

기술자료

국제 연구 참여를 위한 돛슨 분광광도계 반출 준비 작업 과정

The Shipping Preparation of Dobson Spectrophotometer in Detail for Participation to the International Collaboration

박민주, 구자호*, 김 준, 박상서¹⁾, 이태경, 김수민²⁾,
Glen McConville³⁾, Koji Miyagawa⁴⁾

연세대학교 대기과학과, ¹⁾울산과학기술원 지구환경도시건설공학과,
²⁾국립기상과학원, ³⁾콜로라도주립대 환경과학연구협력단
⁴⁾일본 기상청

Minju Park, Ja-Ho Koo*, Jhoon Kim, Sang Seo Park¹⁾, Taegyung Lee,
Sumin Kim²⁾, Glen McConville³⁾, Koji Miyagawa⁴⁾

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Civil Urban Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Republic of Korea

²⁾National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Republic of Korea

³⁾Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado, USA

⁴⁾Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan

접수일 2024년 8월 25일
수정일 2024년 9월 22일
채택일 2024년 9월 23일

Received 25 August 2024
Revised 22 September 2024
Accepted 23 September 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-2123-5694
E-mail : zach45@yonsei.ac.kr

Abstract Dobson spectrophotometer is the representative ground-based remote sensing instrument for the continuous monitoring of stratospheric ozone variation. Therefore, Dobson spectrophotometer has been significantly considered as a standard instrument in the Global Atmospheric Watch programme (GAW) of World Meteorological Organization (WMO), meaning that the participation to the international collaboration is quite important. Yonsei University in Seoul (37.34N, 126.95E) has been operating a Dobson spectrophotometer No. 124, as one of the GAW stations since the year 1984. Due to the long-term usage (~40 years) it is very important to maintain the performance of Dobson spectrophotometer for a sustainable and reliable data production. GAW officially recommends from their report (#183) to calibrate Dobson instrument regularly by comparing to the primary or regional standard Dobson spectrophotometers. For this calibration purpose, Dobson instrument at Yonsei university was shipped to the NOAA at Boulder, Colorado, USA in June 2024. This paper is the technical report to include all detailed processes about the preparation of this shipping, such as parts separation, packing, and final shipping. We believe that this report can provide a number of useful information in detail to users of Dobson spectrometer or other ground-based instrument who needs the instrument shipping for the international collaboration.

Key words: Dobson spectrophotometer, Ozone, Global atmosphere watch, Calibration

1. 서 론

돛슨 분광광도계 (Dobson spectrophotometer)는 대기 중의 오존 전량과 연직 분포를 광학적 방법으로 관측하는 장비이다. 돛슨 분광광도계는 영국 G.M.B. Dobson에 의해 1928년 처음 제작된 이래로 (Dobson,

1968) 세계 각지에서 성층권 오존량 변화를 추적하기 위한 오존 전량 (total ozone column) 관측에 이용되고 있다. 오존은 돛슨 분광광도계 외에도 브루어 분광광도계 (Brewer spectrophotometer), 소형화 기기인 판도라 분광계 (Pandora spectrometer) 및 여러 위성 센서에 의한 원격탐사 방법으로 감시되고 있으며 풍선

비양을 통해 연직 고도별 오존량을 실측하는 오존존데(Ozonesonde)와 같은 방법으로도 일부 추정기가 가능하다. 그중에서도 돕슨 분광광도계는 최초 남극 성층권 오존층 파괴를 탐지하는 데 활용된 만큼(Farman *et al.*, 1985), 전구 범위 성층권 오존 감시의 기본 기기로 여전히 간주되고 있으며 지금도 많은 관측소에서 활용 중이기에 단일 기기 기반 수십 년의 지상 관측 자료를 생산한다는 점에서도 지구대기감시 역사에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 전 세계에서 수집된 돕슨 기기의 관측 데이터는 지구대기감시 프로그램(Global Atmosphere Watch programme, 이하 GAW) 산하의 웹사이트 World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC)에 저장, 공유된다.

세계기상기구(World Meteorology Organization, 이하 WMO)의 GAW 지구 오존층 감시 시스템(GO3OS, Global Ozone Observing System)은 앞서 언급한 대로 돕슨 분광광도계를 표준 관측 기기로 지정했다. WMO는 1957년 국제 지구 물리 관측의 해(International Geophysical Year)에 오존 관측 표준 절차를 마련한 후 1960년대 후반 배경대기오염 감시망(Background Air Pollution Monitoring Network)을 설립했다. 감시망은 이후 1989년 GAW로 편입되어 GO3OS의 토대가 되

었다(WMO, 2014). 현재 GAW 프로그램의 운영 기준은 GAW 보고서에서 제시하는 바를 따르며, 그 목표는 다음 3가지이다: (1) 환경 위기가 사회에 미치는 위험을 줄이고 환경 협약의 기준을 준수; (2) 기후, 날씨, 대기질 예측 성능 강화; (3) 환경 정책을 통해 과학적 평가 방식 기여(WMO, 2017). 현재 전 세계에서 약 80여 개의 GAW 관측소에서 위 세 가지 목표에 맞추어 성층권 오존 감시 업무를 수행하기 위해 돕슨을 운영 중에 있다(그림 1)(WOUDC, 2024).

GAW에 등록된 서울 성층권 오존 감시관측소(#252, SEO)는 연세대학교에 과학관 옥상에 위치하며 2004년부터 기상청의 기후변화감시 위탁관측소로도 지정되어 운영 중이다. 연세대학교는 최초 1984년 영국 Ealing사(社)로부터 돕슨 분광광도계(No. 124)가 도입된 이후로, 동일한 기기가 한반도 상공의 오존층 변화를 약 40년간 감시하고 있으며(Cho *et al.*, 1996)(표 1), 2007년에는 기상 변화에 자동으로 대처할 수 있도록 월봉오존관측소라는 이름의 오존돔을 구축하여 돕슨 기기 관측의 안정성을 도모하였다(Kim *et al.*, 2007). 돕슨 기기 관측의 운영과 유지보수는 1980년 발간 후 2008년 개정된 GAW Report No. 183에서 제시되는 지침을 따르는데 검보정과 관련하여 각 관측소에



Fig. 1. Map of total ozone column observation stations (WMO Region II, Asia) (figure source: GAW, <https://gawsis.meteoswiss.ch/>).

Table 1. Upgrade and calibration history of Dobson spectrophotometer (No. 124) (Kim *et al.*, 2007).

Date	Main contents
1983.9	- Dobson spectrophotometer in Yonsei University (No. 124) started the operation from May 1984, after calibration with the WMO RA-VI (Europe) regional standard instrument (No. 41, UK Met Office).
1985.10.18	- Intercomparison with international reference standard lamps (operated by NOAA/ERL).
1991.4.23~8.5	- Intercomparison with WMO's secondary standard Dobson spectrophotometer (No. 065) was conducted. The original vacuum tube circuitry was replaced with new electromechanical systems.
1991.11.26~1992.2.25	- Intercomparison with international reference standard lamps (operated by NOAA/ERL).
1992.1	- IAMAP (1992, International Association of Meteorology and Atmospheric Physics) absorption coefficients of ozone and scattering coefficients of airborne particles were adopted at the recommendation of the International Ozone Commission (IOC). - New programme for vertical ozone calculation was introduced, as WOUDC improved Umkehr measurement algorithm.
1996.2.27~3.26	- Intercomparison with WMO RA-II (Asia) regional standard Dobson instrument (No. 116, Japan Meteorological Agency) (Tsukuba, Japan).
1999.3.5~2000.3.8	- Intercomparison with WMO RA-V (Australia, Pacific) regional standard Dobson instrument (No. 105, Australian bureau of Meteorology) and repairment (Australia).
2004.11.1~2004.11.14	- Intercomparison with WMO RA-II (Asia) regional standard Dobson instrument (No. 116, Japan Meteorological Agency) and 1st Automation of Dobson instrument (No. 124) (Yonsei University, Seoul, Korea). Dobson No. 116 was brought from Japan.
2005.10~2005.11	- 2nd automation of Dobson instrument (No. 124) (Tsukuba, Japan).
2006.8.5	- Complete automation of Dobson (No. 124).
2014.9	- Regular intercomparison with standard Dobson instrument (No. 065) (NOAA Global Monitoring Laboratory, Boulder, US).
2018.11	- Replacing the computer in the automated observation system and correcting the instrument calibration drift by the expert invitation (Koji Miyagawa, JMA) (Yonsei University, Seoul, Korea).
2023.10	- Inspecting the overall state of Dobson instrument (No. 124) and correcting the instrument calibration drift by the expert invitation (Koji Miyagawa, JMA) (Yonsei University, Seoul, Korea).
2024.7	- Regular intercomparison with standard Dobson instrument (No. 065) (NOAA Global Monitoring Laboratory, Boulder, US).

서 운영 중인 돕슨 기기를 WMO 기준에 따라 분류된 지역 표준 기기, 혹은 미국 콜로라도주 볼더 (Boulder) 에 위치한 미국 국립해양대기연구소 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 이하 NOAA) 표준 기기 (No. 065)와 최소 5년 주기로 정량적인 (Absolute Scale) 상호 보정을 하도록 권고하고 있다. 이를 위해서는 돕슨 기기를 해외로 배송하기 위한 반출 작업을 수행해야 하는데 40년 이전의 기술로 제작된 기기라 해체 및 재조립 과정이 편리하게 모듈화되어 있지 않은 데다 광학 부품의 외부 영향에 대한 취약성으로 인해

매우 주의 깊은 작업을 요구한다.

본 기술논문은 국내 단 한 기밖에 존재하지 않는 돕슨 분광광도계의 검보정 및 해외 공동 연구 등의 목적에 따른 해외 기기 반출 과정을 요약하여 보고하기 위한 목적으로 작성되었다. 앞서 언급했듯이 돕슨 분광광도계는 여전히 WMO-GAW 관측소에서 성층권 오존 감시의 표준 기기로 활용되어 오고 있는 만큼 이 기기 반출 과정에 대해서도 일부는 실무 목적의 사용자 방침 (user manual)이 정리되어 공유되고 있으나 다소 세부 사항의 누락이 많은 데다 관측 제반 환경의

변화가 고려되지 못한 부분들이 많아 내용의 업데이트가 필요한 상황이다. 특히 본 연구팀이 이번 2024년 6월에 연세대학교 돕슨 기기의 정기 검보정 목적으로 미국 NOAA로 배송을 준비하는 과정에서 기존 연구진들의 노하우가 기록으로 남은 바가 크지 않아 준비에 나름 난관을 겪었기에 이번 기회를 통해 기기 해체, 포장(packaging), 운반, 배송까지 이르는 모든 과정을 소상하게 국문 기록으로 남겨 향후 연구에도 지속적으로 활용하고자 한다. 갈수록 국제 공동 연구가 증가하고, 또 촉진되고 있는 상황에서 이런 기기 반출 준비 과정에 대한 기록은 관측/실험 연구자 전반에게도 좋은 참고 자료가 될 것으로 생각한다.

2. 돕슨 분광광도계 관측 원리와 측기 구성

2.1 돕슨 분광광도계 관측의 광학적 원리

돕슨 분광광도계는 자외선 영역에 포함된 파장쌍(λ , λ')의 직달일사 세기를 이용해 오존 전량(X)을 계산한다. 관측 파장은 4가지로 분류한다(A: 305.5, 325.0 nm; B: 308.9, 329.1 nm; C: 311.5, 332.4 nm; D: 317.5, 339.9 nm). 오존층에 의한 흡수가 발생한 짧은 파장 λ 와, 흡수가 발생하지 않은 긴 파장 λ' 의 빛은 각각 실효(Slit)를 통과한다. 이때 두 직달일사량의 빛 세기 비율(N)을 알아야 한다. 이는 실효 앞에 있는 광학 쉐기(Optical wedge)를 조절하여 두 빛의 세기가 같도록 한 다음 계산 가능하다(Kim *et al.*, 2007).

오존 전량 계산에 필요한 값을 광학적으로 측정하기 위한 주요 부품들이 있다. 먼저, 2개의 파장은 돕슨 기기 전면에 위치한 Q-lever(Q1, Q2) 회전량에 의해 결정된다. 다음으로 광학 쉐기의 감쇄율은 돕슨 기기 상단의 R-dial 회전량으로 조절된다. 마지막으로 돕슨 기기 전면 아래쪽에 위치한 2개의 차단막대(Shutter rod)를 누르거나 당겨 빛이 통과하는 실효의 종류(S2, S3, S4)를 변경한다. 왼쪽 차단막대는 눌렀을 때 S4 실효를 열고, 이는 관측에 사용되는 실효이므로 기기를 점검할 때를 제외하고 항상 눌러 있어야 한다. 오른쪽 차단막대는 눌렀을 때(S2, S3. SHORT Position), 당겼을 때

(S3, S4. LONG Position) 실효가 열리고, 사용 가능한 파장의 종류가 변한다($C \rightarrow C'$). 파장쌍의 선택은 관측 목적에 따라 달라지는데, 일반적으로 오른쪽 차단막대를 SHORT Position에 두고 A, B, C, D 파장 조합을 이용한다(Komhyr and Evans, 2008). 오존 전량과 빛 세기 비율을 계산하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{[N - (\beta - \beta') \frac{mP}{P_0} - (\delta - \delta') \sec(SZA)]}{(\alpha - \alpha') \mu} \quad (1)$$

$$N = L_0 - L = \log(I_0/I_0') - \log(I/I') \quad (2)$$

수식에 나타난 기호의 의미는 아래와 같으며, 파장쌍에 대한 값은 일반 기호와 위첨자(')가 더해진 기호 2가지로 표현했다.

X: 오존 전량(DU, Dobson Unit. 1 DU = 10^{-5} m)

I_0, I_0' : 대기 상한에서 입사한 태양 복사 세기

I, I' : 지표에 직달한 태양 복사 세기

β, β' : 레일리 산란계수(Rayleigh Scattering Coefficient)

m : 대기굴절과 지구의 곡률을 고려한, 대기를 통과하는 태양 복사의 실제 경로와 수직 경로의 비

P, P_0 : 관측 기압 및 해발고도 기압

δ, δ' : 대기 중 에어로졸 입자에 의한 산란계수

SZA: 태양 천정각

α, α' : 오존에 의한 흡수계수

μ : 오존층을 통과하는 태양 복사의 실제 경로와 수직 경로의 비

L_0 : 대기 상한에 입사한 태양 복사 세기(I_0, I_0') 비율의 로그값

L: 지표 직달 태양 복사 세기(I, I') 비율의 로그값

수식으로부터 R-dial은 0.1도의 변화가 오존 전량을 최대 1 DU까지 변화시킬 수 있다고 알려져 있다. 또한, Q-lever는 기온에 따른 설정값 변화가 필요하다. 따라서 광학 관측 방식의 오차를 줄이려면 정교한 회전량 설정이 필수적이다. 연세대학교에서 운영 중인 돕슨 분광광도계(No. 124)는 자동관측시스템화를 위해 측

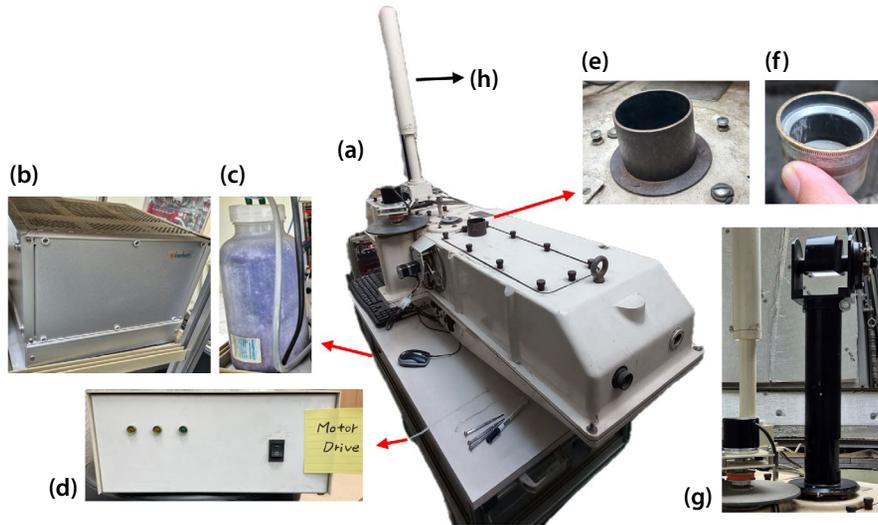


Fig. 2. Dobson spectrophotometer and an operation system. (a) Dobson spectrophotometer, (b) Dobson PC, (c) Dry air pump, (d) Motor controller, (e) Zenith sun cap, (f) Ground quartz plate, and (g) Sun director.

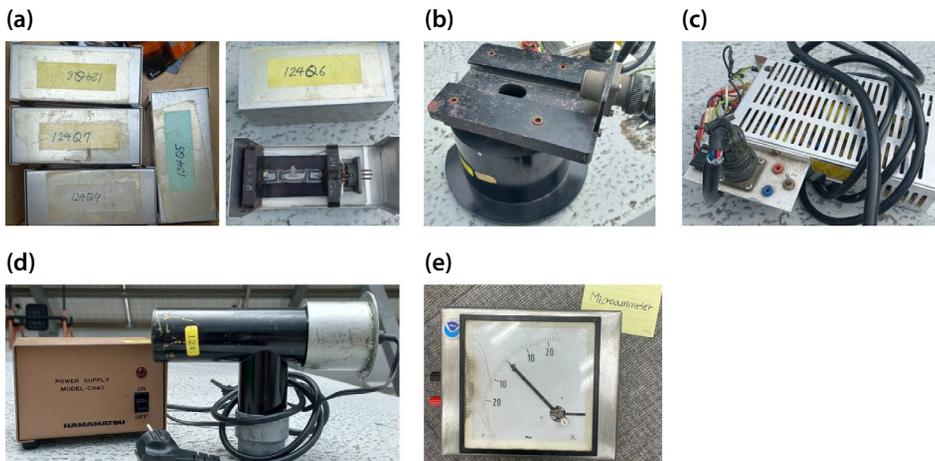


Fig. 3. Dobson calibration set. (a) Standard lamps, (b) Standard lamp holder, (c) Standard lamp AC power, (d) Mercury lamp, and (e) Microammeter.

기 개조된 이력이 있다(Kim *et al.*, 2007). 구동 유닛 (Motor controller, MT01-01)은 관측 자동화의 핵심 하드웨어로, 관측 컴퓨터와 돛스 분광광도계 사이의 인터페이스 역할을 하며 R-dial과 Q-lever를 작동시킨다.

2.2 돛스 분광광도계 관측 장비 구성

돛스 분광광도계 관측에는 광학관측시스템이 포

함된 본체 자동화를 위한 구동 유닛, 관측 수행 및 기 제어 컴퓨터(PC), 직달일사를 측기에 입사시키는 Sun director, 직달일사 관측을 위한 Ground quartz plate, 산란 관측을 위한 Zenith sun cap, 운량을 측정하는 구름 센서(Cloud sensor)가 필요하다(그림 2). 또한 기기 보정에 사용되는 표준전구(Standard lamp)와 전구기구(Standard lamp holder), 표준전구 전원장

치 (Standard lamp AC power), 수은전구 (Mercury lamp), 마이크로 전류계 (Microammeter)가 돕슨 기기 장비 구성에 포함되어 있다(그림 3). 그 외에는 장비 전원 공급을 위한 110 V 멀티탭, 기기 내부 습도 유지를 위한 건조공기 송풍장치(Dry air pump)가 있다(그림 3).

3. 포 장

돕슨 분광광도계 포장(packing) 과정 전반은 NOAA Earth System Research Laboratories 소속의 Global Monitoring Laboratory에서 제공하는 Dobson Packing Instructions 문서를 바탕으로, 자동화를 위해 추가된 부품을 포함하여 기술했다(NOAA GML, 2005).

3.1 돕슨 분광광도계 포장 상자의 규격과 형태

돕슨 포장 상자(그림 4)는 모서리 보강과 내부 스펀지 처리가 된 나무상자로, 상자와 덮개로 구성된다. 덮개를 포함한 전체 크기는 가로 1,600 mm, 세로 670 mm, 높이 520 mm이다. 실제 돕슨이 들어가는 상자 내부 공간 크기는 가로 1,515 mm, 세로 595 mm, 높이 390 mm이다. 상자에는 총 6개의 운반용 손잡이가 있다. 이 중 4개는 2개씩 각 가로면에, 나머지 2개는 1개씩 각 세로면에 있다. 손잡이는 운반 중 수평을 유지

할 수 있도록 대칭 형태로 배치되어 있다. 덮개는 가로면 양쪽에 3개씩 잠금장치가 되어 있고, 상자와 완전히 분리되는 형태이다. 덮개의 가로, 세로면은 상자와 크기가 동일하여 결합 후에는 외부에 튀어나온 곳 없이 완전한 직육면체가 된다.

상자 내부 스펀지는 덮개 쪽을 제외한 상자 5개 면에 기본적으로 한 겹(고경도 스펀지 1T 1장) 보강되어 있다. 돕슨 본체에 맞추어 짧은 세로면에는 양쪽 1개씩 총 2곳에 한 겹, 긴 가로면에는 돕슨 중앙에 있는 Q1, Q2 레버를 피해 약 460 mm 간격을 두고 양쪽 2개씩 총 4곳에 세 겹이(고경도 스펀지 5T 2장, 3T 1장, 전체 130 mm) 추가되어 있다. 가로면의 스펀지는 돕슨 기기를 넣었을 때 약 80 mm의 높이 차이가 있다. 덮개는 상자와 마찬가지로 기본 1겹의 스펀지가 보강되어 있고, 돕슨 기기 위쪽과 닿는 넓은 면에는 고탄성 계란판 스펀지가 있다. 상자와는 별개로, 돕슨 기기를 넣은 후 흔들리지 않도록 빈 공간을 채우는 스펀지가 필요하다. 이에 대한 내용은 기기 포장 과정 이후 자세히 다룬다.

3.2 돕슨 분광광도계 부품 분리 및 보관

돕슨 분광광도계는 본체 외부에 관측 부품과 각종 센서가 부착되어 있고, 여러 케이블이 연결되어 있어 포장 전 분리 작업을 진행해야 한다. 분리 작업 후에는 장기간 야외 관측으로 인해 먼지로 오염된 본체를 깨끗이 닦아 수평을 맞추어 상자에 넣어야 한다. 이번 장

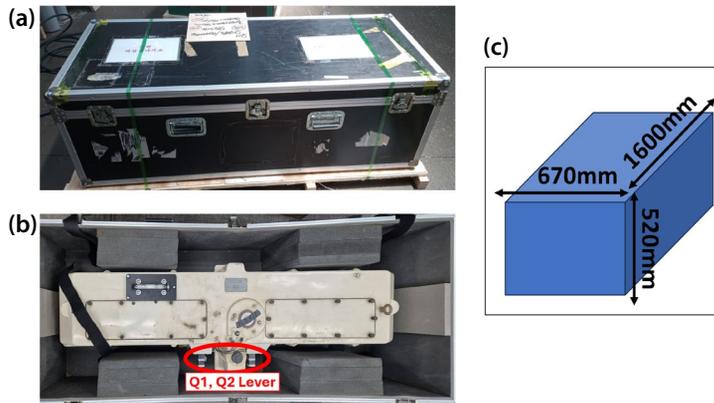


Fig. 4. (a) Outside, (b) Inside, and (c) Size of the Dobson packing box.

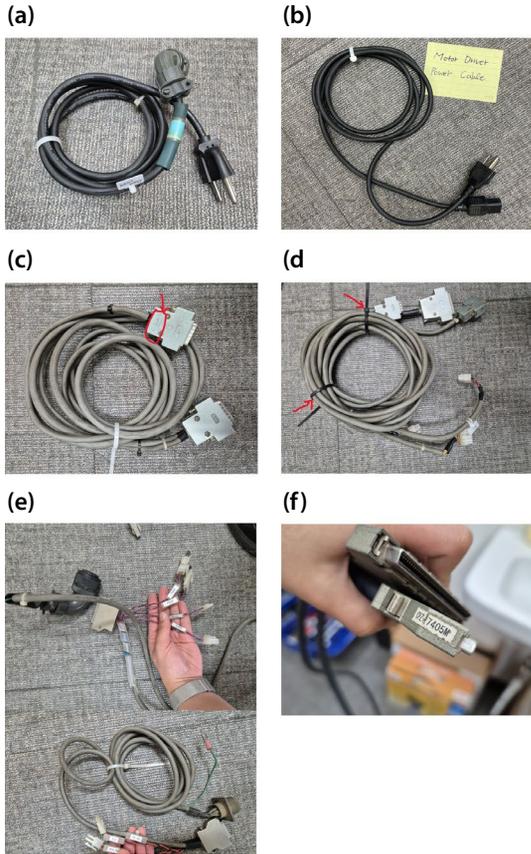


Fig. 5. Cables. (a) Motor drive power, (b) Dobson power, (c) R-dial, (d) Q1/Q2 lever, (e) Origin & Limit sensor, and (f) PCI/IF.

에서는 실제 작업 내용과 순서에 따라 부품, 센서, 케이블을 포함한 각 부속품에 대한 설명과 해체 방법을 하나씩 소개하고, 상자에 넣을 때 주의할 점을 설명한다.

3.2.1 구동 유닛 케이블

구동 유닛에 연결되는 케이블은 전원 케이블 2개를 포함해 총 7개이다. 7개의 케이블은(그림 5) 각각 (a) 구동 유닛 110 V 전원, (b) 돕슨으로 출력되는 110 V 전원, (c) R-dial/Encoder, (d) Q1/Q2 lever, (e) Origin/Limit 센서, (f) PCI/IF에 연결된다. 모든 케이블은 관측을 중단하고 전원을 차단한 후에 해체되어야 한다. R-dial/Encoder 케이블은 2개 선이 하나의 어댑터에 체결된 구조이다. Q1, Q2 lever 케이블은 동일한 형태로, 추후 재설치 시 Q-lever 숫자가 구동 유닛에 맞게

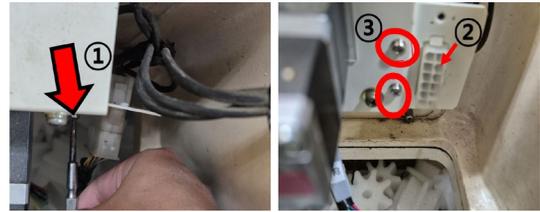


Fig. 6. Procedures for detaching the origin & limit sensor from Dobson. ① Loosening two screws totally on the side of the origin and limit sensor panel. ② Detaching the panel to disconnect the sensor cable. ③ Attaching again the panel with the screws.

연결되도록 주의해야 한다. 센서 케이블은 Origin/Limit 센서에 연결되어 Q-lever의 움직임을 통제하는데 사용된다(그림 6). 센서 케이블은 4개 채널 커넥터와 1개의 항공 커넥터로 나뉘어 있으며, 별도 연결 케이블이 있다. Q-lever와 마찬가지로, 센서 케이블도 재설치 시 알맞게 연결하도록 주의한다. PCI/IF 케이블은 돕슨 관측 명령을 내리는 컴퓨터 본체 CPZ-7405M 모듈에 연결된다. 케이블 해제 작업 중 연결 소켓이 손상되지 않게 유의하고, 케이블 외피가 공구 등에 의해 손상되지 않도록 한다. 또한 케이블이 서로 엉키지 않고 명칭이 잘 나타나도록 개별로 보관하는 것을 권장한다.

3.2.2 구름 센서(Cloud sensor)

구름 센서는 전체적으로 긴 경통 형태이며 돕슨 본체 상단에 고정되어 있다. 구름 센서의 하부에는 수평계, 측면에는 구름 센서를 돕슨에 고정하기 위한 2개의 나사 연결부와 케이블 소켓이 있다(그림 7). 구름 센서는 측면 2개 나사를 손으로 풀고, 센서로부터 케이블을 분리한 다음, 긴 경통 측면의 1개 나사를 손으로 풀어 2개 부분으로 분리함으로써 해제한다. 케이블은 2개 전선이 하나의 커넥터에서 나오는 구조이므로, 포장 시선이 꼬이지 않도록 케이블 타이로 잘 정리해 둔다.

3.2.3 R-dial

R-dial은 돕슨 본체 상단 중앙부에 부착된 회전판 일체를 지칭한다. R-dial은 원형의 금속판(R-dial plate), 회전 인코더(Rotary encoder), 스텝 모터(Step

motor) 및 부속품으로 구성되어 있다. R-dial은 돕슨이 관측하는 오존량에 직접 영향을 미치는 중요한 부품으로, 정밀한 회전량 측정을 위해 부속품이 여러 개 있는 것이 특징이다. R-dial은 구름 센서보다 중요도가 높지만, R-dial 분리 전에 인코더 고정판넬에 연결되어

있는 구름 센서를 제거해야 작업이 용이하므로 나중 순서로 소개한다(그림 8).

첫 번째로, 인코더 고정판넬(Encoder panel)을 돕슨 본체와 분리한다. 판넬에는 인코더, 스텝 모터가 고정되어 있으며, 금속판을 회전시키도록 연결된 부분, 돕슨 본체와 고정된 부분을 해체해야 한다. 먼저 인코더 고정판넬을 돕슨 본체와 연결하는 3개의 나사를 맞는 크기의 육각렌치로 푼다. 다음으로 인코더 옆에 있는 스텝 모터를 고정한 4개의 볼트를 맞는 크기의 육각렌치를 이용해 느슨하게 한다. 스텝 모터가 인코더 고정판넬에 단단히 고정되어 있을 때는 하단의 주황색 드라이브 벨트(Drive belt)가 스텝 모터의 도르래(Pulley)와 R-dial의 도르래를 연결하고 있다. 스텝 모터가 살짝 움직일 수 있도록 볼트를 풀면 팽팽하게 연결되어 있던 드라이브 벨트가 2개의 도르래로부터 분리된다. 이때, 스텝 모터 쪽 도르래는 별도의 고정장치가 없어 축으로부터 분리되어 분실될 수 있으므로, 기기에 접착제가 남지 않는 마스킹 테이프나 필라멘트 테이프 등으로 축에 끼운 상태를 고정한다. 스텝 모터의 볼트는 드라이브 벨트 분리 후에는 다시 조여 스텝 모터가 움직이지 않도록 고정한다. 드라이브 벨트는 분리 과정과 그 이후에 늘어나지 않도록 유의하고, 별도 비닐포장하여 인코더 고정판넬에 붙여둔다.

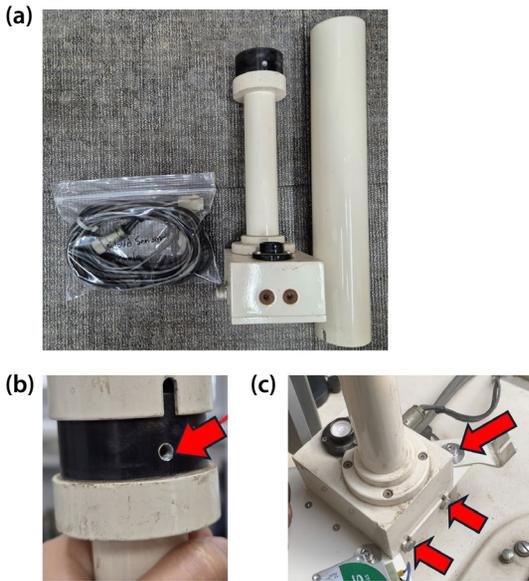


Fig. 7. (a) Cloud sensor cable, main sensor, and cylindrical shaver, from left to right, (b) Cloud sensor screw, and (c) 3 holding screws for the cloud sensor.

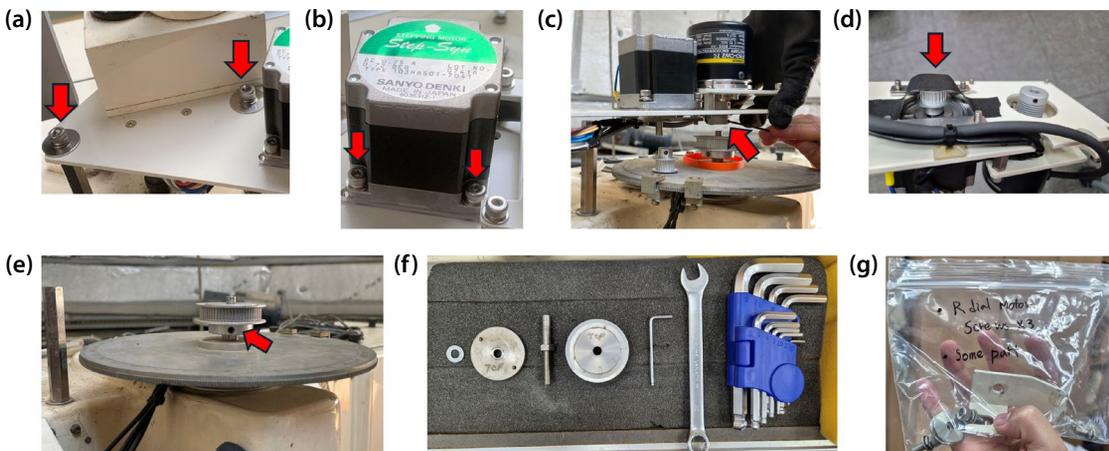


Fig. 8. Process of R-dial disassembly. (a) Encoder panel separation, (b) Step motor position adjustment, (c) Loosening the coupler, (d) Drive belt pulley fixing, (e) R-dial plate, (f) A shaft and two pulleys from R-dial, and (g) Screws and small parts.

마지막으로, 1/16인치 육각렌치로 인코더 아래에 있는 플렉시블 커플러(Flexible coupler) 하단 측면 나사를 풀어, 금속판과 커플러를 잇는 샤프트 축(Shaft)으로부터 인코더 고정판넬이 분리되도록 한다. 이때 커플러 측면 나사는 전부 풀지 않고 커플러가 회전이 가능한 정도로만 느슨하게 한다. 판넬을 본체로부터 완전히 분리시키고, 판넬 하단에 고정되어 있는 인코더 케이블 연결을 해제한다. 인코더 고정판넬의 3개 나사와 3개의 평와셔(Washer)는 고정에 중요한 역할을 하므로 잃어버리지 않도록 주의한다.

두 번째로, 금속판을 축으로부터 분리한다. 앞 과정에서 언급된 금속판 쪽 도르래의 하단 측면에는 고정볼트가 있다. 먼저, 2인치 육각렌치를 이용해 고정볼트를 느슨하게 하면 축으로부터 도르래가 쉽게 분리된다. 다음에는, 10mm 스패너를 이용해 축을 살짝 풀어준다. 축은 금속판을 기준으로 상단은 일반 축, 하단은 나선 축 형태로, 스패너로 느슨하게 해준 후에는 손으로 돌려 빼낼 수 있다. 축을 완전히 뺀 후에, 금속판과 그 아래의 작은 원형판 1개, 평와셔 1개까지 돕슨 본체로부터 분리한다. R-dial의 부속품은 서로 굽히지 않도록 유의하여 같이 포장한다. 마지막으로, 모든 부품이 제거된 후에는 돕슨 본체 상단의 금속판 눈금을 읽는 부분 구멍에 들어간 먼지를 가볍게 털고, 큰 이물질은 핀셋 등으로 제거한다. R-dial 금속판이 있던 회전축은 운반 중 돌지 않도록 마스킹 테이프 혹은 필라멘트 테이프로 고정한다.

3.2.4 돕슨 본체

돕슨 본체에서 케이블과 부품을 분리한 후에는 몇 가지 간단한 작업만을 거치면 돕슨 포장 준비를 완료할 수 있다. 다음 소개하는 과정은 작업 순서에 서로 무관하며, 필요한 경우 R-dial 제거보다 선행되어도 무방하다(그림 9).

• 차단막대

돕슨 전면 중앙부 오른쪽 아래에 있는 2개의 금속막대로, 정면에서 봤을 때 왼쪽 막대에는 'CLEAR', 오른쪽 막대에는 'LONG' 글자가 적혀 있다. 두 막대는

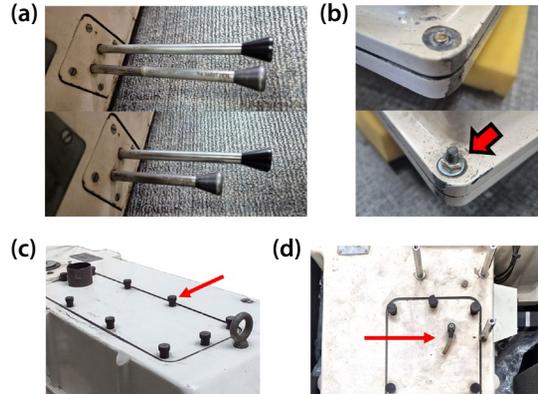


Fig. 9. (a) Two shutter rods, (b) Dobson frame screw, (c) Humidity control screw, and (d) Air outlet from the inside of Dobson.

본체로 집어넣거나 뺄 수 있으며, 포장 시에는 각 글자가 적힌 깊이까지 누른 상태로 만든다.

• 본체 나사

돕슨 본체의 네 모서리에는 본체의 윗면과 아래를 결합하는 볼트가 있다. 돕슨 포장 전에 각 모서리의 볼트, 너트, 평와셔가 잘 체결되어 있는지 확인하고, 녹슬거나 누락되어 있는 경우 규격을 맞추어 교체한다.

• 기기 내부 습도 조절 나사

돕슨 상단에는 R-dial이 있는 자리 양옆으로 각각 10개의 검은색 나사가 직사각형 모양으로 배치해 있다. 이는 기기 내부 및 외부 공기가 교환되는 정도를 조절하기 위한 장치로, 나사를 조이면 내부 습도가 유지되고, 풀면 내부 습도가 외부와 동화된다. 돕슨 내부 습도는 기기 수명에 영향을 미치므로, 상황에 따라 적절히 조절하도록 한다.

• 건조공기 송풍장치

돕슨 상단에서 R-dial의 바로 왼쪽에는 실리콘 튜브가 기기 내부로부터 나와 있다. 실리콘 튜브관은 실리콘 카겔이 담긴 용기와 공기 펌프에 연결되고, 돕슨 작동 시에는 공기 펌프가 항상 작동해 기기 내부가 건조하게 유지되도록 한다. 돕슨 포장 후 운반 시에는 펌프를 작동할 수 없으므로 실리콘 카겔 용기와 펌프 모두 실

리콘 튜브로부터 제거해 별도로 포장한다.

돋سن 기기 본체와 연결된 부품에 대한 작업이 완료 되면, 기기 본체를 와이퍼와 정제수를 이용해 닦는다. 돋سن 분광광도계는 평소 장기간 야외에 노출된 상태로 관측을 수행하기 때문에 각종 오염물질이 남아있는 채 포장될 경우, 본체 내부나 외부 센서에 악영향이 갈 수 있다. 다음으로, Q-lever와 R-dial 위치를 버블랩으로 덮고 마스킹 혹은 필라멘트 테이프로 고정한다.

3.3 돋سن 분광광도계 본체 및 부품 포장

돋سن 분광광도계 상자는 돋سن 본체보다 큰 규격으로 제작되었다. 돋سن 본체를 상자에 넣은 후 남은 공간은 완충재로 포장된 부품들로 채워 효율적인 배송이 가능하다. 먼저, 돋سن 기기 본체의 Q1, Q2 lever가 위치한 앞면을 상자의 Front 면에 맞추어 넣는다. 돋سن 본체의 상판에 수평계를 놓고 전후, 좌우 방향 모두 상자에 대해 상대적인 수평이 맞는지 확인한다. 돋سن 기기 본체 하부에는 4개의 발이 있어 약간의 공간이 남아있기 때문에, 수평이 맞지 않는 경우 이 공간에 스펀지 혹은 완충재를 추가해서 수평을 맞춰주도록 한다(그림 10).

모든 물건은 파손되지 않도록 완충재로 포장된 상태여야 한다. 돋سن 기기 상자의 여분 공간에는 본체로부터 분리한 부품과 관측 부품(Sun director)을 넣는

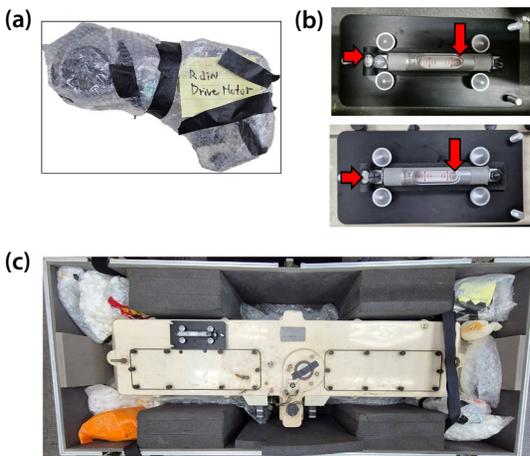


Fig. 10. (a) An example of bubble-wrap packaging, (b) Adjusting the balance between the box (upper) and Dobson (lower), and (c) Final status of Dobson and parts package.

다. 별도 상자를 하나 더 마련해서 자동화 부품인 컴퓨터와 구동 유닛, 보정을 위한 마이크로 전류계와 표준/수은 램프를 넣는다. 나사와 같이 작은 부속품은 지퍼백에 넣어 수량과 용도를 명시해 둔다. 이번 포장에 사용한 체크리스트를 참고하여, 물건의 위치와 포장 여부를 꼼꼼히 확인한다(표 2).

본체와 부품을 모두 넣은 후에는 상자 내부에 습기가 차지 않도록 실리카겔 혹은 제습제를 배치한다. 실리카겔은 통기성이 있는 면 재질 혹은 거름망 등으로 감싸 포장한 다음 상자의 4개 모서리와 윗면에 넣는다. 실리카겔은 전체 부피 약 800 mL 분량을 나누어 사용했다.

4. 수출입 및 보정 후 점검 사항

4.1 수출입

돋سن 분광광도계 상자, 2개 부속품 상자는 수출용 나무상자(Wooden box)로 한 번 더 포장되었다(그림 11). 포장에 사용된 2개 나무상자의 크기는 각각 가로, 세로, 높이가 180×79×68 cm, 105×82×67 cm이고, 상자를 포함한 전체 무게는 163 kg, 52 kg이다. 돋سن 분광광도계는 제작 후 오랜 시간이 지났기 때문에 물품 가치를 산정하기 어렵고 제조 회사의 공식적인 설명이 남아있지 않다. 한편, 보정을 위해 수출되는 돋سن 기기는 관세법 제97조에 따른 재수출면세 대상 물품 중, 같은 법의 시행규칙 제50조 제1항 제11호에 따른 수리를 위한 물품에 해당하여 수출입 관세가 면제된다. 돋سن 기기의 중량과 크기가 상당한 편이므로 일반 배송보다는 전문 항공 회사에 의뢰하여 수출입 업무를 진행하도록 권장한다.

돋سن 분광광도계 검보정은 주로 표준 보정 기기가 있는 미국 콜로라도주 볼더(Boulder) World Dobson Calibration Centre, 혹은 WMO의 지역 분류 기준에 따라 서울 관측소가 속한 Region II의 일본 츠쿠바(Tsukuba) Asian Regional Dobson Calibration Centre에서 수행되었다. 검보정 시술에 대한 정보는 전 세계 돋سن 분광광도계 네트워크의 중심 역할을 담당하는

Table 2. Dobson package checklist (Example).

Box	#	Category	Part name	Quantity	✓
Dobson box (Hard case)	1	Dobson	Dobson spectrophotometer	1	
	2	Cables	R-dial cable	1	
			Q1, Q2, S cables (bundle)	1	
			Dobson power cable	1	
			Sensor cable 1	1	
			Sensor cable 2	1	
			CPZ 7405M cable	1	
	3	R-dial	R-dial plate	1	
			R-dial shaft (bundle)	1	
			Drive belt	1	
	4	R-dial motor & encoder	Encoder plate	1	
			Screws & Washers	3	
			Connection accessory	1	
	5	Cloud sensor	Cloud sensor	1	
			Cylindrical shader	1	
			Cloud sensor cable	1	
			Cloud sensor screw	1	
	6	Dobson prism & accessories	Sun director	1	
Ground quartz plate			1		
Zenith sun cap			1		
Box 1 (Cardboard)	7	Dobson PC	Dobson PC	1	
			PC power cable	1	
Box 2 (Cardboard)	8	Motor controller	Motor controller (MT01-1)	1	
			Motor controller power cable	1	
	9	Microammeter	Microammeter	1	
	10	Calibration set	Standard lamp	4	
			Standard lamp holder	1	
			Standard lamp AC power	1	
			Mercury lamp	1	
	11	Multi strip	110V multi strip	1	



Fig. 11. Size and weight information of two boxes. (a) Dobson box and (b) PC, Motor controller, and Calibration set.

미국해양대기청 Global Monitoring Lab (NOAA GML) 웹사이트 (<https://gml.noaa.gov/>), 혹은 GAW report #183 (Operation Handbook - Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer, Revised 2008)으로부터 제공된다.

4.2 돕슨 분광광도계 재설치 점검 사항

보정 작업이 끝난 돕슨 분광광도계를 설치한 후에는 3가지를 점검해야 한다. 먼저, R-dial 드라이브 벨트의 장력 변화에 유의해 보정 전후 R-dial 회전량에 차이가 없는지 확인해야 한다. 만약 차이가 있으면, 보정 작업 레포트를 따라 전문가에게 문의해서 설정값을 조절해야 한다. 다음으로 R-dial 금속판에 맞닿은 2개의 Limit sensor의 위치가 처음과 같은지 확인해야 한다. 금속판의 톱니는 Limit sensor에 의해 일정량 이하의 회전 범위를 가지므로, 돕슨 분광광도계 설치 중 센서 위치가 변하지 않도록 주의한다. 마지막으로 기기 본체 나사, 습도 조절 나사가 잘 고정되어 있는지 확인한다. 운송 중 충격이나 환경 변화에 의해 평소에 신경 쓰기 어려운 나사들이 느슨하게 풀릴 가능성이 있다. 부품을 분해할 때 확인한 것과 마찬가지로, 관측 재개 전 기기 상태를 잘 점검하도록 한다.

5. 결 론

돕슨 분광광도계는 오랜 시간 오존 관측에 이용됨에 따라 장비 개선 및 관측 정확도 향상을 위한 연구가 진행되어 왔다 (Redondas *et al.*, 2014; Miyagawa *et al.*, 2009). 또한 돕슨 관측 데이터는 새로운 오존 관측 방법 도입 시 비교 점정 대상 값 (Kim *et al.*, 2017), 혹은 지역 오존량 변화 경향을 보여주는 대표적인 실측 값으로 이용된다 (Park *et al.*, 2019). 최근 소형화 기기 판도라 분광계는 GO3OS와 비슷한 Pandora Global Network (PGN) 국제 협력 관계를 구축하여 운영되는 등 오존 감시 방식에 변화가 있기도 하지만, 돕슨을 이용한 관측은 동일 기기에서 생산된 데이터를 유지 및 축적하는 데에 의미가 있다. 서울에서는 강수 시를 제외하고 매일 오존 전량을 직달일사/산란일사

(Direct Sun/Zenith Sky) 방식으로 3회, 연직 오존 분포를 움케어 (Umkehr) 방식으로 2회 관측한다. 해외 반출을 통한 표준 기기와의 검보정 외에도 매달 표준 램프, 수은램프를 이용해 자체 측정값 보정을 진행하고, 결과 값을 위성 데이터와 비교해 허용 범위 내에 오차가 있는지 확인한다.

이런 장기간 관측 자료의 품질을 꾸준히 유지하기 위해서는 주기적인 표준 보정을 수행해야 하며 이 과정에서 국외로의 기기 반출을 조심스럽게 수행할 필요성이 존재한다. 본 기술노트는 돕슨 분광광도계의 표준 보정을 위해 2024년 6월 연세대학교 돕슨 분광광도계를 미국 콜로라도의 NOAA로 반출하는 과정 전반을 상세하게 기록하였다. 특히 서울관측소 (GAW #252)의 돕슨 (#124)은 2004년 관측 자동화를 위해 개조되었기 때문에, 본 문서에서는 공식적인 반출 과정을 따르며 자동화 부품에 대한 내용을 추가했다. 야외에 고정되어 장기간 관측을 수행하는 돕슨의 특성상 관리 실무자 변경이 불가피한데, 관측 장비에 대한 부품별 이해와 반출 과정을 자세히 기록한 본 기술노트가 추후 정기적인 보정 외에도 국제 비교실험 참여, 수리 업무 등에 적절히 활용될 것으로 기대된다.

끝으로, 본 논문과 같은 기술노트가 많이 준비되어 학계에 공유될 필요성을 강조하고자 한다. 최근 여러 국제 연구팀과의 공동 연구 활동을 통해 복잡한 기기의 관리, 점검, 반출 등이 요구되는 상황이 빈번하지만, 그 과정이 정보화되어 공유되는 경우는 극히 부족한 것으로 보인다. 만약 특정 연구팀에서 기기 관리 노하우가 문서화되어 있다고 해도 대외적으로 공유가 잘 되어 있지 않다 보니 관측 및 실험 연구와 관련된 실무를 준비하는 과정에서 다른 연구팀의 경험을 참고하기 매우 어려운 상황이다. 관측과 실험을 통해 확보한 자료를 면밀하게 분석하고 어떤 과학적인 이해를 높이는 과정의 중요성은 잘 인지되고 있는 데 반해, 그 관측과 실험을 성공적으로 진행하기 위한 과정에서 필요한 정보들은 중요한 지식으로 간주되고 있지 못한 경향이 있는 것 같아 보인다. 그러다 보니 연구 현장에서 수많은 시행착오를 통해 확보한 귀하고 값진 노하우가 잘 축적, 공유되지 못하고 일회성으로

휘발되는 경우도 적지 않은데, 그런 실무적인 노력의 정교함과 정확함 없이 대기 환경에 대한 이해가 잘 이루어질 수 없다는 당연한 사실을 감안한다면, 기술노트의 발간을 통해 관측, 실험 과정의 소중한 노하우를 잘 기록하고 전수하는 노력을 좀 더 기울일 필요가 있다고 제안하는 바이다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2023-00219830). 기상청 지구대기위탁관측소로 지정된 연세대학교 월봉관측소에서의 관측을 위한 기상청 위탁관측망의 재정적 지원에도 감사드립니다.

References

- Cho, H., Kim, J., Chung, S. (1996) Stratospheric Ozone Observations in Korea, *Korean Journal of Geophysical Research*, 24(1), 19-27.
- Dobson, G.M.B. (1968) Forty Years' Research on Atmospheric Ozone at Oxford: a History, *Applied Optics*, 7, 387-405. <https://doi.org/10.1364/AO.7.000387>
- Farman, J.C., Gardiner, B.G., Shanklin, J.D. (1985) Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207-210.
- Kim, J., Kim, J., Cho, H.-K., Herman, J., Park, S.S., Lim, H.K., Kim, J.-H., Miyagawa, K., Lee, Y.G. (2017) Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 3661-3676. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3661-2017>
- Kim, J., Park, S.S., Moon, K.-J., Koo, J.-H., Lee, Y.G., Miyagawa, K., Cho, H.-K. (2007) Automation of Dobson Spectrophotometer (No. 124) for Ozone Measurements, *Atmosphere*, 17(4), 339-348, (in Korean with English abstract).
- Komhyr, W.D., Evans, R.D. (2008) Operations Handbook - Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer Revised 2008, World Meteorological Organization, Switzerland, 85.
- Miyagawa, K., Sasaki, T., Nakane, H., Petropavlovskikh, I., Evans, R.D. (2009) Reevaluation of long-term Umkehr data and ozone profiles at Japanese stations, *Journal of Geophysical Research*, 114, D07108. <https://doi.org/10.1029/2008JD010658>
- NOAA GML (2005) Dobson Packing Instruction. https://gml.noaa.gov/ozwv/dobson/papers/Dobson_Packing_Instructions.pdf (accessed on Aug. 23, 2024).
- Park, S.S., Cho, H.K., Koo, J.-H., Lim, H., Lee, H., Kim, J., Lee, Y.G. (2019) Monitoring and Long-term Trend of Total Column Ozone from Dobson Spectrophotometer in Seoul (1985-2017), *Atmosphere*, 29(1), 13-20, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2019.29.1.013>
- Redondas, A., Evans, R., Stuebi, R., Köhler, U., Weber, M. (2014) Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1635-1648. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1635-2014>
- World Meteorological Organization (WMO) (2014) The Global Atmosphere Watch Programme: 25 Years of Global Coordinated Atmospheric Composition Observations and Analyses, World Meteorological Organization, Switzerland, 75.
- World Meteorological Organization (WMO) (2017) Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023, World Meteorological Organization, Switzerland, 74.
- World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC) (2024) Instrument List. <https://woudc.org/data/instruments/> (accessed on Aug. 23, 2024).

Authors Information

박민주 (연세대학교 대기과학과 박사과정 연구원)
(par0821@yonsei.ac.kr)

구자호 (연세대학교 대기과학과 부교수) (zach45@yonsei.ac.kr)

김 준 (연세대학교 대기과학과 교수) (jkim2@yonsei.ac.kr)

박상서 (울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 부교수)
(sangseopark@unist.re.kr)

이태경 (연세대학교 대기과학과 박사과정 연구원)
(taegyung@yonsei.ac.kr)

김수민 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구관)
(sulla@korea.kr)

Glen McConville (University of Colorado CIRES, Associate Scientist) (glen.mcconville@noaa.gov)

Koji Miyagawa (Japan Meteorological Agency, Aerological Observatory Scientist) (koji.miyagawa@gmail.com)