

마이크로파 스펙트럼 분석을 통한 대류권 투과도 비교

가수현¹ · 장희수² · 오정진^{1,2,†}

¹숙명여자대학교 지구환경연구소, ²숙명여자대학교 화학과

Comparison of Tropospheric Transmittance at Different Microwave Frequencies

Soohyun Ka¹, Heesu Jang², and Jung Jin Oh^{1,2,†}

¹Research Institute of Global Environment, Sookmyung Women's University, Seoul, 04310, Korea

²Department of Chemistry, Sookmyung Women's University, Seoul, 04310, Korea

Received October 17, 2016/Revised November 27, 2016/Accepted December 6, 2016

We report the tropospheric transmissions at 22 GHz and 110 GHz by analyzing spectra measured by different ground-based microwave radiometers at Seoul. The transmittance is calculated from the opacities, which are the sum of absorption coefficients of the atmosphere. The opacities are derived from the tipping curve calibration for 22 GHz and the radiative transfer equation, from estimated tropospheric temperature for 110 GHz. The transmittance at these frequencies shows strong seasonal variation as it depends on the water vapor content of the troposphere. Although their variation scales differ, both transmittances show a linear relationship. In addition, the transmittances are derived from the 110 GHz ozone spectrum using quadratic equations.

Key words: Microwave, Transmittance, Troposphere, Opacity

1. 서 론

지구 대기를 구성하는 기체 분자는 중력에 의해 지표면 부근에 가장 많은 수가 존재하며, 존재 비율을 성분별로 살펴보면 건조한 공기 내에서 질소 78%와 산소 21%, 아르곤 0.9%의 구성비를 갖고 있다고 알려져 있다. 그러나 수증기의 경우는 인위적 요인 없이도 0~4% 범위에 걸쳐 변화한다고 알려져 있다. 이러한 대기 분자는 각 분자의 특성에 따라 고유 주파수의 전파를 흡수하거나 방출, 또는 산란시키며 존재를 알리고 있다. 이러한 전파 대역 중 마이크로파는 GHz 단위의 주파수를 갖는 대역으로 영구 쌍극자 모멘트를 갖는 기체 분자가 회전 전이를 통해 해당 대역의 전파를 자발적으로 방출하고 있다. 이렇게 방출된 신호는 사방으로 퍼져나가 우주의 위성과 지상에서 수신할 수 있으며, 수신된 전파 스펙트럼으로부터 성층권 이상의 중층대기 영역에 존재하는 기

체 분자의 농도 분포를 분석할 수 있다.^{1,2)} 중층대기에서 방출된 전파를 수신하는 경우, 수신된 전파 스펙트럼은 전파 전달 과정에서 발생한 흡수나 산란의 영향이 포함된다. 또한 지상에서 수신할 경우 막대한 양의 대기 분자가 존재하는 대류권으로 인해 그 영향은 무시할 수 없는 수준에 이른다.

다른 대기 구성성분과 다르게 급변하는 수증기 양은 지상에서 수신한 마이크로파 스펙트럼의 형태를 시시각각 변형시킨다. 따라서 대류권 내에서 급변하는 수증기의 양을 보정해주기 위한 방법이 필요하며, 다음의 전파 전달방정식에서 나타나는 광학두께 항($\tau(\nu, \theta)$)으로 이를 표현할 수 있다. 대기 분자에서 방출되는 마이크로파 스펙트럼을 지상에서 수신할 경우, 대기가 균일한 하나의 층으로 되어 있다는 가정 하에 다음과 같은 전파전달방정식으로 표현한다.³⁾

[†]To whom correspondence should be addressed.

$$T_b(v, \theta) = T_{cosmic} e^{-\tau(v, \theta)} + T_{eff}(v)(1 - e^{-\tau(v, \theta)}) \quad (1)$$

T_b 는 마이크로파 수신기를 통해 수신한 스펙트럼의 밝기 온도이며, θ 는 천정각, T_{cosmic} 은 우주 배경온도로서 2.7K으로 가정한다. $T_{eff}(v)$ 는 대류권이 균일한 조성과 온도를 갖고 있다고 가정할 경우에 나타나는 대류권 온도이다. 광학두께를 지수함수로 변환한 $e^{-\tau(v, \theta)}$ 는 해당 주파수의 전파 투과도를 나타낸다. 즉, 광학두께를 알고 있을 경우, 해당 전파의 투과도를 계산할 수 있어 대류권 기체 분자로 인한 영향을 보정할 수 있다. 광학두께는 일반적으로 전파 전달 경로에 대한 전파의 흡수계수의 적분식으로 표현된다.

$$\tau(v, z) = \int_0^z \alpha(v, s) ds \quad (2)$$

여기서 τ 는 특정 주파수에서 전파 전달 거리 z 에 대한 광학두께, $\alpha(s)$ 는 지점 s 에서의 대기 분자의 흡수계수를 의미한다. 광학두께가 전파 경로의 영향을 받기 때문에 대류권의 조성에 의한 광학두께의 변화를 살펴보기 위해서는 전파 전달 경로를 일정하게 하여 광학두께를 표현할 필요가 있다. 지상에서 대기 전파를 수신할 경우에 사용되는 전파 전달 거리는 전파 수신 각도 θ 를 이용해 air mass ($\alpha(\theta)$)의 항으로 대체하여 나타낼 수 있다. 일반적으로 θ 는 천정각을 나타내며, air mass는 $1/\cos(\theta)$ 외에 여러 계산법이 제시되어 있다.^{4,6)} Air mass를 이용할 경우, 전파 수신 각도와 그 각도에서 측정된 광학두께는 다음의 관계를 갖는다.

$$\tau(v, \theta) = \alpha(\theta) \tau_0(v) \quad (3)$$

τ_0 는 천정방향에 대한 광학두께를 의미한다.

습한 대기 상태일 때 측정되는 스펙트럼은 많은 분자의 방출선이 나타나지 않는 연속 스펙트럼 형태로 측정되어, 몇몇 주파수에서의 스펙트럼만 측정 가능하다. 일례로 지상에서 관측이 가능한 스펙트럼은 수증기 방출선의 경우 22.235 GHz가 대표적이며,⁷⁾ 오존의 경우 110 GHz, 142 GHz 등이 있다.^{8,9)} 그러나 방출선이 나타나지 않는 대역의 경우도 광학두께를 측정하여 대류권의 수증기 및 물 총량을 계산하는데 활용하고 있다. 수증기 및 물 총량을 측정하기 위해 21 GHz와 31 GHz에서의 광학두께가 사용되고 있으며,^{10,11)} 22 GHz에서도 적절한 계수를 이용하여 보정하여 수증기 총량을 계산하고 있다.¹²⁾

이 연구에서는 서울에서 110.836 GHz 오존전파 수

신기와 22.235 GHz 수증기전파 수신기를 이용하여 2013년 6월부터 2014년 12월까지의 대류권의 광학두께를 계산하고, 두 주파수에서의 전파 투과도와 두 투과도 간의 상관관계를 제시하였다. 또한 110 GHz 스펙트럼으로부터 두 주파수 대역의 투과도를 예측할 수 있는 근사식을 나타내었다.

2. 재료 및 방법

22.235 GHz의 수증기 전파 스펙트럼은 수증기전파 수신기 SWARA (Seoul Water Vapor Radiometer)를 통해 2006년부터 서울 속명여대에서 측정하고 있으며, 수증기의 연직 분포 변화를 관측하고 있다. 110.836 GHz 오존 전파 스펙트럼은 오존전파수신기 SORAS (Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)을 통해 SWARA와 동일한 지점에서 측정하고 있다. 두 기기의 구성 및 측정 원리는 참고문헌 13과 14에 나타나있다.

2.1. 22 GHz 광학두께 계산

22 GHz에서의 광학두께는 티핑커브보정법을 이용하여 계산한다.¹⁵⁾ 간단히 설명하면, 식 (1)의 전파전달방정식은 전파 수신 각도에 의해 경로차가 발생하면서 여러 세기의 스펙트럼이 측정된다. 즉, 전파 수신 각도에 대한 스펙트럼의 세기 차이는 air mass $a(\theta)$ 로부터 발생하는 것이기 때문에, 식(4)에서와 같이 다양한 각도에서의 $\tau_0(v)$ 에 대한 스펙트럼의 세기를 알 수 있다.

$$T_b(v, \theta_n) = T_{cosmic} e^{-\tau_0(v)a(\theta_n)} + T_{eff}(v)(1 - e^{-\tau_0(v)a(\theta_n)}) \quad (4)$$

22.235 GHz에서의 T_{eff} 는 $0.69 \times (T_{surface} - 273.15) + 266.3$ 을 사용한다.¹⁵⁾ $T_{surface}$ 는 관측지의 지표면 온도[K]를 의미하며, SWARA의 관측지에서 기상센서를 통해 측정된 온도를 사용한다. 스펙트럼에 존재하는 노이즈로 인해, 많은 각도에서 측정된 결과가 있을 경우, 선형적 기법을 이용하여 $\tau_0(v)$ 의 정확성을 향상시킬 수 있다. SWARA의 경우 약 20분 간격으로 44.72°에서 70° 사이의 7개 각도에서 신호를 측정하여 광학두께를 계산하고 있다.

2.2. 110 GHz 광학두께 계산

110 GHz 오존 스펙트럼은 파워전량수신법으로 측정되었으며, 이 수신법은 두 가지 이상의 보정물질로부터 해당 주파수 대역의 전파 세기를 측정한 후, 보정물질의 온도와 전파 세기 간의 선형 관계를 통해 수신된 대기

전파의 온도를 역으로 추정하는 방법을 말한다. 두 가지의 보정 물질 중 높은 온도의 물질을 Hot, 낮은 온도의 물질을 Cold라고 명명할 경우에 오존 스펙트럼(T_{sky})은 Hot과 Cold 물질의 온도 T_{hot} (T_{cold})와 수신 파워 P_{hot} (P_{cold})를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{sky} = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{P_{hot} - P_{cold}} (P_{sky} - P_{cold}) \quad (5)$$

Hot과 Cold는 각각 실온과 액체질소에 담겨진 전파흡수체를 사용하였다. Fig. 1에는 SORAS를 통해 2013년 8월 1일, 8월 25일, 2014년 3월 28일, 3월 7일에 측정된 오존전파스펙트럼을 나타내었다. 8월에 측정된 스펙트럼은 3월에 측정된 스펙트럼에 비해 낮은 세기로 측정된 것을 볼 수 있으며, 이것은 대류권에서의 광학두께 차이로 인해 전파 전달 과정에서 전파의 상대적 세기가 감소하였음을 의미한다. 즉, 스펙트럼은 파워전량수신법으로 측정된 오존스펙트럼에는 대류권의 영향이 포함되어 있기 때문에 대류권 상태에 따른 스펙트럼의 변화가 그대로 나타나 있으며, 식 (4)의 전파전달방정식을 통해 광학두께 $\tau_0(\nu)$ 를 계산할 수 있다.

$$\tau_0(\nu) = \frac{1}{\alpha(\theta)} \ln \left[\frac{T_b(\nu, \theta) - T_{eff}(\nu)}{T_{cosmic} - T_{eff}(\nu)} \right] \quad (6)$$

SORAS의 경우 θ 는 64.98° 로 일정하며, $T_{eff}(\nu)$ 는 $T_{surface} - 38K$ 을 적용하였다.

2.3. 데이터 선택

22 GHz와 110 GHz 스펙트럼에서 수증기와 오존의 방출 주파수 22.235 GHz와 110.836 GHz 부근의 전파 세기는 오존 또는 수증기의 방출선의 영향이 크게 작용한다. 따라서 두 방출 주파수 부근의 전파 전달 방정식은 식 (4)에서 다음과 같이 오존 또는 수증기의 방출 신호를 의미하는 $T_{species}$ 항이 추가된다.

$$T_b(\nu, \theta_n) = (T_{cosmic} + T_{species}) e^{-\tau_0(\nu)\alpha(\theta_n)} + T_{eff}(\nu)(1 - e^{-\tau_0(\nu)\alpha(\theta_n)}) \quad (7)$$

대류권의 기여도가 절대적인 광학두께 계산에 있어서 방출 주파수로부터 멀리 떨어진 주파수 대역을 선택해야한다. 따라서 수증기 전파 스펙트럼의 경우 방출선 22.235 GHz에서 250 MHz 떨어진 21.8850~22.0850 GHz까지 대역에서 측정된 광학두께의 평균값을, 오존 전파 스펙트럼에서는 방출선 110.836 GHz에서 400 MHz 떨어진 110.4268~110.4330 GHz의 광학두께의 평균값을 사용하였다. SORAS로 측정된 오존 스펙트럼의 방출 세기(Bias Temperature)도 광학두께 추출 영역과 동일한 주파수 대역의 평균값을 사용하였다. 광학두께는 1일 평균값을 사용하였으며, 강우가 기록된 날이나 SORAS의 광학두께가 1.2 이상(30% 이하의 투과도)인 경우는 스펙트럼 상의 노이즈가 강하게 작용하기 때문에 데이터 분석에서 제외하였다.

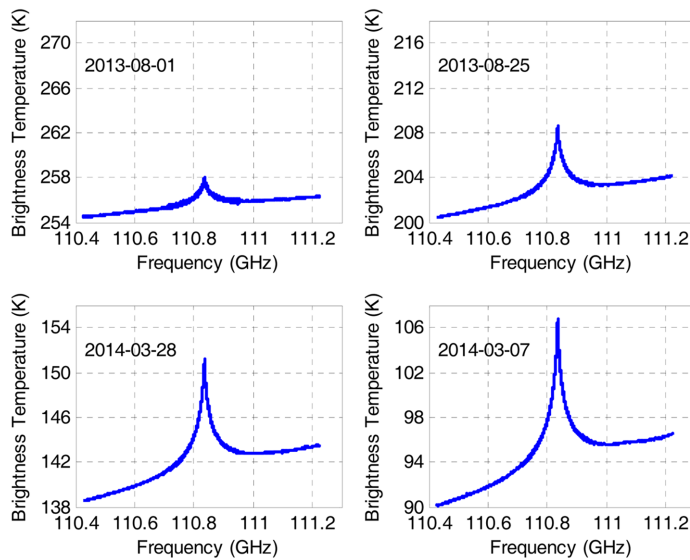


Fig. 1. 110 GHz daily mean ozone spectra measured on different days.

Table 1. Monthly mean opacity and transmittance at 110 GHz and 22 GHz

Date (yyyy-mm)	110 GHz		22 GHz	
	Opacity	Transmittance	Opacity	Transmittance
2013-06	0.764	0.473	0.218	0.805
2013-07	0.954	0.387	0.264	0.768
2013-08	0.877	0.422	0.258	0.774
2013-09	0.657	0.536	0.190	0.829
2013-10	0.399	0.685	0.111	0.897
2013-11	0.300	0.744	0.073	0.930
2013-12	0.242	0.786	0.049	0.952
2014-01	0.233	0.793	0.046	0.955
2014-02	0.242	0.785	0.053	0.948
2014-03	0.290	0.751	0.070	0.933
2014-04	0.385	0.686	0.104	0.902
2014-05	0.400	0.674	0.119	0.888
2014-06	0.776	0.463	0.225	0.799
2014-07	0.897	0.413	0.256	0.775
2014-08	0.838	0.436	0.236	0.790
2014-09	0.583	0.564	0.172	0.843
2014-10	0.361	0.700	0.104	0.902
2014-11	0.302	0.741	0.080	0.924
2014-12	0.219	0.803	0.041	0.960

3. 결과 및 고찰

2013년 6월 1일부터 2014년 12월 31일까지 총 394 개의 일 평균 광학두께를 이용하여 결과 분석을 하였다. 앞선 방법으로 계산한 2014년 22 GHz와 110 GHz에 서의 광학두께와 투과도를 Figs. 2와 3에 나타내었다.

두 주파수 대역 모두 7월에 연중 최대 광학두께를 보였으며, 2014년 1월과 12월에 최저 광학두께를 보여 110 GHz 오존 전파의 경우 약 79%, 22 GHz 수증기 전파의 경우 약 95% 이상의 투과율을 보였다.

두 주파수 대역에서의 투과도를 살펴보면, 110 GHz 에서는 22 GHz 대역보다 계절적 변화 폭이 크게 나타

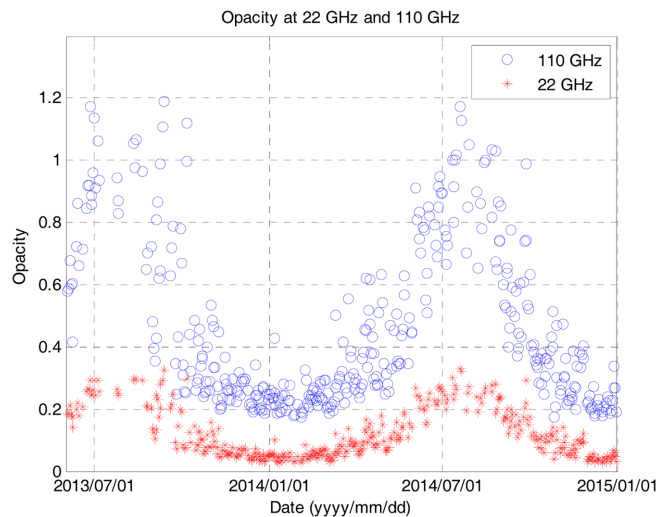


Fig. 2. 110 GHz and 22 GHz opacity variation from June 2013 to December 2014.

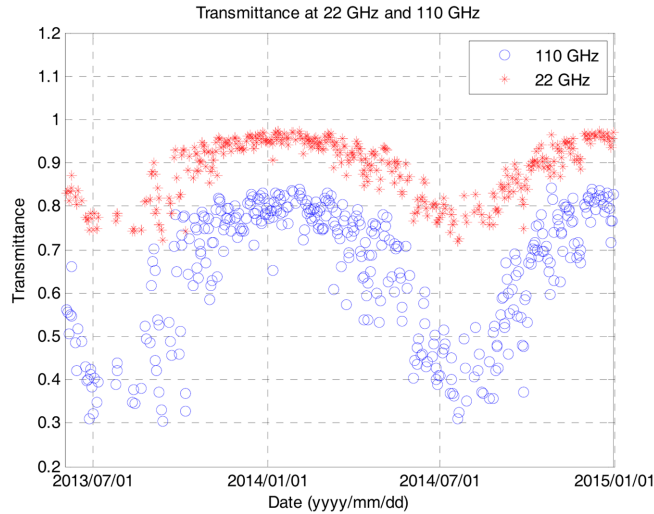


Fig. 3. 110 GHz and 22 GHz transmittance variation from June 2013 to December 2014.

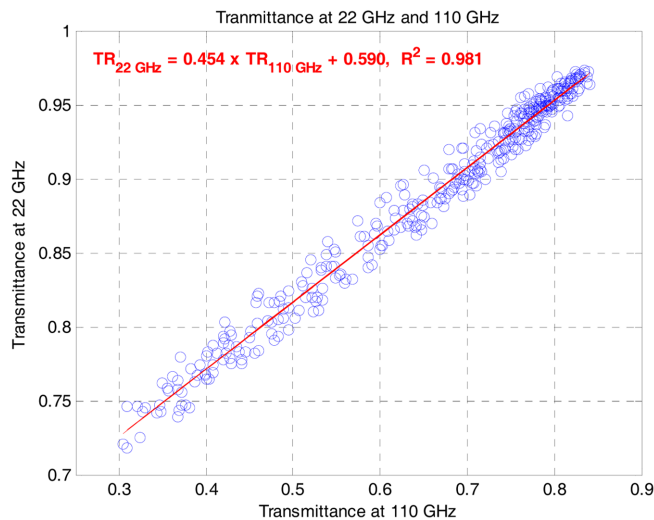


Fig. 4. The linear relation between transmittances of 110 GHz and 22 GHz.

나며, 110 GHz에서의 투과도가 22 GHz보다 낮게 나타나 있다. 이것은 대류권 수증기 증가에 대한 흡수 계수의 증가 폭이 22 GHz보다 110 GHz에서 크게 나타나는 것과 일치한다.¹⁶⁾ 두 주파수 대역간의 투과율의 관계는 선형적으로 나타났으며, $R^2=0.981$ 의 값을 보였다(Fig. 4). 그러나 이 관계식은 110 GHz에서의 투과도가 0.3 이상일 때에만 적용이 가능하며, 0.3 미만일 때에는 자료의 산포도가 크게 나타나 선형성이 확인되지 않았다.

투과도는 식 (4) 및 (6)을 통해 계산하여 나타낼 수 있지만, SORAS에서 측정된 110 GHz의 스펙트럼 정보와 Fig. 4에서 나타난 110 GHz 및 22 GHz의 투과도를 이용하여 관계식을 도출할 수 있다. 110 GHz 오존 스펙트럼에서 110.4268~110.4330 GHz 대역의 평균 밝기온도값을 $T_{110\text{ GHz}}$ 라 했을 때, 투과도 $TR_{110\text{ GHz}}$ 과 $TR_{22\text{ GHz}}$ 는 $T_{110\text{ GHz}}$ 에 대해 다음의 식 (8)과 (9)처럼 2차식으로 나타냈다.

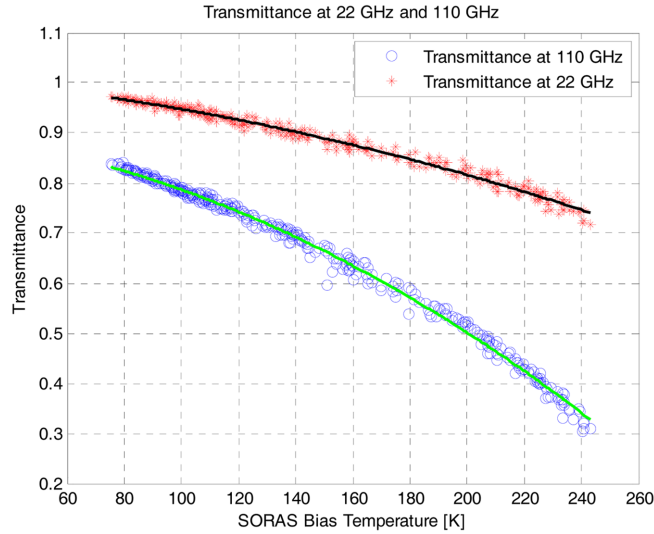


Fig. 5. 110 GHz and 22 GHz transmittance and SORAS bias temperature.

$$TR_{110\text{GHz}} = -0.8157 \times 10^{-6} T_{110\text{GHz}}^2 - 0.4092 \times 10^{-4} T_{110\text{GHz}} \quad (8)$$

$$R_{110\text{GHz}}^2 = 0.995$$

$$TR_{22\text{GHz}} = -0.3057 \times 10^{-6} T_{110\text{GHz}}^2 - 0.3967 \times 10^{-4} T_{110\text{GHz}} \quad (9)$$

$$R_{22\text{GHz}}^2 = 0.985$$

두 관계식에서 R^2 이 0.995와 0.985로 근사식이 실제 데이터 예측에 적합함을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 숙명여대에서 관측한 22 GHz 수증기 전파 수신기와 110 GHz 수증기 전파 수신기를 통해 관측한 대기 스펙트럼으로부터 광학두께와 투과율을 계산하고, 두 주파수 대역간의 투과율 관계 및 110 GHz 오존 스펙트럼으로부터 두 주파수 대역의 투과율을 추정할 수 있는 관계식을 나타내었다. 2013년 6월부터 2014년 12월까지 측정된 자료로 분석된 이 연구에서는 두 주파수 대역의 투과도가 값의 차이는 있으나 계절적으로 동일한 변동성을 보이고 있으며, 서로 선형적인 관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 또한 110 GHz

의 스펙트럼 측정 정보로부터 두 주파수 대역의 투과도 값을 2차식을 통해 예측할 수 있어, 110 GHz 오존 스펙트럼 관측 즉시 두 주파수 대역의 투과도 및 광학두께를 관측 즉시 계산할 수 있다. 이 자료는 극지성 호우 등의 급변하는 날씨에 대해 실시간으로 정보를 줄 수 있다. 또한 서로 다른 주파수 대역에서의 광학두께 또는 투과도 관계 도출은 마이크로파 대역의 스펙트럼으로부터 대류권의 수증기 총량 및 물 총량을 계산할 수 있는 자료로 활용할 수 있으며, 특히 110 GHz 대역의 스펙트럼으로부터 대류권의 수증기총량 추정 연구에 사용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 숙명여자대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음(과제번호 1-1503-0126).

참고문헌

1. Jet Propulsion Laboratory, Microwave Limb Sounder, <http://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php>, July 2016.
2. A. Parrish, R. L. deZafra, P. M. Solomon, and J. W. Barrett, "A ground-based technique for millimeter wave spectroscopic observations of stratospheric trace constituents", *Radio Science*, **1988**, 23, 106-118.
3. M. A. Janssen, "Atmospheric remote sensing by

- microwave radiometry”, **1993**, Chap. 7, John Wiley & Sons, Inc., Singapore.
4. A. T. Young, “Air mass and refraction”, *Applied Optics*, **1994**, 33, 1108-1110.
 5. R. A. Chamberlin and J. Bally, “225-GHz atmospheric opacity of the south pole sky derived from continual radiometric measurements of the sky-brightness temperature”, *Applied Optics*, **1994**, 33, 1095-1099.
 6. F. Kasten and A. T. Young, “Revised optical air mass tables and approximation formula”, *Applied Optics*, **1989**, 28, 4735-4738.
 7. E. Motte, P. Ricaud, B. Gabard, M. Niclas, and F. Gangneron, “A 22-GHz mobile microwave radiometer (MobRa) for the study of middle atmospheric water vapor”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2008**, 46, 3104-3114.
 8. T. Nagahama, H. Nakane, Y. Fujinuma, M. Ninomiya, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Ground-based millimeter-wave observations of ozone in the upper stratosphere and mesosphere over Tsukuba”, *Earth Planets Space*, **1999**, 51, 1287-1296.
 9. L. Moreira, K. Hocke, E. Eckert, T. von Clarmann, and N. Kampfer, “Trend analysis of the 20-year time series of stratospheric ozone profiles observed by the GROMOS microwave radiometer at Bern”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2015**, 15, 10999-11009.
 10. F. O. Guiraud, J. Howard, and D. C. Hogg, “A dual-channel microwave radiometer for measurement of precipitable water vapor and liquid”, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, **1979**, GE-17, 129-136.
 11. C. Matzler and J. Morland, “Refined physical retrieval of integrated water vapor and cloud liquid for microwave radiometer data”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2009**, 47, 1585-1594.
 12. B. Deuber, J. Morland, L. Martin, N. Kampfer, “Deriving the tropospheric integrated water vapor from tipping curve-derived opacity near 22 GHz”, *Radio Science*, **2005**, 40, RS5011.
 13. E. De Wachter, A. Haefele, N. Kampfer, S. Ka, J. E. Lee, and J. J. Oh, “The seoul water vapor radiometer for the middle atmosphere: calibration, retrieval, and validation”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2011**, 49, 1052-1062.
 14. 가수현, 오정진, “마이크로파 스펙트럼 관측을 통한 2013년 성층권 오존 연직분포”, *한국환경분석학회지*, **2014**, 17, 244-251.
 15. Y. Han, and Ed R. Westwater, “Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2000**, 38, 1260-1276.
 16. E. K. Smith, “Centimeter and millimeter wave attenuation and brightness temperature due to atmospheric oxygen and water vapor”, *Radio Science*, **1982**, 17, 1455-1464.