

돕슨 분광광도계(No.124)의 오존 자동관측시스템화

김 준^{1,*} · 박상서¹ · 문경정² · 구자호¹ · 이윤곤¹ · Koji Miyagawa³ · 조희구¹

¹연세대학교 지구환경연구소/대기과학과

²국립환경과학원

³Aerological Observatory, Japan Meteorological Agency

(2007년 8월 4일 접수; 2007년 11월 6일 승인)

Automation of Dobson Spectrophotometer(No.124) for Ozone Measurements

Jhoon Kim^{1,*}, Sang-Seo Park¹, Kyung-Jung Moon², Ja-Ho Koo¹,
Yun-Gon Lee¹, Koji Miyagawa³ and Hi-Ku Cho¹

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

²National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

³Aerological Observatory, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan

(Manuscript received 4 August 2007; in final form 6 November 2007)

Abstract

Global Environment Laboratory at Yonsei University in Seoul (37.57°N, 126.95°E) has carried out the ozone layer monitoring program in the framework of the Global Ozone Observing System of the World Meteorological Organization (WMO/GAW/GO3OS Station No. 252) since May of 1984. The daily measurements of total ozone and the vertical distribution of ozone amount have been made with the Dobson Spectrophotometer (No.124) on the roof of the Science Building on Yonsei campus. From 2004 through 2006, major parts of the manual operations are automated in measuring total ozone amount and vertical ozone profile through Umkehr method, and calibrating instrument by standard lamp tests with new hardware and software including step motor, rotary encoder, controller, and visual display. This system takes full advantage of Windows interface and information technology to realize adaptability to the latest Windows PC and flexible data processing system. This automatic system also utilizes card slot of desktop personal computer to control various types of boards in the driving unit for operating Dobson spectrophotometer and testing devices. Thus, by automating most of the manual work both in instrument operation and in data processing, subjective human errors and individual differences are eliminated. It is therefore found that the ozone data quality has been distinctly upgraded after automation of the Dobson instrument.

Key words: Dobson spectrophotometer, Total ozone and Umkehr observations

1. 서론

Dobson UV 분광광도계 (No.1) 는 1928년에 영국

옥스퍼드 대학의 C. M. B. Dobson 교수에 의하여 처음 제작되었다. 그 후 몇 번의 개량 과정이 있었으나, 기본 기기 구조는 현재와 크게 다르지 않다. 1957~59 국제 지구 물리 관측년 (International Geophysical Year) 에 Dobson 기기에 의한 오존 관측망이 확대되어 그 후 통일된 성층권 오존관측이 이루어졌다. 현재 세계 기상기구 (WMO) 지구대기감시 (Global Atmospheric Watch : GAW) 조직에 지구 오존층 감시 시스템 (Global Ozone Observing System : GO₃OS)과 배경대기오염 관

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

측망 (Background Air Pollution Monitoring Network : BAPMoN)이 구성되어 있는데, 돋슨 분광광도계는 GO_3OS 표준관측기로서 현재 세계 약 120개 관측소 중 80여개에서 사용되고 있다.

우리 나라에서는 WMO의 도움으로 1984년에 연세 대학교에서 처음 Dobson 분광광도계 (No.124)를 영국 Ealing 사로부터 도입하였다. 따라서 연세대학교 지구 환경연구소는 이 기기로 현재까지 약 20여년동안 세계 기상기구 지구대기감시 전구오존관측망 (WMO/GAW/ GO_3OS ; #252)의 하나로 한반도 상공의 오존층 변화를 감시해오고 있다. 이 오존층 감시는 2005년까지는 오존전량과 오존 연직분포를 돋슨오존분광광도계를 이용, 수동으로 관측하여 왔다. 이 수동관측에는 관측자 개인에 따라 관측과 자료처리에 오차가 수반될 수 있다. 그러므로 오존관측값의 품질을 높이기 위하여 기기의 현대화와 함께 관측 시스템의 자동화가 요구되었다. 일본은 1994년부터 시작하여 2002년에 남극 Syowa 기지를 포함하여 5개 관측소의 Dobson 분광광도계를 성층권 오존감시를 위하여 완전 자동화 시스템으로 구축하였다 (Miyagawa, 1997, 2004). 또한 NOAA는 2000년대 초반 Dobson 분광광도계를 자동화하였다 (R. Evans, private communication, 2003).

2004년과 2006년 사이에 한반도 상공의 오존층을 자동 감시하기 위하여 연세대학교 Dobson 기기 (No.124)의 하드웨어를 개조 및 새로 교체하고 따라서 소프트웨어도 함께 개발하였다. 따라서 관측시스템, 자료처리 및 기기 정기 검정의 모두가 자동화시스템으로 구축되었다. 이로 인하여 고품질 자료를 생산하고 한반도 상공의 오존층 변화를 보다 정확하게 객관적인 방법으로 감시하게 되었다. 돋슨 분광광도계 (Dobson Spectrophotometer)에 의한 오존전량과 연직분포 관측의 완전자동화시스템은 미국 NOAA, 일본 기상청 (JMA, Japan Meteorological Administration)에 이어 세 번째로 이루어진 나라로 알려져 있다. 우리나라는 WMO 전구 대기감시계획에 첨단화된 관측시설로 지구오존층보호에 참여하고 보다 더 안정되고 정확한 관측자료로 국제협력을 기하게 되었다.

2. Dobson 분광광도계의 측정원리와 내부시스템

오존전량 (Ω)은 Beer의 법칙에 의해서 자외선 영역의 직달일사의 두 파장 (λ, λ')을 이용하여 다음 식에 의하여 구하여 진다 (Komhyr, 1980; 조희구 등, 1989).

$$\Omega = \frac{N - (\beta_{\lambda} - \beta_{\lambda'})mP/P_0 - (\delta_{\lambda} - \delta_{\lambda'})\sec Z}{(\alpha_{\lambda} - \alpha_{\lambda'})\mu} \quad (1)$$

여기서 N 은 직달일사의 두 파장의 빛 세기비로

$$N = 100\{\log(I_{\infty\lambda}/I_{\infty\lambda'}) - \log(I_{\lambda}/I_{\lambda'})\} \quad (2)$$

로 주어진다. I_{λ} 는 파장 λ 에서 지상에서 관측된 직달일사의 세기, $I_{\infty\lambda}$ 는 파장 λ 에서 대기 상한에서 입사한 태양복사의 세기이다. 그리고 β, δ, α 는 Rayleigh, 에어러솔의 산란계수와 오존의 흡수계수를 각각 의미한다. P 와 P_0 는 관측기압과 표준기압, Z 는 관측지점에서의 태양천정각, m 은 대기를 통과하는 태양복사의 수직경로에 대한 실제경로비(대기굴절과 지구의 곡률을 고려), 그리고 μ 는 오존층을 통과하는 태양복사의 수직경로에 대한 실제경로의 비 (오존층의 평균고도는 22 km)를 각각 의미한다. 이와 같이 식 (1)에서 에어러솔의 영향을 없애기 위하여 Fig.1에 표시된 A ($\lambda = 305.5, \lambda' = 325.0 \text{ nm}$)와 D ($\lambda = 317.5, \lambda' = 339.9 \text{ nm}$)의 두 파장쌍 즉, 4파장의 자외선 세기를 측정하여 오존전량은 구하여진다 (Komhyr, 1980).

해발 고도 h 에 따르는 연직오존분포 $\Omega(h)$ 는

$$\Omega(h) = f[N(z)] \quad (3)$$

의 함수에 의하여 구하여 진다 (예: Craig, 1965; 조희구와 이재원, 1990; Shitamichi, 1993). 여기에서 $N(z)$ 는 태양 천정각 z 의 함수로 두 산란광의 비로

$$N(z) = 100\{\log[I(\lambda', z)/I(\lambda, z)] - \log[(I_{\infty}(\lambda')/I_{\infty}(\lambda))] + Const(\text{측기 상수})\} \quad (4)$$

로 구하여진다. 식(4)의 두 파장은 Fig.1에 표시된 C파장쌍 ($\lambda = 311.5, \lambda' = 332.4 \text{ nm}$)의 산란광을 의미한다. $N(z)$ 는 태양 천정각 z 가 60° 와 95° 사이에 측정되는데 보통 $z = 85 \sim 87^\circ$ 부근에서 반전 효과 (Umkehr effect)가 나타난다. 이 반전관측에 의하여 식(3)을 두 모형 즉, 전방계산모형 (forward model)과 역산모형 (inverse model)을 서로 적용하여 구한다 (Shitamichi, 1993).

Dobson 분광광도계 내부 광학시스템의 개략도를 Fig.1에 표시하였다. 이 측기는 태양광을 Sun director로 측기 내부로 들어오게 하고, 석영 프리즘으로 자외

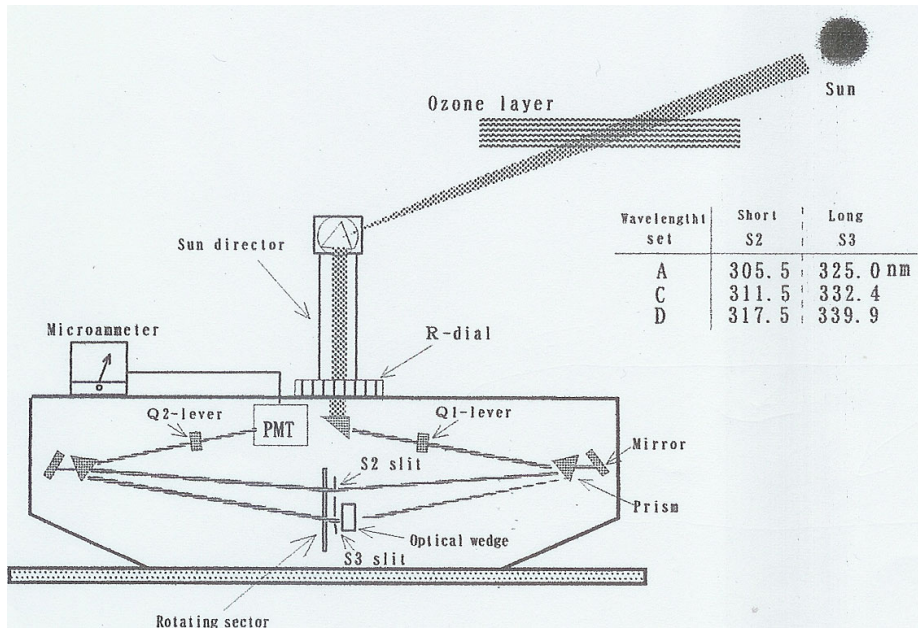


Fig. 1. Internal optical system of the Dobson spectrophotometer (Normally, wavelengths A and D are used for total ozone observations, and wavelength C for the Umkehr observations) (taken from Miyagawa, 1997).

선의 두 파장 (λ, λ')을 분광 측정하여 대기 중의 오존량을 측정할 수 있게 되어 있다.

이 때 두 슬릿 (slits) (S2, S3)을 사용하여 오존층에 의하여 강하게 흡수되는 비교적 짧은 파장 λ (S2 측)과 오존층에 거의 흡수가 되지 않는 긴 파장 λ' (S3 측)의 자외선을 각각 측정하여 이 두 자외선의 세기비 (N값)로 오존전량을 식(1)에 의하여 계산한다. 이 파장의 빛의 세기비를 측정할 때 두 파장의 빛 세기가 서로 같게 하기 위하여 S3측을 통과한 빛의 세기를 광학쇄기 (optical wedge)로 약화시켜 서로 같게 한다. 이 약화시킨 투과율을 구하여 두 파장 세기의 차를 알 수 있다. 이 광학쇄기의 감쇄율은 R-dial로 조절할 수 있다. 따라서 R-dial의 회전각도와 광학쇄기의 투과율 관계를 미리 구하여 두고, R-dial을 회전시켜 두 파장의 세기가 같을 때 그 회전 위치의 각도로부터 투과율을 파악하고, 이를 통해 두 파장 빛의 세기비(N값)를 구할 수 있다. 그리고 이 비로 오존량을 계산한다. 즉, 회전 sector에 의하여 교대로 광전증배관 (PMT : photo-multiplier tube)으로 들어간 빛의 세기를 전기 신호로 변환하여 미시전류계 (microammeter)(MCA)에 감지된다. 이 때 R-dial을 조절하여 MCA의 표시를 영점으로 오게 하여 R-dial의 눈금을 읽어 N값을 구한다.

이 두 파장의 빛은 오존의 흡수 외에 공기분자와 에

어러술에 의하여 산란된다. 여기 오존에 의한 흡수계수 (α_λ)와 공기분자의 산란 (Rayleigh scattering)계수 (β_λ)는 실험실에서 구해진 값을 사용한다. 그러나 에어러술에 의한 산란계수 (δ_λ)는 매일매일 변화하므로 오존량을 구할 때 이 효과를 최소로 하기 위하여 두 쌍의 파장을 (오존전량의 경우 A, D 파장쌍, 반전관측의 경우에는 C 파장쌍을 사용) 동시에 측정하여 에어러술의 영향을 상쇄시키는 방법을 사용하고 있다. 파장쌍을 선택하는 방법은 2개의 quartz plates, Q1과 Q2를 회전시켜 행한다. 이 조작 방법은 플레이트 (plate)에 부착되어 있는 Q-lever의 위치를 조절하여 파장을 결정한다. 측기 내부는 산란오차를 줄이기 위하여 입사창을 중심으로 좌우의 광학부를 대칭적인 구조로 만든 이중분광방식 (double-monochromator system)이 설치되어 있다.

3. 측기 개조와 검증

3.1 Dobson 분광광도계(No.124)의 개조 연혁

1984년 한국에 최초로 도입된 이래 Dobson 기기 (No.124)는 정기적으로 또는 비정기적으로 검정, 내부부품교체 및 수리가 Table 1과 같이 이루어졌다.

Table 1. Upgrade and calibration history of Dobson spectrophotometer (No.124).

기간	주요 내용
1983.9	- 연세대학교 Dobson 분광광도계 (No.124)와 WMO 유럽지역 RA-VI 기준 Dobson 기기 (No.41, 영국기상청 소재)와 비교 검정후 도입 (1984년 5월부터 오존정규관측)
1985.10.18	- 국제 순례 표준램프를 이용한 돋슨 분광기 검정 실시(NOAA/ERL 주관)
1991.4.23~8.5	- 돋슨 분광기(No.124)를 WMO 세계 기준 Dobson 기기(No.65)와 비교 관측 및 검정 (NOAA/ERL, Boulder, Colorado) - 진공관에서 전자 시스템으로 교체
1991.11.26~1992.2.25	- 국제 순례 표준램프를 이용한 돋슨 분광기 검정 실시 (NOAA/ERL 주관)
1992.1	- IAMAP(1992)의 권고에 따라 돋슨 관측자료처리에서 새 오존흡수계수와 분자산란계수를 채택 - 세계 오존자료센터의 반전계산법이 보강됨에 따라 새 프로그램을 입수하여 연직오존분포를 계산
1996.2.27~3.26	- 연세대학교 돋슨 오존분광광도계 (No.124)와 WMO 아시아지역 RA-II 기준기 돋슨 오존분광광도계 (No.116, 일본기상청 소재)와의 비교 관측 및 검정 (일본고층기상대, Tsukuba, Japan)
1999.3.5~ 2000.3.8	- Dobson 분광광도계의 수리, 검정과 기준화 : Dobson No.124와 WMO 오세아니아지역 RA-V 기준 Dobson 분광광도계 (No.105, 호주기상청 소재)와 비교 관측 및 검정 (호주로 수송)
2004.11.1~11.14	- Dobson 분광광도계 (No.124)와 아시아지역 RA-II 기준 광도계 (No.116)의 비교 관측 및 검정 자동화 (연세대학교 과학관 옥상) - 일본으로부터 수송
2005.10~11	- Dobson 분광광도계 (No.124)의 2차 자동화 과정 실시 (일본 고층기상대, Tsukuba, Japan) - 일본으로 수송
2006.8.5	- Dobson 분광광도계 (No.124) 의 완전 자동화

3.2 자동화를 위한 최근 측기의 검정 및 개조과정

자동화 시스템을 위하여 1차로 2004년 11월에 일본 Tsukuba의 일본 고층기상대에 있는 아시아지역 기준기 Dobson 분광광도계, No.116 를 서울로 수송하였으며, 일본기상청의 기술지원으로 수행되었다 (Miyagawa *et al.*, 2005). 이 때 보수가 이루어진 부분은 다음과 같다.

- 파장 선택 shutter rod (short/long) 교환.
- 건조공기 송풍장치 경신, 측기의 casket 교환.
- Two-lamp 점검용 보조램프 부착.
- 광전자 증배관의 박스 가공.
- 좌우의 분광 거울 점검과 광학시스템 배열 및 조정, 분광프리즘, 반사면 조정.
- 회전부 외에 스텝 모터와 회전기구의 점검 및 조정, 측기 온도계의 디지털화.
- 광전자 증배관의 고압 감쇠기(attenuator) 스위치의 교환 등.

2005년에 실시된 2차 자동화 과정 이전까지는 모든 관측 과정이 수동으로 이루어졌으나, 2차 자동화 과정 이후에는 PC의 제어로 측기를 조작하는 측기의 기본적인 바탕이 마련되었다. 그리고 2006년에는 2005년에 실시된 2차 자동화 과정에서의 일부 부품의 교체 작업 및 자동화 기기의 다이얼의 해상도 향상이 이루어지면서 자동화가 최종적으로 이루어졌다.

4. 자동화 시스템

자동화 시스템 과정에는 하드웨어와 소프트웨어 부분으로 나뉘어 수행되었다.

4.1 하드웨어

돋슨 분광광도계의 과거 수동 관측은 2차 자동화 계획으로 2005년부터는 오존 전량 및 반전 관측의 자동화들을 갖추었다. 이때 Windows98 기반 OS에 프로그

램을 설치하여, 돕슨 분광광도계와 컴퓨터를 연결하여 컴퓨터에서 측기를 제어하였다. 자동화에 필요한 하드웨어에는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 작동 장치(operation unit)와 이 장치(unit)를 작동케 하는 구동장치(driving unit)로 구성되어 있다. 이 작동유닛에서는 광학쇄기(optical wedge)를 조작하여 두 파장쌍의 빛 세기비 [식(1)의 N]를 측정하는 R-dial과 파장을 선택하는 Q-lever로 구성되어 있다. 구동유닛에서는 작동유닛을 조절하는 기능을 갖고 있다. 2006년 8월 3차 자동화계획에서는 Windows XP의 OS에서 사용가능한 소프트웨어로 업그레이드하면서 컴퓨터의 교체와 측기의 자동화 하드웨어 부품이 완전 교체되었다. 교체된 부분은 컴퓨터와 측기의 제어 다이얼에 설치된 모터 및 컴퓨터에 연결되어있다. 그리고 측기 내부에 Q-lever와 R-dial 조절을 위한 장치들이 본체에 삽입되었다.

4.2 소프트웨어 - Windobson

소프트웨어는 Windows XP를 기반으로 설계된 Windobson 프로그램이 있다. 이 Windobson 프로그램은 오존전량 관측, 반전 관측, 램프 검정, 자료 파일 관리 등의 자동 제어 기능을 갖고 있으며, 자세한 내용은 Table 2에 표시하였다.

5. 자동화 전후의 차이

자동화 이전 관측에서는 관측기기의 옥외 이동 후에 관측 준비를 마치고, 기기의 상태의 기록과 함께 관측 조작을 모두 수동으로 수행하였다. 자동화 이후에는 관측시의 수동 조작 및 기기 상태 기록이 모두 자동으로 이루어졌다. 특히 반전 관측에서 1회의 반전 관측시에 실시하던 횟수가 약 40회에서 약 230회로 늘어나면서 반전관측의 정확도가 향상되었다.

5.1 관측 과정의 변화

오존전량 관측에서 자동화 이전에는 1회의 관측을 수행하는데 있어서 Q-lever 설정부터 관측과 자료 기록, 파장 조절까지의 과정의 경우, 1회당 30초동안 설정과 관측을 동시에 수행하여야 했다. Q-lever의 설정이 온도에 따라 설정되고, R-dial 0.1도의 변화가 최대 1DU의 값을 변화시킬 수 있는 요인이 되므로 수동 설정의 잘못이 정확한 관측을 방해하게 된다. 그리고 Q-lever의 값의 설정은 측기의 온도로 파장을 설정하므로 온도 변화가 심한 경우, 1회의 오존전량을 측정할 때 5회 lever를 조절하여야 하므로 짧은 시간에 미리 정해진 조건표(Look-up Table ; LUT)로부터 구하기 때문에 그 결과는 많은 불확실성을 내포하고 있다. 하

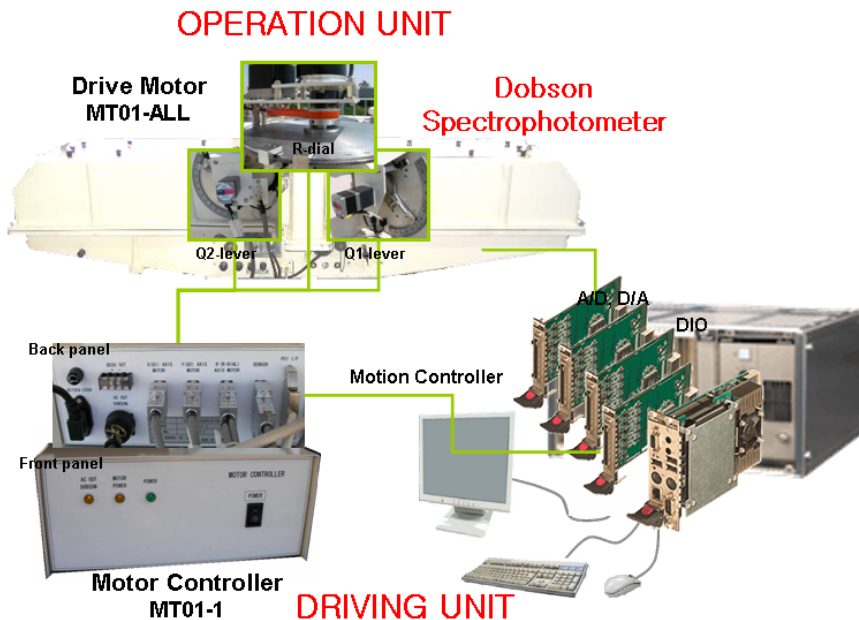


Fig. 2. Hardware of the automatic system.

Table 2. Windobson program and function.

처리 항목	내용
관측 스케줄	관측 시각 표시, 오존관측의 예약 실행, 실시간 태양천정각 표기
오존전량관측	오존전량관측의 자동 처리 및 자료 편집, 시계열 그래프의 표시
오존반전관측	반전관측의 자동제어 및 자료 편집, 시계열 그래프 표시
측기 점검	표준 램프, 수은 램프, 투 램프 점검 등의 자동 제어 및 자료 편집 및 보관, 점검의 경향 분석
측기 보수	자동화 제어 기기에 대한 지속적인 보수 점검
월통계	오존량의 월통계처리, 인쇄, 파일 작성, WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Data Center) 보고 양식 작성
기타 Batch 처리	오존관측 스케줄표, 반전 스케줄표, 각종상수의 인쇄 및 관리
정보 처리	관측시의 운량 및 측기의 상태에 대한 자료 보관 및 처리

지만 위의 모든 과정이 PC의 프로그램에 의해서 제어를 받으면서 Q-lever 와 R-dial의 선정이 자동적으로 이루어지기 때문에 이들 과정이 신속하고 정확해졌다.

반전 관측에서는 한정된 태양천정각 안에서 되도록 많은 관측을 수행하는 것이 관측값의 정밀도를 높이게 된다. 자동화가 이루어져 1회의 관측 시간이 단축되면서, 반전관측의 1회 결과를 위한 관측 횟수가 과거 30~50회 측정하였으나 현재 180~230회 정도로 늘면서 각 층의 오존량 관측수가 증가하므로 오존량계산을 위한 통계량이 증가하여 정확도가 향상되었다.

5.2 관측 자료의 DB화

이전까지 관측 자료는 관측된 R-dial의 수치, 관측 시간, 태양 천정각, 관측 시간의 운량, 시정의 순으로 입력이 되어 관측 장부 목록에 저장되었다. 그러나 이러한 관측 장부는 분실 및 손상의 위험이 존재하고 있으며, 관측된 값을 통해서 LUT를 이용해 다시 한 번 계산을 수동으로 해야 될 필요성이 있었다. 그리고 계산을 위한 테이블은 측기의 상태에 따라서 그 값이 달라지기 때문에 그 파악이 훨씬 어렵다. 자동화 이후에는 관측 자료는 모든 것이 측기와 연결된 PC에 저장된다. PC에 저장이 되는 것은 시간별 관측된 R-dial의 값뿐만 아니라 관측 시 측기 및 전자부의 상태도 저장이 된다. 그리고 이러한 정보는 날짜별로 텍스트 파일 형태로 저장이 된다. 저장된 관측 자료는 별도의 알고리즘에 의해 오존량을 계산하게 된다. 알고리즘 안에는 오존량 계산에 필요한 파라미터 값이 입력되어 있다. 이 값은 수치로 검정과 보정을 하게 되므로, 과거에 잘못된 파라미터를 사용해서 계산했을 경우에는 텍스트 파일의 편집을 통해서 수정을 한 후 재계산을 할 수

있다. 이러한 이유로 장기간에 걸친 관측 자료와 계산된 오존량의 관리에 있어서 시간의 절약과 더불어 체계적이고 정확한 관리가 가능하게 되었다.

6. 관측 자료의 질 향상

자동화 이전에는 Q-lever 및 감쇠기 설정, R-dial의 조작과 회전각도 읽음 (reading) 등을 수동으로 진행하였으나, 자동화 후에는 이들 모두가 정밀스텝모터 (step motor)와 회전 인코더 (rotary encoder)를 사용하여 자동화 되었다. 이에 따라 관측 자료의 질 또한 향상되었다.

6.1 오존 전량

오존전량을 구하기 위하여 식(1)에서 필요한 모든 관계요소를 컴퓨터의 제어로 자동 측정하였다. 따라서 자동화가 이루어지면서 가장 크게 달라진 점은 모든 관측이 컴퓨터의 제어로 이루어지면서 관측자의 숙련도와 상태에 영향을 받지 않게 되었다. Table 3은 직달 일사와 천정산란광으로 1회에 두 번에 걸쳐 관측한 값의 차이를 표시한 것이다. 그 시간적 차이가 짧기 때문에 그 사이에 오존량이 변하지 않는다면, 오존량의 차이는 없다. 하지만 실제 관측시 그 값의 차이가 나타나는데 그 원인은 관측자, 측기의 정밀도에 관계된다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 관측값의 차에 의한 오차가 3% 이내에 속하는 관측 자료가 자동화 전에는 92.79% 에서 98.16%로 약 5.5%가 향상되었다.

Fig. 3은 자동화 전후의 돋슨 분광광도계의 일 오존 전량과 동시에 다른 지상관측 (Brewer 분광광도계)과 다른 위성관측 (TOMS, OMI) 값과 비교한 것이다. 이 그림에서 왼쪽그림들 (Fig. 3 (a), (c))은 돋슨자동화 이

Table 3. Comparison of the data before and after automation in terms of difference between direct sun measurement(DS) and zenith sky measurement(ZS).

Accuracy(%)	Before auto		After auto	
	No. of obs.	Freq.(%)	No. of obs.	Freq(%)
Below ±0.99	248	63.92	474	66.95
±1.00~2.99	112	28.87	221	31.21
±3.00~4.99	14	3.61	12	1.70
Above ±5.00	14	3.61	1	0.14
Total	388	100	708	100

전의 비교를 오른쪽 그림들 (Fig. 3 (b), (d))은 자동화 이후의 비교를 보여준다. 연세대학교 관측소에 위치한 Brewer 분광광도계와의 오존전량 비교에서 보면, 자동화 이전에 R^2 값이 0.777 이던 것이 자동화 이후에는 0.911 로 크게 향상되었고, 화귀선의 기울기도 0.897 에서 0.912 로 개선되었다. Brewer 위성자료의 경우는

2004년도에 TOMS 위성이 OMI 위성으로 대체됨에 따라 자동화 이전에는 TOMS와, 이후에는 OMI와의 비교를 보였다. 두 위성간의 측정정확도 차이가 있기는 하나, 보는 바와 같이 2003년의 $R^2 = 0.842$ 에 비해 자동화 이후인 2006년의 $R^2 = 0.922$ 로 상관성이 매우 높게 나타났다. 이 결과들은 자동화 이후의 오존전량 자료의

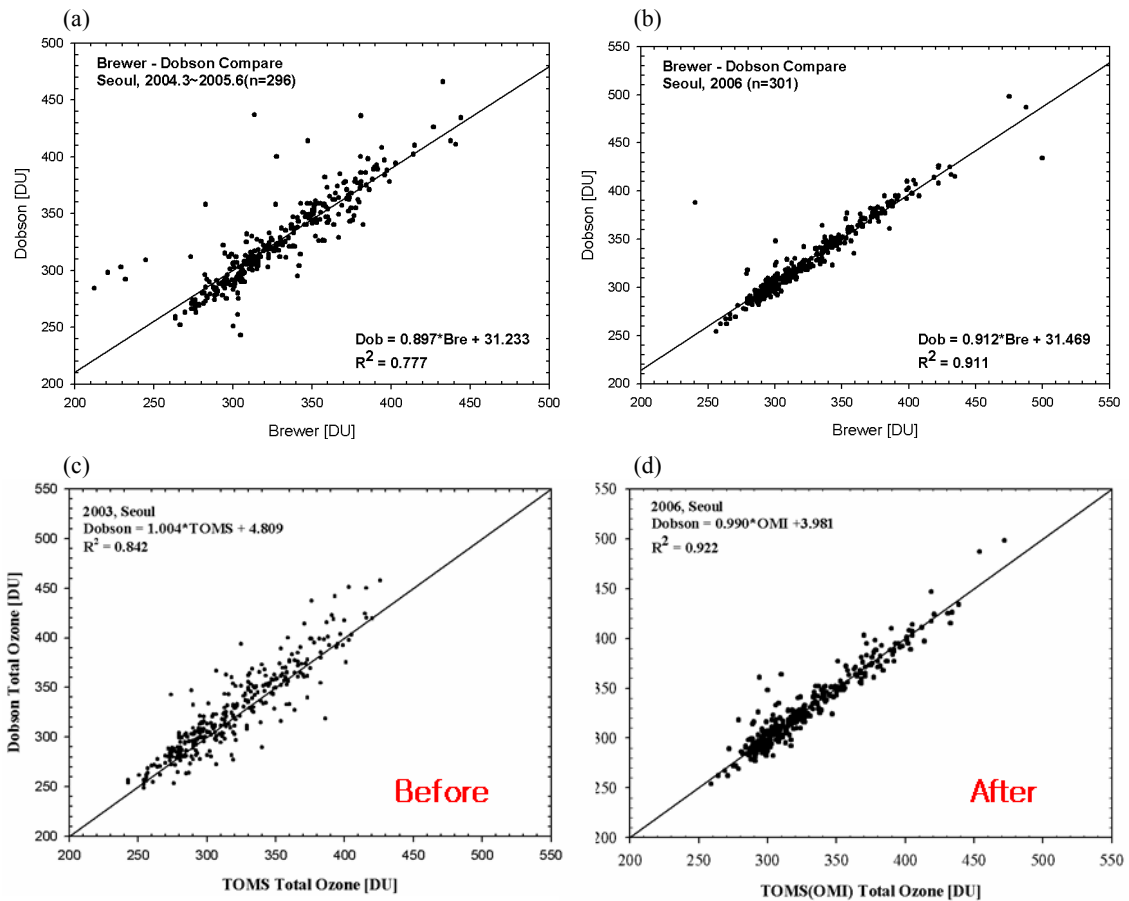


Fig. 3. Comparison of daily ozone data by Dobson measurements before(left column) and after(right column) automation with Brewer Spectrophotometer [(a) and (b)] and with OMI [(c) and (d)]. Respective observation period is listed in the figure.

질이 많이 향상되었음을 나타낸다.

6.2 연직 오존 분포

연직 분포는 식(3)의 반전 관측, $N(z)$ 으로 총 10개의 층 ($Z=10$)에서 오존 분포, $\Omega(h)$ 가 구하여진다. 그리고 연직분포는 주어진 태양 천정각에서 기준 $N(z)$ 값과 측정 $N(z)$ 값의 차이를 통해서 구한다. Fig. 4는 자동화 전후의 반전곡선 (Umkehr curve), $N(z)$ 를 비교한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 $N(z)$ 는 태양 천정각에 따라 기준값 (기후값)과 관측값의 차가 자동화 후에 크게 감소하였다.

여기 기준 N 값은 미리 연직 오존분포의 기준값으로 계산되어 있다. 측정 N 값은 관측 시간에 관측지점의 천정에 구름이 통과하거나 대기 상태의 변화, 관측도중의 측기 상태의 변화 등이 많기 때문에 그 관측 전후의 N 값을 내삽하여 구한다. 그렇기 때문에 태양 천정각 (z)에 따라 관측값이 많을수록 Umkehr 곡선 $N(z)$ 가 정확해진다. 자동화 이전의 반전 관측 간격을 Table 4에 표시하였다. 이 표에서 보는 바와 같이 시간 간격을 준수하게 된다면, 자동화 이전에는 관측횟수가 가장 긴 관측 시간대를 가지는 여름의 경우에도 약 40회의 관측만이 이루어지게 된다. 이것은 측정 N 값 계산을 위한 관측값이 계산을 위한 특정 태양 천정각 당 3회 정도만 존재하는 것을 의미한다. 그러나 자동화 이후에는 1회의 관측 때마다 수동으로 실시하던 Q-lever의 dial 설정이 생략되면서 관측횟수가 증가하게 되었다. 자동화 이전에는 최대 40회의 관측이 이루어졌으나, 현재는 관측 시간이 비교적 짧은 겨울의 경우에도

Table 4. Time interval of Umkehr observations before automation.

SAZ (deg)	Time interval (min)
60~70	15
70~80	10
80~84	3
84~88	2
88~90	3

관측횟수가 180~220회 정도가 실시되고 있다. 이 때문에 태양 천정각 당 5~10회의 관측값을 이용하여 N 값을 계산하도록 관측 횟수가 증가하게 되었다. 이로 인하여 보다 정확한 $N(z)$ 를 구하게 되었다.

관측 횟수의 증가는 각 1회의 관측마다 나온 결과들에 대한 비중이 감소하면서, 태양 천정각 z 에서 $N(z)$ 값을 측정할 때 기상 상태 및 측기의 오차가 줄어들었다. 특히 $N(z)$ 값이 비교적 빨리 변하는 시간인 $SAZ = 60^\circ$ (PM)와 $SAZ = 90^\circ$ (AM) 주변의 경우에는 $N(z)$ 값이 변화가 매우 심하기 때문에 Umkehr 관측값 ($N(z)$)의 신뢰도가 높지 않으므로 보정을 요한다. 그러나 측기 변화에 의한 오차와 구름에 의한 오차를 역시 관측 간격이 조밀해지면서 그 원인을 실시간으로 확인하게 되었다. 이와 같이 자동화 이전의 경우에는 관측 자료의 연속성의 파악이 힘들기 때문에 천정에 관측되는 구름의 변화를 파악하는데 어려움이 있었다. 자동화 이후에는 1분 간격의 측정이 이루어지고 있기 때문에, 구름의 통과 시간을 파악할 수 있으면서 관측 자료의 선택에 있어서 보다 정확해져 관측 자료의 수정과 연직 분포의

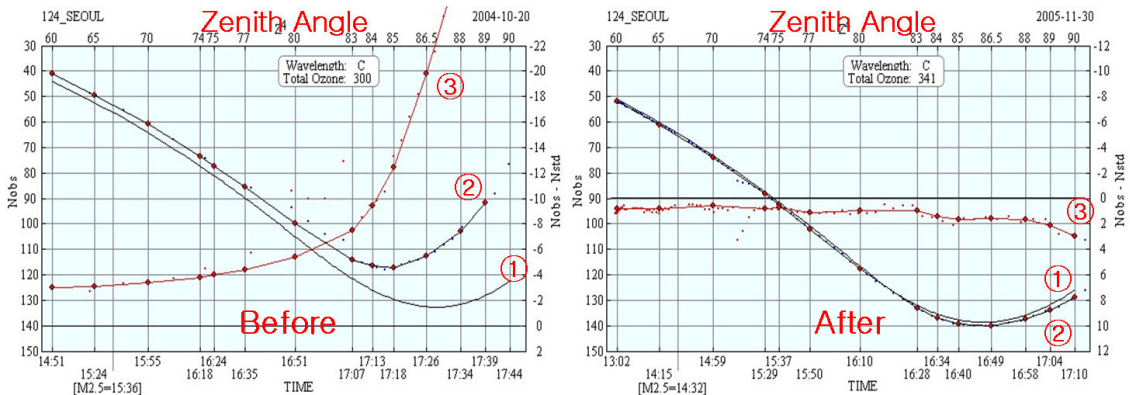


Fig. 4. Comparison of the Umkehr curves between before (Left) and after automation (Right). Solid line(①) is reference (REF), black dot line(②) is measured (MEAS), and red dot line(③) is difference (REF-MEAS).

정확도 향상이 가능하게 되었다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 자동화 전후의 Umkehr 관측 곡선을 사용하여 구한 연직오존분포를 각각 표시한 것이다. 이 그림에서 음영을 중심으로 한 굵은 실선은 관측된 서울 상공의 연직 오존 분포이고, 음영 부분은 서울의 기후 평균값 $\pm 1\sigma$ 의 값이다. 그리고 중앙 점선을 중심으로 한 선은 관측값과 기후값의 편차 (anomaly)를 의미한다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Ozone layer number 4~5 (고도 약 20~30 km)에서 기후값에 비해

그 변화의 절대편차가 자동화 전에 39DU로 높게 나타났으나 후의 경우에는 7DU로 크게 감소하였다. 그리고 전기층을 통하여서는 16DU에서 4DU로 감소하였음을 알 수 있다. 그리고 이를 통해 층별로 자동화 전후의 정밀도를 불확실성으로 표준편차를 구하여 Table 5에 표시하였다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 평균층별 관측 표준편차가 전에는 39.8DU였으나 후에는 33.4DU로 6.4DU 만큼 불확실성이 줄어들었음을 알 수 있다. 자동화된 Dobson Ozone Spectrophotometer

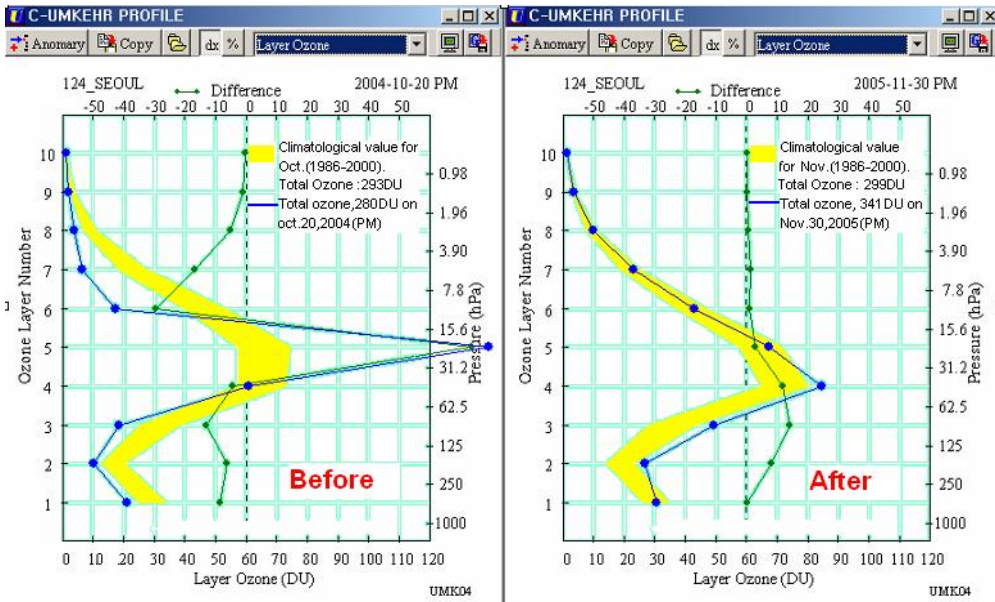


Fig. 5. Comparison of the vertical ozone distribution between before and after automation (Left : Before, Right : After).

Table 5. Comparison of vertical distribution of average ozone amount and standard deviation from Umkehr observations (Before : 1997.11~1998.12 , After : 2005.1~2006.12).

Umkehr layer	Height(km)	Before auto (n=104)		After auto (n=109)	
		Ave.[DU]	Stdev.[DU]	Ave.[DU]	Stdev.[DU]
1	0~10	33.92	3.75	30.65	3.17
2	10~15	28.64	11.77	25.13	9.37
3	15~19	50.89	17.77	46.10	14.56
4	19~24	78.06	11.39	77.23	11.04
5	24~28	61.92	6.16	64.99	5.78
6	28~33	42.05	5.18	43.22	5.17
7	33~38	23.05	3.71	24.70	3.31
8	38~43	9.18	1.37	10.34	1.11
9	43~48	3.24	0.49	3.60	0.42
10	48~	1.34	0.10	1.40	0.08
Total		332.29	39.84	327.36	33.43

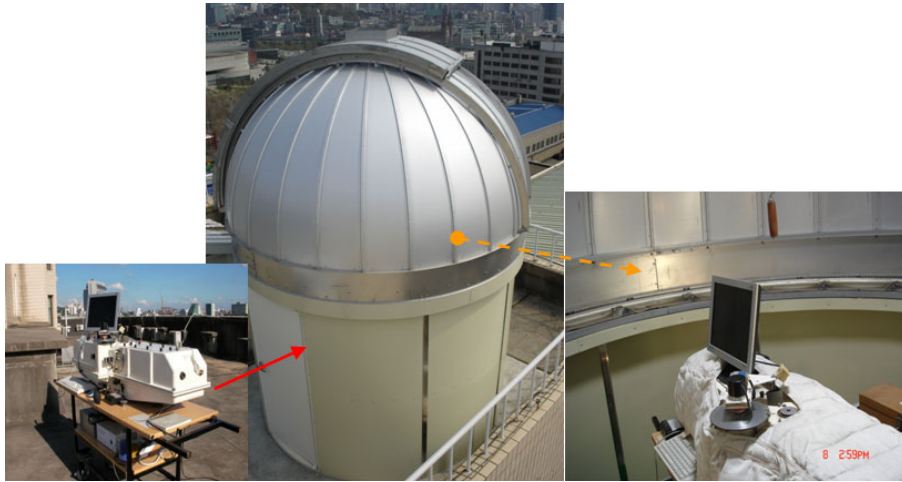


Fig. 6. Automated Dobson Ozone Spectrophotometer (No.124) and Wollbong (月峰) Ozone Observatory (WMO/GAW/GO3OS #252) at Yonsei University, Seoul.

(No.124)와 2007년 6월에 설치한 오존관측돔 [月峰(월봉)오존관측소]을 Fig.6에 나타냈다. 과거에는 관측 때마다 Dobson 기기를 실내로부터 실외로 이동시켜 가며 관측하였으나 현재는 돔 안에서 기기를 고정시켜 관측할 수 있어 관측 기기의 안정도가 높아졌다.

7. 결 론

연세대학교 돕슨 오존 분광광도계 (No.124)의 수동 관측시스템을 자동화하기 위하여 Q-lever 설정, 감쇠기 고정, R-dial의 조절 및 각도 탐지 등의 전반적인 과정이 자동조정시스템으로 하드웨어가 교체되고 오존 관측시스템도 업그레이드 되었다. 자동 관측, 자동 자료처리 및 기기 정기 검정을 위한 소프트웨어 또한 새롭게 구축하였다. 이로 인하여 기기작동과 자료처리에서 관측자 개인의 숙련도에 따르는 측정 오차가 제거되어, 자동화 시스템 이후에 관측 자료의 정확도가 크게 향상되었다. 따라서 보다 정확한 고품질 자료를 생산하므로 한반도 상공의 오존층 변화를 정확하게 파악하고, 나아가서 WMO 전구 대기감시 (GAW) 계획 아래 첨단화된 관측 시설로 지구오존층 감시 및 보호에 국제협력이 가능하게 되었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER2006-3203) 및 2차년도 BK21 연구 프로그램

의 지원으로 수행되었습니다. 또한 Dobson 분광광도계 (No.124)의 자동화와 관측실 돔에 필요한 경비는 한국기상청, 그리고 기술이전은 일본기상청에 의해 대부분 지원되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 조희구, 이승만, 최지영, 1989: 서울의 오존전량변동, *한국기상학회*, 25, 1, 21-29.
- _____, 이재원, 1990: 반전관측에 의한 서울의 연직오존분포, *한국기상학회*, 26, 4, 217-228.
- Craig, R. A., 1965: *The Upper Atmosphere*, Academic Press., 509 pp.
- Komhyr, W. D., 1980: *Operational Handbook-Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer. WMO/Global Ozone Research and Monitoring Project*, 6, 126 pp.
- Miyagawa, K., 1997: Development of an Automated System for the Dobson Ozone Spectrophotometers. *The Geophys. Mag. Series 2*, 2-1, 77-107.
- _____, 2004: Upgraded automatic Dobson ozone spectrophotometer with Windows PC for ozone observation network in Japan. *Proceedings Quadrennial Ozone Symposium*, 1-8 June 2004, Kos, Greece, 579-580.
- _____, Jhoon Kim and Hi Ku Cho, 2005: Intercomparison of Dobson Spectrophotometer in Yonsei University, Korea. *J. of Aerological Observatory*, 65, 93-98.
- Shitamichi, M., 1993: On the new retrieval program of vertical profile of ozone from Umkehr observation. *J. of Aerological Observatory*, 53, 27-38.