계면의 고도는 사계절 중에서 봄에 가장 높았다.

여름(6-8월)에 Natal, Ascension Is., Nairobi, 그리고 La Reunion 지역에서 나타나는 오존 최대값은 봄에 비하여 5 ppbv 높은 55 ppbv를 보였다(Fig. 9b). 또한 Watukosek 지역의 상부 대류권에서 나타나는 오존 최소값도 봄에 비하여 5 ppbv 높은 30 ppbv를 보였다. 여름철 대류권계면은 봄보다 1 km 정도 낮은 15 km 고도에서 나타났다. 가을(9-11월)에 대류권 오존 연직 분포는 1998년-2000년의 자료를 이용한 Thompson et al.(2003; see their Fig. 4b)의 결과와 비슷하였다(Fig. 9c).

오존의 계절별 변동은 강수 현상과 밀접한 관련이 있으며(Thompson et al., 2003) 본 연구에서의 오존 최대값은 건기인 가을에 생물 자원 연소(생태계화재)의 발생으로 인해 나타났다. 생물 자원 연소(생태계화재)에 의한 오염은 최대 200 hPa 고도까지 영향을 줄 수 있다(Thompson et al., 2002b). 본 연구에서 가을에 오존 최대값은 Natal, Ascension Is., Nairobi, 그리고 La Reunion 지역의 중간 대류권(7 km 고도)에서 선행 연구 기간(1998-2000년)의 결과보다 5 ppbv 증가한 80 ppbv를 보였다. Watukosek 지역의 9-14 km 고도에서 나타나는 오존 최소값은 선행 연구 기간의 결과보다 5 ppbv 증가한 35 ppbv를 보였다. Watukosek 지역에서의 오존은 남아프리카에서 발생한 생물 자원 연소(생태계화재)에 의한 오염 물질의

이동, 계절별 대류, 그리고 엘니뇨에 의해 이동하여 분포하기 때문에 감소되는 것으로 추정되었다(Thompson et al., 2003). 본 연구 기간의 가을철 대류권계면은 선행 연구 결과(Thompson et al., 2003; see their Fig. 4b)와 유사하게 13-15 km 고도에서 나타났다. 대류권계면의 하강은 40 W-70 E 지역에서 사계절 중 가을에 가장 뚜렷하였다.

겨울(12-2월)에 대류권 오존의 연직 분포 구조는 봄과 유사하였다(Fig. 9d). 겨울에 Natal, Ascension Is., Nairobi, 그리고 La Reunion 지역에서 오존 최대값은 가을에 비하여 20 ppbv가 낮은 60 ppbv이었다. Watukosek 지역의 상부 대류권에서 겨울철 오존 최소값도 가을에 비하여 5 ppbv가 낮은 30 ppbv를 보였다. 겨울철 대류권계면은 가을에 비하여 1 km 정도가 높은 14-15.5 km 고도에서 나타났다.

결론

본 연구에서는 전구에 대한 오존전량의 추세 및 시공간 변동을 1979-1992년(기간A)과 1997-2002년(기간B)의 두 기간에 대하여 비교 분석하였다. 전자 기간은 Nimbus-7/TOMS, 후자 기간에 대하여는 Earth Probe/TOMS 복사계로부터 본 연구에서 유도된 월별 오존전량 자료를 사용하였고, 전자 기간에 대하여는 선행 연구 결과들(유정문과 전원선, 2000; 유정문과 이해란, 2000)을 이용하였다. 또한 열대 지역에서 대류권 오존의 계절별 연직 분포를 조사하기 위하여, 1998-2003년 기간에 남반구 열대 지역의 여덟개 지점에서 관측한 SHADOZ 오존존데 자료를 이용하였다.

두 기간의 계절별 및 연평균 분포의 비교에서, 기간A에 비하여 기간B에 오존전량이 전지구적으로 10 DU 정도 감소한 반면에, 일부 지역(0-20 N의 아프리카, 남아메리카, 인도네시아)에서는 증가하였다.

두 기간 오존전량 자료에 대하여 전구를 다섯 개 지역(전구, 북반구, 남반구, 열대, 한반도) 그리고 해륙 분포(해양, 육지, 해양과 육지)에 따라 세분화하여 오존 경년 변화를 비교 분석하였다. 기간A의 오존전량 아노말리가 북반구에서 감소(-6.23 DU/decade), 남반구에서 감소(-6.60 DU/decade), 열대 지역에서 감소(-2.64 DU/decade)하여 전지구적으로 감소하였다(-6.30 DU/decade). 반면 기간B의 오존전량 아노말리는 북반구에서 감소(-3.60 DU/decade)하였으나, 남반

구에서 증가(6.60 DU/decade)하고, 열대 지역에서도 증가(7.44 DU/decade)하여 전지구적으로 증가하였다(0.12 DU/decade). 따라서 오존전량의 추세는 1992-1997년을 기점으로 감소에서 증가로 전환되었음을 알 수 있다. 오존전량 아노말리는 열대 지역(30°N-30°S)에서 엘니뇨 시기에 감소, 그리고 라니냐 시기에는 증가하였다.

오존전량의 시공간 변동을 조사하기 위하여 월평균 오존전량값과 그 아노말리에 대하여 각각 경험직교함수 분석을 전구 여덟개 지역별로 실시하였다. 본 연구 기간에 월평균 오존전량의 시공간 분석에서 연주기를 나타내는 모드1이 모든 지역에서 지배적이었다($\geq 42.9\%$). 모드2도 모드1과 비슷하게 연주기를 보였다. QBO와 QTO를 나타내는 모드3에서 오존 최대값은 적도 부근의 70 hPa 고도에서 풍계가 동풍에서 서풍으로 바뀌는 시기에 나타났다. 또한 2000년 초에 태양 흑점 수 증가에 의한 태양 에너지의 감소로 인하여 오존의 광화학적 파괴 작용이 저하됨에 따라 대부분의 열대 지역에서 오존이 증가하였다. 엘니뇨를 반영한 모드4에서는 오존이 엘니뇨 기간(1997년 4월-1998년 6월)에 열대 동태평양에서 감소하였고, 열대 서태평양에서는 증가하였다. 반면, 라니냐 기간(1998년 7월-2000년 8월)에 열대 동태평양에서 증가하였고, 열대 서태평양에서 감소하였다. 엘니뇨/라니냐의 영향으로 열대 지역에서의 오존전량 변동이 동서 방향의 시소형태를 보였다.

한편, 오존전량 아노말리에 대한 시공간 분석에서 모드1은 1997/1998년 ENSO와 Nyamuragira 화산 폭발의 영향을 나타냈다. 방대한 양의 이산화황을 분출한 DR Congo 지역의 Nyamuragira 화산 폭발 후 대략 2년이 경과한 2001년 2월에 오존전량이 감소한 것으로 추정되었다. 모드2는 QBO 및 QTO, 그리고 모드4는 ENSO를 반영하였다.

열대 지역에서의 대류권 오존 최대값은 Natal, Ascension Is., Nairobi, La Reunion 지역에서, 그리고 최소값은 Am. Samoa, Watukosek, Fiji 지역에서 나타났다. 대류권 오존의 연직 분포는 사계절 모두에서 동서방향 파수 1의 공간 변동 형태를 보였다. 오존은 계절에 따라 봄(3-5월)에 감소하였고, 가을(9-11월)에 증가하였다. 이는 선행 연구 결과에 비추어 생물 자원 연소, 대류, 성층권-대류권 상호작용, 번개, 대규모 순환, 엘니뇨 등의 복합적인 현상과 관련이 있는 것으로 추정되었다. 대류권계면 고도는 선행 연구 결과

와 유사하게 봄에 가장 높았고(16 km), 가을에 가장 낮았다(13-15 km).

본 연구는 과거에 비하여 최근에 오존 감소 경향이 둔화되고 있음을 제시하며, 오존 연직 분포에 대한 분석이 대류권 오존 변동의 원인 규명에 도움이 될 수 있음을 보여준다.

사 사

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 기초과학 연구 지원(KRF-2004-015-C00598)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- 김준, 조희구, 이윤곤, 백선균, 오성남, 2004, 서울 상공의 최근 오존층 변화 경향 및 예측. 대기지, 14 (2), 98-99.
- 백선균, 2002, 10년 규모 변동성을 고려한 북반구 오존 전량의 장기 경향. 연 세대학교 박사학위 논문, 206 p.
- 유정문, 김소현, 1998, 마이크로파 위성자료의 하루 성층권 온도에 대한 경험 직교함수 분석. 한국지구과학회지, 19 (6), 649-663.
- 유정문, 배정남, 1999, TOMS 반사율의 시·공간 변동 및 하루 대류권 열적 상태와의 상관, 한국지구과학회지, 20 (5), 520-533.
- 유정문, 이혜란, 2000, 오존 전량의 시·공간 변동 및 대기 열적 상태와의 상관, 한국기상학회지, 36 (1), 75-86.
- 유정문, 전원선, 2000, 전구에 대한 TOMS 오존 전량과 반사율의 경년 변화; 위성관측 밝기 온도와의 상관. 한국 지구과학회지, 21 (6), 703-718.
- Ahn, J. B., and Shin, D. W., 1998, Response of total ozone to ENSO in the tropical region. Korean Journal of the Atmospheric Science, 1, 70-77.
- Andrews, D. G., Holton, J. R., and Leovy, C. B., 1987, Middle Atmospheric Dynamics. AP, San Diego, 489 p.
- Angell, J. K., and Korshover, J., 1973, Quasi-biennial and long-term fluctuations in total ozone. Monthly Weather Review, 101, 426-443.
- Appenzeller, C., Weiss, A. K., and Staehelin, J., 2000, North Atlantic Oscillation modulates total ozone winter trends. Geophysical Research Letters, 27, 1131-1134.
- Bodeker, G. E., Scott, J. C., Kreher, K., and McKenzie, R. L., 2001, Global ozone trends in potential vorticity coordinates using TOMS and GOME intercompared against the Dobson network, 1978-1998. Journal of Geophysical Research, 106, 23,029-23,041.
- Bojkov, R. D., 1987, The 1983 and 1985 anomalies in ozone distribution in perspective. Monthly Weather Review, 115, 2187-2201.
- Bowman, K. P., and Krueger, A. J., 1985, A global clima-

- tology of total ozone from the Nimbus-7 Total ozone mapping spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, 90, 7967-7976.
- Bowman, K. P., 1989, Global patterns of quasi-biennial oscillation in total ozone. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46, 3328-3343.
- Brewer, A. W., 1949, Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapor distribution in the stratosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 75, 351-363.
- Chamey, J. G., and Drazin, P. G., 1961, Propagation of planetary-scale disturbance from the lower into the upper atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 66, 83-109.
- Coughlin, K. T., and Tung, K. K., 2004, 11-Year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method. *Advances in Space Research*, 34, 323-329.
- Fishman, J., and Larsen, J. C., 1987, Distribution of total ozone and stratospheric ozone in the tropics: Implication for the distribution of tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 92, 6627-6634.
- Funk, J. P., and Gamham, G. L., 1962, Australian observations and a suggested 24 month cycle. *Tellus*, 14, 378-382.
- Grams, G., and Fiocco, G., 1967, Stratospheric aerosol layer during 1964 and 1965. *Journal of Geophysical Research*, 72, 3523-3542.
- Harris, J. M., Oltmans, S. J., Tans, P. P., Evans, R. D., and Quinby, D. L., 2001, A new method for describing long-term changes in total ozone. *Geophysical Research Letters*, 28, 4535-4538.
- Herman, J. R., and McPeters, R., 1993, Ozone depletion at Northern and Southern latitudes derived from January 1979 to December 1991 Total Ozone Mapping Spectrometer data. *Journal of Geophysical Research*, 98, 12,783-12,793.
- Hofmann, D. J., Oltmans, S. J., Harris, J. M., Johnson, B. J., and Lathrop, J. A., 1997, Ten years of ozonesonde measurements at the South Pole: Implication for recovery of springtime Antarctic ozone. *Journal of Geophysical Research*, 102, 8931-8943.
- Hoinka, K. P., Claude, H., and Kohler, U., 1996, On the correlation between tropopause pressure and ozone above central Europe. *Geophysical Research Letters*, 23 (14), 1753-1756.
- IPCC, 1995, *Climate Change 1995, The Science of Climate Change; Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report*. Cambridge University Press, New York, 572 p.
- Karin, L., 2004, On the signal of the 11-year sunspot cycle in the stratosphere and its modulation by the quasi-biennial oscillation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66, 1151-1157.
- Kayano, M. T., 1997, Principal modes of the total ozone on the Southern Oscillation timescale and related temperature variation. *Journal of Geophysical Research*, 103, 1455-1461.
- Kerr, J. B., 1991, Trends in total ozone at Toronto between 1960 and 1991. *Journal of Geophysical Research*, 96, 20,703-20,709.
- Kim, J. H., and Newchurch, M. J., 1996, Climatology and trends of tropospheric ozone over the eastern Pacific Ocean: The influences of biomass burning and tropospheric dynamics. *Geophysical Research Letters*, 23 (25), 3723-3726.
- Kim, J. H., and Newchurch, M. J., 1998, Biomass-burning influence on tropospheric ozone over New Guinea and South America. *Journal of Geophysical Research*, 103, 1455-1461.
- Kim, J. H., Na, S. M., and Newchurch, M. J., 2003, Tropospheric ozone retrieval algorithm based on the TOMS scanning geometry. *Korean Journal of Remote Sensing*, 19 (1), 11-19.
- Komhyr, W. D., Oltmans, S. J., and Grassm, R. D., 1998, Atmospheric ozone at South Pole Antarctica in 1986. *Journal of Geophysical Research*, 93, 5167-5184.
- Kutzbach, J. E., 1967, Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America. *Journal of Applied Meteorology*, 6, 791-802.
- Labitzke, K., and van Loon, H., 1988, Associations between the 11-year solar cycle, the QBO, and the Atmosphere, Part I, The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 50, 197-206.
- Labitzke, K., and van Loon, H., 1989, Association between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, Part III, Aspects of the association. *Journal of Climate*, 2, 554-565.
- London, J., 1985, The observed distribution of atmospheric ozone and its variations. *Ozone in the free atmosphere*. Van Nostrand Reinhold Company, 288 p.
- National Centers for Environmental Prediction/Climate Prediction Center, 2004, http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.html.
- National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center/Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch/Southern Hemispheric Additional Ozonesondes, 2004, <http://croc.gsfc.nasa.gov/shadoz>.
- North, G. R., Bell, T. L., Cahalan, R. F., and Moeng, F. J., 1982, Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, 110, 699-706.
- Pitcock, A. B., 1965, Possible destruction of ozone by volcanic material at 50 mbar. *Nature*, 207, 182.

- Quiroz, R. S., 1983, The climate of the El Niño winter of 1982-83; A season of extraordinary climate anomalies. *Monthly Weather Review*, 3, 1685-1706.
- Ramanathan, K. R., 1963, Bi-annual variation of atmospheric ozone over the tropics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89, 540-542.
- Randel, W. J., and Cobb, J. B., 1994, Coherent variations of the monthly mean total ozone and lower stratospheric temperature. *Journal of Geophysical Research*, 99, 5433-5447.
- Rosenlof, K. H., and Holton, J. R., 1993, Estimates of the stratospheric residual circulation using the downward control principle. *Journal of Geophysical Research*, 98, 10,465-10,479.
- Shindell, D. T., Rind, D., Balachandran, N., Lean, J., and Lonergan, P., 1999, Solar cycle variability, ozone and climate. *Science*, 284, 305-308.
- Shiotani, M., 1992, Annual, quasi-biennial, and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) timescale variations in equatorial total ozone. *Journal of Geophysical Research*, 97, 7625-7633.
- Stolarski, R. S., Krueger, A. J., Schoeber, M. R., McPeters, R. D., Newman, P. A., and Alpert, J. C., 1986, Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. *Nature*, 322, 808-811.
- Thompson, A. M., and Hudson, R. D., 1999, Tropical tropospheric ozone (TTO) maps from Nimbus 7 and Earth Probe TOMS by modified-residual method: Evaluation with sondes, ENSO signals, and trends from Atlantic regional time series. *Journal of Geophysical Research*, 104, 26,961-26,975.
- Thompson, A. M., and coauthors, 2002a, Southern Hemisphere Additional Ozone-sonde (SHADOZ) 1998-2000 tropical ozone climatology. 1. Comparison with Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) and ground-based measurements. *Journal of Geophysical Research*, 108(D2), 8238.
- Thompson, A. M., Witte, J. C., Freiman, M. T., Phahlane, N. A., and Coetzee, G. J. R., 2002b, Convergence of local and imported ozone pollution. *Geophysical Research Letters*, 29, 1976.
- Thompson, A. M., and coauthors, 2003, Southern Hemisphere Additional Ozone-sonde (SHADOZ) 1998-2000 tropical ozone climatology. 2. Tropospheric variability and the zonal wave-one. *Journal of Geophysical Research*, 108(D2), 8241.
- Tinsley, B. A., 1988, The solar cycle and the QBO influences on the latitude of storm tracks in the north Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 15, 409-412.
- Tung, K. K., and Yang, H., 1988, Dynamical component of seasonal and year-to-year changes in Antarctic and global ozone. *Journal of Geophysical Research*, 93, 12,537-12,599.
- van Loon, H., Zerefos, C. S., and Repapis, C., 1982, The southern oscillation in the stratosphere. *Monthly Weather Review*, 110, 225-229.
- Weiss, A. K., Staehelin, J., Appenzeller, C., and Harris, N. R. P., 2001, Chemical and dynamical contributions to ozone profile trends of the Payerne (Switzerland) balloon soundings. *Journal of Geophysical Research*, 106, 22,685-22,694.
- Willett, H. C., 1962, The relationship of total atmospheric ozone to the sunspot cycle. *Journal of Geophysical Research*, 67, 661-670.
- WMO/NASA, 1988, Ozone Trends Panel Report, An Assessment Report, WMO Report 18, Volume I, II, Geneva, Switzerland.
- WMO/SPARC, 1991, Assessment of trends in the vertical distribution of ozone. Edited by N. Harris et al., SPARC Report 1, Report 43, WMO Global Ozone Research and Monit. Project, Geneva, Switzerland.
- Yulaeva, E., and Wallace, J. M., 1994, The signature of ENSO in global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 37, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Zerefos, C. S., van Loon, H., and Repapis, C., 1982, Possible evidence of the southern oscillation in total ozone at Arosa. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, 31, 231-235.
- Zerefos, C. S., Bais, A. F., Ziomias, I. C., and Bojkov, R. D., 1992, On the relative importance of quasi-biennial oscillation and El Niño-Southern Oscillation in the revised Dobson total ozone records. *Journal of Geophysical Research*, 97, 10,135-10,144.
- Zerefos, C. S., Tourpali, K., and Bias, A. F., 1994, Further studies on possible volcanic signal to the ozone layer. *Journal of Geophysical Research*, 99, 25,741-25,746.
- Ziemke, J. R., Chandra, S., McPeters, R. D., and Newman, P. A., 1997, Dynamical proxies of column ozone with applications to global trend models. *Journal of Geophysical Research*, 102, 6117-6129.
- Ziemke, J. R., Chandra, S., and Bhartia, P. K., 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, 22,115-22,128.