Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 35, No. 3 (2025) pp. 413-431
https://doi.org/10.14191/Atmos.2025.35.3.413
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

해 설
(Review)

연세대학교 월봉 관측소의 돕슨 분광광도계 오존 관측 40년(1985~2024)

박상서[1)] · 김준[2)*] · 구자호[2)] · 이윤곤[3)] · 문경정[4)] · 정욱교[5)] · 이하나[6)] ·
임현광[7)] · 박민주[2)] · Koji Miyagawa[7)] · 김영아[8)] · 신대근[8)] · 김수민[8)]

[1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [2)]연세대학교 대기과학과, [3)]충남대학교 지구환경우주융합과학과,
[4)]국립환경과학원, [5)]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공,
[6)]한국기상산업기술원, [7)]일본국립환경연구소, [8)]국립기상과학원

(접수일: 2025년 5월 21일, 수정일: 2025년 6월 20일, 게재확정일: 2025년 6월 30일)

40-Year Observation of Dobson Spectrophotometer for Ozone Monitoring in Yonsei Wolbong Observatory (1985~2024)

Sang Seo Park[1)], Jhoon Kim[2)*], Ja-Ho Koo[2)], Yun Gon Lee[3)], Kyung-Jung Moon[4)], Ukkyo Jeong[5)], Hana Lee[6)], Hyunkwang Lim[7)], Minju Park[2)], Koji Miyagawa[7)], Young-Ah Kim[8)], Daegeun Shin[8)], and Sumin Kim[8)]

[1)]Department of Civil, Urban, Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea
[2)]Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea
[3)]Department of Earth, Environments, and Space Sciences, Chungnam National University, Daejeon, Korea
[4)]National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea
[5)]Division of Earth Environmental System Sciences, Major of Spatial Information Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
[6)]Korea Meteorological Institute, Seoul, Korea
[7)]National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, Japan
[8)]National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

(Manuscript received 21 May 2025; revised 20 June 2025; accepted 30 June 2025)

Abstract In South Korea, ground-based total ozone observation has been operated since 1984 by using a Dobson spectrophotometer at the Wolbong Observatory of Yonsei University in Seoul. This year marks the 40th anniversary of the observation by the Dobson spectrophotometer. We introduce the detailed history of the Wolbong Observatory, the oldest ozone monitoring site in Korea. In addition, we provide an overview of the instrument updates of the Dobson spectrophotometer and the processes involved in instrument calibration and data quality control. It also reviews various research activities related to using data by the total ozone and ozone profile observation from the Dobson spectrophotometer over the past 40 years. Long-term observational data have been used not only as a reference dataset for the validation of other remote sensing instruments, but also an important dataset for the study of long-term trends in the ozone layer and the spatio-temporal change of ozone. The Dobson spectrophotometer has produced observation datasets of high quality for four decades, and it still consistently provides homogeneous and reliable data on total ozone and vertical profile information. It is expected to continue playing a significant role in ozone research in Korea.

Key words: Total ozone, Ozone trend, Dobson spectrophotometer, Yonsei Wolbong observatory

*Corresponding Author: Jhoon Kim, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea.
Phone: +82-2-2123-5682, Fax: +82-2-365-5163
E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

1. 서 론

돕슨 UV 분광광도계(Dobson UV Spectrophotometer)는 1928년 C. M. B. Dobson 교수의 제작을 통해 처음 만들어진 이후로, 자외선을 이용하여 오존 감시에 기여하고 있다. 특히 1957~1959년의 국제 지구 물리 관측년(international geophysical year)에 돕슨 분광광도계를 통한 오존전량 관측망이 전구로 확대되면서 현재까지 세계기상기구(WMO)의 지구대기감시 조직의 지구 오존층 감시 시스템(Global Ozone Observing System; GO3OS)의 표준 관측기기로 운용되고 있다. 전구 오존 관측망은 염화불화탄소(Chlorofluorocarbons; CFCs)에 의한 오존 파괴 메커니즘과 이로 인해서 발생한 성층권 오존층 파괴에 대해서 그 영향을 관측하는 데에 매우 많은 기여를 하였다(WMO, 1985). 그리고 몬트리올 의정서에 의한 ozone depleting substances (ODSs)의 규제와 농도 감소(Anderson et al., 2000)의 영향에 의해 오존층이 재회복되는 경향을 분석하고 감시하는 데에도 많은 기여를 하였다(e.g., Fioletov et al., 2002; Newchurch et al., 2003; Weatherhead and Andersen, 2006; Balis et al., 2007; Newman et al., 2009). 그 외에도 돕슨 분광광도계는 국제적으로 타 지상 측기나 위성 자료의 비교 검증을 위한 표준 자료로의 활용 연구(e.g., Bernhard et al., 2005; Krzyścin et al., 2021), 한 지점에서의 장기간 연속적인 관측을 통한 지역별 장기 변화 경향 분석 연구(e.g., Svendby and Dahlback, 2002; Chubachi, 2009; Krzyścin and Rajewska-Więch, 2009), 그리고 이러한 활용 연구를 위한 다양한 측기 및 산출 과정에서의 영향력을 교정하는 정확도 향상 연구 등이 이루어졌다(e.g., Wang et al., 2015; Koukouli et al., 2016; Moeini et al., 2019).

이러한 장기간의 협력 속에서 2024년은 오존 관측에 있어서 국제적으로는 최초로 남극 오존홀(ozone hole)을 발견한 지 40주년이 되는 역사적인 시점이다. 오존홀 발견 과정에서는 남극 오존 관측 기지에서 관측한 결과를 Farman et al. (1985)을 통해 학술지로 최초로 출판한 것으로 알려져 있지만, Bhartia and McPeters (2018)에서 언급한 바와 같이 Chubachi et al. (1984, 1985)에서도 일본 남극 기지에서의 관측 자료를 바탕으로 제시되거나 Bhartia et al. (1985)에서 위성을 통해서도 재현했다는 연구가 알려진 바 있다. 다만 이 과정에서 관측 자료의 품질 관리 및 동료 심사(peer-review) 논문의 중요성에 따라 후대에 해당 연구의 대표성의 지위가 바뀌었던 역사가 있다. 이러한 역사적 지위의 변화의 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나, 장기간 측기 운영의 신뢰도와 관측 자료 품질 관리에 대한 이해도가 연구 업적에 영향을 크게 끼친 것으로 장기간 관측 인프라의 형성과 함께 관측에 대한 담당 연구진의 이해도의 중요성이 강조된 역사적 사례라 할 수 있다.

이와 동시에 국내에서는 한반도에서 가장 긴 오존 지상관측소를 운영한 서울 월봉 오존관측소를 통해 성층권 오존 감시를 시작한 지 40년이 되는 해로서 의미가 깊은 해이다. 국내에서의 돕슨 분광광도계 도입은 1984년 WMO의 지원을 통해 서울 연세대학교에 이루어졌다(instrument number 124; 영국 Ealing 사 제작). 그리고 연세대학교 과학관에 오존관측소를 설치하여 1985년부터 매일 오존전량 관측을 수행하였으며(Appendix), 관측 자료는 한반도 오존전량의 감시 및 다양한 활용 연구에 인용되어 발표되어 왔다(e.g., Cho et al., 1989, 2003; Kim et al., 2005; Balis et al., 2007; Park et al., 2012; Kim et al., 2017; Park et al., 2019). 또한 한반도 오존층의 감시를 위한 오존전량의 시계열과 장기 변화 경향에 대해서도 동일 지점에서 Brewer 분광광도계를 통해 관측하는 자외선지수와 더불어 국내 학술지를 통해 최근까지 보고한 바 있다(Kim et al., 2011; Park et al., 2011; Park et al., 2019).

장기간 오존층 감시가 이루어진 서울 연세대학교 관측소는 최초로 도입한 돕슨 분광광도계를 통해 세계기상기구 지구대기감시 전구 오존 관측망의 252번 관측소로 등록되어 현재 모든 관측 자료를 전구 오존층 감시를 위하여 보고를 지속적으로 하고 있다. 또한 장기간 기후 감시를 위한 장기 자료 생산과 품질 유지에 최선을 다하여 국제기후변화 협력에 기여하였다. 종관기상관측소를 제외하고는 장기간 한 지점에서 동일 측기를 통해 관측소를 운용한 사례가 국내에서는 매우 희소하기 때문에 40년 간 한 지점에서 운용했던 측기를 소개하고 이로부터 나온 장기적인 관측 자료에 대한 기록을 남기는 것은 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 본 논문에서는 서울 지역 돕슨 분광광도계를 통한 오존 전량의 감시 및 측기 품질과 관측소 운영 관리와 측기의 개선 역사에 대하여 소개하고, 장기 관측 자료를 이용한 연구 사례와 관측 통계를 정리하여 소개하고자 한다.

2. 연세대학교 월봉 오존관측소

Figure 1은 2023년 기준으로 전세계에서 현재 운용 중인 돕슨 분광광도계 관측소를 나타낸 것이다(Tully, 2023). 이 중, 서울 서대문구 연세대학교 과학관에 위치하고 있는 월봉(月峰) 오존관측소(37.57^{o}N, 126.98^{o}E)는 세계기상기구 지구대기감시(WMO/GAW)의 전구오존관측시스템(GO3OS)의 관측소(station number 252) 중 하나로 등록되어 있으며, 돕슨 분광광도계를 통해 성층권 오존층을 감시하는 역할을 수행하였다. 월봉 오존관측소에 도입된 돕슨 분광광도계는 비교 검정

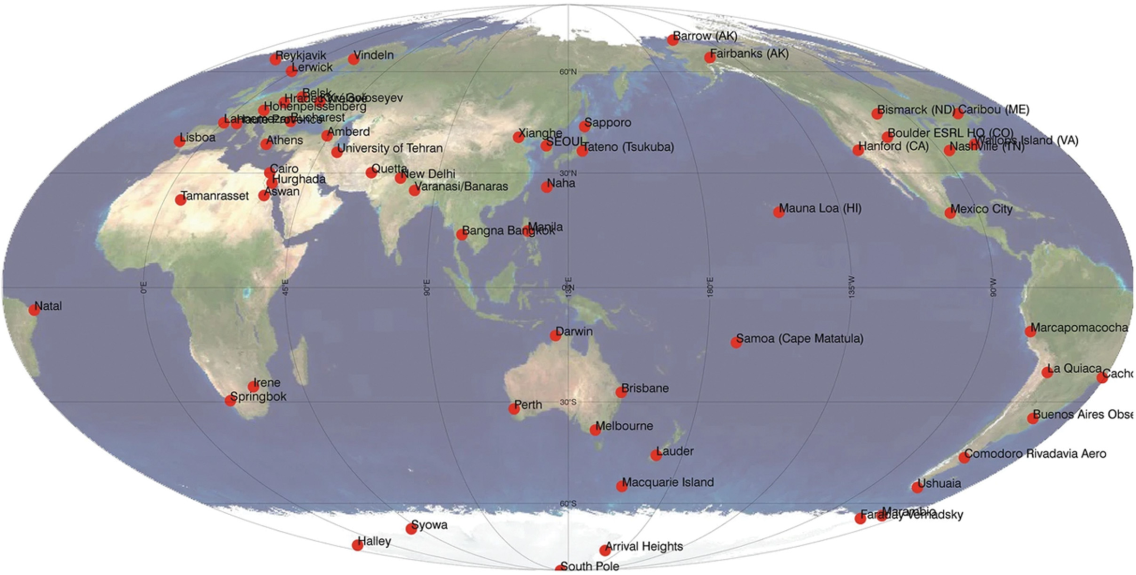

Fig. 1. Global distribution of observatories for Dobson spectrophotometer (Tully, 2023).

및 시범 관측 수행 후, 1984년 5월부터 정규관측이 이루어졌으며, 1985년부터의 자료가 공식적으로 연간 자료로 제공하고 있다. 국내에서 가장 오래된 성층권 오존 지상 관측소이며, 이 장소에서 수행한 관측 자료는 일 3회 내외의 관측을 통해 매월 일 대푯값을 포함하여 꾸준히 세계기상기구에 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(e.g., Cho et al., 1989, 2003; Kim et al., 2005; Park et al., 2019).

오존전량 관측뿐 아니라 1986년 2월부터는 오존 연직 분포를 Umkehr 방법(e.g., Dütsch, 1959; Petropavlovskikh et al., 2004)에 의해서 진행하고 있다. 해당 관측 방법은 맑은 날씨에 서로 다른 태양천정각에 의한 산란광의 광경로 변화를 통해 오존연직 분포를 추정하는 방법으로 천정 방향(zenith direction)에서 관측한 산란광을 활용하여 태양천정각이 95°-60°(혹은 70°)가 될 때까지 연속 관측을 통해 추정하게 된다(Cho and Lee, 1990). 이 과정에서 허긴스 흡수선(Huggins band)에서의 태양 산란광을 이용하게 되며, 구름 등에 의한 산란 효과를 최소화하기 위하여 Umkehr 방법의 관측을 수행하는 동안에는 천정 방향의 구름 유무를 판단하여 관측 자료를 산출하게 된다. 이러한 이유로 Umkehr 방법에 의한 오존 연직 분포는 오전/오후 일 2회만 관측이 가능하며, 연직 해상도 또한 4 km(성층권)-10 km(대류권)로 매우 낮은 편이다. 날씨에 의한 영향이 크기 때문에 상시 관측이 아닌 특별 관측을 통해 수행하여 국내에서는 일 자료가 아닌 연도별 통계자료가 주로 보고되었다(e.g., KMA, 2024).

월봉 오존관측소는 돕슨 분광광도계를 통해 오존 감시를 수행한 이후에 초분광 자외선 및 오존의 동시 관측과 비교 검정을 위하여 1997년부터 브루워 분광광도계(Brewer spectrophotometer; SCI-TEC사 No. 148)도 도입하여 돕슨 분광광도계로부터 관측하는 오존전량에 대해서 상호 비교할 수 있는 관측자료를 생산하고, 자외선지수(UV index)와 자외선 영역(320.1 nm)의 에어로졸 광학두께(aerosol optical depth; AOD)의 자료 생산이 이루어졌다(Kim et al., 2011, 2014). 그리고 자외선지수에 대한 높은 시간해상도 자료를 위하여 UV-Biometer 측기, 에어로졸 광학특성의 관측을 위하여 스카이라디오미터(skyradiometer, PREDE 사)와 썬포토미터(sunphotometer, CIMEL 사)를 차례로 도입하여 자외선 및 가시광선 영역의 태양복사 관측을 통한 대기화학성분 및 대기질 감시를 위한 관측 지점으로 널리 활용되었다.

돕슨 분광광도계가 강수 및 바람 등에 의해서 손상 위험이 높은 측기인 점을 감안하여 현재는 2007년 6월에 설치한 오존 관측돔으로 돕슨 분광광도계의 측기와 모든 시스템을 이설하였으며(Kim et al., 2007), 관측돔에서는 오존 관측 스케줄과 연동하여 돕슨 분광광도계의 태양위치 추적과 이를 통한 오존전량 연속 관측, 강수 감지에 의한 관측 중단 등의 시스템이 구축되었으며, 특히 돕슨 분광광도계의 실외 이동을 통한 전도 등의 위험을 회피하게 되면서 관측 기기의 안정도를 높여 최근까지도 오존 감시가 진행되고 있다.

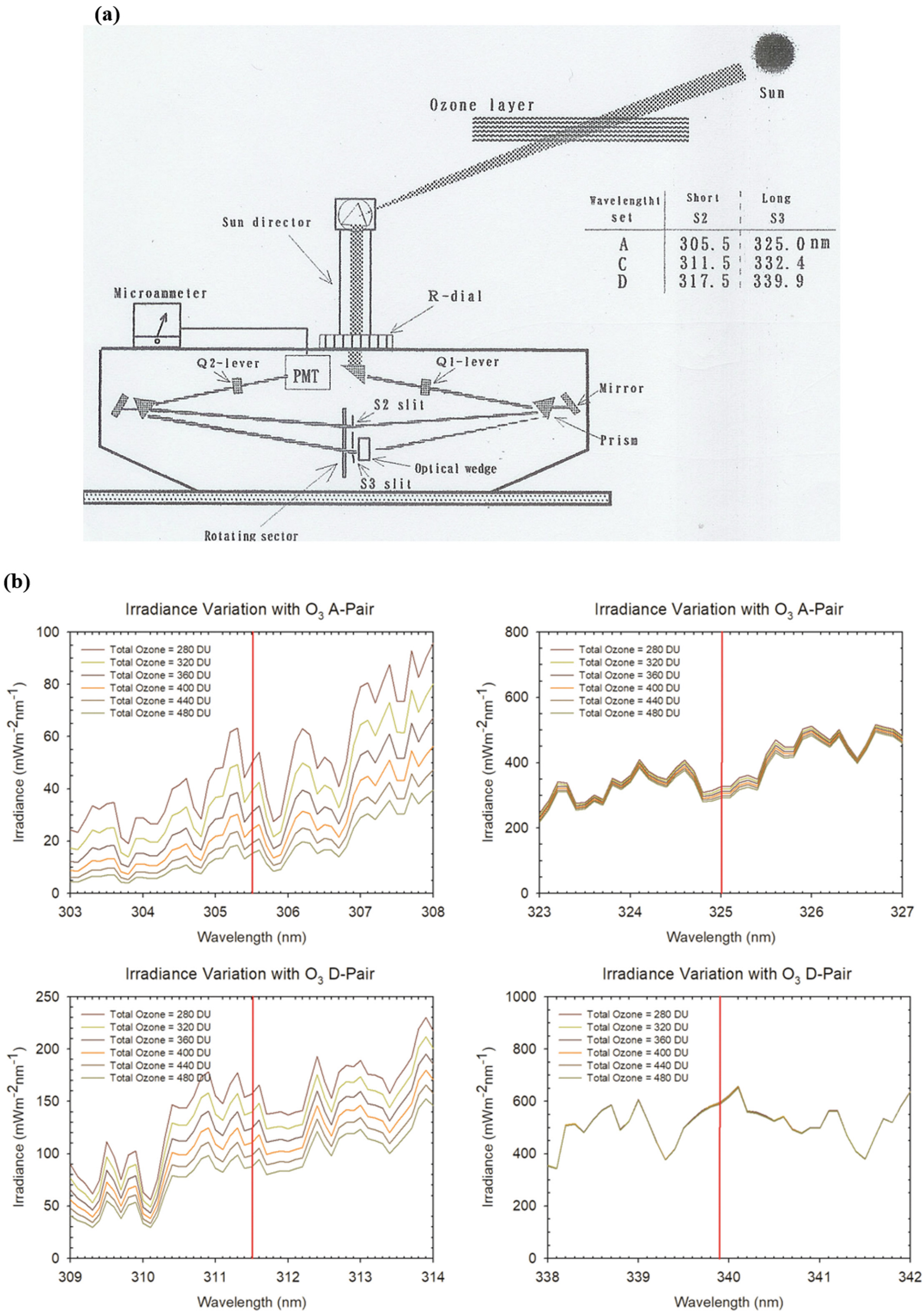

Fig. 2. (a) Principle of Dobson spectrophotometer to measure the total ozone [originally taken from Miyagawa et al. (1997)] and (b) radiative absorption sensitivity for ozone at the respective wavelength pairs.

3. 돕슨 분광광도계 검정 및 개조

3.1 돕슨 분광광도계 검정

Figure 2는 돕슨 분광광도계를 이용하여 오존을 관측하는 원리를 나타낸 것이다. 돕슨 분광광도계는 태양 복사를 통해 오존의 흡수 강도를 추정하는 원리를 가지고 측정하기 때문에 정확한 태양 복사 정보 관측을 장기간 유지하는 것이 매우 중요하다. 특히 돕슨 분광광도계는 Fig. 2b에 나타난 바와 같이 오존 흡수가 강한 파장 영역과 흡수가 약한 파장 영역을 한 개의 파장쌍으로 하여 측정하게 된다. 해당 파장쌍을 정확하게 선택하기 위하여 돕슨 분광광도계에서는 내부의 slit을 통해 선택된 파장의 태양광만 검출기에 도달할 수 있도록 하여 정확한 오존전량 산출을 하도록 한다. 측기에 있는 두 slit을 이용하여 오존의 강한 흡수가 이루어지는 짧은 파장과 흡수가 약한 긴 파장의 자외선의 세기비를 측정하기 때문에 파장 정보에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 이를 위해 돕슨 분광광도계는 내부 프리즘과 거울의 각도를 조정하여 자외선 파장을 조절한다. 이 과정에서 내부 프리즘의 위치 조절을 위하여 외부에 Q-lever를 이용하게 되는데 이 Q-lever는 측기 좌우 광학부의 대칭적인 형태로 2개의 lever가 존재한다.

Q-lever를 이용하여 좌우 대칭으로 정확한 파장의 자외선이 두 slit을 통과하게 하기 위하여 Q-lever에 대해서 정확한 파장 정보의 투과 여부를 검정과정으로 수행하게 된다. Q-lever의 검정을 위하여 돕슨 분광광도계는 자외선 영역에 선스펙트럼을 가지는 수은램프를 이용하여 관측소에서의 검증을 월 1회 이상 실시하게 되며, 수은램프의 선스펙트럼 정보가 파장에 대해서 일정하다는 가정을 통해 Q-lever로부터 내부 프리즘의 위치 조절이 정상적으로 작동하는 지를 정기적으로 파악하게 된다.

그리고 두 파장 사이의 자외선 세기비 측정에서는 각 파장의 정량적인 빛의 강도를 구하는 것이 아니라 오존 흡수가 약한 파장의 빛에 광학쐐기(optical wedge)를 통해 빛의 강도를 약화시켜 두 파장에서의 빛의 세기가 같을 때의 광학쐐기의 감쇄율을 통해 역으로 두 파장의 세기비를 추정하는 방식을 이용한다. 이 과정에서 내부에 있는 회전 sector에 의하여 광전증배관(photo-multiplier tube; PMT)에 들어가는 빛의 세기를 서로 다른 전류 방향의 전기신호로 변환하여, 출력되는 전류신호가 영점이 되는 지점을 두 파장의 자외선 세기가 같은 것으로 간주한다. 따라서 정확한 파장 정보와 함께 광학쐐기의 감쇄율 특성을 정확하게 추정하는 것이 오존전량을 측정하는 정확도에 결정적이라 할 수 있다.

이를 위해서 투과되는 빛에 대해서 광학쐐기의 위치를 조절하는 R-dial이 존재하며, 이 R-dial은 광학쐐기의 투과율과의 관계식이 사전에 측기 제작 과정에서 제시되어 있다. 돕슨 분광광도계(No. 124) 또한 초기 도입시에 투과율의 관계식이 제시되었으며, 이후에 광학쐐기의 노후화 등에 따라 1999년 3월부터 2000년 3월까지 호주로 수송하여 수리를 진행하면서 현재 사용하는 광학쐐기에 대한 R-dial과 투과율의 관계식을 적용하여 오존 산출에 활용하였다. 그리고 관측을 장기간 진행함에 따라 변화하는 광학쐐기의 투과율 특성은 관측소에서의 표준램프를 이용하여 검정을 진행하게 된다. 표준램프는 알려진 파장별 램프 강도를 통해 측기 제작 과정에서 만들어진 R-dial과 투과율의 관계식 정보와 실제 측기 사이에서의 투과율 인자의 차이를 확인하고 보정하는 데 이용한다.

서울에서는 총 3개의 Quartz Halogen 램프를 표준램프로 하여 관측소에서 상시 구비하여 검정에 활용하게 된다. 이 중, 1개의 램프는 주 1회 검정에 활용하며, 나머지 2개의 램프는 월 1회 이용하여 주 1회 검정에 활용하는 램프의 노후화를 추적하는 데 활용한다. 이를 통해 자외선 파장의 세기비 강도를 추정하기 위한 검정은 더욱 엄밀한 형태의 검정을 정기적으로 진행하게 된다.

그러나 관측소에서 진행하는 정기적인 검보정 관련 작업 외에 측기의 종합적인 상태를 확인하기 위하여 돕슨 분광광도계를 보다 엄밀하게 검정하는 과정을 정기적으로 실시하게 된다. Park et al. (2024) 에서는 돕슨 분광광도계의 종합적인 상태를 확인하고 검정을 실시하기 위하여 측기 운송 과정이 모두 포함된 과정을 정리한 바 있다. 연세대의 돕슨 분광광도계는 국제 표준 램프를 이용한 검보정을 위하여 총 6회의 해외 반출이 이루어졌으며(Kim et al., 2007; Park et al., 2024), 이 과정에서 세계 기준 측기와의 비교 관측 및 검정 작업을 수행하여 표준기의 수은/표준램프에 의한 측기의 불확도를 세계 기준 측기와 비교하여 보고한 바 있다. 이 과정에서 연세대학교에서 관측하는 측기는 모든 검정 과정에서 오존전량 관측 기준으로 3% 이내의 오차를 가지고 있는 것으로 보고되었으며, 장기간 안정성도 매우 높은 것으로 확인되었다.

3.2 개조 및 자동 관측 시스템화

돕슨 분광광도계를 통한 오존전량의 관측은 자외선 영역에서 오존 흡수가 강한 파장과 약한 파장의 조합을 한 쌍으로 하여 오존에 의한 자외선복사의 강도 차이를 통해 오존전량을 추정하는 원리를 이용한다 (e.g., Komhyr, 1980; Cho et al., 1989). 이 과정에서 파장에 따른 자외선 강도에 영향을 주는 요소는 측기의 정확도와 품질을 지속적으로 유지하기 위하여 분광광도계의 자동화 시스템 구축(Miyagawa, 1997, 2004;

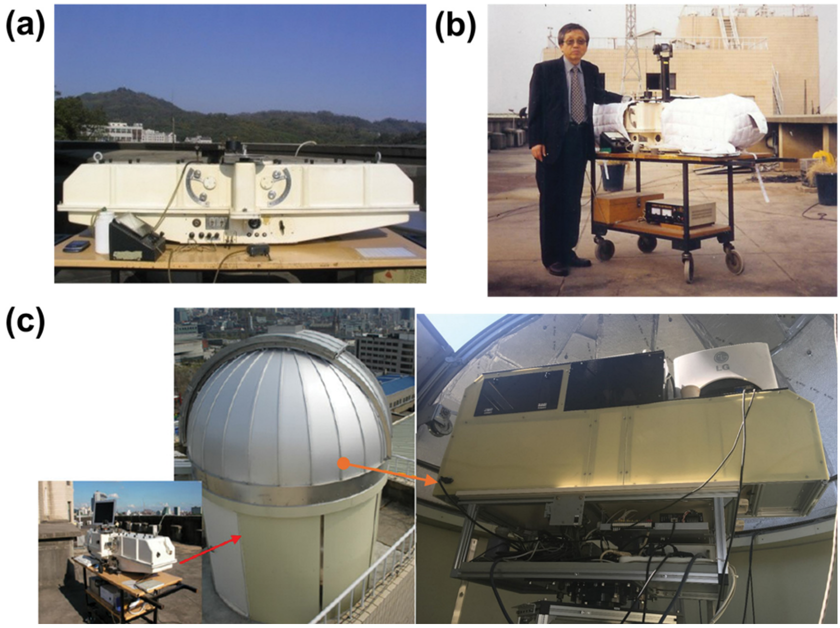

Fig. 3. (a) Early model of the Dobson spectrophotometer, (b) Dobson spectrophotometer in operation on the rooftop of Yonsei University in 1993, and (c) Current observational setup at the Wolbong Ozone Observatory following the installation of the observation dome.

Kim et al., 2007)을 통해 자료 생산과 품질 관리의 최신화를 수행하였다. 돕슨 분광광도계의 자동화 과정은 기존에 돕슨 분광광도계가 모든 측기의 조작을 수작업으로 진행한 것을 컴퓨터를 통한 자동 제어가 되는 점과 모든 관측 자료가 자동화 제어를 위한 컴퓨터에 저장되는 점이 특징이라 할 수 있다. 자동화 과정은 2004년부터 수행이 되었으며, 일본기상청 고층기상대의 돕슨 분광광도계 아시아 지역 센터를 통해 이루어졌다.

2004년의 1차 자동화는 과거 관측 자료의 데이터베이스화와 돕슨 분광광도계의 관측에 이용하는 측기의 핵심 레버 부품들에 대한 제어를 임시적으로 자동화하는 과정이 이루어졌으며, 2005년 10~11월의 2차 자동화 과정에서는 자동화를 위한 표준 부품들을 돕슨 분광광도계 관측 시스템에 모두 설치하는 작업이 이루어졌다. 두 번의 자동화 과정을 통해 연세대학교 월봉관측소에 대한 검보정 정보가 모두 자동화 시스템에 입력되었으며, 측기의 내부 온습도 상태 정보가 종합적으로 모니터링이 가능한 시스템의 구축과 Q-lever와 R-dial의 자동화 제어 및 정밀도 향상이 이루어졌다. 그리고 관측소에서의 검보정 시스템의 자동화 또한 이루어졌다. 그리고 2006년까지의 3차 자동화 과정을 통해 돕슨 측기 본체의 자동 제어와 데이터베이스화 과정이 모두 완료되었으며, 2018년 최종적으로 월봉 오존 관측소의 돕슨 관측돔과의 제어가 연동되는 작업을 마지막으로 모든 자동화 과정이 마무리되었다. 돕슨 관측돔과의 연동 작업은 태양의 방위각을 추적하는 측기 자세 제어, 강수 감지 센서에 의한 관측 제어 과정, 천정 방향의 구름 감지에 의한 연직분포 관측 자료 재처리 작업 고도화 등이 수행되었다.

이러한 일련의 자동화 과정을 통해 Fig. 3과 같이 오존전량 관측을 위한 돕슨 분광광도계의 외부 형태가 많은 부분이 보강되고 관측 정확도와 안정성 향상을 위한 다양한 외부 모듈들이 추가되었다. 상세한 관측 자동화 모듈과 이들의 설치 및 해체 과정은 Kim et al. (2007)과 Park et al. (2024)에 상세히 기술되었다. 오존전량 및 연직 분포 관측을 위한 자외선 세기비의 관측 샘플링 숫자가 약 10배 정도 늘어났으며 (e.g., Kim et al., 2007), 이를 통해 모든 관측의 정확도가 향상되었다. 이러한 관측 정확도 향상은 기존 수동 관측으로 인해 가지고 있던 수동관측자의 숙련도 등의 오차 원인이 제거된 이유로 보여 돕슨 분광광도계의 관측소의 장기간 유지에 많은 도움이 되었다.

4. 돕슨 분광광도계 40년 연구 현황

4.1 장기변동 경향

돕슨 분광광도계의 장기간 관측 자료의 가장 큰 목

적은 한반도 상공의 오존층에 대한 시간 변동성을 확인하고, 그 경향을 감시하는 것이다. 따라서 돕슨 분광광도계의 오존전량 관측 자료는 한반도의 오존층 감시 결과의 대표성을 가지는 관측 결과로 여겨졌으며, 1990년대 이후로부터 주기적으로 오존전량의 장기변동 경향에 대한 연구와 보고가 이루어졌다. 특히 연세대학교 월봉관측소의 돕슨 분광광도계는 기상청에서 발간하는 지구대기감시보고서에 매년 그 통계 결과가 보고되어 매년 그 해의 오존전량의 통계적인 결과가 정리되고 있다.

돕슨 분광광도계의 오존전량자료를 통한 변동성은 성층권 오존층의 변동성과 동일한 것으로 가정하여 연구를 수행하였다. 그리고 성층권 오존층의 변동성은 자연적인 요인과 인위적인 요인으로 나누어 장기변화 경향의 분석이 이루어졌다. 오존전량은 뚜렷한 계절 변동성을 가지기 때문에 장기변화 경향을 분석하는 과정에서는 월별 장기 기후 평균을 기준으로 한 잔차를 구하는 형태로 계절 효과를 우선 제거하는 방법이 널리 사용되었다(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)와 같이 전구 오존층 분포에 유의미한 변화를 주는 것으로 알려져 있는 자연적 요인에 대한 인자를 추가로 고려하여 오존층의 장기변화 경향 분석에 활용하였다.

각 인자들을 고려하는 방법은 계절 효과가 제거된 월별 관측 자료와 자연적 요인의 인자의 회귀분석을 통해 자연변동성의 인자를 제거하고 남은 잔차 시계열로부터 장기 변화경향을 산출하게 된다(e.g., Cho et al., 2003; Kim et al., 2005, Park et al., 2011, 2012, 2019). 이렇게 산출한 장기 변화경향은 잔차 산출 과정에서 모든 자연적인 요인에 의한 변동성이 제거되어 있다고 가정할 수 있기 때문에 인위적인 요인에 의한 장기변화 경향으로 가정하여 오존층의 변동성을 추정하게 된다. 이 과정에서 SC와 QBO와 같은 뚜렷한 자연적 요인 외에도 Kim et al. (2005)에서 제시한 바와 같이 북극 진동(Arctic Oscillation), 북대서양 진동(Northern Atlantic Oscillation), 북태평양 진동(Northern Pacific Oscillation), 태평양 십년 진동(Pacific Decadal Oscillation), 남방 진동(Southern Oscillation)까지도 자연적 요인을 고려하는 인자로 포함하여 제거하기도 한다. 이들 인자들은 Cho et al. (1994)에서 서울 오존전량 변동성에 유의미한 변화를 주는 인자로 분석된 바 있는 것으로 오존전량 자료의 장기 자료를 통한 멱 분광 분석(power spectrum)에서 나오는 주기와 자연 진동 지수의 주기 사이의 비교를 통해서 유추하여 얻어진 바 있다. 다양한 자연진동인자에 대해서 정밀하게 고려할수록 인위적인 영향에 의한 오존의 장기 변동성 유추의 정확도는 올라가게 된다. 다만, 각 자연 진동 간의 상관성에 대한 고려가 부족할 수 있기 때문에 실제 장기변동 분석에서는 자연 진동에 대해서 선형회귀분석에 대해서 다양한 모델을 구축하여 분석을 수행하게 된다(Kim et al., 2005).

이렇게 구축된 선형회귀모델을 이용하여 정기적으로 서울 지역의 오존층의 인위적 요인에 의한 변동성은 시기별로 다르게 나타났다. Cho et al. (2003)에서는 1985~1999년까지의 자료를 통해 0.77% decade^{-1}로 분석이 되었으며, Park et al. (2011)에서는 2009년까지의 기간에 대해서 1.16~1.36% decade^{-1}로 분석되었다. 그리고 2017년까지의 분석 결과에서는 1.23~1.41% decade^{-1}로 나타났다(Park et al., 2019). 이처럼 분석 기간이 늘어날수록 오존층의 회복 경향은 점점 유의미하게 강해지는 것으로 확인되어 최근에 나타나는 오존층 회복에 대한 경향이 서울에서도 유의미하게 나타나고 있으며, 장기적으로 회복 경향의 강도도 보다 뚜렷해지는 것으로 분석이 되었다. 정량적인 경향도 Nair et al. (2013)에서 제시한 유럽 지상관측 지점에서의 회복 경향 증가 추세에 비해서는 다소 높은 수준이나, Chehade et al. (2014)에서의 결과에서 나타난 동위도대의 장기 추세 경향과는 유사한 수준으로 나타났다.

이런 전체 시기에 대한 분석 외에도 추가적으로 고려가 필요한 사항에 대해서도 연구가 수행된 바 있다. SC와 QBO에 대한 변동성을 고려하기 위하여 초기 연구에서는 전 기간에 대해서 분석하여 오존층 회복 경향을 분석하였으나, Kim et al. (2005)에서는 장기 변화 경향에 대해서 전기(1979~1991년)와 후기(1992~2004년)으로 나뉘어 분석을 수행한 바 있다. 이를 통해 장기 변화 경향을 볼 경우, 전기의 변화경향은 –4.9% decade^{-1} 내외로 나타났으나, 후기의 장기 변화 경향은 0.10~1.07% decade^{-1}로 나타나 성층권 오존층의 회복 경향은 그 분석 시점에 따라서 다르게 나타나는 점을 확인하였으며, 1980년대 이후 시행된 CFC 배출 규제에 의한 오존 회복 경향이 서울에서도 나타나는 점을 확인한 바 있다. 이러한 분석은 Park et al. (2011)에서도 유사한 형태로 분석을 진행한 바 있다.

추가적으로 대부분 오존전량의 변화 경향 연구에서는 이를 오존층의 변화 경향과 동일한 것으로 가정하여 해당 변동성과 오존층의 변동성을 동일시하고 있었다. 그러나 성층권 오존층의 변동성이 오존전량과 명확하게 일치하지 않으며, 실제로 동아시아에서는 오존층 외에 상부 대류권에서의 오존 변동성이 매우 크게 일어나게 된다. 이러한 현상은 2차 오존피크 현상에 의한 영향으로 오존전량의 급증으로 연관이 된다. 이 현상의 빈도에 장기 변화 경향이 있을 경우, 오존전량의 변동성이 성층권 오존의 회복 경향과 일치하

지 않을 수 있다(e.g., Park et al., 2012). 이러한 영향을 고려한 연구는 최근의 오존전량의 장기 변동을 분석할 때부터 분석이 이루어졌으며, 실제 Park et al. (2019)에서는 2차 오존피크 현상이 나타나는 유무에 의한 오존전량의 장기 회복 경향은 1.23~1.41% decade^{-1}에서 1.11~1.26% decade^{-1}로 전체 회복 경향의 25% 수준(0.12~0.25% decade^{-1})이 2차 오존피크의 발생 빈도 변화에 의한 영향으로 분석하였다. 따라서 최근에는 오존층 회복에 대해서 오존전량의 장기 변동성뿐 아니라 2차 오존피크의 발생에 의한 대류권 상부의 효과도 함께 고려하는 것이 필요한 것으로 언급되었다. 이러한 결과들을 전체적으로 요약할 경우, 서울 지역을 기준으로 한 한반도 상공 오존전량 증가경향의 강화는 전구의 오존 회복 경향과 같은 특징으로 보여지나, 2010년대 이후에는 증가 추세의 속도가 안정화되는 것으로 보이며, 북반구 오존전량이 1980년대에 비해서 2.0% 수준으로 여전히 낮은 것으로 볼 때 오존전량 회복은 2040년대 전후가 될 것으로 분석한 바 있다(Park et al., 2019).

또한, 오존의 연직 분포에 대해서도 돕슨 분광광도계의 Umkehr 관측 자료를 모두 취합하여 분석해 고도별로의 평균 오존연직분포 특성과 계절별 분포 변화에 대해서 분석한 바 있으며, 이를 포항에서의 오존존데와 비교한 연구들이 이루어졌다(Cho et al., 2003). 오존존데가 35 km 고도 이상의 관측이 어려운 단점을 보완하여 돕슨 분광광도계는 항시 50 km까지 10개의 층에 대한 적산 오존량을 산출하여 그 분포를 파악할 수 있기에 보다 안정된 관측 자료 활용이 가능하였으며, 이에 대한 계절별 특성 또한 Cho et al. (2003)에서 제시하였다. 또한, 층별 관측 자료를 장기 경향 분석을 하여 오존 연직 분포가 전반적으로 대류권부터 하부 성층권에서는 증가하는 경향을 보이는 반면, 중-상부 성층권에서는 감소하는 장기 경향이 나타남을 관측 자료를 통해서 얻게 되어 오존층의 회복 경향 특성이 모든 층에서 균질하게 나타나는 것이 아니라 연직 분포의 특성은 일부 변화하고 있는 것을 밝힌 바 있다(e.g., Cho et al., 2003).

4.2 위성 및 타 측기 비교 검증 표준 자료 활용

위성은 산란광을 이용하여 기체의 흡수강도를 통해 기체의 양을 산출하게 되는데, 이 과정에서 연직 분포 특성이나 흡수강도 특성에 대한 가정이 실제와 다를 경우 위성 산출 결과에 편차와 불확실성을 야기하게 된다(e.g., Kwon et al., 2017; Baek et al., 2024). 이러한 이유로 위성 산출 알고리즘은 항시 비교 검증 과정이 필요하며, 이를 위한 정확도가 높은 표준 자료가 매우 중요하다.

돕슨 분광광도계는 오존전량 관측을 위하여 장기간 연구가 이루어진 측기이기 때문에 그 정확도가 매우 높다. 특히 Komhyr et al. (2008)에서는 돕슨 분광광도계의 목표 정확도는 직달관측을 기준으로 1% 내외이며, 산란 관측의 경우에도 4%의 오차가 넘지 않는 것으로 분석된 바 있다. 돕슨 분광광도계를 통한 매우 정확한 오존전량 관측은 안정적이고 균질한 자료를 확보하기에 오존의 장기 변화 경향을 추정하는 데에 있어서도 유용할 뿐 아니라, 타 측기의 비교 검증을 위한 표준 자료로도 활용되기도 한다. 특히 돕슨 분광광도계는 극궤도 및 정지궤도 환경위성 프로젝트에 있어서 위성 검보정을 위한 기준 측기(fiducial reference measurement; FRM)으로 지정되어 오존전량의 검증에 활용되고 있다(ESA, 2017).

서울 돕슨 분광광도계는 오존을 관측하는 위성 프로젝트와 유사한 관측 기간을 가지기 때문에 아시아 지역에서의 위성 오존 자료를 검증하는 연구와 지상 타 측기의 검증 연구에 매우 광범위하게 활용되었다. 기본적으로는 오존전량의 장기 변화 경향을 연구하기 위하여 오존전량의 일 대표 자료에 대해서 그 정확도를 파악하기 위하여 위성 자료와의 비교를 수행한 바 있다. 해당 비교 과정에서는 서울에서 관측한 전 기간에 대해서 오존전량 자료를 비교하였으며, 1985~2017년까지의 33년의 관측 자료에 대해서 서울 돕슨 분광광도계와 위성 자료 간의 편차는 0.1% ± 4.9%의 편차 범위인 것으로 나타났다. 그 외에도 Park et al. (2012)에서는 돕슨 분광광도계의 일 대푯값에 대해서 동일 관측소의 브루워 분광광도계, 포항의 브루워 분광광도계, 위성 오존전량 관측값과의 다자 비교를 2007년까지의 관측 자료를 이용하여 수행하였다. 이 경우, 서울 돕슨과 브루워는 1.1%, 돕슨과 포항 브루워는 3.8%, 위성 자료와는 0.9%의 편차가 나타나 서울 돕슨 분광광도계의 정확도를 검증하여 타 연구 활용을 위한 기초 자료로 분석한 결과를 제시한 바 있다. 또한 다중 측기를 이용한 돕슨 분광광도계의 비교를 통해 서울 돕슨 분광광도계의 장기 안정성이 Komhyr et al. (2008)에서 제시하고 있는 목표 정확도 수준을 만족하는 관측 자료임을 증명한 바 있다.

이러한 연구들을 바탕으로 하여 최근에 개발되거나 새로 도입되는 측기에 대한 검증에도 돕슨 분광광도계의 자료가 활용되기도 하였다. Kim et al. (2017) 에서는 최근에 개발된 판도라 분광광도계의 국내 도입에 따라 서울에서 관측한 돕슨, 브루워, 판도라 분광광도계의 모든 자료를 활용하여 상호 비교 연구를 수행하였고, 이를 통해 측기별 편향과 불확도, 그리고 자료의 상관계수에 대해서 태양천정각에 의한 영향, 계절 변동성을 전체적으로 파악한 바 있다. 특히 판도라 분광광도계는 정확도에 있어서 돕슨 및 브루워 분광광도계보다는 높지 않으나, 시간해상도에 장점을

가지는 측기이다. 향후 정지궤도 환경위성(geostationary environment monitoring spectrometer; GEMS) 등에서 산출되는 자료의 검증을 위한 네트워크 구축에 범용적으로 활용될 예정에 있었기 때문에 이들 연구를 통해 새로 도입되는 측기에 대한 정확도를 평가하고, 신뢰도를 높이는 데에 기여하는 연구가 이루어졌다. 이러한 선행 연구를 바탕으로 구축된 높은 신뢰도를 바탕으로 하여 보다 더 시간해상도가 좋은 판도라 분광광도계가 동아시아 전역에 다수의 관측소에 설치되면서 해당 측기를 통한 GEMS의 오존 산출 알고리즘 검증 자료로 다수 활용되었다(Baek et al., 2020, 2023, 2024; Bak et al., 2012, 2015).

오존전량 외에도 오존 연직 분포에 대해서도 상호비교를 수행하는 연구를 수행한 바 있다. 돕슨 분광광도계의 Umkehr 관측법은 오존존데에 비해서는 연직해상도가 좋지 않기 때문에 오존전량처럼 검보정 기준 측기로 활용되기에는 어려우나, 고층 대기 정보의 관측 자료는 확보가 어렵기 때문에 다양한 측기의 신뢰도를 상호 비교하거나 자료를 융합 활용하는 경우에 많이 이용되었다. 연세대 돕슨 분광광도계의 경우에는 한반도에서 유일하게 장기간 관측이 수행되면서 신뢰도를 쌓아왔기 때문에 국내의 오존 연직 분포 관측 자료의 신규 방법론 적용 과정에서 이용되었다. 특히 한국항공우주연구원의 Korean Sounding Rocket (KSR) 시리즈에 탑재한 자외선 복사관측계에서 오존 연직 분포를 산출하는 연구를 수행하였을 때에는 포항의 오존존데와 Halogen Occultation Experiment (HALOE) 위성과 함께 Umkehr 관측 자료가 상층 오존의 비교 자료로 활용되기도 하였다(Kim et al., 1997, 2001; Hwang et al., 2007a). 이 과정에서 Hwang et al. (2004) 등과 같이 측기 하드웨어와 이론적인 복사 관측 특성에 의한 오차 특성과 실제 관측 자료를 상호 비교하면서 새로운 오존 연직 분포 산출 방법론에 대한 심층적인 비교 분석을 위해 활용되었다.

4.3 자외선 및 일사량 활용 연구

오존층의 감시가 이루어진 이유 중 하나로 오존층이 차단하는 유해자외선의 지표 도달 영향을 파악하기 위한 부분이 있다. 이렇듯 오존층은 자외선 중, 유해자외선 영역인 UV-C (100~280 nm)와 UV-B (280~320 nm)의 파장 영역의 자외선을 차단하여 지표에 도달하는 자외선 복사에 의한 생태계의 유해 효과를 차단하는 효과를 가진다. 그리고 오존층은 지표에 도달하는 자외선 복사 강도에 크게 영향을 주기 때문에 오존과 자외선 간의 상관관계와 활용 연구는 다양하게 이루어졌다(e.g., McKinlay and Diffey, 1987; Scotto et al., 1988; WHO, 1994; Weatherhead et al., 1997). 국내의 자외선 관련한 연구에 대해서도 이와 유사한 연구가 많이 수행되었으며, 특히 오존전량에 의한 자외선 복사량의 변동성에 대한 관계를 지상 관측 자료를 통해 상관성을 구한 연구가 초기에 이루어졌다. 이 과정에서 서울 지역의 월봉 오존관측소에 있는 자외선 관측과 오존전량 관측값이 주된 자료로 활용되었다(Cho et al., 1998). 해당 연구에서는 오존의 변화량과 자외선 변화량을 시간적으로 비교한 뒤에 오존전량 감소에 따른 자외선 복사의 증가에 대해서 관측값을 통해 규명하였다. 이 과정에서 계절성과 태양천정각에 대한 의존성을 제거한 후에 구름 효과를 보정하여 분석하였으며, 이 결과 1%의 오존전량 변화가 0.7~1.2%의 자외선 변화에 미치는 것으로 확인되었다. 또한, 자외선과 오존전량과의 상관성 뿐 아니라 자외선에 영향을 미치는 모든 요소(구름, 에어로졸 등)를 전부 관측 자료를 통해 고려하여 서울 지점에서의 자외선 변화의 기여도가 운량, 에어로졸 광학두께, 오존전량에 의해서 동시에 영향을 받으며, 서울 지역에서의 세 변수의 증가 경향이 유해자외선과 전자외선의 감소 경향을 유발하며, 정량적인 기여도를 평가한 연구 또한 있다(Kim et al., 2013). 그리고 자외선 영역 외에도 전체 일사량에 대해서도 유사한 분석을 수행하여 에어로졸과 구름, 오존전량이 미치는 지표 도달 복사량 효과가 파장에 따라서 달라짐을 확인하였다(Lee et al., 2018, 2019). 해당 연구들은 서울 지역만의 특성이 아니라 타 지역과의 특성과 대체적으로 비슷한 수치로 확인되어 관측을 통해 오존에 의한 자외선 강도 변화의 정량적 추정을 위한 기초 연구로 활용된 바 있다.

그리고 자외선 변화의 민감도 특성을 기반으로 하여 실제 자외선 예측 및 보건 효과의 활용 방안을 연구하는 과정에서 오존전량 자료는 분석의 기초 자료로 다수 활용된 바 있다. 예를 들어 Park et al. (2017)과 같이 유해 자외선의 파장별 특성을 파악하는 과정에서는 브루워 분광광도계에서 나오는 초분광 자외선 자료 및 오존전량 자료를 활용하고, 에어로졸과 구름의 특성을 고려하여 자외선의 물질별 민감도를 산정하는 연구를 수행하고 있으나, 해당 연구를 바탕으로 하여 자외선지수(UV Index)와 같이 광대역의 자외선 정보를 추정하거나, 예보를 하기 위한 연구를 수행하는 과정에서 그 기초 정보로 돕슨 분광광도계의 오존전량 자료가 활용되기도 하였다(Lee et al., 2009; Park et al., 2015). 이러한 연구에서는 특히 자외선의 정확한 예보를 위하여 오존전량의 자기상관성에 대한 분석을 오존전량의 일 대표 관측값으로 수행하여 오존전량과 상층 기상장 변수 간의 상관성을 통해 오존전량을 통계적으로 예측하고, 자외선 예보에 활용하는 방법을 도입하였으며, 이 과정에서 돕슨 분광광도계의 오존전량이 기초 자료로 활용되었다(Lee et al.,

2009). 그 외에도 자외선에서의 유해 효과가 아닌 보건 효과로 많이 활용되는 비타민 D 합성에 대한 자외선 지수의 추정과 예보 활용 연구에 있어서도 오존전량의 정보가 필수이며, 돕슨 분광광도계의 정보가 활용되었다(e.g., Park et al., 2019).

5. 돕슨 분광광도계 40년 관측 통계

5.1 오존 전량

오존전량 자료는 서울 지역의 오존층 감시를 위한 자료로 40년동안 일대푯값을 바탕으로 하여 다양한 관측 통계 자료를 만들어냈다. 돕슨을 통한 오존전량 관측은 일관된 정확도를 위하여 초기에는 오존에 대한 대기질량인자(air mass factor)가 1.5~2.5인 범위 안에서의 관측만을 수행하도록 스케줄이 되어 있었으며 (Chung, 1996), 이 때문에 오전과 오후에 각각 1회씩 총 2회에 걸쳐서 관측이 이루어졌다(Park et al., 2019). 그러나 자동화 이후에는 오전과 정오, 오후의 관측 일정으로 변경되면서 일 3회 관측을 기본으로 수행되었다. 각 관측 수행 과정에서는 직달일사법(direct sun method; DS)과 천정 산란일사법(zenith sky method; ZS)이라는 두 가지 관측 방법을 하나의 세트로 묶어 수행한다. 이 과정에서 DS 관측을 위한 기상 조건이 아닐 경우에는 ZS 관측으로 2회 실시하여 자료를 생산하게 된다. 강수 등으로 결측이 없는 경우, 총 6개의 일 관측값이 생산되며, 이 중 일 대푯값은 아래의 우선순위에 따라 선택된다.

1) DS 관측 자료가 모든 ZS 관측보다 우선한다.

2) DS 관측이 있을 경우에는 구름 조건 중 얇은 구름이 없는 경우를 우선한다.

3) 1, 2번의 조건으로 여러 개의 관측 자료가 선택될 경우, 대기질량인자가 작은(즉, 태양천정각이 작은) 관측 자료가 우선한다.

4) ZS 관측만 존재할 경우에는 구름 상태(구름이 얇거나 운량이 작을수록 우선)와 태양천정각(태양천정각이 작은 경우 우선)에 따라 우선순위가 선택된다.

이렇게 선택된 자료를 통해서 구성한 일 대푯값은 서울 지역 오존전량의 기준자료로 선택되며, 서울 지역의 오존전량과 관련한 모든 연구의 기초 자료가 된다.

일 대푯값은 1985년부터 2024년까지의 총 12,499일의 관측 자료가 존재하며, 결측률은 16.5%에 해당한다. 주요 결측의 원인으로는 하루 종일 강수 등 기상요인으로 인해 관측이 이루어지지 못하거나, 측기의 장기간 검증을 위하여 관측소에서 장기간 떠나 있던 경우, 혹은 관측소에서의 측기 문제(e.g., 침수 또는 부품 손상)에 의해서 관측을 수행하지 못한 경우에 주로 발생하였다. 총 40년의 관측 기간에서의 일 대푯값의 평균 오존전량은 325.4 Dobson Unit (DU)이며,

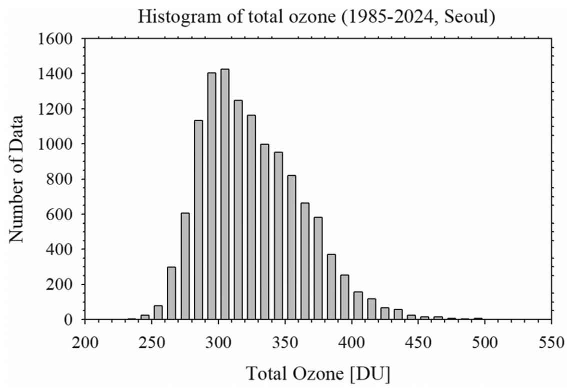

Fig. 4. Histogram of daily total column ozone measured by Dobson spectrophotometer.

이는 2017년까지의 평균값인 324.3 DU보다 1.1 DU이 증가한 값이다(Park et al., 2019). 일 대푯값의 표준편차는 37.8 DU로 이는 2017년까지의 37.5 DU에 비해서는 큰 변화가 없었다. 이를 통해서 볼 때 최근 들어 오존층의 회복 경향으로 평균 오존전량이 유의미하게 상승한 것으로 보인다. 극값에 해당하는 일 대푯값의 최소, 최대값은 각각 225 DU (1994년 7월 29일)와 518 DU (2010년 5월 11일)으로 나타났으며, 이는 과거 Park et al. (2019)에서 보고했던 것과 같다. Figure 4는 일 대표 오존전량에 대해서 빈도수를 나타낸 것으로 최대빈도로 나타나는 범위는 300~310 DU의 범위(1426회)로 나타났다. 그리고 Fig. 4에서 나타나는 바와 같이 분포의 형태는 오른쪽으로 치우친 형태의 분포로 나타난다. 실제 오존전량의 일 대푯값의 왜도(skewness)는 0.692로 나타나 유의미하게 비대칭적인 형태를 하고 있는 것으로 확인되었다.

Figure 5는 1985년부터 2024년까지의 월평균 오존전량을 나타낸 것이다. 40년동안 월별 관측횟수는 954

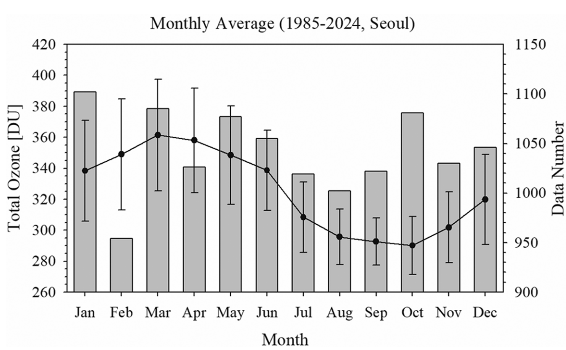

Fig. 5. Monthly average of total ozone in Seoul from Dobson spectrophotometer.

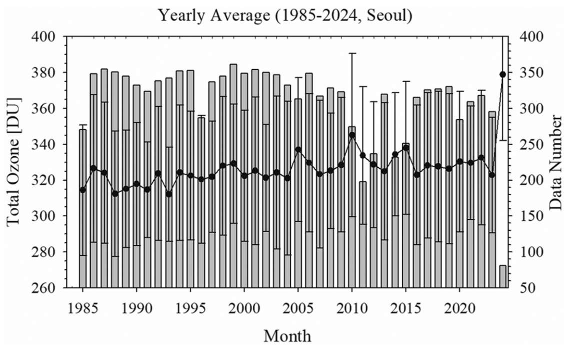

Fig. 6. The annual average of total ozone in Seoul from Dobson spectrophotometer from 1985 to 2024.

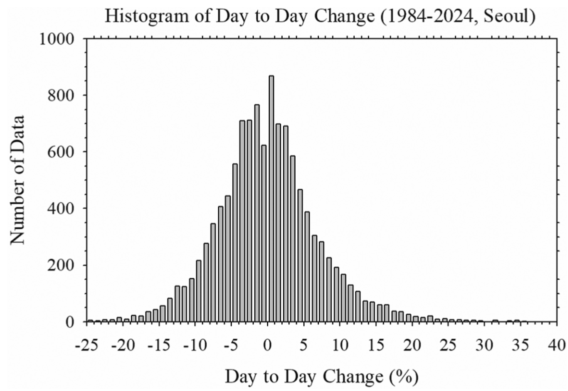

Fig. 7. Histogram of day-to-day change of total column ozone in Seoul from 1985 to 2024.

회(2월)~1102회(1월)였으며, 전체적으로 겨울-봄에 걸쳐서 관측횟수가 상대적으로 많고, 여름철에 적은 것으로 나타났다. 이는 장마와 빈번한 강수에 의해 여름철에 결측되는 횟수가 많기 때문이며, 봄철에서 4월에 관측 횟수가 상대적으로 적게 나타나는 이유는 2024년의 관측이 장기간 검증을 위하여 3월 31일까지 수행된 점과 2007년의 자동화 직후에 있었던 초기 시스템의 불안정성으로 인하여 4월에 장기간 결측이 있었기 때문인 것으로 보인다. 40년 기간의 오존전량 월평균 값은 10월에 290 DU에서 3월에 361 DU를 보이며, 오존전량 연교차는 71 DU로 나타났다. 이는 Park et al. (2019)에서 분석한 결과와 연교차에서 1 DU의 변화만이 나타난 것으로 최근의 오존전량의 계절 변화 특성이 장기간 특성과 유사하게 나타나고 있으며, 장기간 관측 자료의 축적으로 인해 관측 자료가 안정적인 기후값으로 인식될 정도로 안정된 자료가 축적된 것으로 보인다.

Figure 6은 오존전량에 대한 경년 변화를 나타낸 것이다. 서울 지역의 연평균 오존전량은 2010년 극댓값으로 343 DU이 관측된 이후로 극댓값이 갱신되지 않았으며, 극솟값 또한 1988년과 1993년의 312 DU으로 나타나, Park et al. (2019)에서 2017년까지의 관측 결과가 정리된 이후에는 특이할 수준의 오존전량 변화가 나타나지 않았다. 2018년 이후의 오존전량의 연평균은 323~330 DU 범위에서 변화하고 있으며, 이는 기후평년값에 해당하는 값에서 크게 벗어나지 않는 것으로 파악되었다. 다만, 2024년은 관측이 1-3월까지만의 자료가 존재하기 때문에 성층권 역학 수송 과정에 의해 갖게 되는 계절변동성이 연평균 결과에 그대로 남아 있어 향후 경년 변화를 분석하는 과정에서 2024년은 별도의 재처리가 필요할 것으로 보인다.

Figure 7은 오존전량의 일일 변동성을 나타낸 것이다. 오존전량의 장기적인 변동과 다르게 단기적인 변동성은 성층권의 역학 수송 과정의 강도 변화에 의해서 매우 유의미하게 나타나며, 일부는 대류권 오존 생성 메커니즘에 의해서 나타나기도 한다. 오존전량의 일일 변동성은 오존전량의 장기 회복 경향 특성과 다르게 중위도 지역에서의 성층권 역학 수송 과정의 강도를 설명하기 위한 지표로 활용될 수 있다. 오존전량의 일일 변동성은 오존전량의 일 대푯값의 하루 동안의 상대변화량을 나타낸 것으로 정의한다. 40년동안의 일일 변동성은 $0.04 \pm 7.16\%$로 나타났다. 일일변동성은 장기적으로 유의미한 변화 경향이 없을 경우에는 평균적으로는 0에 수렴할 것으로 보이기 때문에 일일 변동성의 평균 변화로 나타난 0.04%는 타당한 수치로 보인다. 다만 최대/최소 일일변동성은 각각 –35.5%와 41.7%로 나타났으며, 이는 Park et al. (2019)에서 보고한 –30.3(최소)와 38.3%(최대)의 일일변동성보다도 큰 값이 극값으로 확인되었다. 이는 전체적으로 성층권 역학 수송 과정 강도가 최근 들어서 강해지면서 오존전량의 단기 변동성도 같이 높아진 것으로 보인다. 또한 일일변동성은 Table 1에서 보는 바와 같이 계절적으로도 유의미한 특성이 나타난다. 가장 변동폭이 큰 시기는 4월로 –31.7~41.7%의 범위를 가지고 있으며, 4월을 중심으로 하여 12~5월까지의 변동성이 큰 것으로 나타났다. 그리고 최소 변동성은 9월로 나타났으며, 9~11월은 12~5월과 비교할 때 변동성이 절반 수준으로 나타났다. 이러한 이유는 전체적으로 성층권에서의 남북 방향의 역학적 수송 효과와 성층권-대류권 물질 교환(stratospheric-tropospheric exchange; STE)은 겨울 반구에서 비교적 강하게 나타나기 때문으로 보인다.

오존전량의 변동성이 겨울-봄철에 걸쳐서 강하게 나타나고 있는 것에 대해서 Table 2와 같이 일일변동성의 상대빈도수 분포를 통해 볼 경우 15% 이상의 변동성을 보이는 빈도가 12~5월에 걸쳐서 4.8~9.3%로

Table 1. Monthly average, standard deviation, and maximum and minimum of day-to-day change at Seoul (1985~2024).

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mean (%)	0.3	0.2	0.2	0.0	–0.1	–0.1	–0.3	–0.1	0.0	0.0	0.1	0.3
Stdev. (%)	8.3	8.5	9.0	8.2	7.6	6.7	6.7	5.9	5.0	5.2	6.0	7.5
Max (%)	35.4	30.0	33.1	41.7	35.5	23.8	27.7	32.5	24.5	27.1	24.7	38.4
Min (%)	–26.9	–26.1	–30.3	–31.7	–23.0	–21.5	–25.0	–35.5	–19.0	–23.4	–22.3	–23.3

Table 2. Relative frequency of day-to-day change larger than 10 and 15% at Seoul (1985~2024).

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
>15%	7.2	7.9	9.3	6.5	5.2	3.3	4.0	2.4	1.3	1.3	2.0	4.8
>10%	19.4	22.3	25.6	17.8	15.9	12.7	12.3	7.2	5.0	6.5	9.5	15.8

나타나는 반면에 6~11월에는 1.3~4.0%로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 10% 이상의 변동성으로 확장하더라도 같은 기간에 대해서 각각 9.5~25.6%와 5.0~12.7%로 나타나고 있으며, 이는 STE에 의해서 일어나는 대류권상부/성층권하부(upper troposphere/lower stratosphere; UTLS)의 오존 급증 현상의 빈도수와도 밀접한 연관이 있는 것으로 파악된다(e.g., Hwang et al., 2007b; Park et al., 2012, 2019).

5.2 오존 연직 분포 관측

현재 1986년부터 수행된 Umkehr 관측횟수는 총 3641회로 확인되었으며, 이는 오존전량의 일대푯값에 비해서 약 20% 수준의 관측 자료만이 확보된 것이며, 일부는 일 2회의 관측을 포함하고 있기 때문에 일관측값으로 변환할 경우에는 이보다 더 적은 것으로 보인다. 돕슨 분광광도계를 이용한 오존 연직 분포 관측은 Umkehr 방법의 한계로 인해 태양천정각을 60~70도에서부터 일출(또는 일몰)까지 관측을 연속적으로 수행해야 하기 때문에 관측 횟수의 제한이 있을 뿐 아니라 중간에 구름에 의한 산란광 복사가 달라질 경우에는 산출민감도가 급격히 바뀌면서 산출이 성공적으로 이루어지지 못하게 된다. 특히 일출/일몰 시점에서는 태양천정각에 의한 산란광의 오존고도별 민감도가 급격히 바뀌기 때문에 하루 종일 청천 상태인 경우라도 얇은 구름이 덮일 경우에는 관측에 실패할 수 있다.

이러한 이유로 Fig. 8a에서 보는 바와 같이 Umkehr 방법을 목측으로 수행하던 시점인 2004년 이전까지는 관측 횟수가 매우 적었으며, 자동화가 이루어진 2007년 이후에도 Umkehr 관측 시도 이후에 구름에 의한 영향으로 인한 산출 실패와 돕슨 측기의 이동 과정에서의 문제로 인해 관측 횟수가 증가하지 못하였다. 그러나 완전 자동화가 이루어진 2016년 이후부터는 돕슨 분광광도계의 자동화 운영이 가능해지면서 Umkehr 관측에 대한 자동관측이 고도화되면서 관측 시도 횟수의 증가와 구름 영향에 대한 정밀한 제거 등으로 인해 비약적으로 관측 횟수가 증가한 것을 확인할 수

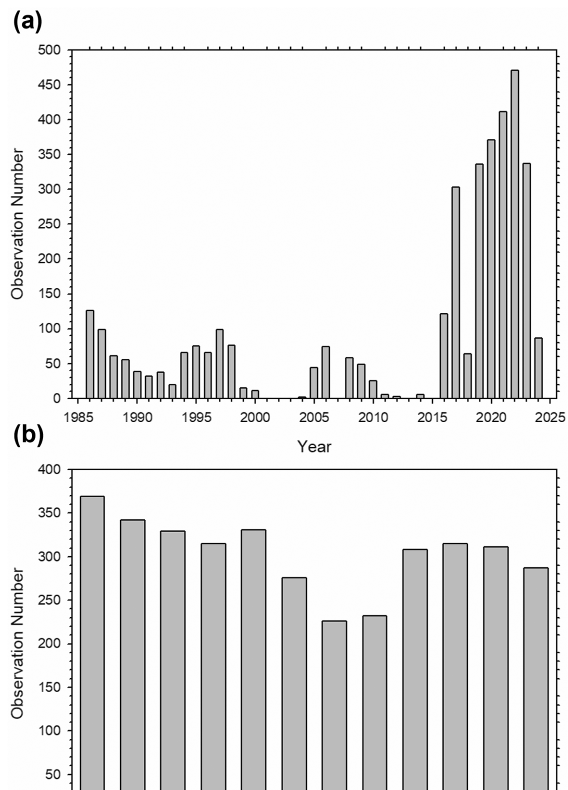

Fig. 8. (a) Annual and (b) Monthly observation counts of the Umkehr measurements for ozone profile retrieval in Seoul.

있다. 다만, Umkehr 관측이 이루어지는 2~3시간 동안 구름에 의한 영향이 전혀 없는 경우는 매우 드물기 때문에 해당 관측에 대해서 사후 보정 및 재처리 작업을 수행해야 하지만, 관측 횟수가 늘어나게 되면서 오존 연직 분포의 자료 확보가 더 수월해진 것을 확인할 수 있으며, 관측 정확도 향상과 관측자에 의한 영향을 최소화하는 돕슨 분광광도계의 자동관측시스템의 원래의 취지에 부합하는 것을 확인할 수 있다 (e.g., Kim et al., 2007).

Figure 8b는 동일하게 Umkehr 관측횟수의 월별 결과를 나타낸 것이다. 월별 결과를 통해서 볼 경우, 비교적 건조하고 구름이 없는 날씨가 빈번한 9~4월까지의 기간이 대체로 Umkehr의 관측횟수가 많은 것을 확인할 수 있다. 다만, 겨울철에 비해서 봄, 가을의 관측횟수가 상대적으로 적게 되는데 이러한 이유는 측기가 장기간 관측을 하게 되면서 외부 온도에 노출이 되게 되는데 일교차가 클 경우에 Umkehr 관측을 수행하는 동안에 측기 내부 광학부의 뒤틀림이 유의미하게 발생하게 된다. 이러한 부분을 일부 관측시스템을 통해 보완하기는 하지만, 빈번한 관측을 수행해야 하는 시점에서 해당 현상이 나타날 경우에 Umkehr 관측법을 통한 산출 과정에 필수적인 파장별 산란광 자료 획득 과정에서 파장 편향(spectral shift)으로 인해 불확실성이 커지게 되면서 연직 분포의 산출에 실패하게 된다. 이러한 현상으로 인해 일부 관측의 실패가 일어나 월별 관측횟수 특성이 나타난 것으로 보인다.

Figure 9는 1986년부터의 Umkehr 관측법을 이용하여 산출된 오존 연직 분포 자료를 바탕으로 구성한 서울의 장기기후분포를 나타낸 것이다. Umkehr 방법은 계절별로 관측이 균질하게 이루어지지 않기 때문에 연간 전체 관측자료를 평균한 뒤에 연평균 연직분포 자료를 기후값으로 재평균한 결과이다. 또한 Umkehr 방법론은 구름과 태양천정각별 관측자료의 샘플링 등으로 인한 관측 품질 변화가 매우 많고, 이 경우에 연직분포의 전체 특성이 달라지는 경우가 있기 때문에 산출 결과 중에서 각 층별(10개층) 오존량이 극단적인 분포에 대해서는 제외(각 층별 오존량이 상/하위 10%인 분포는 제외)하여 기후값을 산출하였다. Umkehr 방법론을 통해서 오존 연직 분포를 살펴볼 경우, 대류권의 오존전량은 38.1 ± 6.2 DU로 나타났으며, 이는 오존전량 대비 11.6%가 대류권에 분포하고 있음을 나타낸다. 또한 UTLS 영역으로 주로 정의되는 10~15 km에서는 24.3 ± 4.9 DU로 나타났으며 표준편차가 층별 오존량 대비 20%가 넘는 층은 해당 구간만이 유일한 것으로 나타났다. 이는 STE 현상에 의해 가장 영향을 많이 받는 고도 구간이기 때문에 관측 시기별로의 오존 변동성이 크기 때문으로 보인다. 성층권에

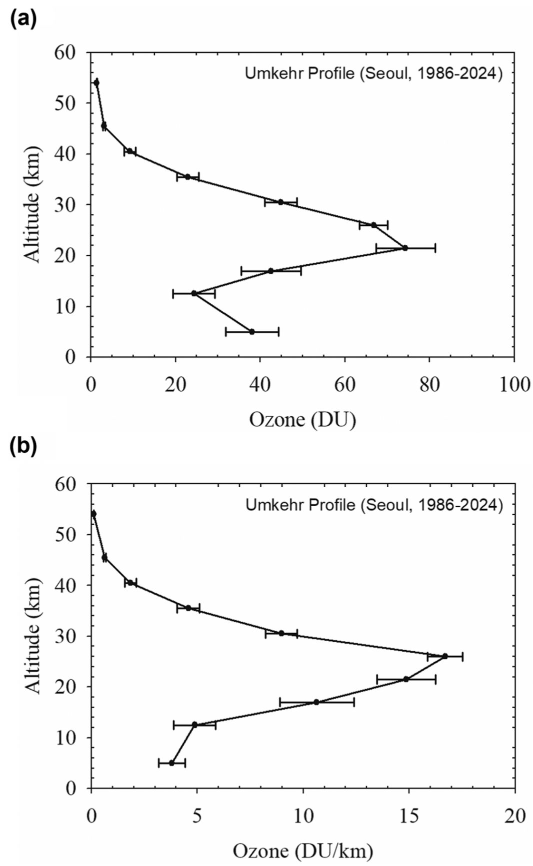

Fig. 9. (a) Climatology of layer integrated ozone profile and (b) ozone concentration profile in Seoul from 1986 to 2024.

해당하는 15~43 km까지의 영역(3~8번 층)까지의 오존량의 총합은 260.6 DU으로 80% 가량의 오존이 성층권에 분포하는 것을 Umkehr 방법에 의한 연직 분포 결과를 통해 확인할 수 있다(Fig. 9a). 그러나 농도분포로 보게 될 경우(Fig. 9b), 성층권에서의 고농도 오존 영역은 3~5번 층(15~28 km)에 분포하고 있으며, 이 고도에서는 10.6~16.7 DU km^{-1}의 농도로 나타나 상부 성층권(1.9~9.0 DU km^{-1})에 비해 유의미하게 높은 농도가 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 Umkehr 방법에 의한 기후 분포를 통해 오존연직분포의 일반적인 특성이 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

6. 요약 및 결론

1985년부터 공식적으로 오존자료의 산출이 이루어진 돕슨 분광광도계는 서울 연세대학교의 월봉 오존 관측소에 위치하여 오존전량과 오존 연직 분포에 대

해 40년동안 장기간 관측을 통해 오존층 변화 감시에 대해 한반도의 대표적인 정보를 공유하고 다양한 연구활동에 활용되면서 국제적인 연구 협력에 장기간 기여하였다. 특히 오존홀의 발견으로 인해 오존 관측의 관심이 높아지던 시점과 동시에 관측이 시작된 한반도 유일의 오존 지상관측소이기 때문에 장기간 지상 관측 자료를 이용한 기후 특성 변화 연구와 위성 등의 장기 검증 자료로 다양하게 활용되었다. 관측이 이루어진 40년 동안 측기의 노후화와 특성 변화 등이 관측에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 주기적인 검증과 수리를 거쳤을 뿐 아니라 자동화 시스템을 구축하여 노후화되는 측기에 의한 관측 자료의 품질 저하를 최소화하고 장기간 안정된 자료를 확보하도록 다양한 노력이 이루어졌다.

이러한 장기 관측 자료를 바탕으로 하여 돕슨 분광광도계는 한반도의 오존자료의 대표 자료로 활용되어 동아시아 영역에서의 위성을 포함한 다양한 원격탐사 측기의 검보정 표준 자료로 제공되는 데 자주 활용되었으며, 오존층의 장기 기후변화 경향에 있어서 인위적 요인과 자연적 요인을 구분하여 오존층의 장기적인 시간변화 특성에 대한 연구에 활용되었다. 이러한 기후적인 분석뿐 아니라 오존층이 가지는 시공간적 특성을 이용하여 성층권과 대류권 사이의 역학적 수송 과정에 대한 연구와 자외선 복사에 영향을 주는 오존의 특성상 자외선 지수의 현황과 예보를 위한 기초 자료로도 이용되어 다양한 대기복사 및 기후물리 분야에서 그 활용 가치가 높았다. 장기간의 관측으로 일부 노후화가 진행된 상황에서도 오존전량과 오존 연직 분포의 장기 통계 경향을 볼 경우, 오존 회복 경향과 연직 분포 특성이 정확하게 산출되고 있으며, 이는 향후 지속적인 관측을 통해 한반도 오존 연구에 있어서 여전히 중요한 관측 자료의 가치를 가질 것으로 기대된다. 그러나 과거에 매우 다양한 노력을 통해 품질 관리가 이루어진 서울 돕슨 분광광도계는 노후화가 진행되면서 관측 품질이 계속해서 변할 것으로 예상된다. 따라서 앞으로는 돕슨 분광광도계에서 생산되는 자료에 대해서 자체적인 정밀 감시와 추적을 통해 관측 품질을 유지하고, 새로이 구축된 판도라 분광광도계 관측 네트워크와 환경위성에서부터 생산된 오존 자료의 품질을 평가하는 활동에 그 역할이 높아질 것으로 보인다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2023-00219830). 또한 연세대학교 월봉관측소는 기상청 지구대기감시 위탁관측소로 지정되어 장비 운영을 위한 재정적 지원을 받았습니다. 오존 관측에 참여한 연세대학교 대기복사연구실 연구원 일동에게 감사드립니다. 무엇보다 성층권 오존 파괴라는 전 지구적인 환경 문제의 긴급성을 1980년대 초반 대한민국 학계에 최초로 알리셨으며, 남극 오존층 파괴가 공식 발표된 1985년 이전에 국내 최초로 연세대학교에 돕슨 분광광도계를 기반으로 성층권 오존 감시 체제를 구축하신 고(故) 조희구 교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 연구 과정의 완성까지 함께하지는 못하셨지만, 기력이 다하시는 날까지 자료 분석에 귀중한 조언과 통찰을 아끼지 않으셨던 조 교수님의 업적을 기리며 본 논문을 바칩니다.

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.

Baek, K., J. Bak, J. H. Kim, S. S. Park, D. P. Haffner, and W. Lee, 2024: Validation of geostationary environment monitoring spectrometer (GEMS), TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI), and Ozone Mapping and Profiler Suite Nadir Mapper (OMPS) using Pandora measurements during GEMS Map of Air Pollution (GMAP) field campaign. *Atmos. Environ.*, **324**, 120408, doi:10.1016/j.atmosenv.2024.120408.

______, J. H. Kim, J. Bak, D. P. Haffner, M. Kang, and H. Hong, 2023: Evaluation of total ozone measurements from Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS). *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 5461-5478, doi:10.5194/amt-16-5461-2023.

______, ______, and J. Kim, 2020: The cross-validation of satellite OMI and OMPS total ozone with Pandora measurement. *Korean J. Remote Sens.*, **36**, 461-474, doi:10.7780/kjrs.2020.36.3.6.

Bak, J., J. H. Kim, R. J. D. Spurr, X. Liu, and M. J. Newchurch, 2012: Sensitivity study of ozone retrieval from UV measurements on geostationary platforms. *Remote Sens. Environ.*, **118**, 309-319, doi:10.1016/j.rse.2011.11.010.

______, X. Liu, J. H. Kim, K. Chance, and D. P. Haffner, 2015: Validation of OMI total ozone retrievals from the SAO ozone profile algorithm and three operational algorithms with Brewer measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 667-683, doi:10.5194/acp-15-667-2015.

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.

Bernhard, G., R. D. Evans, G. J. Labow, and S. J. Oltmans, 2005: Bias in Dobson total ozone measurements at high latitudes due to approximations in calculations of ozone absorption coefficients and air mass. *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JD005559.

Bhartia, P. K., D. F. Heath, and A. F. Fleig, 1985: Observation of anomalously small ozone densities in south polar stratosphere during October 1983 and 1984. *in Proceedings of the Symposium on Dynamics and Remote Sensing of the Middle Atmosphere*, 5th Scientific Assembly, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Prague, Czech Republic, 5-17 August 1985.

______, and R. D. McPeters, 2018: The discovery of the Antarctic Ozone Hole. *C. R. Geoscience*, **350**, 335-340, doi:10.1016/j.crte.2018.04.006.

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.

Cho, H. K., H. K. Kim, and K. T. Lee, 1994: Variability and trend of total ozone over Seoul. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 219-234.

______, J. Kim, S. N. Oh, S.-K. Kim, S.-K. Baek, and Y. G. Lee, 2003: A climatology of stratospheric ozone over Korea. *Korean J. Atmos. Sci.*, **6**, 97-112.

______, S. M. Lee, and C. Y. Choi, 1989: The seasonal variations of total amounts of ozone at Seoul. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 21-29.

______, Y.-J. Yoon, J. H. Park, K. M. Lee, and Y. Tatsuya, 1998: Retrieval of vertical ozone profile using satellite solar occultation method and tests of its sensitivity. *J. Astron. Space Sci.*, **15**, 119-138.

Chubachi, S., 1984: Preliminary result of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983. *Memoirs of the National Institute of Polar Research*, Japanese Special Issue **34**, 13-19.

______, 1985: A special ozone observation at Syowa station, Antarctica from February 1982 to January 1983. In: Zerefos, C.S., Ghazi, A. (Eds.), *Atmospheric Ozone*, 285-289, doi:10.1007/978-94-009-5313-0_58.

______, 2009: Seasonal start of the Antarctic ozone hole derived from observations with Dobson spectrophotometers. *Int. J. Remote Sens.*, **30**, 3907-3916, doi:10.1080/01431160902821957.

Chung, S. R., 1996: WMO regional comparison of the Dobson spectrophotometers: aerological observatory. Yonsei University, 91 pp.

Dütsch, H. U., 1959: Vertical ozone distribution from Umkehr observations. *Archiv. Met. Geoph. Biokl. A*, **11**, 240-251, doi:10.1007/BF02247929.

ESA, 2017: Sentinel-5 Precursor Calibration and Validation Plan for the Operational Phase. European Space Agency, 26 pp.

Farman, J. C., B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/Nox interaction. *Nature*, **315**, 207-210, doi:10.1038/315207a0.

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**, 4647, doi:10.1029/2001JD001350.

Hwang, S.-H., H.-M. Kim, J. Kim, E.-S. Lee, D.-H. Lee, M. Jang, D.-R. Son, and G.-R. Cho, 2007a: Overview of scientific payloads onboard the KSR-III rocket. *Acta Astronautica*, **60**, 880-888, doi:10.1016/j.actaastro.2006.11.010.

______, J. Kim, and G.-R. Cho, 2007b: 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.

______, S.-J. Lee, J. Kim, H. K. Cho, and E.-S. Chung, 2004: Vertical O3 profiling and error analysis by UV radiometer onboard KSR-III. *Passive Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds IV*, **5652**, 290-298, doi:10.1117/12.580141.

Kim, J., H.-K. Cho, J. Mok, H. D. Yoo, and N. Cho, 2013: Effects of ozone and aerosol on surface UV radiation variability. *J. Photochem. Photobiol. Biology*, **119**, 46-51, doi:10.1016/j.jphotobiol.2012.11.007.

______, ______, Y.-G. Lee, S. N. Oh, and S.-K. Baek, 2005: Updated trends of stratospheric ozone over Seoul. *Atmosphere*, **15**, 101-118.

______, 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**, 16121-16126, doi:10.1029/97JD00460.

______, S. J. Lee, J. D. Lee, G. R. Cho, Y. I. Won, and

H. K. Cho, 2001: Measurement of middle atmospheric ozone density profile by rocket-borne radiometer onboard KSR-II. *Adv. Space Res.*, **27**, 2025-2030, doi:10.1016/S0273-1177(01)80014-4.

______, S.-S. Park, K.-J. Moon, J.-H. Koo, Y.-G. Lee, K. Miyagawa, and H.-K. Cho, 2007: Automation of Dobson spectrophotometer (No. 124) for ozone measurements. *Atmosphere*, **17**, 339-348.

______, ______, N. Cho, W. Kim, and H. K. Cho, 2011: Recent variations of UV irradiance at Seoul 2004-2010. *Atmosphere*, **21**, 429-438, doi:10.14191/Atmos.2011.21.4.429.

Kim, J., J. Kim, H.-K. Cho, J. Herman, S. S. Park, H. K. Lim, J.-H. Kim, K. Miyagawa, and Y. G. Lee, 2017: Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 3661-3676, doi:10.5194/amt-10-3661-2017.

Kim, W., J. Kim, S. S. Park, and H.-K. Cho, 2014: UV sensitivity to changes in ozone, aerosols, and clouds in Seoul, South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol*., **53**, 310-322, doi:10.1175/JAMC-D-13-052.1.

KMA, 2024: Report of global atmosphere watch. Korea Meteorological Agency, 134 pp.

Komhyr, W. D., 1980: *Operational handbook-Ozone observations with a Dobson spectrophotometer*. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 6, World Meteorological Organization, 125 pp.

______, and R. D. Evans, 2008: *Operations handbook-Ozone observations with a Dobson spectrophotometer*. GAW No. 183, Revised 2008. World Meteorological Organization Global Atmospheric Watch, 85 pp.

Koukouli, M. E., M. Zara, C. Lerot, K. Fragkos, D. Balis, M. van Roozendael, M. A. F. Allart, and R. J. van der A, 2016: The impact of the ozone effective temperature on satellite validation using the Dobson spectrophotometer network. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 2055-2065, doi:10.5194/amt-9-2055-2016.

Krzyścin, J. W., and B. Rajewska-Więch, 2009: Ozone recovery as seen in perspective of the Dobson spectrophotometer measurements at Belsk (52 N, 21 E) in the period 1963~2008. *Atmos. Environ.*, **43**, 6369-6375, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.09.018.

______, ______, and J. Jarosławski, 2021: Total column ozone measurements by the Dobson spectrophotometer at Belsk (Poland) for the period 1963–2019: homogenization and adjustment to the Brewer spectrophotometer. *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 4425–4436, doi:10.5194/essd-13-4425-2021.

Kwon, H.-A., R. J. Park, J. I. Jeong, S. Lee, G. González Abad, T. P. Kurosu, P. I. Palmer, and K. Chance, 2017: Sensitivity of formaldehyde (HCHO) column measurements from a geostationary satellite to temporal variation of the air mass factor in East Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 4673-4686, doi:10.5194/acp-17-4673-2017.

Lee, H., W. Kim, Y. G. Lee, J.-H. Koo, Y. Jung, S. S. Park, H.-K. Cho, and J. Kim, 2018: Broadband dependence of atmospheric transmissions in the UV and solar radiation, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, **71**, 1503513, doi: 10.1080/16000889.2018.1503513.

______, ______, ______, J. Kim, and H. K. Cho, 2019: Atmospheric transmission of Ultraviolet and total solar radiation by clouds, aerosols, and ozone in Seoul, Korea: a comparison of semi-empirical model predictions with observations, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 165-175, doi:10.1007/s13143-018-0082-3.

Lee, Y. G., J. Kim, H.-K. Cho, and C. H. Song, 2009: Regional forecast of the UV index with optimized total ozone prediction using satellite observations over East Asia. *Int. J. Remote. Sens.*, **30**, 6035-6051.

McKinlay, A. F., and B. L. Diffey, 1987: A reference action spectrum for ultra-violet induced erythema in human skin. Human exposure to ultraviolet radiation: risks and regulations, Elsevier Science, 83–87.

Miyagawa, K., 1997: Development of an automated system for the Dobson ozone spectrophotometers. *The Geophys. Mag. Series.*, **2**, 77-107.

______, 2004: Upgraded automatic Dobson ozone spectrophotometer with Windows PC for ozone observation network in Japan. *Proceedings Quadrennial Ozone Symposium in Kos Greece 2004*, **1**, 579-580.

Moeini, O., Z. Vaziri Zanjani, C. T. McElroy, D. W. Tarasick, R. D. Evans, I. Petropavlovskikh, and K.-H. Feng, 2019: The effect of instrumental stray light on Brewer and Dobson total ozone measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 327–343, doi:10.5194/amt-12-327-2019.

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, doi:10.5194/acp-9-2113-2009.

Park, M., J.-H. Koo, J. Kim, S. S. Park, T. Lee, S. Kim, G. McConville, and K. Miyagawa, 2024: The shipping preparation of Dobson spectrophotometer in detail for participation to the international collaboration. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **40**, 585-597, doi:10.5572/KOSAE.2024.40.5.585.

Park, S. S., H. K. Cho, J.-H. Koo, H. Lim, H. Lee, J. Kim, and Y. G. Lee, 2019: Monitoring and long-term trend of total column ozone from Dobson spectrophotometer in Seoul (1985~2017). *Atmosphere*, **29**, 13-20, doi:10.14191/Atmos.2019.29.1.013.

______, 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.

______, ______, 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, doi:10.14191/ATMOS.2011.21.4.349.

______, M. Kim, H. Lee, H. Lee, S.-M. Kim, and Y. G. Lee, 2017: Estimating cloud and aerosol UV modification factors based on spectral measurement from the Brewer spectrophotometer. *Atmosphere*, **8**, 109, doi:10.3390/atmos8060109.

______, Y. G. Lee, and J. H. Kim, 2015: Impact of UV-A radiation on erythemal UV and UV-index estimation over Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 1639-1646, doi:10.1007/s00376-015-4231-7.

Petropavlovskikh, I., P. K. Bhartia, and J. DeLuisi, 2004: An improved Umkehr algorithm. *NOAA Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences*, 10-15 [Available online at https://gml.noaa.gov/grad/research/umkehr/append_umk_pdf.pdf].

Scotto, J., G. Cotton, F. Urbach, D. Berger, and T. Fears, 1988: Biologically effective ultraviolet radiation: surface measurements in the United States, 1974 to 1985. *Science*, **239**, 762-764, doi:10.1126/science.3340857.

Svendby, T. M., and A. Dahlback, 2002: Twenty years of revised Dobson total ozone measurements in Oslo, Norway. *J. Geophys. Res.*, **107**, ACH3-1-ACH3-17, doi:10.1029/2002JD002260.

Tully, M. B., 2023: GAW Ozone Networks. In *Handbook of Air Quality and Climate Change*, 1-13, doi:10.1007/978-981-15-2527-8_53-1.

Wang, W., S. Chai, H. Wang, W. Fan, K. Yu, S. Liang, and J. Ma, 2015: The influence of sulfur dioxide on Dobson spectrophotometer total ozone measurement: analysis on the basis of theoretical factor. *J. Coastal Res.*, **73**, 353-358, doi:10.2112/SI73-062.1.

Weatherhead, E. C., and S. B. Andersen, 2006: The search for signs of recovery of ozone layer. *Nature*, **441**, 39-45, doi:10.1038/nature04746.

______, G. C. Tiao, G. C. Reinsel, J. E. Frederick, J. J. DeLuisi, D. Choi, and W.-K. Tam, 1997: Analysis of long-term behavior of ultraviolet radiation measured by Robertson-Berger meters at 14 sites in the United States. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**, 8737-8754, doi:10.1029/96JD03590.

WHO, 1994: Ultraviolet radiation: an authoritative scientific review of environmental and health effects of UV, with reference to global ozone layer depletion/ published under the joint sponsorship of the United Nations Environment Programme, the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection and the World Health Organization. 2nd ed. World Health Organization [Available online at https://iris.who.int/handle/10665/39901].

WMO, 1985: Atmospheric Ozone. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 16, World Meteorological Organization, 520 pp.

APPENDIX

Historical List of Participants for Dobson Spectrophotometer

Participant	Period (Year)			Participant	Period (Year)		
최치영	1984	~	1994	정욱교	2007	~	2015
이재원	1986	~	1988	최선현	2008	~	2009
유희동	1986	~	1988	조나영	2009	~	2011
김기철	1984	~	1989	이상희	2009	~	2012
김남옥	1988	~	1989	김창수	2009	~	2009
고정석	1988	~	1990	김우경	2010	~	2013
신현우	1989	~	1990	윤서연	2012	~	2014
김영옥	1989	~	1991	서소라	2012	~	2014
	1995	~	1996	최명제	2011	~	2017
김형진	1989	~	1989	고수정	2012	~	2016
이규태	1989	~	1993	이하나	2013	~	2021
최진	1989	~	1990	임현광	2013	~	2016
정영숙	1990	~	1990	김정현	2014	~	2015
강성락	1990	~	1991		2016		2017
김경환	1990	~	1990	김지영	2014	~	2016
황장희	1990	~	1991	이서영	2014	~	2018
이호찬	1990	~	1993	정희성	2015	~	2018
이재병	1991	~	1993	조영범	2015	~	2015
장정국	1991	~	1992	홍재민	2016	~	2020
이계영	1991	~	1991	조원석	2016	~	2016
정창훈	1991	~	1992	박중희	2016	~	2017
	1993	~	1995	안다현	2016	~	2020
신도식	1992	~	1994	조예슬	2017	~	2020
공갑구	1992	~	1993	김경민	2017	~	2017
이승용	1992	~	1993	임나리	2018	~	2018
윤영준	1993	~	1997	김민석	2018	~	2021
정성래	1994	~	1996	박예림	2018	~	2018
백선균	1994	~	1999	김정우	2018	~	2019
권효정	1994	~	1996	정도윤	2018	~	2018
정명재	1994	~	2000	김송강	2019	~	2021
박수미	1994	~	1997	김지수	2019	~	2019
이승현	1995	~	1996	이지우	2019	~	2022
박지용	1996	~	1998	양혜성	2019	~	2020
박병권	1996	~	1999	이동희	2019	~	현재
이준석	1996	~	2001	이태경	2020	~	현재

김호진	1996	~	2000	배혜진	2020	~	2021
박선욱	1996	~		차혜지	2021	~	2023
홍경하	1998	~		이다영	2021	~	2023
전우근	1999	~		이주희	2021	~	현재
엄준식	2000	~	2001	박민주	2021	~	현재
송근용	2000	~	2002	이나현	2021	~	2023
문경정	2001	~	2006	임소연	2022	~	2022
이윤곤	2001	~	2011	구본훈	2022	~	2022
최성화	2002	~	2009	이소정	2022	~	2024
윤종민	2003	~	2006	나성균	2022	~	현재
이재화	2005	~	2011	정영빈	2022	~	2023
홍현기	2005	~	2006	채유진	2023	~	2023
	2011	~	2012	강욱	2023	~	2023
정연진	2005	~	2009	전하정	2023	~	2023
	2012	~	2016	김지훈	2023	~	2024
구자호	2005	~	2008	권혁도	2023	~	현재
목정빈	2005	~	2008	김상준	2023	~	현재
김윤미	2005	~	2008	서예준	2024	~	2024
이연주	2006	~	2008	오승주	2024	~	2024
박상서	2006	~	2013	채종천	2024	~	현재
김미진	2006	~	2012	박지민	2024	~	현재
구명서	2006	~	2007	박서연	2025	~	현재