

## 돛슨 분광광도계를 이용한 서울 상공의 오존층 감시 및 장기변화 경향(1985~2017)

박상서<sup>1)</sup> · 조희구<sup>2)</sup> · 구자호<sup>2)</sup> · 임현광<sup>2)</sup> · 이하나<sup>2)</sup> · 김준<sup>2)</sup> · 이윤곤<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>2)</sup>연세대학교 대기과학과,  
<sup>3)</sup>충남대학교 대기과학과

(접수일: 2018년 11월 22일, 수정일: 2018년 12월 26일, 게재확정일: 2019년 1월 6일)

## Monitoring and Long-term Trend of Total Column Ozone from Dobson Spectrophotometer in Seoul (1985~2017)

Sang Seo Park<sup>1)</sup>, Hi Ku Cho<sup>2)</sup>, Ja-Ho Koo<sup>2)</sup>, Hyunkwang Lim<sup>2)</sup>,  
Hana Lee<sup>2)</sup>, Jhoon Kim<sup>2)</sup>, and Yun Gon Lee<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>3)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Chungnam National University, Daejeon, Korea

(Manuscript received 22 November 2018; revised 26 December 2018; accepted 6 January 2019)

**Abstract** Since 1985, the Dobson Spectrophotometer has been operated at Yonsei University, and this instrument has monitored the daily representative total ozone in Seoul. Climatological value for total ozone in Seoul is updated by using the daily representative observation data from 1985 to 2017. After updating the daily representative total ozone data, seasonal and inter-annual variation of total ozone in Seoul is also estimated after calculating inter-comparison between ground (Dobson Spectrophotometer) and satellite [Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) and Ozone Monitoring Instrument (OMI)] observations. The global average of total ozone measured by satellite is 297 DU, and its recent amount is about 3.5% lower than the global amount in 1980s. In Seoul, daily representative total ozone is ranged from 225 DU to 518 DU with long-term mean value of 324.3 DU. In addition, monthly mean total ozone is estimated from 290 DU (October) to 362 DU (March), and yearly average of total ozone have been continuously increased since 1985. For the long-term trend of total ozone in Seoul, this study is considered the seasonal variation, Solar Cycle, and Quasi-Biennial Oscillation. In addition to the natural oscillation effect, this study also considered to the long-term variation of sudden increase of total ozone due to the secondary ozone peak. By considering these natural effects, the long-term total ozone trends from 1985 to 2017 are estimated to be 1.11~1.46%/decade.

**Key words:** total ozone, ozone trend, Dobson spectrophotometer

\*Corresponding Author: Yun Gon Lee, Department of Atmospheric Sciences, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea.  
Phone: +82-42-821-7101, Fax: +82-42-821-8891  
E-mail: yglee2@cnu.ac.kr

## 1. 서 론

지구 생태계에 있어서 태양으로부터의 유해자외선 유입은 매우 위협적인 요소로 알려져 있다. 유해자외선의 대부분이 지표에 도달하지 않는 이유는 성층권에 존재하는 오존층의 존재 때문이다. 그러나 Molina and Rowland (1974)에 의해서 염화불화탄소(chlorofluorocarbons; CFCs)가 오존 파괴 메커니즘에 기여할 수 있다는 연구가 나온 뒤로 실제 CFCs에 의해 오존층이 파괴되고 있음이 알려졌으며, 그 이후로 전구적인 감시와 보고가 지속적으로 이루어져 왔다(WMO, 1985). 특히 CFC를 대표적인 물질로 하는 Ozone depleting substances (ODSs)에 대해서는 1987년 이루어진 몬트리올 의정서에 의해서 전세계 대부분의 나라에서 배출 규제가 이루어지게 되었다. 이러한 노력으로 성층권에서의 ODSs 농도는 최근 들어서 차츰 줄어들기 시작하였으며(Anderson et al., 2000), 최근에는 오존층의 회복 경향에 대한 분석 연구 결과(Weatherhead and Andersen, 2006)나 오존층의 완전 회복에 대한 예측 연구(Schrope, 2000; Newman et al., 2009) 등이 나오기 시작하였다. 오존층 회복 경향에 대하여 보고가 이루어지고 있기는 하지만 여전히 과거 오존층의 농도에 비해서는 여전히 낮을 뿐 아니라 최근에도 극 지역에서는 계속해서 오존홀이 관측되고 있기에(Kramarova et al., 2014) 지속적인 오존층 감시 및 연구는 여전히 중요하다.

성층권 오존층의 관측은 오존전량의 관측을 통해 주로 수행되어 왔다. 이러한 이유는 오존전량 중 90%가 성층권에 존재하기 때문이다. 오존층의 감시를 위하여 지상 오존관측소를 1957년부터 대규모로 설치한 이후로, 전구에 다양하게 지상 관측소가 설치되어 현재까지 운용되고 있다. 또한 1979년부터는 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) 위성으로부터 오존전량을 관측하게 되면서, 지상 관측소에서 가지는 공간 범위의 한계를 극복하고 전구 규모로 연속적으로 관측하게 되었다. 이러한 다양한 관측 자료를 활용하여 위경도에 따른 오존전량의 변동성 및 장기변화 경향에 대한 연구가 수행되었다(Bojkov and Fioletov, 1995; Solomon, 1999; Fioletov et al., 2002; Newchurch et al., 2003; Balis et al., 2007).

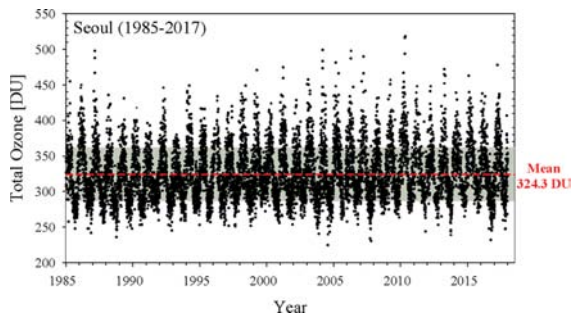
한반도 상공의 오존층 감시를 위하여 월봉(月峰) 오존관측소에서는 돋슨(Dobson) 분광광도계(Beck No. 124)를 통해 1985년부터 매일 오존전량의 관측을 수행하여 왔으며, 관측 자료는 여러 연구 결과에 인용되어 발표되어 왔다(e.g., Cho et al., 2003; Kim et al., 2005; Balis et al., 2007; Park et al., 2012). 본 연구에서는 과거 Park et al. (2011)에서 보고한 2009년까지의 오존전량 장기변화 경향 이후의 관측 자료를 이용

하여 한반도 상공 및 서울 상공의 오존전량 최신 변화 경향에 대해서 분석하고자 한다. 또한, 최근 들어 두드러지게 나타나는 전구 규모의 오존층 회복과 관련하여 한반도 상공에서도 동일한 경향이 나타나는지 여부와 그 회복 경향이 한반도 지역 과거 선행 연구와 비교하여 오존층 파괴 이전의 수준으로 회복되고 있는가를 확인하고자 한다.

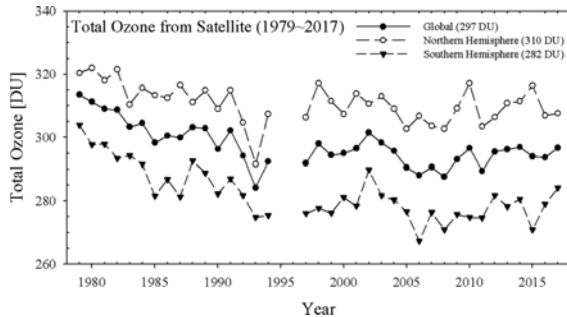
## 2. 자료 및 방법

연세대학교 과학관에 위치하고 있는 월봉(月峰) 오존관측소(37.57°N, 126.98°E)는 세계기상기구 지구대기감시(WMO/GAW)의 전구오존관측시스템(GO3OS) 관측소(Station Number 252) 중 하나로 등록되어 있으며, 수행한 관측 자료는 매월 일 대표값을 포함하여 꾸준히 보고가 이루어지고 있다. 일 결과를 바탕으로 하는 한반도의 대표적인 오존전량 관측 지점으로 알려져 있으며, 한반도 상공의 오존층 변화 연구에 활용되어 꾸준히 그 현황과 장기 경향에 대해서 보고가 이루어졌다(Cho et al., 1989, 2003; Kim et al., 2005; Park et al., 2011).

돋슨 분광광도계를 이용한 오존전량 관측은 일 3회 관측을 기본적으로 수행하며, 그 시기는 오전, 정오, 오후에 각각 1회씩이다. 돋슨 분광광도계의 관측법은 직달일사법(Direct Sun method; DS)과 천정 산란일사법(Zenith Sky method; ZS)으로 구분되며, 각 관측 조건에 따라서 2가지 관측 방법을 번갈아 수행하게 된다. 예를 들어 관측을 수행하는 동안 태양 방향에 대해서 구름의 영향이 없을 경우에는 두 가지 관측 방법으로 1회씩 관측하게 된다. 그러나 DS 관측을 위한 충분한 직달 일사량이 부족한 경우에 대해서는 ZS 관측을 2회 수행하게 된다. 측기의 한계로 인한 영향으로 강수가 있을 경우에는 관측이 불가하나, 강수에 의한 결측이 없을 경우에는 하루 6회의 관측 자료가 생산되며, 이 중 관측 자료의 우선순위에 따라서 일 대표값이 선택된다. 일 대표값의 선택은 DS 관측이 ZS 관측보다 우선하며, DS 관측에 대해서는 얇은 구름의 유무와 관측 시기의 태양천정각에 따라서 우선순위가 정해진다. 그리고 DS 관측이 없는 날에 대해서는 ZS 관측에 대해서만 구름 상태와 태양천정각에 따라 우선순위를 정하여 일 대표값을 결정한다. Figure 1은 관측에 의해서 산출된 서울 지역 오존전량의 일 대표값 시계열이다. 그림에서 보는 바와 같이 1985년부터 수행된 관측 기간 동안 오존전량은 뚜렷한 계절 변동성이 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 중위도 오존전량 변동성이 성층권 부근의 남북방향 역학적 수송 과정에 의존하기 때문이다(London, 1985). 서울 지역 오존전량은 전체 기간 일 대표값 평균이



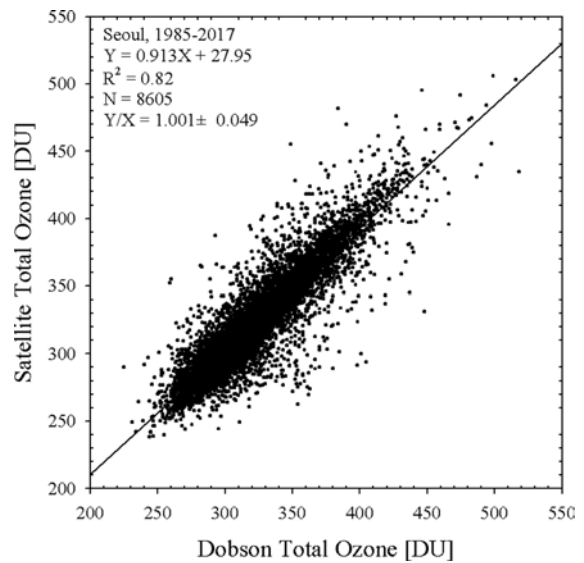
**Fig. 1.** Timeseries of daily representative total ozone, and its temporal variation (gray shade: 1-standard deviation) in Seoul measured by Dobson spectrophotometer (1985~2017).



**Fig. 2.** Inter-annual variation of yearly averaged total ozone in global, Northern Hemisphere, and Southern Hemisphere from satellite measurements.

324.3 Dobson Unit (DU)로 나타났으며(표준편차: 37.5 DU), 최소 225 DU(1994년 7월 29일) 에서 최대 518 DU(2010년 5월 11일)까지의 범위를 가진다.

전구 규모의 오존전량 변동성을 확인하기 위하여 위성 자료를 활용하였다. 오존전량의 위성 관측은 1979년에 Nimbus-7에 탑재된 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) 이후로, Meteor-3(1991년 발사), Earth-Probe Satellite(EP-TOMS, 1996년 발사), Ozone Monitoring Instrument(OMI, 2004년 발사), 그리고 Ozone Monitoring and Profiler Suite(OMPS, 2017년 발사) 등을 통해서 수행되고 있다. 이들 관측 자료는 모든 관측값에 대해서 격자화하여 Level 3로 제공되고, 주요 지상관측소가 있는 지점에 대해서는 overpass time 자료를 제공하고 있다. Figure 2는 1979년부터 2017년까지 위성으로부터 관측한 전구, 북반구, 남반구 평균 오존전량의 경년 변화를 나타낸 것이다. 전구 규모에서 오존 감소가 나타난 1980년대 이후 전구 평균 오존전량은 장기적으로 꾸준히 감소하고 있다가 2000년 전후에 일부 경년 변동으로 증가하기도 하면서 최근 들어 그 감소 경향이 둔화된 것을 확인할 수



**Fig. 3.** Intercomparison of daily representative total ozone between Dobson spectrophotometer and satellite measurements (1985~2017).

있다. Park et al. (2011)에서는 1979년부터 2009년까지 전구 오존전량 평균값은 298 DU로 제시되었다. 본 연구에서 1979~2017년까지의 39년 간의 전구 오존전량의 평균은 297 DU로 1979~2009년까지의 값에 비해서 1 DU가 감소하였다. 전구 오존전량의 평균값 만을 비교하는 경우, 위성 관측을 시작한 이후 오존은 지속적인 감소 경향을 보이는 것으로 생각될 수 있다. 그러나 2014~2017년의 전구 평균은 295 DU로 2006~2009년(290 DU)에 비해 5 DU가 증가하였다. 또한 북반구 평균(2006~2009 평균 306 DU → 2014~2017 평균 311 DU)과 남반구 평균(2006~2009 평균 273 DU → 2014~2017 평균 279 DU)에 대해서도 2006~2009년에 비해 최근 4년의 평균이 각각 5 DU, 6 DU의 증가가 나타난 것을 고려하면, 2000년대 이후 오존층 감소의 둔화 및 일부 회복 경향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 Weatherhead and Andersen (2006)에서 제시한 전 지구 오존이 회복 경향으로 돌아섰다는 결과와 일치하는 것이다. 그러나 여전히 1980년대 초반(1980~1985년 기준 전구 306 DU, 북반구 317 DU, 남반구 293 DU) 오존전량 평균값에 비해 전구에서는 3.5%, 북반구 2.0%, 그리고 남반구 4.8% 정도 적은 값을 보이고 있어 아직까지 1980년대 초반 이전의 오존전량으로 회복되지는 않았다.

Figure 3는 서울 지역의 오존 전량에 대해서 Level 3 위성 자료와 돕슨 분광광도계를 비교한 결과이다. 오존전량에 대해서 위성과 지상 관측 사이에 단기간

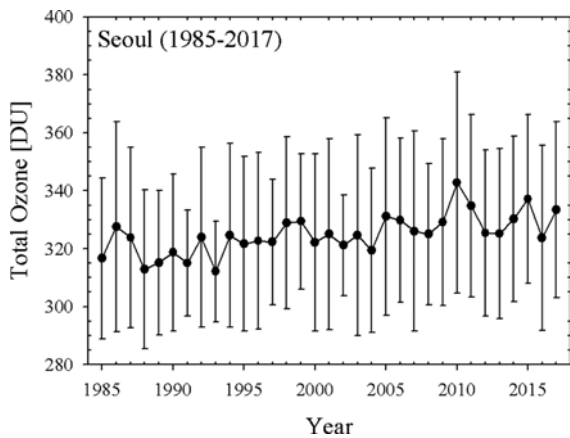


Fig. 4. Inter-annual variation of total ozone in Seoul from Dobson spectrophotometer.

의 불일치성이 존재할 수 있으나, 33년 간의 일 대표 값 장기 비교를 했을 경우에 두 관측자료 사이의 평균 비는  $1.001 \pm 0.049$ 로 0.1%의 편향성과 4.9%의 변동성 범위에서 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 선형회귀 결과 또한 상관결정계수( $R^2$ )가 0.82로 장기간 비교에 대해서 비교적 안정적으로 값이 산출되고 있는 것을 알 수 있다.

### 3. 서울 오존전량의 변동성 및 장기변화 경향

Figure 4는 서울 오존전량의 경년 변화를 나타낸 그림이다. 서울 지역의 연평균 오존전량에 대해서 2010년에 극대값 343 DU가 나타났으며, 극소값은 1988년과 1993년에 312 DU로 나타났다. 연평균을 기준으로 할 경우, 극대값과 극소값의 차이는 31 DU로 서울 지역 1985~2017년의 장기 기후평균값인 약 325 DU를 기준으로 9.6%의 경년 변동성을 가지는 것으로 나타났다. 경년 변화의 장기 경향을 볼 경우, 최소 연평균 오존전량의 대표적인 5개년은 1985, 1988, 1989, 1991, 1993년으로 나타났다. 1970년대부터 시작하여 1980년대 중반까지의 심각한 오존층 파괴 현상이 한반도 상

공의 오존전량에도 영향을 미친 것으로 보인다. 그리고 몬트리올 협약이 발효된 1989년 이후에도 장기적으로 1990년대까지 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 반대로 2009년 이후에는 325 DU보다 낮은 연평균 오존전량은 2016년(324 DU)만이 해당하여 상대적으로 한반도 주변의 오존전량이 과거보다 높아졌음을 확인할 수 있다. 경년 변화를 통해서 1980년대 후반의 오존전량과 2010년 이후의 오존전량의 평균을 살펴볼 경우, 각각 319 DU와 332 DU로 약 30년 기간 동안 오존전량의 연평균이 4.1% 증가하였다. 이러한 경년 변화를 통해 최근 서울 상공의 오존전량은 1980년대 수준으로 회복하였으며, 꾸준히 증가 경향인 것을 확인할 수 있다.

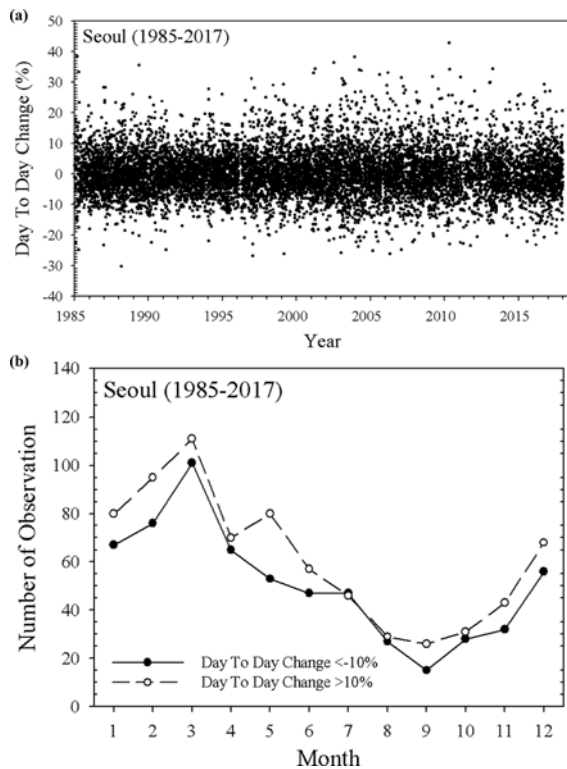
Table 1은 서울지역 오존전량의 월평균 기후값을 1985~2017년과 1985~2009년으로 나누어 비교한 결과이다. 1985~2017년까지 33년 기간의 오존전량 월평균 값은 10월에 290 DU에서 3월에 362 DU를 보이며, 오존전량 연교차는 72 DU 임을 알 수 있다. Park et al. (2011)에서 제시한 1985~2009년까지의 오존전량 월평균 값과 비교할 경우 각 월에서 최대 3 DU까지 증가한 것으로 나타났으며, 평균적으로 2 DU가 증가하였다. 특히 월평균 오존전량의 최근 증가가 1월과 10월을 제외하고는 모든 월에 대해서 나타나고 있으며, 전구 오존전량의 회복 및 증가경향이 서울 지역 오존전량 증가에 전체적으로 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

오존전량의 장기적인 변동은 기본적으로 전구 규모의 오존층 회복 경향과 오존 생성/파괴 메커니즘의 균형과 관계되지만, 단기적인 변동성은 대류권 오존의 생성/파괴와 성층권 역학 수송 과정의 강도에 따라서 변화할 수 있다. 특히 중위도 오존전량의 단기 변화는 성층권 역학 수송 과정에 많은 영향을 받게 된다. 서울 상공 오존전량의 장기적인 변동 뿐만 아니라 단기적인 변동성을 확인하기 위하여 Fig. 5는 오존전량의 일일 변동성 시계열과 그 발생 빈도의 계절 변화를 나타낸 것이다. 일일 변동성은 인접한 두 날짜 사이에 관측한 오존전량의 상대적인 변화량으로 두 날짜에 연속된 오존전량의 관측값이 존재할 경우, 전날 오존전량에 대해서 그 다음날의 오존전량의 상대적인

Table 1. Climatology of monthly averaged total ozone in Seoul since 1985.

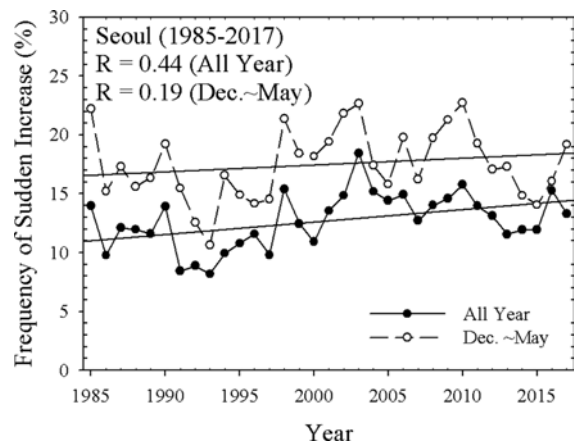
Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep	Oct.	Nov.	Dec.	Avg.
Avg. (1985~2017)	338	349	362	359	347	337	308	295	293	290	302	321	325
Stdev. (1985~2017)	14.5	17.6	17.7	14.7	13.2	12.8	11.4	8.3	7.8	9.7	11.1	13.7	6.8
Avg. (1985~2009)	338	346	359	356	346	334	305	293	291	290	300	318	323
Stdev. (1985~2009)	15.6	15.9	17.4	13.7	12.9	11.2	9.9	7.4	7.5	9.5	10.3	11.9	5.4
Diff.	0	3	3	3	1	3	3	2	2	0	2	3	-

\*Diff.: Difference of total ozone between average of 1985~2017 and average of 1985~2009.



**Fig. 5.** (a) Timeseries of ‘day to day change of total ozone’ and (b) its monthly frequency larger than -10% (solid line) and less than 10% (dashed line).

변화율로 정의하였다. 서울 지역 오존전량의 일일 변동성은 최대 -30.3%와 38.3% 사이에서 변동성을 보이는 것으로 나타났으며,  $\pm 10\%$ 와  $\pm 5\%$  이상의 일일 변동성을 보이는 자료는 해당 자료 중 각각 14.0%, 41.2%로 나타났다. 특히 Fig. 5b와 같이  $\pm 10\%$  일일 변동성을 초과하는 발생빈도를 월별로 살펴보면, 계절에 따라 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 일일 변동성이  $\pm 10\%$ 보다 큰 경우를 기준으로 했을 때 각각 감소 및 증가의 일일 변동성은 3월에 감소 101회, 증가 111회로 최대 빈도가 나타났으며, 9월에 감소 16회, 증가 26회로 최소 빈도가 나타났다. 물론 계절에 따른 관측 횟수의 차이도 영향을 줄 수 있지만 전체적으로 봄철에 일일 변동성이 크고 가을철에 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Park et al. (2011)에서 보인 일일 변동성의 월평균 통계 결과와 정성적으로 유사함을 알 수 있다. 또한 이러한 일일 변동성의 계절적 차이는 월평균 오존전량의 계절변동과 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 북반구 오존전량의 변동성은 대기 대순환에 의한 저위도에서부터 고위도로의 오존 수송과 밀접하게 관련되는데, 겨울과 봄철



**Fig. 6.** Long-term variation of frequency of sudden increase of total ozone in Seoul.

북반구에서 대기 대순환 흐름이 강하게 일어나기 때문에 중위도 오존전량은 겨울과 봄철에 높게 나타나게 된다(London, 1985). 단기 오존전량 변동성 역시 대기 대순환 강도에 따라 크게 변화될 수 있으며, 앞에서 보인 일일 변동성에서도 가을철에 최소로, 봄철에 최대로 나타나는 것을 설명할 수 있다.

일일 변동성 변화 중에 증가에 대한 현상은 Park et al. (2012)에서 설명한 것과 같이 오존전량의 급증 현상(Sudden Increase of total ozone)으로 일부 제시된 바 있다. 특히 성층권 하부/대류권 상부(Upper Troposphere/Lower Stratosphere; UT/LS)에서의 2차 오존피크는 성층권 오존층의 변동과는 다르게 중위도의 UT/LS 영역으로 극지역의 성층권 공기가 관입하여 발생하는 것으로 설명하고 있다(Kim et al., 2002; Lemoine, 2004; Hwang et al., 2007; Park et al., 2012). 그리고 이러한 2차 오존피크 발생의 계절 변동 및 경년 변동이 중위도 지역 오존전량의 장기 경년 변화에 영향을 줄 수 있다는 것이 제시되었다(Park et al., 2012). 장기적인 오존전량 급증 현상의 빈도를 확인하기 위하여 Fig. 6에서는 전체 관측 횟수 중 오존전량 급증 현상의 상대적인 빈도에 대한 경년 변화를 확인하였다. 오존전량 급증 현상의 정의는 Park et al. (2012)에서 제시한 3일 이내에 오존전량 일 대표값의 변동이 24.1 DU 이상 증가된 경우로 사용하였다. Figure 6에서 나타난 바와 같이, 오존전량의 급증 현상은 선형 회귀를 통한 장기 경향을 볼 때 전체적으로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 모든 계절의 자료를 선택했을 경우 오존전량 급증 현상의 장기 빈도 경향은 1.1%/decade로 나타났으며, 겨울과 봄철에 대해서 한정을 할 경우에도 0.6%/decade의 빈도 증가 경향이 나타났다. 따라서 이러한 오존전량 급증 현상 증가가

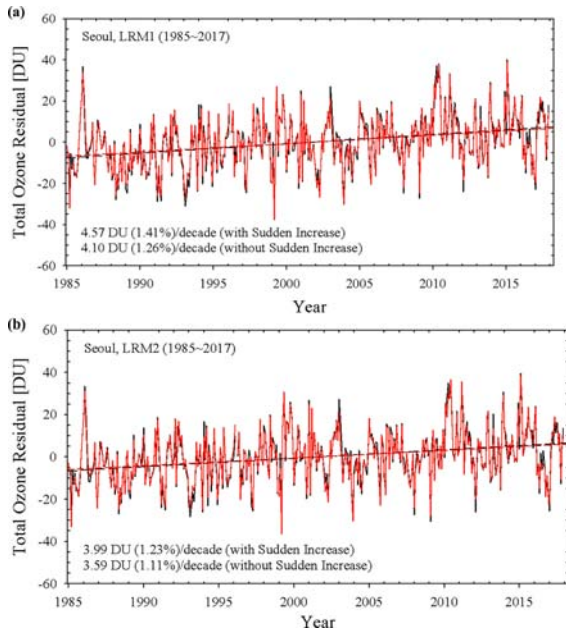


Fig. 7. Long-term trend of total ozone with (black line) and without sudden increase of total ozone (red line) estimated by (a) LRM1, and (b) LRM2 in Seoul.

오존전량의 최근 증가 경향을 강화시킬 수 있을 것으로 예상된다.

Figure 7은 서울 지역의 오존전량 자료를 바탕으로 하여 1985년부터 2017년까지의 장기변화 경향을 나타낸 것이다. Figure 6에서 분석한 바와 같이 오존전량의 급증 현상은 성층권 오존의 회복 경향이 아니라 UT/LS에서 발생하는 2차 오존피크 현상에 의한 영향이다. 따라서 오존층의 장기 회복 경향을 보다 정확히 파악하기 위하여 오존전량 급증 현상의 고려 유무를 모두 포함하여 분석하였다. 오존전량은 뚜렷한 계절 변동성을 가지기 때문에 장기변화 경향을 분석할 때에는 계절 효과를 우선 제거하여 분석하였다(LRM1) (Cho et al., 2003; Park et al., 2011). 그리고 계절 효과에 추가하여 태양 활동(Solar Cycle; SC)과 성층권의 준 2년주기(Quasi-Biennial Oscillation; QBO)를 고려한 회귀모형(LRM2) 또한 장기변화 경향의 분석을 위해 동시에 사용하였다. 선행 연구들(WMO, 1999; Kim et al., 2005; Park et al., 2012)에서는 SC에 대해서 시차 상관을 고려하지 않았으며, QBO에 대해서는 10개월의 시차 상관을 고려한 회귀모형을 제시한 바 있다. 본 연구에서도 자연 진동에 대해 동일한 시차 상관을 가정하여 진행하였다.

LRM1에 대해서 1985년부터 2017년까지 33년 동안 서울 지역 오존전량의 장기변화 경향은 1.41%/decade

로, Park et al. (2011)에서 제시한 1985~2009년의 1.36%/decade와 유사한 수준으로 나타났다. 그러나 1985년부터 2000년까지의 0.77%/decade (Cho et al., 2003)에 비해서는 증가 경향이 2배 높아졌음을 알 수 있다. 이러한 장기변화 경향의 증가 추세는 Nair et al. (2013)에서 제시한 유럽 지상관측 지점에서의 회복 경향 증가 추세에 비해서는 다소 높은 것으로 보이나, Chhade et al. (2014)에서 나타난 동위도대에서의 장기 추세 경향과는 유사한 수준으로 나타났다. 오존의 급증 현상을 제거한 자료를 사용했을 경우에는 1.26%/decade로 나타나, 급증 현상의 고려 유무에 의한 장기 경향의 차이는 0.15%/decade로 나타났다. 이는 Park et al. (2012)에서 제시했던 0.30%/decade에 비해서는 약하지만, 오존전량 급증 현상의 빈도 변화가 장기적인 오존전량의 추세 분석에 영향을 줄 수 있음을 보여주는 것이다.

LRM2에 대해서는 오존 급증 현상을 제거하기 전과 후에 대해서 각각 1.23%/decade와 1.11%/decade로 나타났으며, 오존의 급증 현상에 대한 효과는 0.12%/decade이다(Fig. 7b). 이러한 장기변화 경향 결과는 LRM1과 마찬가지로 Park et al. (2011)과 Park et al. (2012)에서 SC와 QBO를 고려한 회귀모형일 때의 서울 지역 오존전량의 장기변화 경향 결과와 매우 유사한 값을 보이고 있으며, 2000년대 초반까지의 자료만을 이용하여 분석한 선행연구 결과에 비해서는 오존전량의 증가 경향이 더 강해졌음을 확인할 수 있다 (Cho et al., 2003). Chipperfield et al. (2017)에서 북반구 중위도 지역에 대해서 1996년 이후로  $0.4 \pm 1.0\%$ /decade의 회복 경향이 나타나고 있다는 결과를 고려하면, 한반도 상공 오존전량 증가경향의 강화는 전구의 오존회복 경향과 같은 특징으로 보여지나, 2010년대 이후에는 증가 추세의 속도가 안정화된 것으로 보인다. 앞서 Fig. 2에서 보인 바와 같이 북반구 오존전량이 1980년대에 비해서 2.0%가 여전히 낮은 값을 보인다고 가정할 경우, 위의 장기변화 경향을 적용할 때 1980년대의 오존전량을 회복하기 위해서는 20년 정도의 시간이 더 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 요약 및 결론

서울 연세대학교에서 1985년부터 돋슨 분광광도계를 이용하여 꾸준히 관측이 이루어지고 있는 오존전량 자료를 이용하여 2017년까지의 새로운 장기 기후 값에 대하여 보고하고 장기변화 경향에 대해서 분석을 수행하였다. 서울 돋슨 분광광도계는 여러 위성 자료와의 비교 검증을 수행한 결과를 볼 때 장기적으로 안정적인 자료 정확도를 보이고 있으며, 비율 기준으로  $1.001 \pm 0.049$ 로 나타났다. 서울의 오존전량은 약



325 DU의 장기 기후값을 가지며, 312~343 DU의 경년 변화와 290~362 DU의 계절변동 범위를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 경년 변화와 월평균 오존전량을 볼 때 최근 들어 오존전량이 대체적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 월평균 오존전량은 모든 계절에서 2009년까지의 월평균 오존전량에 비해 0~3 DU가 증가한 것으로 나타나, 전구 오존층의 회복 경향에 의해서 모든 계절에 대해서 서울 오존전량이 증가한 것으로 보여진다.

단기간의 변동성을 보기 위하여 일일 변동성에 대해서 확인한 결과 서울 지역 오존전량의 일일 변동성은 -30.3~38.3%의 범위에서 일일 변동성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 일일 변동성에 대해서 계절 의존성이 존재하고 있음을 확인하였다. 성층권 오존의 역학적 수송 강도의 변화로 일일 변동성이 큰 계절은 봄철이었으며 가을철은 작게 나타나는 것을 확인하였다.

오존전량의 장기변화 경향을 확인하기 위하여 오존전량에 대해서 선형회귀모형을 통해 장기변화 경향을 확인하였다. 장기변화 경향에서 성층권의 회복 경향을 보다 정확하게 확인하기 위하여 UT/LS의 2차 오존피크에 의한 오존전량 급증 현상에 대한 고려도 함께 하였다. 선형회귀모형은 계절변동만을 고려한 LRM1과 계절변동 및 SC, QBO를 고려한 LRM2에 대해서 각각 계산하였다. 이를 통해 LRM1과 LRM2에 대해서 1985~2017년까지의 서울의 오존전량 장기변화 경향은 각각 1.41%/decade와 1.23%/decade로 나타났으며, 오존전량 급증 현상을 고려하여 제거했을 때에는 각각 1.26%/decade와 1.11%/decade로 변화하였다. 이러한 회복 경향은 2000년대 초반에 비해서는 증가 추세가 강화된 것이지만, 2009년까지 분석한 장기변화 경향과는 유사한 수준의 회복 경향이 계산된 것이다. 그리고 오존전량의 급증 현상의 빈도 변화에 의하여 0.12~0.15%/decade의 오존전량 회복 경향이 더 과다 모의가 될 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 과제(과제번호: 2017R1C1B1005874, 2018R1C1B6008223)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 기상청 지구대기위탁관측소로 지정된 연세대학교 월봉관측소에서의 관측을 위한 기상청 위탁 관측망의 재정적 지원과 오존 관측에 참여한 연세대학교 대기복사연구실 연구원 일동에게 감사드립니다.

## REFERENCES

- Anderson, J., J. M. Russell III, S. Solomon, and L. E. Deaver, 2000: Halogen Occultation Experiment confirmation of stratospheric chlorine decreases in accordance with the Montreal Protocol. *J. Geophys. Res.*, **105**, 4483-4490, doi:10.1029/1999JD901075.
- Balis, D., M. Kroon, M. E. Koukouli, E. J. Brinksma, G. Labow, J. P. Veefkind, and R. D. McPeters, 2007: Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S46, doi:10.1029/2007JD008796.
- Bojkov, R. D., and V. E. Fioletov, 1995: Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years. *J. Geophys. Res.*, **100**, 16537-16551.
- Chehade, W., M. Weber, and J. P. Burrows, 2014: Total ozone trends and variability during 1979-2012 from merged data sets of various satellites. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 7059-7074, doi:10.5194/acp-14-7059-2014.
- Chipperfield, M. P., S. Bekki, S. Dhomse, N. R. P. Harris, B. Hassler, R. Hossaini, W. Steinbrecht, R. Thiéblemont, and M. Weber, 2017: Detecting recovery of the stratospheric ozone layer. *Nature*, **549**, 211-218, doi:10.1038/nature23681.
- Cho, H. K., S. M. Lee, and C. Y. Choi, 1989: The seasonal variations of total amounts of ozone at Seoul. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **25**, 21-29.
- \_\_\_\_\_, 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**, 97-112 (in Korean with English abstract).
- Fioletov, V. E., G. E. Bodeker, A. J. Miller, R. D. McPeters, and R. Stolarski, 2002: Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4647. doi:10.1029/2001JD001350.
- Hwang, S.-H., J. Kim, and G.-R. Cho, 2007: Observation of secondary ozone peaks near the tropopause over the Korean peninsula associated with stratosphere-troposphere exchange. *J. Geophys. Res.*, **112**, D16305. doi:10.1029/2006JD007978.
- Kim, J., H.-K. Cho, Y. G. Lee, S. N. Oh, and S.-K. Baek, 2005: Updated trends of stratospheric ozone over Seoul. *Atmosphere*, **15**, 101-118 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. K., H. W. Lee, J. K. Park, and Y. S. Moon, 2002: The stratosphere-troposphere exchange of ozone and aerosols over Korea. *Atmos. Environ.*, **36**, 449-463.
- Kramarova, N. A., E. R. Nash, P. A. Newman, P. K. Bhartia, R. D. McPeters, D. F. Rault, C. J. Seftor, P. Q. Xu, and G. J. Labow, 2014: Measuring the Antarctic ozone hole with the new Ozone Mapping and Pro-

- filer Suite (OMPS). *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 2353-2361, doi:10.5194/acp-14-2353-2014.
- Lemoine, R., 2004: Secondary maxima in ozone profiles. *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 1085-1096.
- London, J., 1985: *The observed distribution of atmospheric ozone and its variations*. Ozone in the free atmosphere, New York, Van Nostrand Reinhold Co., 11-80.
- Molina, M. J., and F. S. Rowland, 1974: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, **249**, 810-812.
- Nair, P. J., and Coauthors, 2013: Ozone trends derived from the total column and vertical profiles at a northern mid-latitude station. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 10373-10384, doi:10.5194/acp-13-10373-2013.
- Newchurch, M. J., E.-S. 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**, 4507. doi:10.1029/2003JD003471.
- Newman, P. A., and Coauthors, 2009: What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated?. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 2113-2128.
- Park, S. S., J. Kim, N. Cho, Y. G. Lee, and H. K. Cho, 2011: The variations of stratospheric ozone over the Korean Peninsula 1985~2009. *Atmosphere*, **21**, 349-359 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, J. Kim, H. K. Cho, H. Lee, Y. Lee, and K. Miyagawa, 2012: Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. *Atmos. Environ.*, **47**, 226-235, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.11.011.
- Schrope, M., 2000: Successes in fight to save ozone layer could close holes by 2050. *Nature*, **408**, 627.
- Solomon, S., 1999: Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history, *Rev. Geophys.*, **37**, 275-316.
- Weatherhead, E. C., and S. B. Andersen, 2006: The search for signs of recovery of ozone layer, *Nature*, **441**, 39-45.
- WMO, 1985: Atmospheric Ozone. World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone Research and Monitoring Project (GORMP) - No. 16, 520 pp.
- \_\_\_\_\_, 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone Research and Monitoring Project (GORMP) - No. 44, 558 pp.