

## 마이크로파 스펙트럼 관측을 통한 2013년 성층권 오존 연직분포

가수현<sup>1</sup> · 오정진<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>숙명여자대학교 지구환경연구소, <sup>2</sup>숙명여자대학교 화학과

### Vertical Profile of Ozone in the Stratosphere above Seoul in 2013

Soohyun Ka<sup>1</sup> and Jung Jin Oh<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Global Environment, Sookmyung Women's University, Seoul, 140-742, Korea

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Sookmyung Women's University, Seoul, 140-742, Korea

Received December 2, 2014/Revised December 15, 2014/Accepted December 18, 2014

The ozone layer determines the thermal vertical structure of the stratosphere by absorbing solar UV radiation. Ozone also has impacts on the global radiative budget. A microwave radiometer is a useful instrument to monitor the vertical profile of gases in the middle atmosphere. The 110.836 GHz radiation emitted from the atmospheric ozone molecules can be detected at the ground by the microwave radiometer. The ozone spectrum observed from the ground includes tropospheric effects, especially by variations in water vapor concentration. These tropospheric effects need to be considered for analysis. In this paper, the water vapor contribution to the spectrum was estimated by comparing two items, bias temperature and intensity, with MPM93 simulated values. From the method, the ozone profile was retrieved from May through December 2013. The maximum ozone concentration of the ozone layer was calculated as 8 ppmv with some seasonal variations. The retrieved profile was validated by comparing with AURA MLS satellite data, and the deviation was found to be about 10%.

**Key words:** Ozone layer, Stratosphere, Climate change, Microwave, Remote Sensing

#### 1. 서 론

수 많은 종의 기체와 에어로졸로 구성되어 있는 대기는 기온 분포에 따라 지표면으로부터 여러 층으로 나눌 수 있으며, 각 층마다 고유의 특성을 갖고 있다. 지표면으로부터 약 16 km 이상에 분포하는 성층권과 중간권은 기후변화 감시에 필수적인 영역으로 이 권역에서의 구성성분의 변화가 지구 기후에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 오존은 성층권에 집중 분포하고 있으며, 이러한 이유로 성층권 내 오존을 오존층이라 부르고 있다. 이 오존층은 태양으로부터 유입되는 자외선을 흡수하여 지표면 도달량을 줄여주며, 자외선 흡수로 성층권의 기온 분포를 결정하는 등 대기 열적 구조 결정과 지구 생태계에 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.<sup>2)</sup> 이러한 오존층은 1980년대 남극에서 농도가 감소

한 것이 지상관측을 통해 측정됨에 따라 주요 모니터링 대상으로서 주목을 받기 시작하였으며, 현재 우리나라에서도 흡수 분광기와 오존존데 등의 감시 장비를 통해 한반도 상공의 오존층 농도를 감시하고 있다.<sup>3)</sup> 이러한 오존을 관측하는 라이다, 오존존데, 흡수분광기와 같은 다양한 장비<sup>4)</sup> 중에서 마이크로파 수신기는 성층권부터 중간권에 분포하는 산소나 오존, 수증기 등의 극성 기체 분자의 연직분포를 측정하는데 적합한 관측 특성을 갖고 있다. 마이크로파 수신기는 오존 분자 자체를 광원으로 사용하기 때문에 주야간에 관계없이 상시 관측이 가능하며, 긴 파장 대역을 사용하기 때문에 구름이나 에어로졸 등의 대기 입자로 인한 산란 영향을 무시할 수 있다. 그러나 마이크로파를 이용한 대기의 연직분포 관측은 통계적 방법에 의한 역산법을 사용하기 때문에, 정확한 값이 아닌 최적의 값을 구하게 되며, 연

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

직분포 계산에 사용되는 각종 파라미터들을 관측 환경에 적절한 값을 사용함으로써 측정 결과의 정확성을 향상시킬 수 있다. 또한 관측의 정확성 판단은 상이한 관측방법을 통해 측정된 자료와의 상호 비교를 통해 알 수 있다. 이에 중층대기 분자의 변화를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 다양한 관측 방법을 이용한 측정 자료가 중요하다.

이 논문에서는 110.836 GHz 마이크로파 수신기를 이용하여 2013년 5월부터 12월까지 7개월간 측정된 서울 상공의 오존층 연직분포 관측 결과를 나타내고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 110.836 GHz 마이크로파 수신기

이 실험에서 사용한 마이크로파 수신기는 숙명여대에 서 개발, 운영하고 있는 SORAS (Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)로써, 대기 중 오존에서 방출되는 110.836 GHz 오존 전파 스펙트럼을 지상에서 수신하여 연직분포를 측정한다. 마이크로파 오존전파수신기 SORAS는 오존 전파의 주파수인 110.836 GHz를 1 GHz 이하의 주파수로 변환하여 스펙트럼을 나타내는 방식을 사용하고 있다. 기기의 구성에 대한 내용은 (가수현, 2012)<sup>5)</sup>에 나타나 있다. 기존의 주파수 변환은 국부발진기를 이용하여 발생한 96 GHz 신호를 대기 오존 전파인 110.836 GHz 신호와 주파수 혼합과정을 통해 14.836 GHz로 변환하고, 2차로 1.391 GHz로 다시 변환하여 최종적으로 0.609 GHz의 중심 주파수를 갖는 오존 스펙트럼을 측정한다. 그러나 2013년 5월 수신기 개선작업을 통해 내부 주파수 변환을 위한 발생 주파수를 97.086 GHz로 변경하였으며, 증폭기와 필터를 추가 장착하여 수신기의 출력을 향상시키는 등의 개선 작업을 하였다. 또한 전파의 고주파 대역 전달을 담당하는 수신기의 고주파처리단(RF, Radio frequency)을 30°C로 유지하도록 온도유지장치를 추가로 장착하여 전파 전달 부품의 출력값이 안정적이 되도록 환경을 조성하였다.

### 2.2. 오존 전파 스펙트럼 측정

오존 전파 스펙트럼의 세기는 흑체복사식을 이용하여 나타낼 수 있으며,<sup>6)</sup> 마이크로파 영역에 대해서는 Rayleigh-Jeans 근사법을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{\nu}(T) = \frac{2\pi k\nu^2}{c^2} T$$

즉, 이 식을 사용하여 스펙트럼의 세기를 온도 단위인 켈빈(K)으로 표현할 수 있으며, 이 때 정의되는 온도를 밝기온도(Brightness temperature)라 정의한다. 이 근사법을 사용함으로써 스펙트럼의 세기를 온도단위로 나타낼 수 있으며, 스펙트럼 측정을 통해 대기의 온도를 추정할 수 있는 장점이 있다.

오존 전파 스펙트럼( $T_{\text{ozone}}$ )은 다음과 같은 식에 의해 측정할 수 있다<sup>7)</sup>.

$$T_{\text{ozone}} = \frac{P_{\text{ozone}} - P_c}{P_h - P_c} (T_h - T_c) + T_c$$

첨자 h와 c는 Hot과 Cold라 불리는 흑체가 가정된 보정물질을 나타낸다. T는 각 물질의 절대온도, P는 각 물질을 측정할 때 출력되는 파워값을 나타낸다. 이 연구에서는 Hot 물질로써 30°C의 온도를 유지하고 있는 Eccosorb사의 CV3 전파흡수체<sup>8)</sup>를 사용하였으며, Cold는 기화하고 있는 액체질소 내에 위치한 CV3 전파흡수체를 사용하였다. 액체질소는 1일 1차례 보충을 하여 그 양이 일정량 이상 유지되도록 하고 있다. 스펙트럼 측정을 위한 각 물질과 대략적인 온도를 표 1에 나타내었다.  $P_{\text{ozone}}$ 은 65°의 천정각을 갖는 대기 신호 측정값을 사용하였다.

전파를 수신하는 물질의 선택은 수신기 광학부분에 위치한 회전면경을 통해 이루어진다. 회전면경은 회전하면서 회전면경 주위에 위치한 각 보정물질이 방출하는 전파를 약 6.6초 동안 수신기 안테나로 전달시킨다. 각 물질의 방출전파 파워 P를 분광기가 측정하며, Hot 물질의 온도는 온도 센서를 통해 관측과 동시에 실시간으로 측정되며, 액체질소의 기화점은 Vaisala WXT 510 기상

**Table 1.** Signal sources for the SORAS ozone spectrum calculation

Target	Sources	Temperature Sensor (Typical temperature)
Hot	Eccosorb CV3 absorber in 30°C	Pt100 Sensor (303±0.5 K)
Cold	Eccosorb CV3 absorber soaked into liquid nitrogen	Clausius-Clapeyron equation with measured atmospheric pressure and temperature data (77 K)
Ozone	Atmospheric signal 65 degrees in zenith	-

센서를 통해 측정된 기압과 기온값으로부터 계산한다.

### 2.3. 대류권 보정

성층권에서 대류권을 통과하여 지상에서 측정된 오존 스펙트럼은 대류권의 상태에 따라 스펙트럼의 모양이 달라진다. 특히 마이크로파 대역의 대기 스펙트럼은 전달 과정에서 수증기에 의한 신호 감쇄가 발생하여 관측 스펙트럼의 세기가 달라질 수 있다. 예를 들어 성층권의 오존이 일정한 양이라고 가정할 경우, 대류권계면에서 측정된 스펙트럼은 일정한 세기의 스펙트럼을 보일 것이나, 지표면에서 측정된 스펙트럼은 대류권 내에 다량 존재하고 있는 수증기양에 의해 스펙트럼의 세기가 변화할 것이며, 이것을 보정 없이 그대로 반영할 경우 오존량이 감소한 것처럼 나타나는 등의 문제가 발생한다. 따라서 수증기량으로 인한 스펙트럼의 세기 감소를 보정해 주기 위해 대류권 수증기량을 스펙트럼 역산과정에 반영해 줄 필요가 있다. 이 논문에서는 스펙트럼 측정 당시의 수증기량을 추정하기 위해 오존 스펙트럼에서 오존량에 영향을 받지 않는 스펙트럼 날개 부분의 온도를 기온온도(BT, bias temperature)라고 정의하고, 이 기온 온도와 스펙트럼 세기 변화를 MPM93 (Millimeter wave propagation model) 모델<sup>9)</sup>의 시뮬레이션 결과와 비교하여 대류권 수증기 대푯값을 근사적으로 추정하여 적용하였다. 추정된 수증기 대푯값을 오존 연직분포 역산과정에 반영함으로써 대류권 영향을 보정하도록 하였다. BT값은 110.595 GHz에서 나타나는 스펙트럼 온도로 지정하였다.

마이크로파 대역에서 나타나는 수증기로 인한 신호 감소는 수증기 연속스펙트럼 모델(continuum model)을 통해 수식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha_c = v^2 \Theta^3 (C_{H_2O}^0 P_{H_2O}^2 \Theta^{ns} + C_d^0 P_{H_2O} P_d \Theta^{nd})$$

$\alpha_c$ 는 수증기로 인해 나타나는 흡수계수를 나타낸다.  $C_{H_2O}^0 P_{H_2O}^2 \Theta^{ns}$ 은 수증기 분자간 충돌로 인한 영향을 나타내며,  $C_d^0 P_{H_2O} P_d \Theta^{nd}$ 은 수증기와 다른 대기 분자 특히 질소 분자와의 충돌로 인한 영향을 보여준다. MPM93 모델은 수증기의  $\alpha_c$ 를 2 THz에서 보이는 수증기의 공명 스펙트럼(resonant spectral line)의 영향으로 간주하여 위 식의 파라미터를 계산하는 방법을 사용한다. MPM93 모델을 이용하여 스펙트럼을 시뮬레이션<sup>10)</sup> 하기 위해 설정한 수증기 연직 분포는 대류권 계면인 16 km를 중심으로 상부 영역에 대해 AURA

MLS v2.2의 위성 기후자료를 이용하였으며, 16 km 이하의 영역은 1,000 ppmv부터 40,000 ppmv까지의 20개의 값 변화를 주어 계산하였다.

### 2.4. 오존 연직분포 역산

대기 중 오존으로부터 발산된 전파 스펙트럼은 지상의 수신기까지 도달하는 동안 여러 영향에 의해 오존 발산 주파수를 중심으로 어느정도의 너비를 갖는 스펙트럼으로 모양이 변한다. 특히 대기 구성 물질의 입자는 대류권으로 내려올수록 그 수가 급격히 증가하기 때문에 다른 대기 구성 성분과의 충돌로 인해 너비가 발생하는 압력넓힘 현상의 영향력이 크다. 지상에서 관측한 스펙트럼에서 오존의 연직분포를 역산하는 것은 이러한 압력 넓힘 현상으로 인해 결정된 스펙트럼의 모양 분석을 기반으로 한다. 이 논문에서 오존의 연직분포는 Rodgers의 최적근사법(optimal estimation method)을 이용하여 분석하였다.<sup>11)</sup>

$$x_m = x_a + A(x_t - x_a) + \varepsilon$$

$x_m$ 은 역산한 연직 분포를 의미하며,  $x_a$ 는 초기값으로 설정한 연직분포,  $x_t$ 는 실제 연직분포를 의미한다. A는 평균커널(Averaging kernel)로써 A의 면적을 통해 관측 반응도를 계산할 수 있다.  $\varepsilon_x$ 는 관측이나 역산과정 중에 발생하는 오차항을 의미한다. 이 논문에서 지상관측 오존 스펙트럼을 역산하기 위해 사용한 주요 파라미터를 표 2에 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 오존 전파 스펙트럼

그림 1은 2013년 11월 9일 오후 7시부터 10일 오전 7시 30분 사이에 관측한 스펙트럼을 보여준다. 각각 1시간 30분간의 관측을 수행하여 약 25분동안 적분된

Table 2. SORAS retrieval parameters

Parameter	Value
Bandwidth	800 MHz
Noise level	0.2 K
Platform altitude	52 m
A priori profile ( $x_a$ )	[O <sub>3</sub> ] AURA MLS v3.3 climate profile [H <sub>2</sub> O] AURA MLS v3.3 climate profile and Estimated H <sub>2</sub> O
Baseline	1 <sup>st</sup> order of polynomial

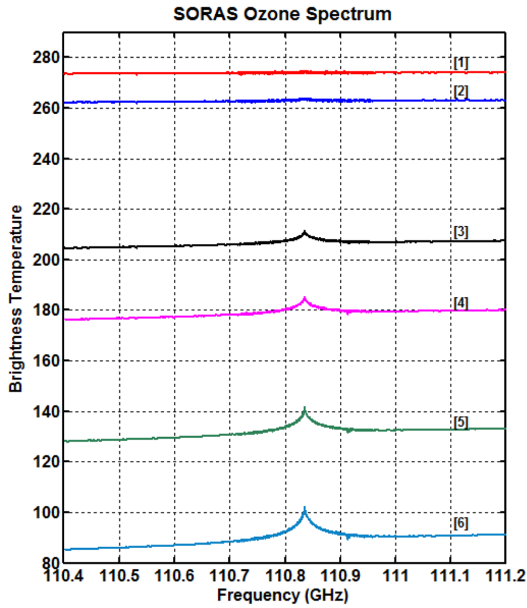


Fig. 1. 110.836 GHz ozone spectrum measured by SORAS on 9-10 Nov. 2013. Detailed time information is in Table 3.

오존 스펙트럼을 나타낸다. 각 스펙트럼의 관측 시간은 표 3에 나타내었다. 이 날의 기상상태는 10일 자정 무렵까지 약한 비가 계속되었으며, 새벽 1시부터 점차 맑아지는 날씨를 기록하였다. 즉, 대류권의 수증기량이 점차 감소하는 기상 상태를 나타내었으며, 이에 따라 스펙트럼의 BT가 점차 감소하는 것을 그림 1에서 확인할 수 있다. 또한 110.836 GHz에서 나타나는 오존 신호의 세기는 BT가 증가함에 따라 감소하여 [1]번 스펙

Table 3. Time information on SORAS spectrum in Fig. 1

No.	Time [KST]
[1]	19:00, 9 Nov. 2013 - 20:30, 9 Nov. 2013
[2]	23:30, 9 Nov. 2013 - 01:00, 10 Nov. 2013
[3]	01:30, 10 Nov. 2013 - 03:00, 10 Nov. 2013
[4]	03:00, 10 Nov. 2013 - 04:30, 10 Nov. 2013
[5]	04:30, 10 Nov. 2013 - 06:00, 10 Nov. 2013
[6]	06:00, 10 Nov. 2013 - 07:30, 10 Nov. 2013

트럼에서는 오존 신호의 크기가 [6]번 스펙트럼에 비해 매우 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 대류권 수증기 변화가 오존 신호에 미치는 영향을 보여주는 것으로, 대류권 수증기 농도에 따라 스펙트럼의 세기와 BT가 어떻게 변하는지 다음 3.2절에서 나타내었다.

3.2. 대류권 영향 보정

2013년 5월 30일부터 12월 31일까지 측정된 오존 전파 스펙트럼의 세기와 BT의 시계열 변화를 살펴보면, 그림 2와 같이 나타난다. 여름인 7월에서 8월에 오존 전파 스펙트럼의 세기는 최소치를 보이는 반면, BT는 최대치를 기록하고 있다. 그러나 대기가 점차 건조해지는 가을과 겨울에 접어들수록 스펙트럼 세기는 증가하고, BT는 감소하는 것을 볼 수 있다. 11월과 12월에도 강우가 기록되는 날에는 대기 중 습도가 증가함에 따라 스펙트럼 세기와 BT가 급한 감소와 증가가 나타남을 확인할 수 있다. 오존량 변화가 아닌 대류권 기상 상태에 따라 나타나는 스펙트럼 변화는 오존 연직분포 역산에 오차를 유발하는 요소 중 하나이다. 따라서 이러한 현상을 보정하기 위해 MPM93 모델을 이

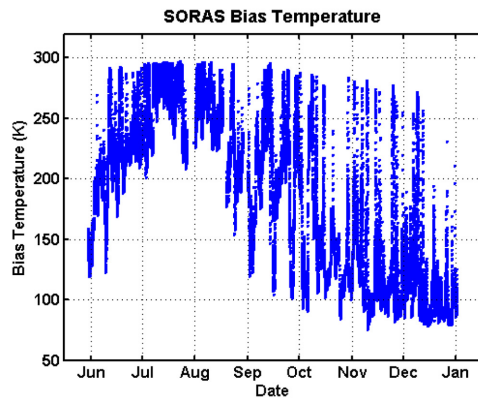
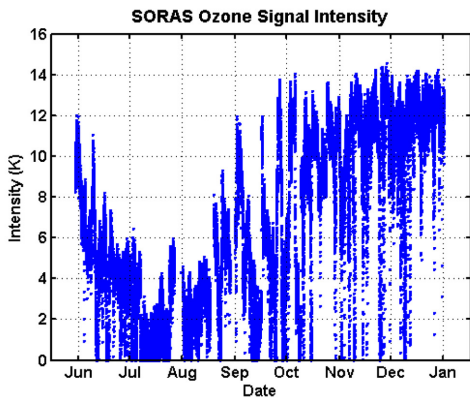


Fig. 2. Variations of intensity and bias temperature of SORAS ozone spectrum measured from 30 May to the end of December 2013.

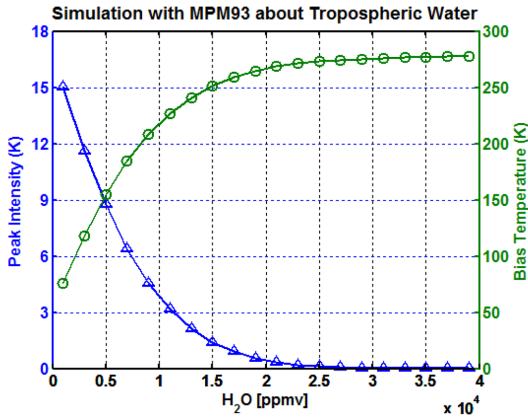


Fig. 3. Simulated intensity and bias temperature of 110.836 GHz ozone spectrum. The  $H_2O$  volume mixing ratios on x-axis are assumed as the amounts of tropospheric water vapor below 16 km.

용하여 대류권 수증기량 변화에 따른 오존 스펙트럼의 세기와 BT 변화를 시뮬레이션하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 보듯이 대류권 수증기의 농도가 증가함에 따라 BT와 스펙트럼 세기는 비선형적으로 반응하는 것을 확인할 수 있다. 건조한 상태에서의 수증기량 변화에 대해 스펙트럼 세기와 BT는 급격하게 변화하며, 15,000 ppmv 이상의 수증기 농도에서는 대기가 점점 포화됨에 따라 변화량이 완만해지는 것을 볼 수 있다. 대류권 영향 보정의 목적은 스펙트럼 측정시 존재하는 대류권의 수증기량을 추정하기 위함이므로, 그림 2에서 나타난 SORAS 오존전파 스펙트럼의 전파세기와 BT를 그림 3의 MPM93 시뮬레이션 결과에 내삽하여 적절한 수증기 농도를 추정하였다. 여기서 추정한 수증기의 농도는 연직분포 역산시에 대류권을 하나의 층으로 가정하여 대류권에 해당하는 16 km 이하의 단일 수증기 농도로 설정하였다.

### 3.3. 오존 연직분포

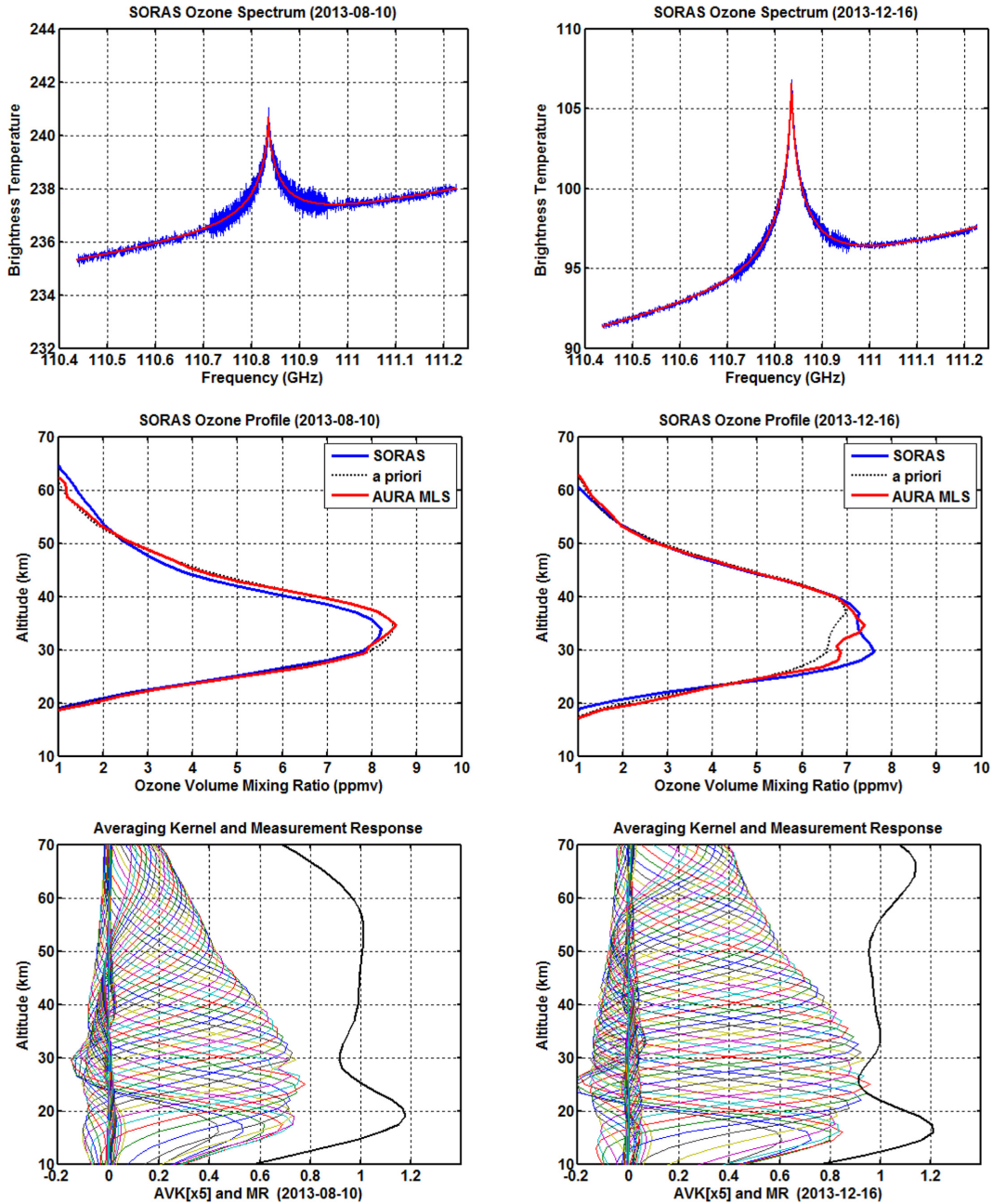
오존 연직분포 역산 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 좌측은 2013년 8월 10일에 측정된 스펙트럼과 오존 연직분포, 그리고 평균 커널(averaging kernel)와 관측 반응도를 보여주며, 우측은 2013년 12월 16일의 결과를 보여준다. 8월 10일의 관측 스펙트럼은 235.9 K의 BT와 3.98 K의 방출 세기를 보여주고 있으며, MPM93 시뮬레이션 결과에 따라 11,500 ppmv의 수증기 양이 대류권 대푯값으로 설정되었다. 12월 16일은

92.8 K의 BT와 11.72 K의 세기를 보이며, 대류권 수증기 양은 시뮬레이션 결과와 비교하여 2,300 ppmv로 건조한 상태로 설정되었다. 스펙트럼 결과에 따라 수증기량을 설정해 줌으로써 각각의 전진모형 스펙트럼(붉은 선)이 관측 스펙트럼 상에 나타난 것을 확인할 수 있다. 평균 커널과 관측 반응도를 고려했을 때, 겨울철과 여름철 모두 15 km에서 60 km 사이의 고도 범위에서는 90%의 관측 반응도를 보여 이 영역에 대해서는 설정한 연직분포 초기값이 아닌 관측된 연직 분포가 반영된 것을 보여준다. 8월 10일의 최대 오존량은 34 km에서 8.20 ppmv로 측정되었으며, 12월 16일은 29 km에서 7.59 ppmv로 측정되었다. 그림 5에서는 2013년 5월 30일부터 12월 31일까지 SORAS를 통해 관측한 오존층 변화와 AURA MLS 위성 관측자료의 오존층 변화를 그림 5에 나타내었다. 두 관측 결과 모두 11월부터 뚜렷하게 오존층이 높은 고도 영역으로 점차 퍼지며 최대 오존량이 감소하는 것을 보여주고 있다.

SORAS의 오존 연직분포도를 AURA MLS 위성 관측값과 비교하기 위해 그림 6에서와 같이 두 관측값의 고도별 월별 평균 농도 차이를 나타내었다. 오존 농도의 대부분이 분포하고 있는 25 km에서 40 km 고도 영역에 대해서는 SORAS를 통한 지상 관측값이 위성 관측값에 대해 월별로 나타나는 차이를 살펴보면 9월에 9.6%로 가장 큰 차이를 보였으며, 6월에 2.1%로 위성값과 가장 근사한 연직 분포를 보이고 있다 (표 4). 그 외의 기간에는 4.5%에서 6% 범위의 차이를 보이고 있다. 오존층 분포 영역에서 10% 이내의 오차를 갖는 측정 결과는 다른 마이크로파 관측자료의 신뢰도와 비슷한 정도를 나타내고 있다.<sup>12)</sup>

## 4. 결 론

이 논문은 마이크로파 지상관측을 통해 관측한 오존층 연직분포를 보여주고 있다. 지상에서 측정된 오존 스펙트럼으로부터 연직분포를 구하기 위해 대류권에 의해 변형된 오존 스펙트럼을 보정해주어야 한다. 이 논문에서는 대류권의 다양한 수증기 농도를 설정하여 MPM93 모델을 통해 오존 스펙트럼을 시뮬레이션하고, 관측한 스펙트럼의 기반 온도(bias temperature)와 세기를 시뮬레이션과 비교함으로써 대류권의 수증기 농도를 반영하여 역산을 수행하였다. 측정된 오존 연직분포도는 오존 농도가 집중 분포해 있는 25 km에서 40 km 구간에



**Fig. 4.** [Top] The ozone spectrum measured by SORAS in August and December. The red line is forward spectrum and the blue line is measured spectrum. [Middle] The retrieved ozone profile (blue line) with AURA MLS satellite ozone profile (red line). Black dots show the monthly a priori profile. [Bottom] The averaging kernels magnified to five times with measurement response (black thick line).

대해 위성의 관측결과와 10% 이내의 차이를 보여, 한 반도 상공의 성층권 오존 연직분포를 다른 마이크로파 관측기와 비슷한 신뢰도를 갖고 관측하고 있다. 오존

의 연직분포 측정은 오존전량의 농도 변화가 어느 고도 영역에서의 증감으로 인해 나타나는지를 보여주는 관측 기술로, 오존량 변동 메커니즘을 밝히는데 유용하게 사

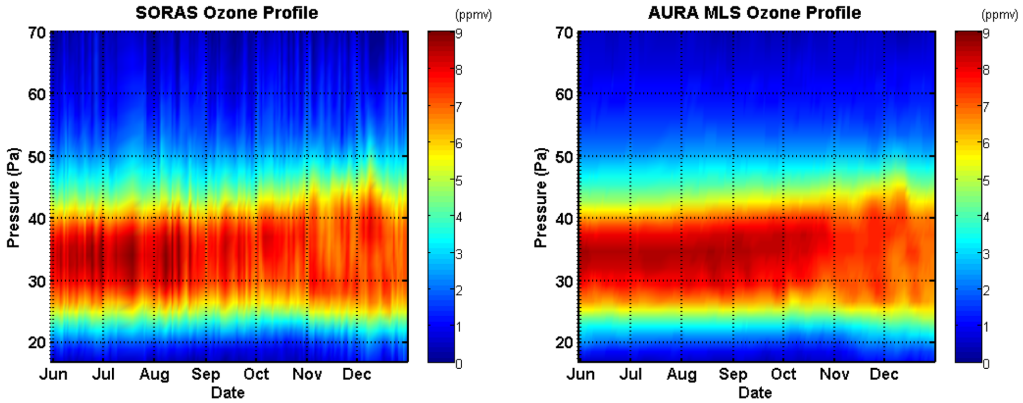


Fig. 5. Ozone profile variation from 30 May to 31 December 2013.



Fig. 6. Monthly differences of the SORAS ozone profile with respect to AURA MLS profile.

Table 4. Maximum absolute deviation of the SORAS ozone profile from AURA MLS profile

	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Max. Dev.(%)	2.1	4.6	6.0	9.6	5.4	5.9	4.5

용할 수 있다. 또한 장기간의 관측데이터 축적은 한반도 중심의 기후변화 시나리오 작성 등에 활용될 수 있으므로, 기후변화 연구를 위해 필수적이라 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 숙명여자대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 1-1303-0147).

### 참고문헌

1. P. N. Vargin, V. A. Yushkove, S. M. Khaikin, N. D. Tsvetkova, S. V. Kostyrykin, and E. M. Volodin, "Climate Change and the Middle Atmosphere: Increasingly More Questions", *Herald of the Russian Academy of Sciences*, **2010**, 80(1), 47-56.
2. S. Solomon, D. Qin, M. Mangging, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.), "Contribution of Working Group I to the Fourth Asse-

- ssment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007”, **2007**, 553-555, Cambridge University Press Publishing, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. 기상청, “2013 지구대기감시보고서”, **2014**, 139-156.
  4. N. Harris, R. Hudson and C. Phillips, “Trends in the vertical distribution of ozone (SPARC Report N°1)”, **1998**, WMO Ozone Research and Monitoring Project Report.
  5. 가수현, 오정진, “2011년 서울상공 중층대기 오존의 고도별 분포도 관측연구”, *한국환경분석학회지*, **2012**, 15(4), 239-244.
  6. P. Atkins, J. de Paula, “Physical Chemistry”, **2009**, 9th edition, 288-293, Oxford University Press Publishing, New York.
  7. M. A. Janssen, “Atmospheric remote sensing by microwave radiometry”, **1993**, John Wiley & Sons Publishing, New York.
  8. Emerson & Cuming, <http://www.eccosorb.com.hk/products/eccosorb-cv>, November, 2014.
  9. H. J. Liebe, “MPM-An atmospheric millimeter-wave propagation model”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **1989**, 10(6), 631-650.
  10. P. Eriksson, S. A. Buehler, C. P. Davis, C. Emde, and O. Lemke, “ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, Version 2”, **2011**, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 112, 1551-1558.
  11. C. D. Rodgers, “Inverse Methods for Atmospheric Soundings: Theory and Practice”, **2000**, World Scientific Publishing, Singapore.
  12. K. Hocke, N. Kaempfer, D. Ruffieux, L. Froidevaux, A. Parrish, I. Boyd, T. von Clarmann, T. Steck, Y. M. Timofeyev, A. V. Polyakov, and E. Kyroelae, “Comparison and synergy of stratospheric ozone measurements by satellite limb sounders and the ground-based microwave radiometer SOMORA”, **2007**, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 4117-4131.