

2011년 서울상공 중층대기 오존의 고도별 분포도 관측 연구

가수현 · 오정진[†]

숙명여자대학교 화학과

Stratospheric Ozone Profile above Seoul in 2011 Measured by 110 GHz Microwave Radiometer, SORAS

Soohyun Ka and Jung Jin Oh[†]

Department of Chemistry, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

Received December 11, 2012/Revised December 26, 2012/Accepted December 31, 2012

Ozone in the stratosphere receives attention as one of the major greenhouse gases. Monitoring stratospheric ozone has been performed by using microwave radiometer. Ozone emits 110.836 GHz radiation spontaneously by 606-615 rotational transition, and it can be detected by a radiometer on the ground. The stratospheric ozone spectrum has been monitored by the microwave radiometer (SORAS) in Seoul. The vertical profiles of ozone from January to June 2011 have been retrieved and the retrieved SORAS profiles are validated by comparing convolved AURA MLS ozone profiles. The retrieved profiles are agreed to AURA MLS data in spring when troposphere is dry. In summer, the profile shows some deviation from AURA MLS data in the high altitude level. It means that the high opacity from the tropospheric water vapor induces the result deviation.

Key words: Ozone, Vertical profile, Stratosphere, Greenhouse gas, Optimal estimation

1. 서 론

지구 대기에 분포하는 오존은 성층권에 약 90%가 존재하고 있으며, 이를 오존층이라 부른다. 성층권의 오존 변화는 흡수하는 전파 영역에 따라 오존의 생성과 파괴가 결정되는 채프먼 이론¹⁾이 가장 기본적인 반응식으로 알려져 있다. 그러나 인간 활동에 의해 방출량이 증가하는 일산화질소, 수소, 염소, 브롬 등이 촉매로 참여하여 오존이 파괴되는 반응도 오존층 농도 변화에 있어 중요하게 다뤄진다.²⁾ 오존층은 지구로 입사하는 태양전파에서 생명체에 유해한 UV-B를 흡수하며, 성층권에서의 고도 증가에 따른 기온 증가 패턴을 결정하는 중요한 분자이다.³⁾ 또한 오존층은 이산화탄소, 메탄과 더불어 주요 온실가스로 여겨짐에 따라 성층권에서의 변화량을 감시하는 것은 기후변화 연구에 있어 중요한 연구 분야라 할 수 있다.

성층권의 오존층의 변화를 감시하는 방법 중 지상에서 마이크로파 수신기를 통해 오존 전파의 스펙트럼을 관측하여 고도별 분포도를 계산하는 방법은 오존 농도 변화를 높은 시간 분해능으로 추적할 수 있는 유용한 관측 방법이다. 대기 분자 중 쌍극자모멘트를 갖는 수증기나 오존 같은 경우 회전전이를 통해 마이크로파 대역의 특정 주파수를 발산한다.⁴⁾ 이 주파수는 지상으로 전달됨에 따라 스펙트럼의 모양이 변형되며, 세기와 너비로 표현되는 스펙트럼 모양 분석을 통해 고도별 분포도를 계산할 수 있다.

이 연구에서는 지상에서 성층권 오존분자의 마이크로파 대역 전파 수신을 통한 고도별 분포도 변화 추적을 위해 110.836 GHz 오존 전파 수신기를 이용하여 2011년 1월부터 6월까지 관측한 스펙트럼을 분석하였으며, 분석결과를 미국 AURA위성의 MLS 관측데이터와 비교하여 검증하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-2-704-4801, Fax: 82-2-704-4802, E-mail: jjinoh@sookmyung.ac.kr

2. 재료 및 방법

2.1. 전파수신기의 구성

성층권 오존의 고도별 분포도를 측정하기 위해 개발된 110.836 GHz 마이크로파 수신기인 SORAS(Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)은 2006년 개발되어 서울 숙명여대에서 관측을 수행하고 있다. SORAS는 주파수를 수신기 내부에서 변환시켜 처리하는 헤테로다인(heterodyne) 시스템을 적용한 파워전량 수신기(total power radiometer)이다.⁵⁾ 성층권 오존 분자 관측을 위한 SORAS 마이크로파 전파수신기는 대기전파의 수신 경로를 결정하고 전달하는 준광학계와 마이크로파 대역의 고주파수를 처리하는 RF수신부, 주파수 변형을 통해 낮은 주파수 대역으로 변환된 IF수신부 그리고 최종적으로 각 채널에 따른 주파수 세기를 측정하는 분광기로 구성된다.

대기 상태에서의 마이크로파를 왜곡을 최소화하여 수신기 내부로 전달시키고자 하는 준광학계(Quasioptical system)는 전파 경로에 따른 퍼짐을 고려하기 위해 가

우시안 분포 이론을 기반으로 구성되며⁶⁾, SORAS의 경우 오존전파 수신 각도를 결정하기 위한 회전면경(rotating mirror)과 회전면경에서 안테나까지 전파를 전달하기 위한 타원면경(elliptic mirror)으로 구성되어 있다. 마이크로파 전달시 준광학계 내에서 생성될 수 있는 정상파(standing wave)를 상쇄시키기 위해 회전면경은 2.5 mm의 진폭으로 끊임없이 진동하며, 전파를 전달한다. 타원면경은 하나의 초점에서 출발한 전파는 타원면에 반사된 후 다른 초점으로 전달된다는 원리에 의해 45°의 입사각을 갖도록 설계되었으며, 타원면경을 중심으로 안테나와 회전면경이 수직으로 위치해 있다. 타원면경의 중심에서 회전면경까지의 전파 경로 거리는 315 mm이며, 안테나까지는 214 mm의 경로 거리를 갖고 있다. 안테나는 마이크로파 전달 중 매질 변환체의 역할을 한다. 즉, 대기 중으로 전달된 마이크로파를 왜곡 없이 수신기 내부로 입사시키기 위해 안테나를 이용하며, SORAS는 110 GHz에서 전파너비(beam width)가 7.0 mm를 나타내는 코러게이트 혼 안테나(corrugated horn antenna)를 사용하였다.

수신기의 전파처리부는 RF 수신부와 IF 수신부로 구성된다. RF 수신부는 증폭기와 고주파 통과필터, 주파수 혼합기와 96 GHz 발진기로 이루어져 있으며, IF 수신부도 RF 수신부와 유사하게 증폭기와 주파수 혼합기, 13.445 GHz 발진기로 구성된다.

안테나를 통해 수신기로 입사된 전파는 신호 증폭 및 필터링을 거쳐 전파 처리가 쉬운 수 GHz 대의 낮은 주파수 대역으로 변환된다. SORAS는 18 dB의 증폭을 갖는 두 개의 증폭기를 안테나에 연결시켜 110 GHz 대역의 전파 세기를 증폭시켰다. 안테나와 각 증폭기 사이에는 격리소자(isolation)를 위치시켜 반사파로 인한 영향을 차단하였다. 증폭된 전파는 96 GHz의 발진기(Gunn-oscillator)와 함께 주파수혼합기(mixer)에서 낮은 주파수 대역으로 변환된다. 주파수 변환은 수백 GHz

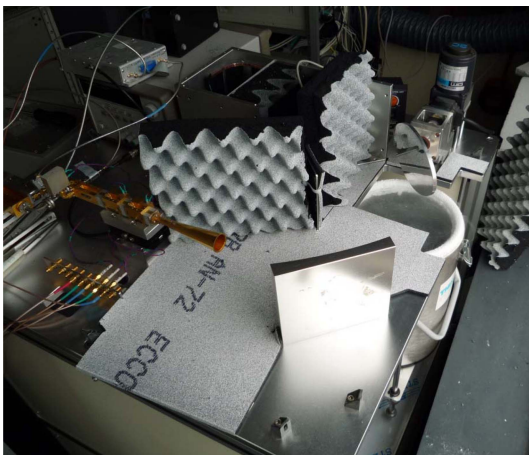


Fig. 1. 110.836 GHz microwave ozone radiometer, SORAS.

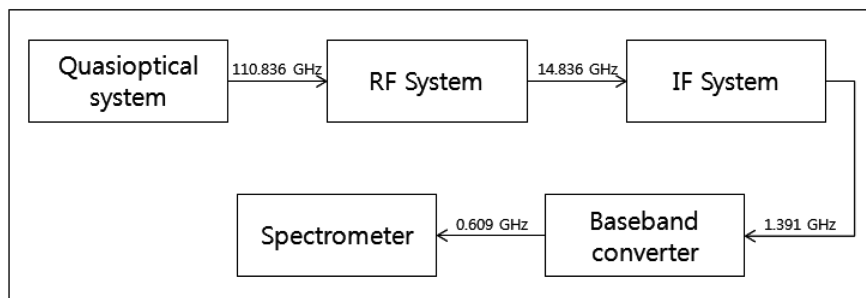


Fig. 2. SORAS simple diagram with frequency conversion.

대역의 전파를 직접 처리할 수 있는 소자가 매우 드물기 때문에 안정적으로 처리할 수 있고 소자 선택의 폭을 넓히기 위해 수 GHz 대역으로 낮추기 위함이다. 96 GHz 발진기에서 발생하는 전파는 수신기 뒷단으로 전달되는 전파의 주파수를 결정하기 때문에 관측을 수행하는 동안 매우 안정한 상태를 유지해야 한다. 96 GHz 전파 발생 여부를 보증하기 위해 PLL(phase lock loop) 시스템을 구성하여 96 GHz 전파의 생성 여부를 검사한다. SORAS의 96 GHz의 전파 생성 검사는 95.99 GHz의 전파를 PLL 시스템 내부에서 별도로 생성시켜 96 GHz와의 주파수 차이에 해당하는 10 MHz 전파가 지속적으로 발생하는지를 검사한다. 95.99 GHz의 전파를 생성시키기 위해 별도의 장치를 이용하여 7.383846154 GHz의 전파를 조화주파수혼합기(harmonic mixer)에 안정적으로 송신하면 이 주파수에 13배에 해당하는 95.99 GHz의 전파가 전달된 것처럼 인식하며, 10 MHz 전파의 발생을 검사할 수 있다. 110.836 GHz의 수신 전파와 96 GHz의 발진기를 통해 전달된 전파는 최종적으로 아래의 식에 따라 14.836 GHz의 주파수를 갖는 전파로 변환되며, 이어서 IF 수신부로 전달된다.

$$v_{IF} = |v_{RF} - v_{LO}|$$

IF 수신부에서는 14.836 GHz의 전파를 13.445 GHz의 발진기 생성 전파를 이용하여 1.391 GHz로 변환한다. 이 과정에서 주파수 혼합기 전후로 두 번의 신호 증폭(혼합기 전: 31 dB, 혼합기 후: 40 dB)이 이루어지며, 처리하는 전파의 주파수 대역이 비교적 낮기 때문에 안정적인 발진을 위한 PLL 시스템은 필요치 않다.

SORAS의 분광기는 Aqiris AC240을 사용하고 있으며, 0~1 GHz 대역의 전파를 총 16384개의 채널로 분석하여 61 kHz의 주파수 분해능으로 전파의 세기를 분석할 수 있다. 앞에서 언급했듯이 IF 수신부에서 출력된 전파의 주파수는 1.391 GHz이기 때문에 IF 수신부와 분광기 사이에 또 하나의 주파수 변환기(baseband converter)를 위치시켜 주파수 대역을 낮춰준다. 이 주파수 변환기는 2 GHz의 발진기를 사용하였으며, 최종적으로 110.836 GHz의 오존 전파 신호는 0.609 GHz로 변환되어 분광기로 전달된다.

2.2. 관측 및 보정

마이크로파의 전달에 따른 전파 세기의 변화는 Rayleigh-Jeans 근사가 적용된 전파전달방정식(radiative

transfer equation)을 통해 표현할 수 있다.^{5),7)}

$$T_b(\nu) = T_0 e^{-\tau(z_0)} + \int_0^{z_0} \alpha T(z) e^{-\tau(z)} dz$$

T_b 는 경로 z 에서 관측된 주파수 ν 의 전파세기이며, T_0 는 우주배경온도 2.7 K, α 는 흡수계수, $\tau(z)$ 는 z 에서의 광학두께를 나타낸다. 우리가 수신한 마이크로파 대역의 오존 전파는 R-J 근사가 적용되었으므로 전파 세기는 온도의 크기로 표현할 수 있다. 이 때의 온도 크기를 밝기온도라 한다.

수신기를 통해 주파수별로 분석된 대기 전파는 전파 세기에 따른 온도를 추정할 수 있도록 별도의 보정 기준 전파를 필요로 한다. 일반적으로 흑체라고 가정하여 hot과 cold라 불리는 보정 기준 물체는 이 물체로부터의 전파를 측정함으로써 전파세기와 온도에 대한 2개의 기준점을 알려주며, 1차 방정식을 통해 전파 세기에 해당하는 대기 전파의 소스 온도($T_{b,atmos}$)를 추정할 수 있다.

$$\frac{T_{b,atmos} - T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} = \frac{S_{atmos} - S_{cold}}{S_{hot} - S_{cold}}$$

여기서 T 는 각 보정기준물체 hot, cold와 대기(atmos)의 온도를 나타내며, S 는 분광기를 통해 출력된 기기 값을 나타낸다.

SORAS는 보정기준물체로써 Eccosorb 사의 CV3 전파 흡수체(absorber)를 사용하며, hot은 실온상태에 놓은 CV3, cold는 액체질소에 담긴 CV3로부터 전파를 측정하여 각각 S_{hot} 과 S_{cold} 로 삼는다. T_{hot} 은 CV3 내에 직접 삽입시킨 PT100 온도센서로부터 측정하며, T_{cold} 는 Clausius-Clapeyron 방정식을 이용하여 계산한다. 따라서 SORAS의 관측과정은 hot-cold-atmosphere의 3가지 물질에서 발산되는 전파를 번갈아 측정하는 것으로 이루어지며, 각 위치에서 약 6.6 초동안 전파를 측정한 후의 평균값을 최종 출력한다. 이때 대기의 관측 각도는 65°로 되어 있다.

2.3. 역산법

수신기를 통해 수신된 전파는 고층대기-중층대기에서 대류권을 거쳐 수신기에 전달된다. 즉, 대류권의 영향이 수신 전파에 누적되어 있으며, 중층대기에 비해 많은 수의 대기분자가 존재하는 대류권은 중층대기 오존 전파 스펙트럼에 연속 스펙트럼 형태로 기여하여 스펙트럼 전체에 걸쳐 온도 상승 효과를 가져오며, 그 결과

오존 스펙트럼의 세기가 약하게 보이는 결과를 낳는다. 대류권에 상대는 기상현상에 따라 수시로 변하기 때문에 이를 보정하는 방안을 마련해야 한다. 오존 전파의 대류권 투과율은 오존 전파의 중심주파수인 110.836 GHz에서 50 MHz 떨어진 부분의 스펙트럼 레벨을 이용하여 계산하였다.⁸⁾

관측한 스펙트럼에서 오존의 고도별 농도 계산은 Rodgers의 최적근사법(Optimal estimation method)⁹⁾을 통해 계산되며 최종적으로 아래 식처럼 표현한다.

$$\hat{x} = x_a + A(x - x_a)$$

\hat{x} 는 스펙트럼으로부터 계산한 고도별 농도, x_a 와 x 는 오존농도의 선형값과 실제 농도를 나타내며, A 는 평균 커널값(averaging kernel)을 나타낸다.

SORAS의 스펙트럼 분석을 위해 고도-압력 분포도는 NASA AURA위성의 MLS¹⁰⁾ 관측 데이터를 사용하였으며, 대기 분자에 대한 농도 분포도는 US standard atmosphere 1976을 사용하였다. 오존 스펙트럼에 대한 정보는 JPL 카탈로그와 HITRAN08 데이터베이스를 혼용하여 반영하였으며, 최종 도출되는 고도별 분포도는 0.01 Pa에서 101 hPa에 걸쳐 50개의 농도값을 출력하도록 하였다. 위의 역산법은 SORAS로 관측한 스펙트럼 중 110.836 GHz 오존 주파수를 중심으로 100 MHz의 영역만 고려하여 계산하였으며, 스펙트럼의 노이즈 표준편차가 1 K 이하가 될 때까지 적분하였다. 위의 역산 과정은 Cygwin상의 Matlab을 통해 ARTS¹¹⁾와 Qpack¹²⁾ 프로그램을 이용하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고도별 분포도

SORAS를 통해 관측한 스펙트럼의 모양을 Fig. 3에 나타내었다. 110.836 GHz를 중심으로 ± 50 MHz의 스펙트럼을 역산에 사용하여 농도 분포도를 계산하였다. 2011년 5월 16일 관측자료 중 도출된 농도 분포와 계산에 사용된 선형값, 검증을 위해 사용된 AURA MLS의 데이터를 Fig. 4에 나타내었다. 검증을 위한 위성데이터의 처리방법은 3.2. 고도별 분포도 검증에 설명하였다. 분석한 데이터의 오차는 Fig. 5에 표현되었다. 관측을 통해 발생한 오차는 454 Pa에서 약 10%의 크기를 보이며, 역산 계산 과정 중에 발생하는 평활오차가 반영된 총 오차는 63 Pa에서 1060 Pa에서 약 30%의 크기를 보였다. 2011년 1월부터 6월까지 관측된 고도

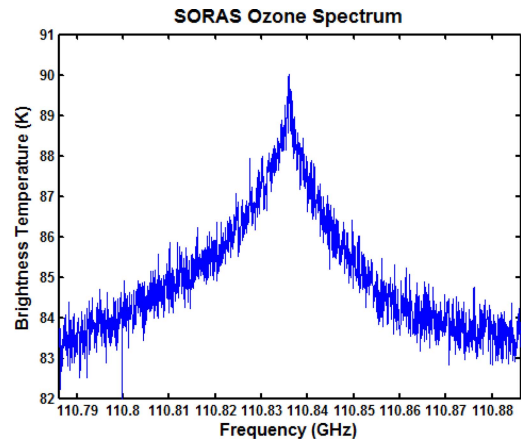


Fig. 3. 110.836 GHz ozone spectrum measured by SORAS.

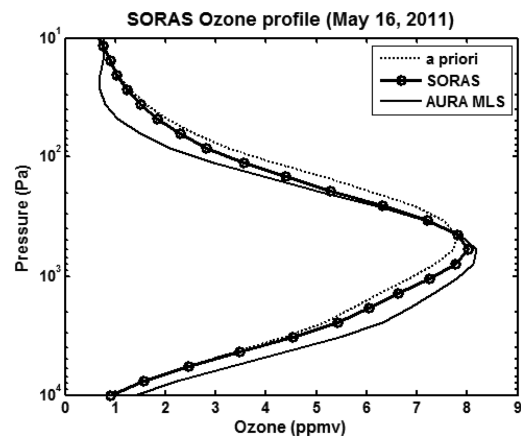


Fig. 4. SORAS ozone profile with *a priori* profile and AURA MLS ozone profile. It results from a measured spectrum integrated for 30 minutes.

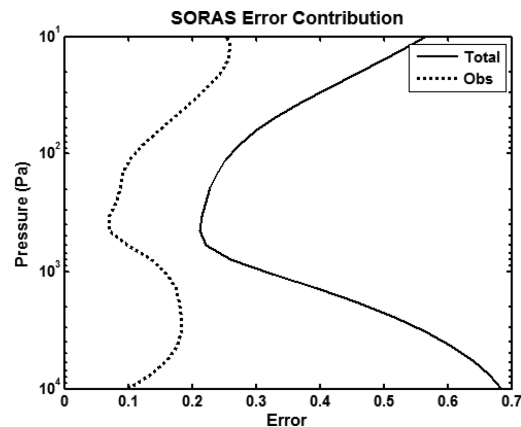


Fig. 5. SORAS error contribution from the observation (dot) and total error contribution (solid). Error is scaled between 0 and 1 (Error 0.3 means 30%).

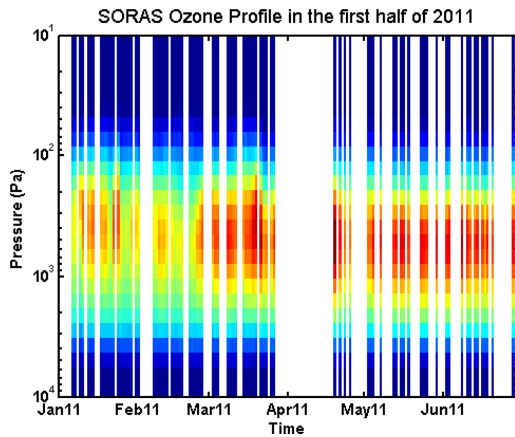


Fig. 6. SORAS ozone profile between Jan. and Jun. 2011.

별 분포도의 시계열 변화는 Fig. 6을 통해 볼 수 있다. 강우나 기기적 문제로 인한 미관측일은 빈 공간으로 표시되었으며, 시계열 분포도를 통해 겨울철에 오존층의 고도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 고도별 분포도 검증

역산법은 통계적 방법으로 수행하기 때문에 어느 정도의 오차를 항상 수반하고 있으며, 분석한 고도별 분포도의 검증은 다른 관측데이터와의 비교를 통해 이루어진다. SORAS의 검증을 위해 NASA AURA위성의 MLS(Microwave Limb Sounder) 데이터를 사용하였다.

AURA위성의 MLS는 오존층 및 기후변화와 관련된 대기 분자 관측을 위해 2004년부터 현재까지 전지구영역의 대기 분자의 고도별 분포도를 관측하는 위성 관측 장비이다. AURA MLS 관측 데이터 중 한반도 주변(북위 35°~40°, 동경 120°~135°)에서 관측된 오존 데이터의 평균값을 사용하였다. MLS 데이터는 SORAS 데이터와 고도 좌표가 다르기 때문에 좌표 일치를 위해 다음의 식¹³⁾을 이용하여 좌표를 일치시킨다.

$$x'_{MLS} = x_a + A_{SORAS}(x_{MLS} - x_a)$$

이 식을 통해 계산되는 위성 데이터(x'_{MLS})는 본래의 위성데이터(x_{MLS})를 SORAS 관측기기로 관측했을 때의 농도 분포 데이터를 의미하며 역산과정의 오차를 제거하는 방법이다. A_{SORAS} 는 SORAS의 평균커널을 의미한다.

SORAS의 오존 농도 변화와 AURA MLS위성의 오존 농도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 1400 Pa(약 28 km)에서 63 Pa(약 51 km)까지의 압력 고도 범위를 다섯 구간으로 나누어 고도별 비교를 하였다. Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 건조한 상태의 대류권 영향을 받는 겨울부터 봄까지의 농도 분석 값은 위성 데이터와 매우 일치하는 변화 특성을 보이고 있으나, 습도가 높은 여름철의 경우 150 Pa(약 이하)의 기압 범위에서 오차가 점점 커짐을 볼 수 있다. 마이크로파 대역의 경우

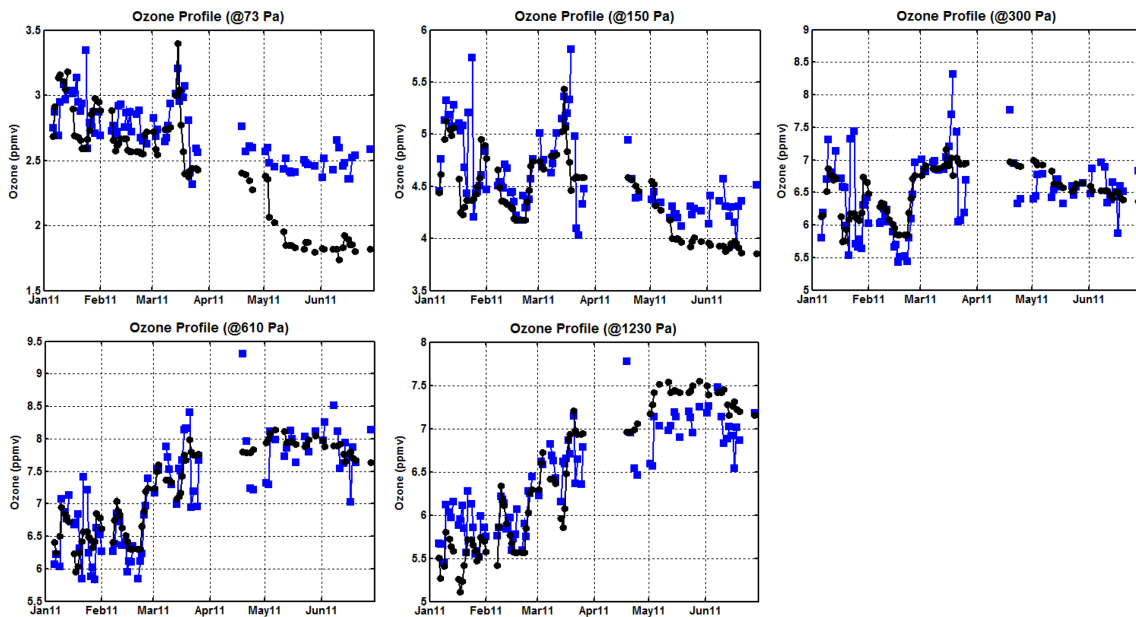


Fig. 7. Validation for SORAS profile (square) by comparing AURA MLS profile (circle). The pressure levels, 73 Pa, 150 Pa, 300 Pa, 610 Pa and 1230 Pa, correspond to 50 km, 43 km, 37 km, 34 km and 28 km respectively.

대류권 수증기의 높은 광학두께 영향으로 지상에서 관측하는 스펙트럼의 신호 감쇄가 발생한다. 이것은 대류권의 높은 수증기 농도에 대한 오존 전파 신호의 투과도 보정의 오차로 인해 고층 영역(150 Pa 이하)에서 농도 계산의 불확실성으로 나타났다.

4. 결 론

성층권 오존 관측을 위해 개발된 110.836 GHz 성층권 오존 전파 수신기 SORAS는 주파수를 낮은 대역으로 바꾸어 분석하는 헤테로다인 파워전량수신기로서, 두 개의 기준 보정 물질로부터 발산된 전파와 더불어 대기 중 오존의 전파를 수신하여 110.836 GHz 오존 스펙트럼을 출력하였다. SORAS를 통해 관측된 스펙트럼은 오존 뿐만 아니라 대류권 수증기에 의한 영향이 연속스펙트럼 형태로 더해지기 때문에, 스펙트럼의 전체적인 레벨이 상승한다. 수증기의 영향을 제거하기 위해 스펙트럼 날개 부분의 세기를 기준으로 대류권의 투과율을 계산하여 보정하였다. 관측된 스펙트럼 중 100 MHz만을 취하여 분석한 고도별 농도 분포도는 최적근사법을 사용하여 통계적으로 분석한 결과로 도출되며, 약 10%의 관측오차를 보이는 것으로 나타났다. 대류권의 습도가 낮은 겨울철의 경우 SORAS의 오존 농도 분포는 고도별 분포 변화 면에서 AURA MLS 위성과 상당히 일치하는 결과를 보이나, 습도가 높은 여름철의 경우 대류권 수증기의 신호 감쇄 영향 및 투과도 보정의 오차로 인해 일치하는 고도 범위가 줄어들어 오존의 고도별 분포도 분석에 상당한 오차 발생을 유발하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 숙명여자대학교 2011학년도 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. R. G. Barry and R. J. Chorley, *Atmosphere, Weather, and Climate*, **2003**, Routledge.
2. J. C. McConnell and J. J. Jin, *Atmosphere-Ocean*, **2008**, 46(1), 69-92.
3. M. D. King Ed., *EOS Science Plan*, **1999**, NASA Goddard Space Flight Center.
4. G. E. Thomas, K. Stamnes, *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*, **2002**, Cambridge University Press.
5. M. A. Janssen, *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry*, **1993**, Wiley-Interscience.
6. P. F. Goldsmith, *Quasioptical systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications*, **1998**, IEEE Press.
7. K. N. Liou, *An introduction to atmospheric radiation*, **2002**, Academic Press.
8. C. M. Puliafito and S. E. Puliafito, *Remote sensing of environment*, **2005**, 94(1), 61-82.
9. C. D. Rodgers, *Inverse Methods for Atmospheric Soundings: Theory and Practice*, **2000**, World Scientific.
10. J. W. Waters et al., *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **2006**, 44(5), 1075-1092.
11. S. Buehler et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **2005**, 91(1), 65-93.
12. P. Eriksson et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **2005**, 91(1), 47-64.
13. B. J. Connor et al., *Journal of Geophysical Research*, **1994**, 99(D8), 16757-16770.