

110 GHz 마이크로파 오존관측을 통한 중층대기 오존농도 추출

권미라 · 국혜인 · 가수현 · 오정진[†]

숙명여자대학교 화학과

Retrieval of Ozone Concentration from 110 GHz Microwave Remote Sensing

Mi Ra Kwon, Hyein Guk, Soohyun Ka, and Jung Jin Oh[†]

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

The ozone microwave radiometer has been developed at RIGE (Research Institute of Global Environment) in Sookmyung women's university. It observes the ozone molecular thermal radiation by rotational transition at 110 GHz. It consists of receiver and analytical system. The spectrum detected by the receiver is analyzed by the retrieval program. In this paper, ARTS and Qpack program were adapted for ozone retrieval as new programs. ARTS builds up the forward model with atmospheric radiative transfer equation. Qpack inverts from the molecular spectrum to the ozone vertical profile by Optimal estimation method. The result from these programs was verified from the comparison with HALOE satellite data.

Key words : Microwave, Stratospheric ozone, Ozone receiver, atmospheric radiative transfer model, Inversion method

1. 서 론

대기환경연구 방법 중 마이크로파를 이용한 대기 지상관측 기술은 먼 대기로부터 전달된 대기분자의 회전 스펙트럼을 관측하는 기술이다. 이러한 대기 관측 기술은 지구 상공의 대기 변화를 감지할 수 있으며, 특히 성층권의 오존층 변화와 온실가스의 관측은 중층 대기 구성의 변화 및 화학반응변화 과정을 밝혀 미래 기후 변화 예측을 위한 모델 자료로 이용된다. 이에 숙명여대에서는 지상기반 마이크로파 수신기를 자체 개발하여 서울 상공 성층권의 오존농도 변화에 대한 연구를 시행해오고 있다. 숙명여대에서 개발된 마이크로파 오존 수신기는 110.8360 GHz의 오존 line ($\delta_{1.5} - \delta_{0.6}$)을 관측하며, 구성은 크게 수신부와 신호 해석부로 나뉘어져 있다. 지상에 위치한 마이크로파 오존 수신기는 관측지 상공에 분포되어 있는 오존의 전량을 측정하여 스펙트럼으로 나타낸다. 그러므로 고도별 정확한 오존농도 변화추이를 분석하기 위한 관측 스펙트럼의 해석은 스펙트럼의 관측만큼 중요한 부분이다. 이에 본 연구에

서의 기존의 오존 수신기를 통해 관측된 데이터 자료를 이용하여 중층대기의 오존 농도를 추출하는 새로운 해석방법을 적용하였다. 이를 위해 대기 전파 전달 모형으로 ARTS 프로그램이 사용되었으며, 고도별 오존 분포도 해석을 위하여 Qpack 프로그램이 적용되었다.

2. 이론 및 방법

오존분자는 마이크로파 주파수 영역에서 분자자체의 회전전이를 통하여 에너지를 방출한다. 지상의 일정한 지점(z_0)에서 관측되는 이러한 대기 중 오존 분자의 총 세기는 대기 전파 전달식 (atmospheric radiative transfer equation)과 키르히호프의 법칙 (Kirchhoff's law)이 적용되어 다음과 같이 표현된다.

$$T_B(z_0, \nu) = T_B(z_\infty, \nu) \exp\left[-\int_{z_0}^{z_\infty} \alpha(z', \nu) dz'\right] + \int_{z_0}^{z_\infty} \alpha(z', \nu) T_B^{blank}(T(z'), \nu) \exp\left[-\int_{z_0}^{z'} \alpha(z'', \nu) dz''\right] dz' \quad (1)$$

[†]To whom correspondence should be addressed.

위 식에서 좌변의 $T_B(z_0, \nu)$ 는 관측되는 주파수(ν)에서 회전전이를 일으키는 분자의 총 밝기 온도이다. 우변의 첫째항은 배경 항, 둘째 항은 원천 항으로 $T_B^{blank}(T(z), \nu)$ 는 어떠한 고도 높이에서의 관측 주파수와 관계된 대기 분자의 복사 밝기 온도, α 는 흡광계수로

$$\alpha_i(\nu) = N_i \sum_{j=1}^m S_j(T) f_j(\nu, p, T) \quad (2)$$

이다. 여기에서 N_i 는 분자종(i)의 수밀도 (number density)이고 이는 이상기체 상태방정식을 적용하여 관심 분자의 대기 중 부피비 (volume mixing ratio)로 변환하여 나타낼 수 있다. m 은 특정 주파수(ν)에 기여하는 분자종의 수를 의미하며, S 는 스펙트럼선의 세기, f 는 스펙트럼 선 모양(line shape)을 나타낸다. 고도별 오존 분자의 양, 온도 및 압력의 변화는 이러한 관측 스펙트럼의 선폭(f)과 대기복사량(S)을 변화시킨다.

대기 중 10-16 km부터 51 km 이내에 주로 분포하는 오존 분자 신호는 지상 관측 시 대기를 통과하면서 압력 선폭 넓힘 및 도플러 선폭 넓힘의 영향을 받으며, 이러한 선폭 넓힘 정도에 따른 스펙트럼의 기여도는 고도별 오존농도를 분석할 수 있게 해 준다. 이에 본 연구에서는 흡광계수(α)의 계산을 위하여 Fig. 1(좌)와 같은 압력 선폭 넓힘과 도플러 선폭 넓힘을 적용한 2×10^{-3} 정도의 정확성을 가진 Voigt-Kuntz3의 선형을 사용하였다. 이는 대기 분자의 복사전이를 시뮬레이션하는 프로그램인 ARTS 프로그램을 이용하여 전진모형(Forward model)에 적용된다.

$$y = F(x, b) + \varepsilon \quad (3)$$

위 식에서 F 는 고도별 오존 농도(x)에 따라 대기 전파 전달 모형을 이용하여 관측 스펙트럼을 나타내는 전진모형이며, y 는 오존 관측 스펙트럼이다. 전진 모형에는 상태를 결정할 수 없으나 모델링에 포함되어 정확한 전진모형을 만들어주는 요소(b)를 포함하고 있으며, 관측 스펙트럼에는 관측 오차(ε)가 포함되어 있다. 이 때, 전진 모형의 도함수($\partial F/\partial z$)를 가중함수 (K : weighting function)라 정의하며, 이를 이용하여 식 (3)은

$$y = Kx + \varepsilon \quad (4)$$

로 나타낸다. 이는 전진 모형에서 오존 농도를 분리하여 나타낸 것으로 이에 역산법(inverse method)를 적용하면 고도별 오존 농도(x)를 얻게 된다. 그러나 식 (4)에서 관측 스펙트럼 주파수 영역의 각 채널 수는 유

한한 것에 비해 고도별 오존 농도(x)는 연속적인 무한한 개수를 가지고 있다. 이는 ill-posed되었다고 하며, 이를 해결하기 위한 방법으로 최적화 과정이 필요하다. 게다가 식 (4)에서 가중 함수(K) 속에는 고도별 오존 농도(x) 항이 포함되어 있는 비선형 관계식을 나타낸다. 이러한 문제로 인하여 식 (4)는 단순한 선형화 과정을 통하여 역산법을 수행할 수 없다.

이에 본 연구에서는 이러한 오존 농도 추출에서 발생하는 문제점들을 해결하기 위하여 Rodgers의 최적화 추정방법 (OEM: Optimal Estimation Method)에 기초한 Qpack 프로그램을 사용하여 역산법을 수행하였다. Qpack 프로그램에서는 식 (3)의 전진모형(F)에 대기 전파 전달식(i)과 더불어 수신기기의 특성(H)을 모델링에 함께 적용한다.

$$y = F_s(i, x_s, b_s) + \varepsilon = Hi + \varepsilon, \quad i = F_r(x_r, b) \quad (5)$$

이러한 전진 모형(F)은 베이즈 이론 (Bayes' theorem)과 가우시안 통계 (Gaussian statistics)에 기초하여 고도별 오존 분포를 얻는 역산법(Inverse method)에 적용된다. 본 연구에서 역산법으로 사용된 Rodgers의 최적화 추정방법 (OEM)은 제한된 최소자승법 (CLS : constrained least squares method)을 통해 이루어지며, 비선형 특성에 대한 최적화 분석을 위하여 Newton법(식 (9))을 적용하여 오차를 최소화하는 반복 추출 과정을 가졌다.

$$\hat{x} = Ax + (I - A)x_0 + G\varepsilon \quad (6)$$

$$G = S_a K^T (K S_a K^T + S_\varepsilon)^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_{n+1} = G_n [(y - K_n x_0) + K_n \hat{x}_n - F(\hat{x}_n, b)] + x_0 \quad (8)$$

식 (6)은 선형의 경우 최적화된 고도별 오존 농도(\hat{x})를 나타내며, A 는 averaging kernel로 기여 함수(G : contribution function, 식 (7))와 가중함수(K)의 곱인 $A = GK$ 로 실제 오존 농도(x)의 스펙트럼 기여 정도를 나타낸다. x_0 는 초기값 (a priori)으로 쓰이는 오존 농도, S_a 는 그에 관한 공분산 (a priori covariance)이며, S_ε 는 관측 오차 공분산이다. 이러한 선형화 경우의 최적화 과정을 확장함으로써 식 (8)과 같은 비선형의 경우를 위한 역산법이 수행되게 된다.

본 연구에서는 숙명여대 오존수신기의 관측 적분 시간에 따라 1일 동안 수회~수십회 관측된 자료는 통합되어 일 평균화 과정을 거쳐 적분시간을 증가시킴으로써 관측 잡음을 최소로 하여 역산법을 수행하였다. 적분 시간 증가 후에도 일정하게 남아있는 baseline은 푸

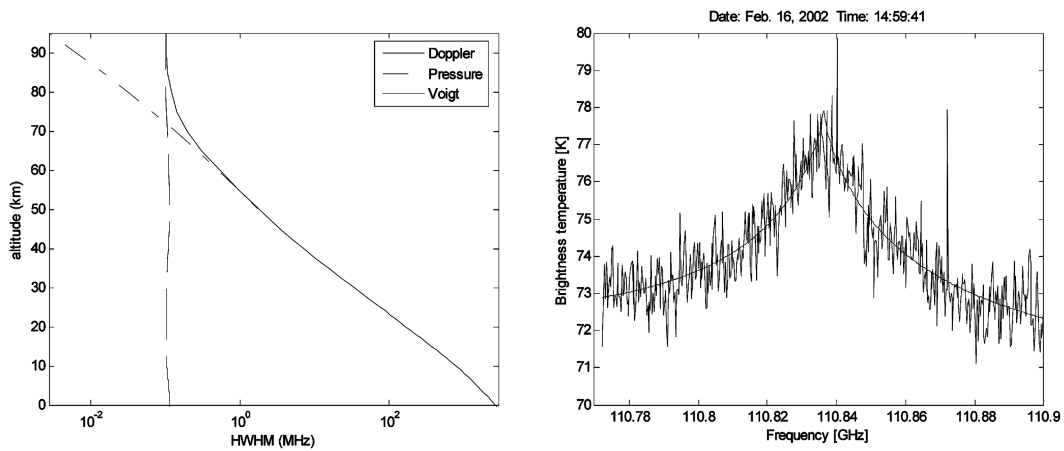


Fig. 1. (좌) 110 GHz 오존 분자선 관측에 적용되는 선평 넓힘 효과의 반폭값(HWHM), (우) [2002년 2월 16일 14시 59분] 오존수신기 스펙트럼 관측자료

리에 변환 (Fourier transform)을 통하여 리플의 계산치 값을 획득하고, 이를 sinefitting을 통하여 모델링하여 baseline을 제거한 후 역산법 과정에 적용하였다. 역산법 과정에서 초기값(α_0)과 중위도 겨울의 고도별 온도와 압력에 대한 정보는 FASCOD 데이터를 이용하였으며, 대기 분자들에 대하여 HITRAN96 자료로부터 분자선 정보를 얻었다. 대기 중 수증기, 산소, 질소 등에 의한 연속적 대기 흡수 등 관측 대상이 아닌 다른 분자에 의한 영향은 MPM93 model을 이용하여 전진 모형 및 역산법에 적용하였다.

역산법 과정 후, Qpack을 이용한 고도별 오존 농도 분포 자료의 신뢰도 평가를 위하여 25~60 km 구간에서 가장 적은 오차범위(5%)를 보이고 있는 HALOE 위성 관측 자료와 비교 과정을 가졌다. 2002년 2월 16

일에 HALOE의 관측은 한국 상공 (38:50 N, 130:32 E)에서 이루어졌으며, 이는 속명여대 지구환경연구소 (37:35:32 N, 126:58:00 E)와 매우 비슷한 관측 위치를 나타낸다. 그러므로 결과의 신뢰도를 파악하기 위하여 그날의 관측 데이터를 이용하여 비교 분석하였다.

3. 결 과

Fig. 1(우)에 나타난 1회 관측 결과는 6초의 적분시간을 가지고 관측된 결과이다. 이 스펙트럼에서는 대기 경로 상의 수증기와 산소 등 대기 분자의 영향을 통해 초기 bias값이 상승되고, peak값이 작아지며 선평이 넓어지는 현상을 볼 수 있다. 이 스펙트럼에서 관측 시간 (Δt), 분광기 특성에 따른 주파수 분해능($\Delta \nu$) 및 관측

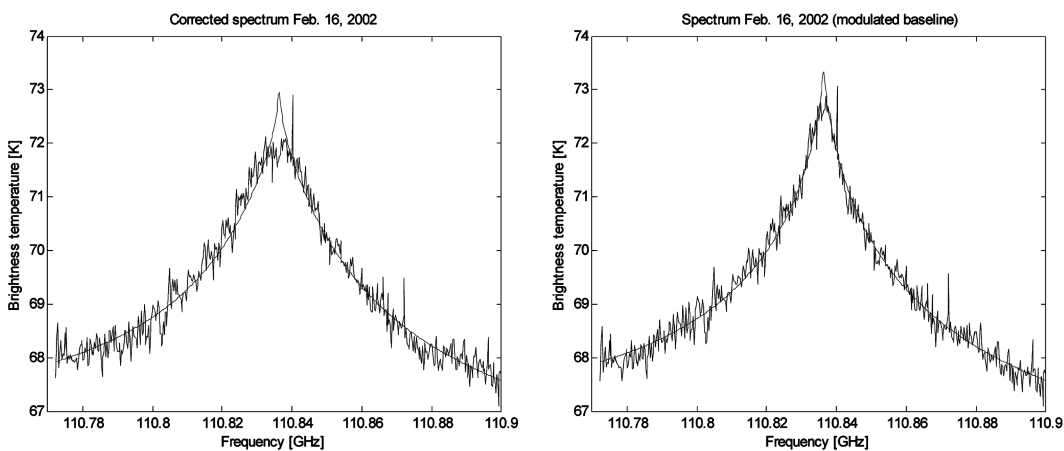


Fig. 2. (좌) 1일 관측 스펙트럼, (우) 리플 제거한 1일 관측 스펙트럼 [2002년 2월 16일].

시스템의 온도($T_{B,sys}$)를 고려할 때 발생하는 시스템 잡음지수(σ)는

$$\sigma = \frac{T_{B,sys}}{\sqrt{\Delta\nu \cdot \Delta t}} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있으며, 6초의 적분시간을 통해 1회 관측된 결과의 잡음지수는 0.7 정도이다. 이러한 결과는 Fig. 1 2(좌)와 같이 1일 관측 데이터로 평균하여 적분시간을 증가시켜 시스템 잡음(σ)을 0.2 정도로 줄일 수 있었다.

평균된 관측 데이터는 Fig. 3과 같이 리플에 대한 푸리에 변환 적용을 통하여 기본적인 리플의 경향성을 제거하였다. 이러한 과정을 통해 1일 관측스펙트럼 결과는 Fig. 2(우)와 같이 변환되었으며, 최적화 추정과정을 통한 역산법을 적용하여 Fig. 5(우)와 같은 고도별 오존농도 분포를 얻을 수 있었다.

이 때 Fig. 4(좌)가 최적화 추정과정에 사용된 Averaging kernel이다. Fig. 4(우)는 Fig. 4(좌)의

averaging kernel의 일부를 나타낸 그래프이다. Averaging kernel 행렬(A)의 각 행은 가우시안 형태(Gaussian shape)를 가지고 특정한 고도에서의 실제 오존 농도 기여도에 대한 정보를 내포한다. 이 그래프에 따르면 30~40 km의 영역에서는 averaging kernel에 의한 오존농도 기여도가 실제 고도와 정확하게 일치되어 그 값이 크게 적용되고 있음을 볼 수 있다. 이는 오존 농도 추출에 있어 30~40 km의 영역에서는 각 고도에 일치하는 실제 오존 농도(x)가 적용되었음을 의미한다.

역산법 과정에서 이러한 averaging kernel의 각각의 행들의 총 합은 실제 고도별 오존 농도(x)가 어떠한 고도 구간에서 얼마나 많이 기여하여 최적화 오존 농도를 나타내는지를 보여준다. Averaging kernel의 합을 통해 잘 기여된 고도 구간을 보면 약 27~43 km 구간에서 70%이상의 기여도를 보인다. 본 연구에 적용된 FASCOD 자료에 따르면 중위도 겨울의 성층권은 Fig. 5(좌)와 같이 약 20~50 km 고도 영역으로 역산법에

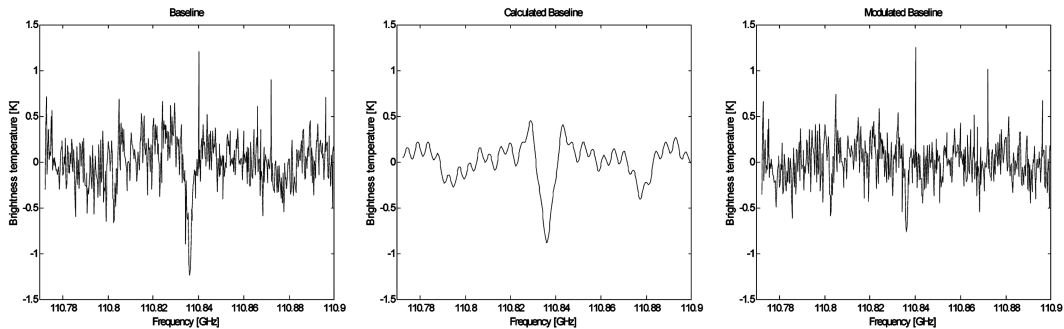


Fig. 3. 프로그램을 통한 리플제거 과정.

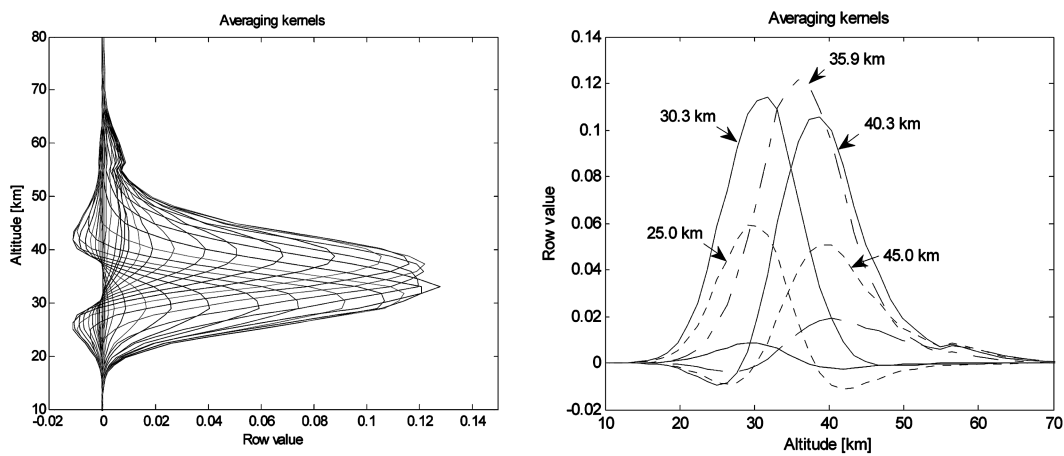


Fig. 4. (좌) 전체 averaging kernel, (우) 특정 고도에서의 averaging kernel.

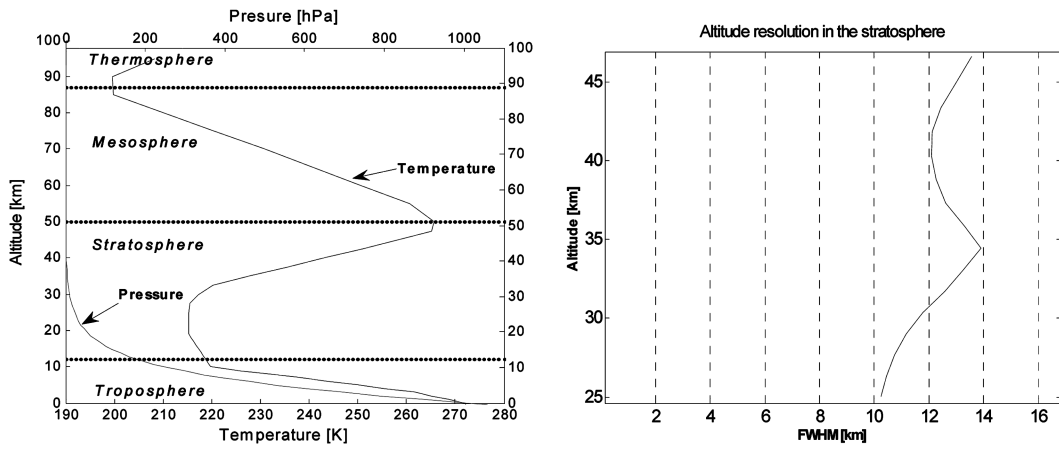


Fig. 5. (좌) 중위도 겨울 고도별 온도 압력 변화 (FASCOD data), (우) 성층권 고도 분해능.

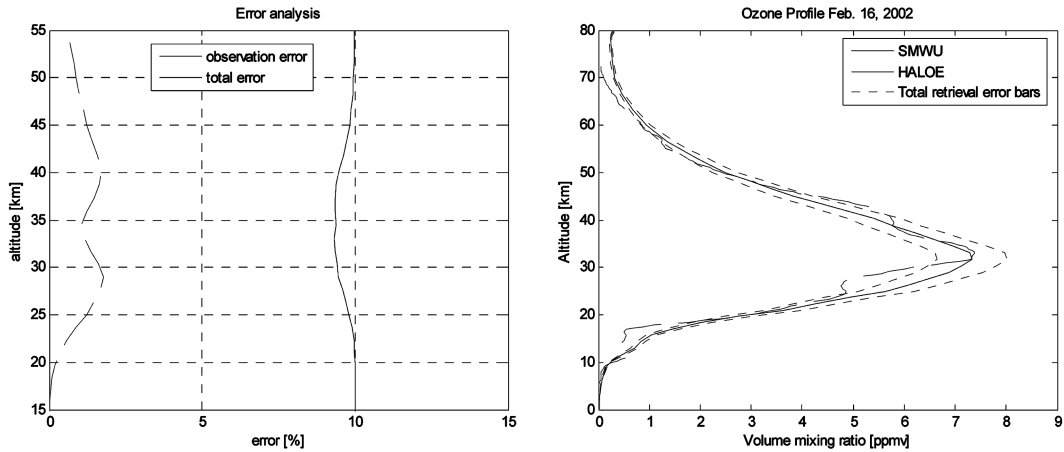


Fig. 6. (좌) 이론적 오차 분석, (우) 추출된 오존 연직 분포와 HALOE data 비교.

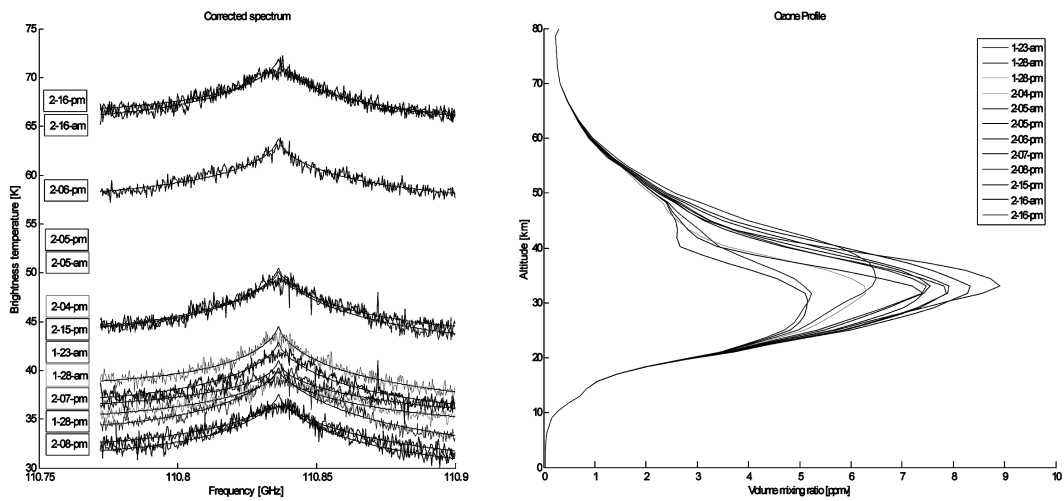


Fig. 7. (좌) 오존 관측 스펙트럼, (우) 서울 상공 연직 오존 분포 [2002년 1-2월].

적용된 실제 오존 농도 기여 구간과 거의 일치함을 볼 수 있다.

또한, averaging kernel의 반폭 값 (FWHM : full width at half height)은 고도 분해능을 나타낸다. 본 연구에서 적용된 averaging kernel의 반폭 값 (FWHM)을 이용한 고도 분해능은 Fig. 5(우)로써 그 고도 분해능은 성층권 영역에서 10~14 km 정도를 보이고 있다.

최적화 추정과정을 통해 발생하는 총 오차는 이론상 averaging kernel 적용을 통해 발생하는 평활오차 (smoothing error)와 모델링에서 발생하는 오차 및 관측 오차를 모두 합하여 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \hat{x} - x = (A - I)(x - x_a) + G_y[K_b(b - b_a) + \varepsilon]$$

이를 고도별 오존농도 추출 결과에 적용시 발생하는 총 오차는 Fig. 6(좌)처럼 10% 이내임을 볼 수 있다. 또한, 최적화 추정과정을 거친 오존 연직분포를 HALOE 관측 자료와 비교시 Fig. 6(우)에서 볼 수 있듯이 최고 오존 농도(체적 혼합비)를 보이는 위치(약 고도 32 km)에서의 오존 농도의 값은 7.3 ppmb로 같은 값을 보이고 있다. 이는 최대 오존량 분포에 대한 신뢰할 만한 결과를 보여주고 있는 것이며, 이를 통해 속명여대 지상관측 수신기 및 해석기술의 정확성을 입증할 수 있다.

이러한 뒷받침을 바탕으로 2002년 1월 23일부터 2월 16일까지 관측된 데이터를 통하여 이 기간 오존농도 변화를 보면 Fig. 5와 같이 서울 상공에서 봄철이 될수록 오존층의 농도가 증가하며, 오존층의 고도가 높아짐을 볼 수 있다.

4. 결 론

현재 속명여대는 대기분자 관측기기들을 개발해오고 있다. 이에 고도별 대기분자의 분포도 해석기술은 변환

및 확장을 통하여 다른 수신기에도 적용될 것이며, 고려 변수의 증가를 통하여 더 향상된 최적화 과정이 이루어질 것이다. 또한, 서울 상공의 장기적인 대기분자종의 관측은 세계 기후감시 기구의 한 사이트로써 데이터를 제공할 것이며, 이를 통하여 지구 대기 변화를 파악하고 밝혀지지 않은 대기화학 메커니즘을 밝혀 지구 기후변화 예측에 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Michael A. Janssen, "Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry", 1993, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.
2. Clive D. Rodgers, "Inverse methods for atmospheric sounding", 2000, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, USA.
3. Patrick Eriksson, Carlos Jimenez, Stefan A. Buehler, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 91(2005) 47-64.
4. S.A. Buehler, P. Eriksson, T. Kuhn, A. von Engeln, C. Verdes, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 91(2005) 65-93.
5. Clive D. Rodgers, *Characterization and Error Analysis of Profiles Retrieved From Remote Sounding Measurements*, 1989.
6. Klein, U., Wohltmann, I, Lindner, K and Kunzi, K.F., *J. Geophys. Res.*, 2002, 107.
7. Y. Calisesi, *Stratospheric Ozone Monitoring Radiometer SOMORA: Data Retrieval*, 2000.
8. Y. Calisesi, *Monitoring of Stratospheric and Mesospheric Ozone with a Ground-based Microwave Radiometer*, 2000.
9. Tomoo Nagahama, Hideaki NaKane, Yasumi Fujinuma, *Earth Planets Space*, 1999, 51, 1287-1296.
10. 속명여대, *한반도 상공의 대기환경 감시기술개발*, 2002, 환경부.