

한반도 상공의 오존층 변화 1985~2009

박상서¹⁾ · 김 준^{1)*} · 조나영¹⁾ · 이윤곤²⁾ · 조희구¹⁾

¹⁾연세대학교 지구환경연구소/대기과학과

²⁾서울대학교 자연과학대학 기초과학연구원

(접수: 2011년 5월 16일, 수정: 2011년 9월 19일, 게재확정일: 2011년 10월 4일)

The Variations of Stratospheric Ozone over the Korean Peninsula 1985~2009

Sang Seo Park¹⁾, Jhoon Kim^{1)*}, Nayeong Cho¹⁾, Yun Gon Lee²⁾, and Hi Ku Cho¹⁾

¹⁾Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Science, Yonsei University, Seoul, Korea

²⁾Research Institute of Basic Sciences College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received: 17 May 2011, Revised: 19 September 2011, Accepted: 4 October 2011)

Abstract The climatology in stratospheric ozone over the Korean Peninsula, presented in previous studies (e.g., Cho *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005), is updated by using daily and monthly data from satellite and ground-based data through December 2009. In addition, long-term satellite data [Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), Ozone Monitoring Instrument (OMI), 1979~2009] have been also analyzed in order to deduce the spatial distributions and temporal variations of the global total ozone. The global average of total ozone (1979~2009) is 298 DU which shows a minimum of about 244 DU in equatorial latitudes and increases poleward in both hemispheres to a maximum of about 391 DU in Okhotsk region. The recent period, from 2006 to 2009, shows reduction in total ozone by 6% relative to the values for the pre-1980s (1979~1982). The long-term trends were estimated by using a multiple linear regression model (e.g., WMO, 1999; Cho *et al.*, 2003) including explanatory variables for the seasonal variation, Quasi-Biennial Oscillation (QBO) and solar cycle over three different time intervals: a whole interval from 1979 to 2009, the former interval from 1979 to 1992, and the later interval from 1993 to 2009 with a turnaround point of deep minimum in 1993 is related to the effect of Mt. Pinatubo eruption. The global trend shows -0.93% decade⁻¹ for the whole interval, whereas the former and the later interval trends amount to -2.59% decade⁻¹ and $+0.95\%$ decade⁻¹, respectively. Therefore, the long-term total ozone variations indicate that there are positive trends showing a recovery sign of the ozone layer in both North/South hemispheres since around 1993. Annual mean total ozone (1985~2009) is distributed from 298 DU for Jeju (33.52°N) to 352 DU for Unggi (42.32°N) in almost zonally symmetric pattern over the Korean Peninsula, with the latitudinal gradient of 6 DU degree⁻¹. It is apparent that seasonal variability of total ozone increases from Jeju toward Unggi. The annual mean total ozone for Seoul shows 323 DU, with the maximum of 359 DU in March and the minimum of 291 DU in October. It is found that the day to day variability in total ozone exhibits annual mean of 5.7% in increase and -5.2% in decrease. The variability as large as 38.4% in increase and 30.3% in decrease has been observed, respectively. The long-term trend analysis (e.g., WMO, 1999) of monthly total ozone data (1985~2009) merged by satellite and ground-based measurements over the Korean Peninsula

*Corresponding Author: Jhoon Kim, Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University 50 Yeonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Rep. of Korea
Phone: +82-2-2123-5682, Fax: +82-2-365-5163
E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

shows increase of $1.27\% \text{ decade}^{-1}$ to $0.80\% \text{ decade}^{-1}$ from Jeju to Unggi, respectively, showing systematic decrease of the trend magnitude with latitude. This study also presents a new analysis of ozone density and trends in the vertical distribution of ozone for Seoul with data up to the end of 2009. The mean vertical distributions of ozone show that the maximum value of the ozone density is 16.5 DU km^{-1} in the middle stratospheric layer between 24 km and 28 km. About 90.0% and 71.5% of total ozone are found in the troposphere and in the stratosphere between 15 and 33 km, respectively. The trend analysis reconfirms the previous results of significant positive ozone trend, of up to $5\% \text{ decade}^{-1}$, in the troposphere and the lower stratosphere (0~24 km), with negative trend, of up to $-5\% \text{ decade}^{-1}$, in the stratosphere (24~38 km). In addition, the Umkehr data show a positive trend of about $3\% \text{ decade}^{-1}$ in the upper stratosphere (38~48 km).

Keywords: stratospheric ozone, spatial ozone distribution, long-term ozone trend

1. 서 론

오존층은 태양에서 오는 유해자외선을 막아주고 지구 의 현재 기후상태를 유지시키는데 중요한 역할을 하기 때문에 인간은 물론 지상의 모든 생태계에서 없어서는 안될 가장 중요한 지구환경의 하나이다. 그러나 1970년 대 후반부터 인간활동에 의하여 오존층이 감퇴하기 시작하자 과학자들은 물론 일반인들에게까지 지구 오존층 변화에 큰 관심을 갖게 되었다. 한반도 상공의 오존층 감시는 남극 오존홀의 발견 1년 전인 1984년 5월부터 연세대학교 과학관 옥상에 있는 월봉(月峰) 오존관측소에서 Dobson 오존 분광광도계 (Beck No.124)로 매일 오존 관측으로 이루어지고 있다. 그리고 1999년부터는 오존층의 변화에 의한 지표자외선의 변화를 함께 알아 보기 위하여 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC, No.148)로 파장별 자외선 복사량과 오존량을 동시에 관측하고 있다. 이 오존관측소는 세계기상기구 지구대기감시 (WMO/GAW)의 전구오존관측시스템 (GO3OS) 관측소의 하나 (No.252, 37.57°N, 126.95°E)로 오존 관측 자료를 주기 적으로 세계 오존 및 자외선 자료센터 (World Ozone and Ultraviolet Data Center, WOUDC)에 전송하고 있다. 또한, 2004년부터 기상청 지구대기감시 위탁관측소로 지정되어 운영 중에 있다. 이들 관측자료를 분석하여 서울과 한반도 상공의 과거 오존층 변화를 밝힌 바 있다 (조희구 등, 1989; 조희구와 이재원, 1990; 조희구 등, 1994; Cho *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1998; Cho *et al.*, 2003; 김준 등, 2005). 이들 변화의 특징을 발표한 지 약 5~10년이 지났으므로, 이번 연구에서는 첫째 목적으로 2009년까지의 관측자료로 한반도 상공의 오존층 변화의 시공간적 특징을 새롭게 밝히고자 한다. 그리고 전구 오존층의 변화를 알아보기 위하여 일찍이 과학자들은 1964년부터 2000년까지의 자료를 사용하여 그 분석결과를 발표한 바 있다 (예; Bojkov and Fioletov, 1995; WMO, 1999; Fioletov *et al.*, 2002; Newchurch

et al., 2003; JMA, 2010; WMO, 2010). 이들 연구결과는 오존홀이 나타나기 전 (1980년)의 전구 평균 오존전량을 그 이후와 비교하여, 1990년대 초까지 뚜렷하게 감소를 보인 후 2000년까지는 감소경향이 둔화되었다는 내용 이었다. 이 연구의 둘째 목적은 1979년부터 2009년까지 관측한 전구오존자료를 사용하여 기존연구결과에 추가 하여 지구오존층의 시공간적 변화특징을 새롭게 밝히는 데 있다. 이 연구를 위하여 한반도의 오존자료는 서울의 Dobson 분광광도계와 포항의 Brewer 분광광도계에 의 하여 관측된 월별값을 사용하였다. 그리고 이 두 지 점 외의 한반도와 전지구의 자료는 위성 [Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), Ozone Monitoring Instrument (OMI)]에서 관측된 월별값을 사용하였다. 이 연구결과는 과거와 최근의 한반도 상공과 전지구 오존층의 변화를 비교하여 볼 수 있는 최신(update)의 연구가 될 것이다.

2. 전 지구 오존층

전구 오존전량의 연 평균분포는 TOMS (1979~1993.6; 1997~2004)와 OMI (2005~2009)의 Level 3 위성 관측 자료로 분석하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 1에 표시 하였다. 위성관측자료는 최근 일본기상청에서 행한 전 구위성자료처리 및 사용법 (JMA, 2010)에 주로 의거하여 사용하였다. TOMS는 Nimbus 7 (1979~1993.6), Earth Probe (1997~2004)의 2개의 위성 자료를, OMI는 Aura (2005~2009)위성 자료를 사용하였다. TOMS자료의 경우, Earth Probe 위성에 사용되고 있는 Version (Ver.) 8의 처리방법으로 Nimbus 7의 자료에도 이용하였다. 그리고 Earth Probe 위성의 TOMS 자료는 2007년 8월에 공개한 수정판을 이용하였다. Aura 위성의 OMI 자료는 2008년 2월에 Ver. 8에서 Ver. 8.5로 변경이 있었으나, 북위 30도와 북위 60도의 영역의 지상관측자료와의 비교 결과, 그 차이가 커 2005~2007년 사이에는 Ver. 8을 그대로 사용

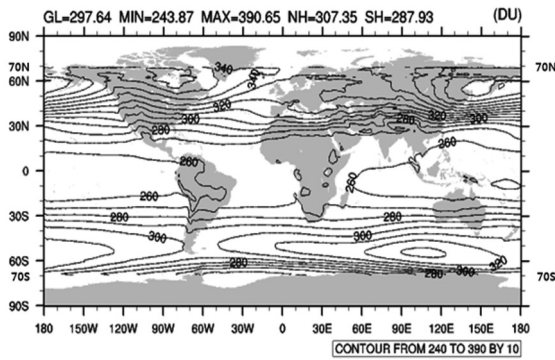


Fig. 1. Global distribution of long-term average total ozone (1979~2009).

하였다. 그리고 2008년 이후는 JMA (2010)의 분석 결과, Ver. 8.5의 값이 이들 지상관측값과 1~2% 작았으며, 2005년 1월부터 2007년 11월까지 OMI 위성의 Ver. 8과의 차이가 전구적으로 약 1~2%의 차이가 나타났다. 2008년 이후에는 Ver. 8.5의 자료만 존재하기 때문에 이 연구에서는 2008년 이후, Ver. 8.5의 위성 관측값에 1.5%의 값을 증가 보정하여 사용하였다.

이번 연구에서 전구오존전량 분포에 대해서 북위 70°와 남위 70°이상의 위도에서는 위성 관측의 지속성 문제로 극외(極外) 지역만을 분석하였다. 1979년부터 2009년

까지 극외 전구 연평균 오존전량의 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림과 Table 1에서 보는 바와 같이 저위도에서 적고 남북 양반구의 중-고위도에서 많이 분포하고 있다. 전구 오존전량 분포의 최소값은 244 DU로 적도 태평양 지역, 최대값은 391 DU로 오흐츠크 해와 캐나다 동부 지역에 위치하고, 위도 50°N~60°N 지역에서 비교적 높게 나타났다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 한반도를 포함하는 30~50°N 지역의 중위도는 오존전량의 등치선이 조밀하여 남북 간의 위도차가 전구에서 비교적 큰 지역에 속한다.

Table 1에서 전구 (70°N~70°S)의 연평균 오존전량을 전기간 (1979~2009)과 1992년과 1993년을 기준으로 전반기 후반으로 나누어 기간별로 나타내었다. 1993년 7월부터 1996년까지는 TOMS 위성의 결측으로, 결측 외 기간에 대해서 서울 Dobson 관측 자료와 전구 TOMS 자료의 평균값들 사이의 상관관계식을 통해 재구성하였다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 전 기간에 대해서 전지구의 연평균 오존전량은 298 DU이고 북반구는 307 DU, 남반구는 288 DU로 나타났다. 후반기 (1993~2009)의 평균 오존전량은 북반구의 304 DU와 남반구의 283 DU는 오존홀이 나타나기 전 (1964~1980) 북반구의 312 DU와 남반구의 300 DU (Bojkov and Fioletov, 1995)와 비교하면 -2.6%와 -5.7%가 각각 적은 편이다. 그리고 북반구의 오존전량은 남반구의 오존전량보다 전 기간과 전, 후반기에 모두 약 7% 가량 더 많은 편이다. 이와 같

Table 1. Annual averages, and maximum and minimum regions of total ozone over the global, northern hemisphere, southern hemisphere, and Korean peninsula. (unit : DU)

(a)	1979-2009	Annual Averages	Maximum(Region)	Minimum(Region)
	Global (70°N~70°S)	298	391 (Okhotsk Sea) 50°N~60°N	244 (Equatorial Pacific Ocean)
	Northern Hemisphere (0~70°N)	307	391 (Okhotsk Sea) 50°N~60°N	251 (Equatorial Pacific Ocean)
	Southern Hemisphere (0~70°S)	288	340 (Antarctic Sea) 50°S~60°S	244 (Equatorial Pacific Ocean)
	Korean Peninsula	329	357 (Unggi)	300 (Jeju)
(b)	1979-1992	Annual Averages	Maximum(Region)	Minimum(Region)
	Global (70°N~70°S)	302	396 (Okhotsk Sea) 50°N~60°N	246 (Equatorial Pacific Ocean)
	Northern Hemisphere (0~70°N)	311	396 (Okhotsk Sea) 50°N~60°N	251 (Equatorial Pacific Ocean)
	Southern Hemisphere (0~70°S)	293	348 (Antarctic Sea) 50°S~60°S	246 (Equatorial Pacific Ocean)
	Korean Peninsula	334	362 (Unggi)	304 (Jeju)
(c)	1993-2009	Annual Averages	Maximum(Region)	Minimum(Region)
	Global (70°N~70°S)	293	386 (Okhotsk Sea) 50°N~60°N	242 (Equatorial Pacific Ocean)
	Northern Hemisphere (0~70°N)	304	386 (Okhotsk Sea) 50°N~60°N	250 (Equatorial Pacific Ocean)
	Southern Hemisphere (0~70°S)	283	333(Antarctic Sea) 50°S~60°S	242 (Equatorial Pacific Ocean)
	Korean Peninsula	324	351 (Unggi)	296 (Jeju)

이 북반구의 오존전량이 남반구의 오존전량보다 많은 이유는 겨울에 극 지역과 적도 지역의 온도차가 북반구가 남반구에 비해서 크기 때문에, 적도 상공에서 광화학 반응에 의하여 생성된 오존량이 보다 강한 북반구 대기 대순환에 의하여 북극으로 더 많은 양이 수송되기 때문이다. 그리고 오존전량은 고위도로 갈수록 증가하고 봄의 오존량이 다른 계절에 비해 비교적 많은 이유도 대기 대순환으로 설명할 수 있다 (예; London, 1985).

1979년부터 2009년까지 31년간 연평균 전구, 북반구와 남반구 오존전량의 경년변화를 Fig. 2(a)에 각각 나

타내었다. 전구 규모의 오존 변화는 위성관측이 시작된 1979년 이후부터 1990년대 초까지 감소하는 추세를 보이며, 1993년에는 최소값을 나타내고 있다. 1990년대 중반 이후부터는 오존의 변화가 증가 경향으로 바뀌면서, 1998~2003년에는 1980년 후반의 수준까지 도달하였다. 그러나 2000년대 중반 이후에는 감소 경향을 보이고 있다. 그리고 최근 4년간 (2006~2009)의 전구 평균오존전량 (290 DU)은 오존층이 감퇴하기 전 4년간 (1979~1982)의 전구 평균 오존값 (307 DU)보다 약 6%가 적었다. WMO (2010)는 2006~2009년의 평균값은 1964~1980년의 평균값보다 위도 90°S~90°N에서 약 3.5%가 적었고, 2006~2009년의 중위도 (35~60°)의 평균값은 1996~2005년의 평균과 비슷하나 1964~1980년의 평균값에 비하면 남반구는 6%, 북반구는 3.5%가 더 적었다고 발표한 바 있다. 이와 같이 오존층은 아직도 회복이 더 필요함을 알 수 있다.

전구 오존전량의 장기변화경향을 월 오존전량의 시계열에서 계절변동, 준2년주기 (QBO), 태양활동 (SC)의 자연 진동을 제거한 후 다중 선형 회귀모형 (예; 김준 등, 2005)을 사용하여 분석하였다. 위성 관측의 결측이 있었던 1993년 7월부터 1996년 12월까지의 그 값을 비워 분석하였다. 그 결과를 Table 2에 표시하였다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 전구 오존전량의 변화경향은 전반기 (1979~1992)에는 $-2.6\% \text{ decade}^{-1}$ 로 감소하였으나, 후반기 (1993~2009)에는 $+1.0\% \text{ decade}^{-1}$ 로 증가하였다. 이와 같은 연구결과를 통해 일부 학자들은 지구오존층이 회복기미를 보인다고 조심스럽게 발표한 바 있다 (Fioletov *et al.*, 2002; Newchurch *et al.*, 2003; Weatherhead and Anderson, 2006). 이 연구의 후반기 (1993~2009)에는 같은 증가 경향을 보였으나, 전기간 (1979~2009)에 대해서는 아직도 약 $-1.0\% \text{ decade}^{-1}$ 로 약간 감소를 보였다. WMO (1999)는 전반기에 해당하는 기간 (1979~1991)의 북반구 중위도 겨울-봄 과 여름-가을에서 각각 -4.0 과 $-1.8\% \text{ decade}^{-1}$, 그리고 남반구 중위도에서 연평균 $-3.8\% \text{ decade}^{-1}$ 가 됨을 발표한 바 있다. 그리고 Fioletov *et al.* (2002)는 지상관측자료로 1979~2000년 사이에 북반구의 중위도에서 $-2.3\% \text{ decade}^{-1}$ 와 남반구 중위도에서 $-2.5\% \text{ decade}^{-1}$ 가 됨을 발표하였다. 최근 IPCC (2007) 보고서에서도 이와 비슷한 결과를 발표한 바 있다. 이와 같이 이들 변화경향은 조건에 따라 차이가 나타나는데, 자료의 기간, 지역의 범위 그리고 측정기기 (지상, 위성)에 따라 다소 차이가 있게 된다.

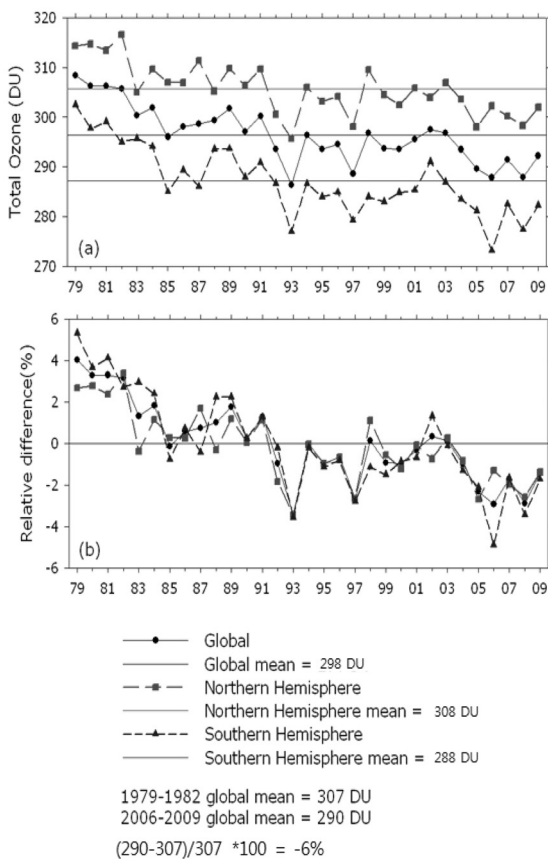


Fig. 2. Long-term intervariations of (a) annual average total ozone and (b) relative difference from climatological values (1979~2009).

Table 2. Long-term trends of total ozone over the global and both hemispheres.

Period	1979 ~ 2009			1979 ~ 1992			1993 ~ 2009		
	Global	North	South	Global	North	South	Global	North	South
Trend (% decade ⁻¹)	-0.93	-0.66	-1.20	-2.59	-2.23	-2.94	+0.95	+1.41	+0.48

1992년과 1993년의 최대 오존감소의 원인은 Pinatubo 화산 폭발 (1991년 6월)로 염소성분에 의한 오존감소와 남북극 겨울의 강한 극지역의 빈번한 극 소용돌이 (polar vortex)의 발생으로 오존수송이 감소함에 따라 고위도 오존이 감소하였기 때문이다 (Dhomse *et al.* 2006). 그 후, 오존전량의 최근 증가 또는 감소완화는 성층권 halogen의 증가가 완화되어 감소경향이 서서히 줄어들기 때문으로 보고 있다. 그 밖에 오존장기변화의 이유는 Brewer-Dobson 순환, annular modes, 태양활동, 준2년 주기진동 (QBO) 등의 역학적 영향으로 설명되고 있다 (예; Staehelin *et al.*, 2001; Harris *et al.*, 2008). 상부성층권의 오존변화는 오존전량변화보다 더 크고 오존수송 등의 역학적 과정이 화학적 과정보다 약하기 때문에 오존층의 변화 경향을 조사하기 위해서는 염소성분 등의 오존파괴물질들의 화학적 진단이 역학적 진단보다 더 좋은 방법으로 보고 있다 (Newchurch *et al.*, 2003). 상부성층권 오존은 1980년대 초부터 1990년대 중반까지 10~15%가 감소하였고 그 후는 완화되고 이 연구에서 확인한 바와 같이 최근 10년 동안 대체로 오존전량의 증가가 나타나고 있다. 이 상부성층권에서 장기 오존변동은 상부성층권의 halogen이 초기에 많은 증가와 그 후 감소와 잘 일치하고 있다. Fig. 2(b)는 전 기간 (1979~2009)의 평균값과 비교한 증감을 백분율로 표시한 것이다. 이 그림에서 1979년과 1980년 초를 기준으로 하였을 때 전 지구의 연평균 오존전량은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 아직도 감소하고 있음을 알 수 있다.

3. 한반도 상공의 오존층

3.1. 오존전량

Fig. 1의 전구 오존전량의 분포에서 한반도 영역만 분리 확대해서 한반도 오존전량의 연평균 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 오존전량은 제주에서 최소로 298 DU 그리고 울기에서 최대로 352 DU를 나타내며 고위도로 갈수록 오존 전량은 증가하여 한반도는 남북차가 약 54 DU로 나타나 남북경도가 평균 6 DU degree⁻¹로 전구에서 가장 심한 편에 속한다. 이는 1985~2000년 기간의 기존 분포와 비교 하였을 때 제주는 +4 DU, 울기는 +6 DU로 전국적으로 증가하였으나 그 분포의 형태는 과거 기존 분포와 거의 비슷하였다 (Cho *et al.*, 2003). 한반도 연평균 오존전량은 전 기간 (1979~2009)에 연평균 329 DU, 전반기 (1979~1992)에 334 DU, 그리고 후반기 (1993~2009)에 324 DU로 나타나, 전구 오존전량 (Table 1)에 비하여 각 기간 모두 약 10~11% 가량 많은 편에 속한다. 이와 같이 한반도의 오존층 광학두께는 오존전량과 비례하므로 전 지구의 평균 오존층 광학두께보다 두꺼운 편에 속한다.

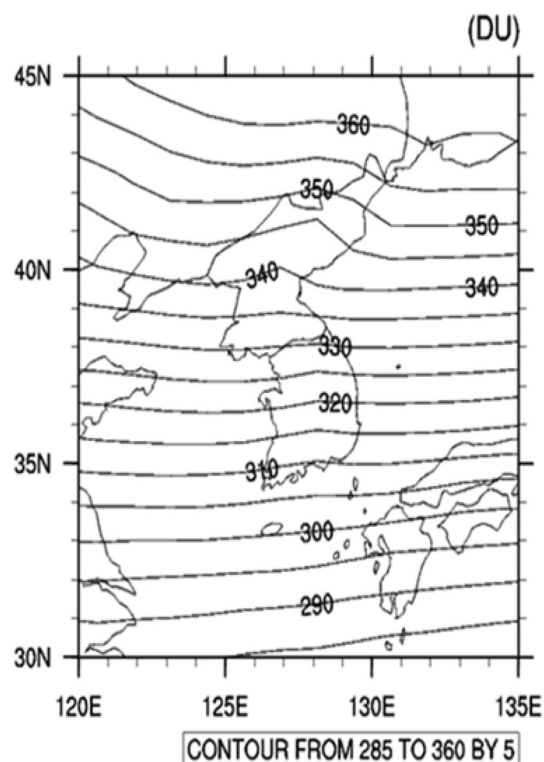


Fig. 3. Long-term annual average distribution of total ozone over the Korean Peninsula (1979~2009).

3.1.1. 일일 변화

1985년부터 2009년까지 서울에서 Dobson 분광광도계로 관측한 일 오존전량을 시계열로 Fig. 4(a)와 같이 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 매년 규칙적인 계절변화를 나타내며, 최대 극값은 2004년 3월 6일의 499 DU이며, 최소 극값은 2004년 7월 29일의 225 DU로 나타났다 (Table 4 참조). 이러한 오존전량의 단기 일변화는 주로 중관기상장의 일변화에 의해서 나타나고 있으며, 계절변화는 앞에서 언급한 바와 같이 대기 대순환의 영향을 주로 받고 있다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 일일 자료를 근거로 당일과 바로 전 날짜의 일 오존전량 차의 변화율 (일일차 변화율, 단위: %)을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 전날에 대하여 최대증가율은 38.4%이고, 최소감소율은 30.3%이었다. 이들 증감율의 평균값을 월별과 연평균으로 Table 3에 표시하였다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 일일차 변화율은 증가의 변화가 3월의 +7.5%로 가장 높고, 반면에 감소의 변화는 역시 3월의 -6.4%로 가장 큰 값을 보였고 이 증감의 변화율은 겨울과 봄에 비교적 높다. 전체적으로는 증가율의 변동폭은 감소율의 변동폭보다 더 높다. 그 까닭은 증가의 경우 전날의 값이 작고, 감소

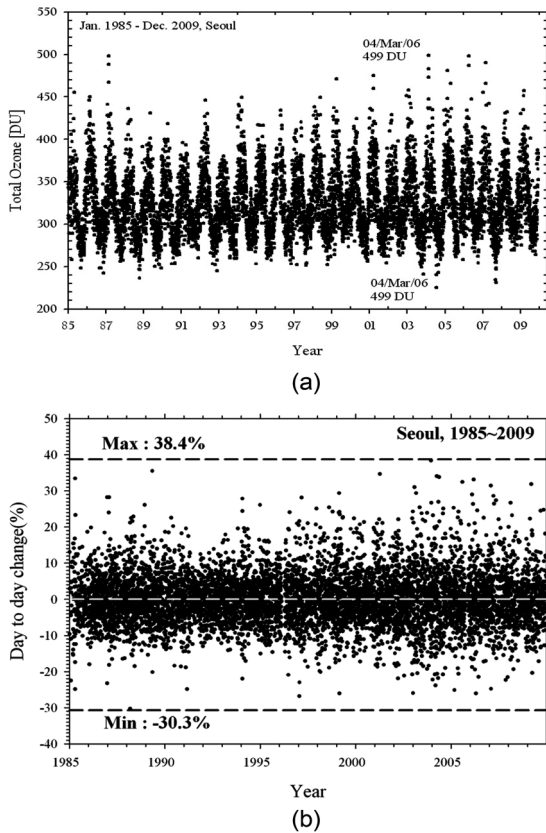


Fig. 4. (a) Daily total ozone and (b) day to day variability at Seoul.

의 경우에 전날의 값이 크기 때문에 전날에 대한 비율에 전자는 높고, 후자는 낮게 된다. 이들 연평균 변화율의 절대값은 평균 5.7%로 나타나, 이 변화는 과거 1985~2001년까지의 연평균 5.1% (Cho *et al.*, 2003)보다 다소 높아, 최근 (1985~2009) 일일 변동이 과거보다 다소 심하게 나타났음을 알 수 있다.

3.1.2. 연변화

한반도에서는 세계기상기구 대기감시 전구오존관측 시스템 (WMO GAW Global Ozone Observing System) 이 서울 (연세대학교, No.252)과 포항 (포항기상대, No.332) 두 곳에 있다. 서울에서는 앞에서 언급한 바와 같이 Dobson 분광광도계(Beck No.124)로, 포항에서는 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC No.161)로 지상에서 한반도 상공의 오존층을 각각 감시하고 있다. 여기에서 서울 (1985~2009)과 포항 (1994~2009) (기상청, 2010)에서 오존전량의 평균 연변화를 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다. 연평균 오존전량은 서울과 포항에서 각각 323 DU와, 314 DU로 과거 (1985~2000) 평균값 (조희구 등, 2003) 322 DU와 313 DU와 거의 같았으며, 월평균의 최대는 서울에서는 3월에 최대 359 DU, 포항은 4월에 최대 348 DU로 나타났다. 반면에 월 최소값은 모두 10월에 나타났고 서울에서 291 DU, 포항에서 284 DU였다. 월평균 오존량의 변동폭은 서울과 포항에서 모두 3월에 크게 나타나고 8~10월이 비교적 작다. 그리고 서울의 관측 기록 중 (1985~2009) 극대값은 2004년 3월 6일에 499 DU, 극소값은 2004년 7월 29일에 225 DU였다.

Table 3. Monthly averages in increasing and decreasing of the day to day change (%) at Seoul (1985~2009).

Difference (%)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Increase	6.7	6.8	7.5	6.4	6.6	5.6	4.8	4.5	4.1	3.9	5.0	6.1	5.7
Decrease	-6.3	-6.3	-6.4	-6.1	-5.4	-5.2	-4.9	-4.1	-3.7	-4.0	-4.6	-5.5	-5.2

Table 4. Monthly averages of total ozone at (a) Seoul, and (b) Pohang. (unit: DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Seoul (1985~2009)													
Average	338	346	359	356	346	334	305	293	292	291	300	319	323
Stdev.	15.8	15.8	17.5	13.9	13.0	11.2	9.9	7.5	7.9	9.5	10.1	11.0	5.2
Max	451	498	499	498	466	449	398	401	351	364	388	434	499
(Date)	(03/4)	(87/27)	(04/6)	(06/20)	(05/11)	(98/3)	(02/15)	(09/3)	(09/12)	(07/19)	(99/26)	(04/31)	(4/Mar/6)
Min	262	264	252	283	267	275	225	240	234	231	242	241	225
(Date)	(02/12,15)	(99/25)	(97/1)	(02/5)	(88/9)	(90/23)	(04/29)	(04/1)	(07/19)	(07/12)	(86/14)	(03/1)	(4/Jul/29)
Pohang (1994~2009)													
Average	323	331	346	348	341	330	297	286	285	284	287	302	314
Stdev.	18.1	14.0	20.1	18.8	17.9	14.4	10.5	9.0	8.3	9.1	20.3	17.3	8.9

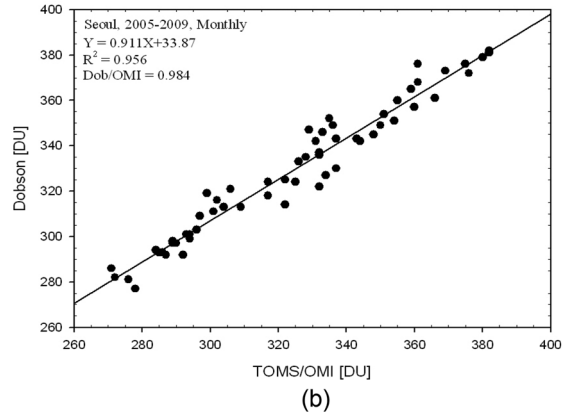
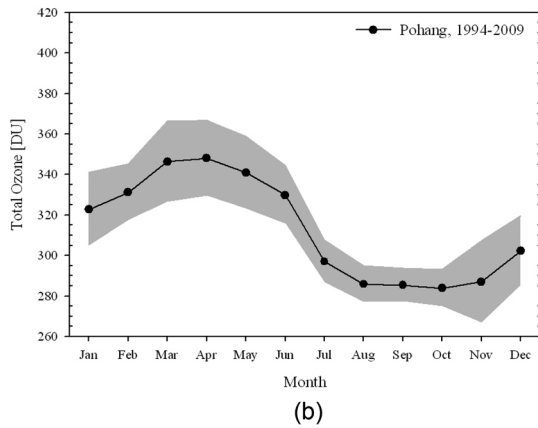
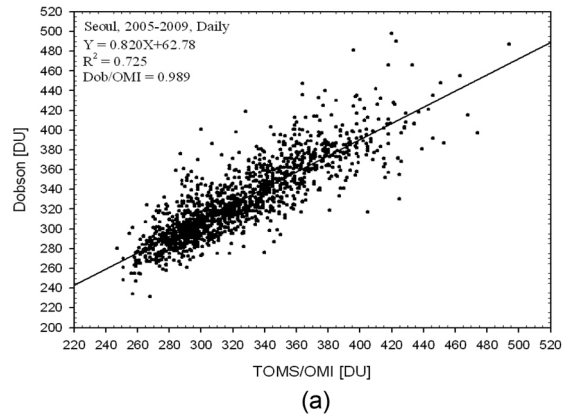
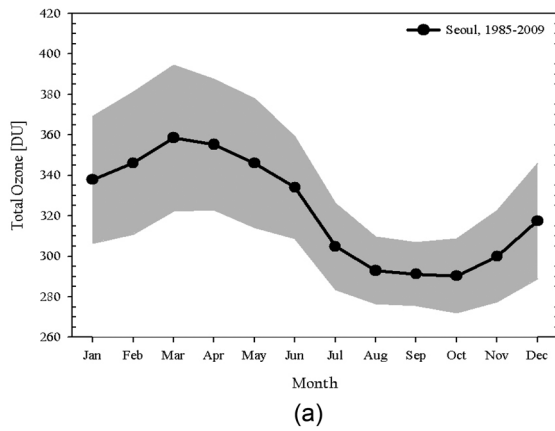


Fig. 5. Annual cycles of total ozone at (a) Seoul (1985-2009) and (b) Pohang (1994~2009). -Shadow means standard deviation.

Fig. 6. Inter-comparison of total ozone between TOMS/OMI and Dobson by using (a) daily and (b) monthly averaged data (2005~2009).

한반도 중요 8개 지점의 오존전량을 구하기 위하여 TOMS/OMI 위성 자료를 서울의 Dobson관측 자료와 Fig. 6에 비교하였다. 이처럼 위성 자료와 지상관측 자료에는 차이가 존재하기 때문에 이들 결과를 근거하여 6개

지점의 위성자료를 지상Dobson값으로 보정 하였다. 단, 포항값은 Brewer 분광광도계에 의하여 관측한 값 (1994~2009)이다. Table 5와 Fig. 7에서 8개 지점에 대한 오존전량의 월별 기후값과 연평균값을 나타내었다. 이 표

Table 5. Annual averages, maximum and minimum values of total ozone at 8 stations in Korea (1985~2009). (unit: DU)

Location	Unggi (42.32°N 130.40°E)	Sinuiju (40.10°N 124.38°E)	Pyeon-yang (39.02°N 125.82°E)	Kang-nung (37.75°N 128.90°E)	*Seoul (37.57°N 126.97°E)	**Pohang (36.05°N 129.38°E)	Kwangju (35.15°N 126.90°E)	Jeju (33.52°N 126.53°E)
Annual Avg.	352	340	334	322	323	314	309	298
Avg. Max. (Month)	406 (Mar)	385 (Mar)	377 (Mar)	360 (Mar)	359 (Mar)	348 (Apr)	338 (Apr)	324 (Apr)
Avg. Min. (Month)	300 (Aug)	302 (Aug)	301 (Aug)	290 (Aug)	291 (Oct)	284 (Oct)	283 (Oct)	273 (Nov)

*Dobson measurements, **Brewer measurements(1994~2009) Satellite measurements (corrected)

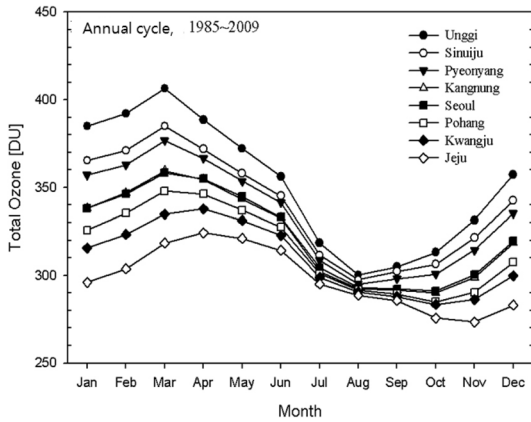


Fig. 7. Annual cycles of total ozone over the Korean Peninsula (1985~2009).

에서 알 수 있는 바와 같이 웅기에서 352 DU로 가장 높고 남쪽으로 갈수록 작아져 제주에서 최소인 298 DU가 나타났다. 월 최대값은 모두 3월에 나타났으나 최소값은 서울을 포함하여 북부는 8월에, 포항과 광주는 10월에 그리고 제주는 11월에 각각 나타났다. 그리고 연교차는 웅기에서 106 DU로 최대, 제주에서 51 DU로 최소로, 남쪽으로 갈수록 감소하고 있다. 이와 같이 한반도에서 오존전량의 연변화 진폭은 위도가 증가함에 따라 증가하였다.

3.1.3. 경년변화

서울 연평균 오존전량의 경년변화를 Fig. 8(a)에 나타내었다. 이 그림에서 연 오존전량은 2005년의 331 DU가 최대이고, 1988년 313 DU가 최소로 나타나고 있다. 가장 최근값인 2009년의 경우에는 329 DU로 역대 (1985~2009) 3번째로 많은 연평균 오존전량임을 알 수 있다.

한반도의 주요 8개 지점의 오존전량의 경년 변화는 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 그 증감의 변화가 모두 매우 비슷하게 나타나고 있다. 특히 1988년, 1993년, 2004년 그리고 2008년의 경우는 비교적 낮았으며, 1986년, 2005년과 2006년은 비교적 높게 나타나는 경향이 한반도 전역에 걸쳐서 나타났다.

과거 오존전량의 장기변화경향을 알기 위하여 (김 준 등, 2005) 서울에서 월별오존전량 (1985~2000)의 시계열에서 계절효과만 제거시킨 회귀모형 (LRM(0)) 으로 변화경향을 분석 결과, 그 변화경향은 $+0.77\% \text{ decade}^{-1}$ 로 나타난 바 있다 (Cho *et al.*, 2003). 그 후, 13년간 (1992~2004)의 월별자료에서 역시 계절 효과만 제거시킨 경우 그 변화경향은 $+1.07\% \text{ decade}^{-1}$ 이었다. 또한, 계절 (Seasonal), 준2년주기 (QBO), 태양활동 (SC)의 세 자연진동을 제거시킨 회귀모형 (LRM(1))의 변화경향은

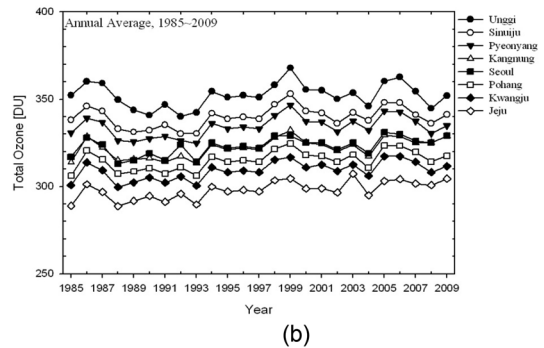
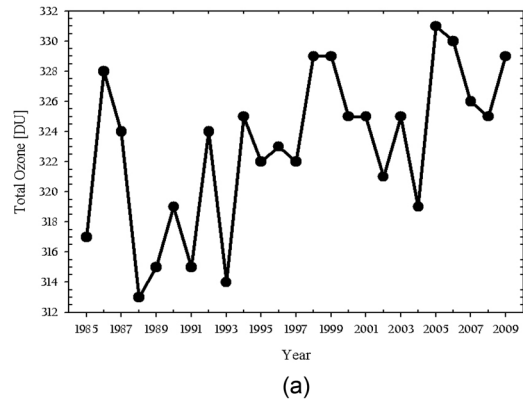


Fig. 8. Interannual variations of total ozone at (a) Seoul, (b) and 8 stations in Korea.

$+1.03\% \text{ decade}^{-1}$ 로 나타났다. Table 6은 한반도 상공 오존층의 변화경향을 최근 자료를 추가하여 분석한 결과이다. 서울의 경우, 계절 효과만 제거한 변화경향 (LRM(0))은 $+1.36\% \text{ decade}^{-1}$ 이고, 세 자연진동 효과를 제거시킨 경우 (LRM(1))는 $+1.16\% \text{ decade}^{-1}$ 로 나타났다. 이와 같이 최근 오존층의 변화경향은 과거보다 더 강한 증가경향을 나타내고 있으며, LRM(0)와 LRM(1)의 변화경향에서 QBO와 SC 등의 자연 진동은 오존전량의 증가경향을 일정 부분 완화시키는 효과를 나타내었다. 이와 같이 1985~2009년 동안 대체로 한반도 오존층은 서서히 회복되고 알 수 있으며, 그 회복 경향은 남부가 북부보다 더 강하게 나타났다. 그러나 최근 13년 (1997~2009)간은 한반도 중부에서는 약한 양의 경향을, 북부와 남부에서는 약한 음의 경향이 나타나고 있다.

3.1.4. 한반도와 일본 상공의 오존층 변화 비교

한반도와 인접한 일본 상공의 오존전량의 연변화와 경년변화를 비교하기 위하여 서울과 삿포로 (Sapporo, $43^{\circ}04'N, 140^{\circ}20'E$), 쓰쿠바 (Tsukuba, $36^{\circ}03'N, 140^{\circ}08'E$), 나하 (Naha, $26^{\circ}12'N, 127^{\circ}41'E$)의 Dobson 관측값 (JMA,

Table 6. Long-term trends of total ozone at 8 stations in Korea. (unit : % decade⁻¹)

Location	Unggi (42.32°N 130.40°E)	Sinuiju (40.10°N 124.38°E)	Pyeon-yang (39.02°N 125.82°E)	Kang-nung (37.75°N 128.90°E)	Seoul (37.57°N 126.97°E)	Pohang (36.05°N 129.38°E)	Kwangju (35.15°N 126.90°E)	Jeju (33.52°N 126.53°E)
1985-2009								
LRM(0)	0.80	1.01	1.11	1.44	1.36	1.15	1.15	1.27
LRM(1)	0.56	0.79	0.91	1.11	1.16	1.02	0.99	1.11
1997-2009								
LRM(0)	-0.50	-0.53	-0.55	0.34	0.40	-0.75	-0.62	-0.04
LRM(1)	-0.44	-0.55	-0.54	0.27	0.32	-0.70	-0.53	0.02

*LRM(0) : Deseasonal Regression, LRM(1) : Regression Model removed by natural oscillations of Seasonal, QBO and Solar Cycle.

2010)을 함께 분석하였다. 일본은 3개의 관측 지역에 대해서 1985년 이전부터 관측이 시작되어 왔으나 서울과의 비교를 위해 1985년부터 2009년까지의 각 월평균 오존전량의 연변화를 Fig. 9(a)에 나타냈다. 나하를 제외한 3개 지점의 연변화 경향은 거의 같으나 고위도로 갈수록 연 변화의 진폭이 증가함을 알 수 있다. 그리고 연변화는 봄철에서 그 차이가 크게 나타나고 있다. 1985년부터 2009년까지 25년간의 연평균 값은 삿포로, 서울, 쓰쿠바, 그리고 나하의 순으로 351, 323, 309, 265DU로 각각 나타나 저위도로 갈수록 오존전량의 연평균값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 월평균 오존전량의 최대값은 4개 지점 모두 봄철에 나타나고 있으며, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 그 최대값의 발생 시기가 늦어지고 있다.

같은 기간 오존전량의 경년 변화를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 1991년 필리핀 Pinatubo 화산 폭발의 영향으로 1993년도 값 (314 DU)이 제일 낮고, 1997년 (322 DU)과 최근 5년 사이 (2004~2008)에 319~325 DU로 비교적 낮은 편이며 그들의 경년 변화의 높고 낮음은 나하를 제외하고 서울과 거의 비슷함을 알 수 있다.

3.2. 연직 오존 분포

서울 월봉 오존 관측소에서는 1986년부터 Dobson 분광광도계로 오존전량과 함께 Umkehr 방법에 의해 관측이 가능한 날씨에 한하여 오존 연직분포를 관측하고 있다 (조희구, 이재원, 1990).

Table 7에서 1986~2009년까지의 층별 월평균 오존량의 기후값 (1986~2009)과 오존전량에 대한 비율(%)과 변화경향을 나타내었다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 오존층이 주로 형성되는 성층권의 19~28 km (Umkehr 4, 5번 층) 고도에서의 오존량은 143.4 DU로 전체 오존량의 44.0%를 차지하고 있다. 그리고 대류권 오존량 (1번 층, 0~10km)은 오존전량의 9.7%를 함유하고 있음

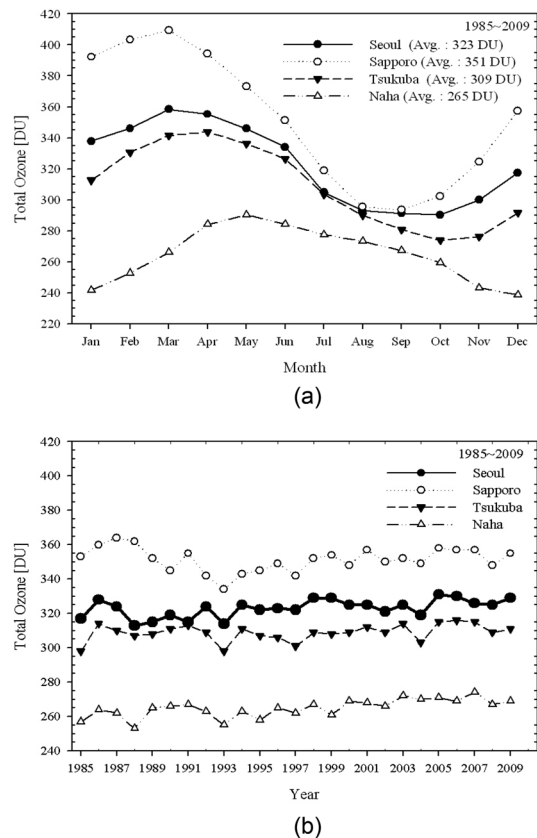


Fig. 9. (a) Annual cycles and (b) interannual variations of total ozone in Korea and Japan.

을 알 수 있다. 그리고 성층권계면 (50 km 고도) 이상은 오존이 거의 존재하지 않는다.

Fig. 10에서 오존 연직 기후값 (1986~2009년)의 월별 고도분포를 표시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이

Table 7. Annual averages and trends of ozone amount for Umkehr layers over Seoul (1986~2009).

Layers (Height, km)	Ozone amount in Umkehr layers [DU]										Total Ozone [DU]
	1 (0~10)	2 (11~15)	3 (15~19)	4 (19~24)	5 (24~28)	6 (28~33)	7 (33~38)	8 (38~43)	9 (43~48)	10 (48~)	
Average	31.6	25.6	46.5	77.3	66.1	43.2	22.3	9.0	3.2	1.4	326.1
(%)	(9.7)	(7.8)	(14.3)	(23.7)	(20.3)	(13.2)	(6.8)	(2.8)	(1.0)	(0.4)	(100.0)
Trend (% decade ⁻¹)	1.7	4.7	5.1	3.4	-1.8	-4.9	-0.3	3.2	3.4	1.5	1.6

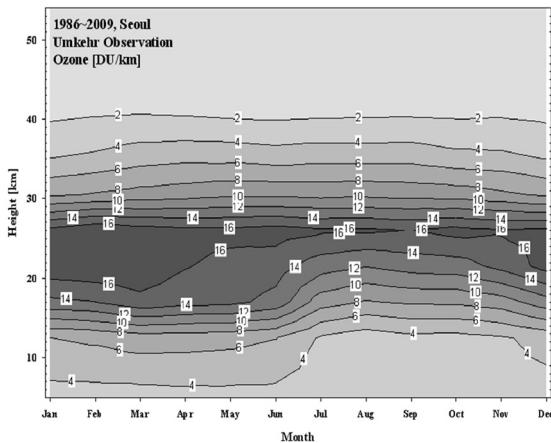


Fig. 10. Monthly cross section of average vertical distribution of ozone measured by Umkehr method over Seoul (1986~2009).

12월부터 4월까지 20~27 km 층에서 16 DU/km의 최대 오존 농도를 보이고 있다. 대류권에서 중부성층권까지는 오존의 계절변화가 뚜렷하나 상부성층권은 계절 변동이 뚜렷하지 않다. Table 7에 서울의 1986~2009년 사이의 각 층별 오존량을 사용하여 오존의 장기 변화 경향을 분석하였다. 대류권에서 하부 성층권 (0~24 km)까지 오존량은 1.8~5.1% decade⁻¹의 증가경향을 나타나고 있으나, 중부 성층권 (24~38 km)에서는 -0.3~4.9% decade⁻¹의 감소 경향을, 상부 성층권에서는 1.5~3.4% decade⁻¹의 증가경향을 보였다. 이들 결과는 과거의 연구결과 (조희구 등, 2003; 김준 등, 2005)와 유사하게 나타났다.

4. 결론 및 요약

서울에서 Dobson 분광광도계로 1985년부터 2009년까지 매일 관측한 오존량을 기초로 위성관측자료와 함께 한반도 상공의 오존층의 시공간적 변화특성을 분석하였다. 그리고 장기간의 위성관측자료 (1979~2009)를 사용하여 전구오존분포와 변동성을 밝혔다. 극외 지역 (70°N~70°S)에 대해서 전구의 오존전량은 연평균 (1979~

2009) 298 DU이고, 북반구 (0~70°N)는 307 DU, 남반구 (0~70°S)는 288 DU 로 나타났다. 전체적으로 오존전량은 저위도에서 적고 남북 양반구의 중, 고위도에서 많은 분포를 하고 있다. 나아가서 오존전량은 오호츠크 해 부근에서 전구 중에서 제일 많고 (391 DU), 적도태평양 지역에서 제일 적은 분포 (244 DU)를 하고 있다. 전 지구의 오존전량의 변화는 과거 1979~1993년 사이에는 -2.59% decade⁻¹로 뚜렷한 감소경향을 보이고, 1993년에 최저를 나타내고 1998~2003년경에는 1980년대 수준까지 증가한 후 다시 감소하였다. 최근 (2006~2009)평균 오존전량은 1980년경 (1979~1982)평균보다 -6%가 감소하였다. 전 지구의 오존전량 변화경향은 전기간 (1979~2009) 사이에 -0.93% decade⁻¹로 감소하였으나, 최근 1993~2009년 사이에는 0.95% decade⁻¹의 증가경향을 나타냈다. 이와 같이 이 연구에서도 전지구의 오존층은 1993년 경 이후에 회복기미를 확인할 수 있었다. 한반도 상공의 연평균 오존전량은 제주의 296 DU로부터 고위도로 감에 따라 증가하여 울기의 357 DU로 한반도 전지역에 대하여 연평균 오존전량은 329 DU로 전지구의 평균값에 비해 많은 편에 속한다. 그리고 한반도는 그 오존분포의 남북경도가 6 DU degree⁻¹로 비교적 큰 지역에 속한다.

서울 (1985~2009)의 연평균 오존전량은 323 DU로 과거 (1985~2000)의 평균값 (322 DU)과 거의 같고, 극대와 극소는 각각 499 DU와 225 DU가 기록되었다. 일일차 변화율은 증가의 경우가 최대 38.4%, 감소의 경우 최대 30.3%로 각각 나타났으며, 전 기간의 평균으로는 증가와 감소가 각각 5.7%와 5.2%로 예상한 바와 같이 전달에 비해 증가한 경우가 감소한 경우보다 그 변화율이 크게 나타났다. 한반도 8개 지점 (제주~울기)에서 오존전량의 장기 변화경향은 제주가 1.11% decade⁻¹, 울기가 0.56% decade⁻¹로 고위도로 가면서 그 증가경향이 감소하였다. 이 경향은 일본 3개 지점 (Sapporo, Tsukuba, Naha)에서 거의 비슷한 결과가 나타났다. 서울의 오존연직분포는 19~28 km 층에서 오존전량의 44%, 대류권 (0~10 km)에서 9.7%를 각각 함유하고 있다. 그리고 대류권에서 하부 성층권 (0~24 km)까지 층별 오존량의 장기경향은 1.8~5.1% decade⁻¹의 증가경향이 나타났으나, 중부 성층권 (24~38 km)에서는 -0.3~4.9% decade⁻¹의 감소 경향을,

상부 성층권 (39 km 이상)에서는 1.5~3.4% decade⁻¹의 증가경향을 나타냈다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (Grant No. 2006-3203) 및 BK21 과제로 수행되었습니다. 그리고 기상청 지구대기위탁관측소로서 재정적 지원에 감사하며, 매일 오존 관측에 참여한 연세대학교 대기복사 연구실 관계 연구원에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청, 2010: 2009 지구대기감시 보고서, 기상청, 213 p.
- 김준, 조희구, 이윤곤, 오성남, 백선균, 2005: 서울 상공의 최신 성층권 오존 변화 경향, *대기*, **15(2)**, 101-118.
- 조희구, 이승만, 최치영, 1989: 서울의 오존전량 변동, *한국기상학회지*, **25(1)**, 21-29.
- 조희구, 이재원, 1990: 반전 관측에 의한 서울의 연직오존분포, *한국기상학회지*, **26(4)**, 216-228.
- 조희구, 김해경, 이규태, 1994: 서울의 오존전량 변동과 경향, *한국기상학회지*, **30(2)**, 219-234.
- 조희구, 백선균, 김준, 오성남, 2003: 서울 상공의 근 인위적 오존층 변화 경향, *대기*, **13(1)**, 144-147.
- Bojkov, R. D., and V. E. Fioletov, 1995: Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years, *J. Geophys. Res.*, **100(D8)**, 16537-16551.
- Cho, H. K., J. Kim, and S. -R Chung, 1996: Stratospheric Ozone Observations in Korea, *Korean Journal of Geophysical Research, IUGG*, **24(1)**, 19-27.
- Cho, H. K., J. Kim, S. N. Oh, S. -K. Kim, S. -K. Baek, and Y. G. Lee, 2003 : A climatology of stratospheric ozone over Korea, *Kor. J. Atmos. Sci.*, **6(2)**, 97-112.
- Dhomse, S., M. Weber, I. Wohltmann, M. Rex, J. P. Burrows, 2006 : On the possible causes of recent increases in northern hemispheric total ozone from a statistical analysis of satellite data from 1979 to 2003, *Atmos. Chem. Phys.*, **6(5)**, 1165-1180.
- Fioletov, V. E., G. E. Bodeker, A. J. Miller, R. D. Mc Peters, and R. Stolarski, 2002: Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000, *J. Geophys. Res.*, **107(D22)**, 4647. doi:10.1029/2001JD001350.
- Harris, N. R. P., E. Kyro, J. Staehelin, D. Brunner, S. -B. Andersen, S. Godin-Beekmann, S. Dhomse, P. Hadjinicolaou, G. Hansen, I. Isaksen, A. J. Jarrar, A. Karpetchko, R. Kivi, B. Knudsen, P. Krizan, J. Lastovicka, J. Maeder, Y. Orsolini, J. A. Pyle, M. Rex, K. Vanicek, M. Weber, I. Wohltmann, P. Zanis, and C. Zerefos, 2008 : Ozone trends at northern mid- and high latitudes - a European perspective, *Ann. Geophys.*, **26**, 1207-1220.
- IPCC, 2007 : IPCC's Fourth Assessment Report, Climate Change 2007-The Physical Science Basis ; 기상청 번역역판, 1101 p.
- Japan Meteorological Agency (JMA), 2010: Annual Report of Ozone layer Monitoring: 2009, JMA, (and website http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/ozone_monthave_sap.html).
- Kim, J., C. -J. Park, K. -Y. Lee, D. H. Lee, H. -K. Cho, Y. -O. Kim, G. R. Cho, and J. H. Park, 1997: Rocket soundings of ozone profiles in the stratosphere over the Korean Peninsula, *J. Geophys. Res.*, **102(D13)**, 16121-16126.
- Kim, J., S. J. Lee, H. -K. Cho, B. K. Park, J. D. Lee, H. -D. Choi, and G. R. Cho, 1998: Rocket measurement of middle atmospheric ozone concentration profile by KSR-II, *J. Astro. Space Sci.*, **15(2)**, 391-400.
- Newchurch, M. J., E. Yang, D. M. Cunnold, G. C. Reinsel, J. M. Zawodny, and J. M. Russell III, 2003: Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss : First stage of ozone recovery, *J. Geophys. Res.*, **108(D16)**, 4507. doi:10.1029/2003JD003471.
- London, J., 1985 : The observed distribution of atmospheric ozone and its variations, *Ozone in the free atmosphere*, Edited by R. C. Whitten and S. S. Prasad, pp11-80, Van Nostrand Reinhold Co.
- Staehelin, J., N. R. P. Harris, C. Appenzeller, and J. Eberhard, 2001: Ozone Trends : A Review, *Reviews of Geophysics*, **39(2)**, 231-290.
- Weatherhead E. C., and S. B. Andersen, 2006: The search for signs of recovery of ozone layer, *Nature*, 441, 39-45.
- World Meteorological Organization (WMO), 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion-1998, Rep. 44, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.
- World Meteorological Organization (WMO), 2010: Scientific Assessment of Ozone Depletion-2010, Rep. 47, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.