

중층대기 수증기 관측을 통한 광학두께와 대류권 수증기 연관성 연구

가수현 · 오정진[†]

숙명여자대학교 화학과

Relation between Tropospheric Water Vapor and Opacity with Middle Atmospheric Water Vapor Measurement

Soohyun Ka and Jung Jin Oh[†]

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

Received December 13, 2013/Revised December 24, 2013/Accepted December 27, 2013

Water vapor takes up the largest proportion of the greenhouse gases which accelerate climate change. Monitoring water vapor is important to predict future climate conditions and estimate its effect on the atmospheric chemical and physical reaction. The microwave radiometer is able to detect the amount of atmospheric water vapor by receiving its radiation. In addition, atmospheric opacity can be calculated from the calibration. This paper will show the water vapor profile and atmospheric opacity, optical thickness, variation measured by the 22 GHz ground-based microwave radiometer for two years. The measured opacity indicates the possibility that the total amount of tropospheric water vapor can be derived.

Key words: Water vapour, Microwave, Climate change, Middle atmosphere

1. 서 론

지구의 대기는 매우 다양한 종류의 기체로 구성되어 있으며, 지표면에 가까울수록 중력의 영향으로 기체의 농도는 지수 함수적으로 증가한다.¹⁾ 기상현상으로 인해 혼합이 잘되는 대류권과는 달리 성층권에서 중간권을 일컫는 중층대기 내의 기체는 상당히 안정된 경향을 보이며, 구성 기체의 농도 변화는 주로 화학반응, 광화학 반응, 대기 대순환과 같은 물리적 변화로 인해 발생한다. 이 같은 특성으로 인해 중층대기 내에서 발생한 기체의 농도 변화는 원상태로 회복되기까지 상당한 시일이 요구된다. 특히 화산폭발과 같은 현상으로 대량의 기체가 유입될 경우 원상태로 회복되기까지 수개월이 소요되며, 이에 따라 발생하는 대기 구성 기체의 변화를 감시하여 기상 및 기후 변화에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.²⁻³⁾ 이 외에도 지구의 기후변화를 유발하는 주요 온실기체의 농도 자료를 추적하여 기후 모

델링 자료로 활용하거나 시계열 분석 등을 통해 대기 대순환 및 대류권-성층권 기체 유입에 따른 영향 평가를 수행할 수 있다.

대기를 구성하는 여러 기체 중 수증기는 타 분자의 농도 변화와 더불어 기후변화도 유발할 수 있다.^{4,5)} 대류권에 존재하는 수증기는 기상현상으로 빠른 수문순환이 이루어진다. 그러나 중층대기에 분포하는 수증기의 경우 기상현상이 없기 때문에 대기의 물리적 상태나 화학적 반응에 의해 농도가 결정된다. 또한 이산화탄소나 메탄과 같은 인위적인 공급에 의해 농도가 결정되지 않고, 농도가 변화하는 것에 대한 지속적인 관측과 평가가 이루어져야 한다. 또 다른 관측 이유로써 온실가스에 포함되어 있는 수증기의 농도 증가는 온난 효과를 가속화시킬 수 있는 한편, 높은 알베도를 갖는 구름의 생성을 촉진하여 지구를 냉각시키는 결과도 나타낼 수 있다. 따라서 수증기의 농도 변화에 따라 상반된 결과가 예상되기 때문에 지속적인 관측을 통해 기

[†]To whom correspondence should be addressed.

후변화에 대한 수증기의 영향 평가가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 이러한 수증기에 대해 중층대기 내의 고도별 분포도를 지상에서 관측하였다. 또한 대류권 내의 수증기 총량을 유추할 수 있는 광학두께를 계산하여 계절적 변화와 함께 대류권 수증기 농도 변화와의 관련성을 나타내었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 수증기 전파 수신기

중층대기의 수증기를 관측하기 위한 숙명여대의 수증기 전파 수신기는 2006년 스위스 베른대학교의 응용물리연구소와 공동연구를 통해 개발되었으며, 서울 숙명여대 과학관 옥상에서 24시간 관측을 수행하고 있다. 수증기 전파 수신기는 22.235 GHz의 수증기 발산 전파를 관측하기 위해 광학계, 고주파 전파 처리단, 주파수 변환단, 저주파 전파 처리단, 분광기로 구성되어 있으며, 22.235 GHz를 중심으로 1 GHz 대역의 전파 스펙트럼을 관측할 수 있다.⁶⁾

광학계는 전파의 수신 방향을 결정하기 위한 반사경과 전파를 수신기 내부로 왜곡 없이 전달시키는 혼안테나로 구성되어 있다. 혼 안테나는 수신기 관측 과정에서 발견된 결함으로 인해 수리과정을 거쳤으며, 수리 기간 동안의 관측 공백을 최소화하기 위해 동일 기능의 여분 안테나로 관측을 실시하였다.⁷⁾

고주파 전파 처리단에서는 22 GHz 대역의 전파 신호를 증폭시키고, 원치 않는 대역의 전파 신호를 걸러내어 주파수 변환기로 전달시키는 역할을 하며, 주파수 변환기로 전달된 22.235 GHz의 전파는 20.735 GHz의 국부발진신호와 혼합되어 1.5 GHz의 저주파 대역으로 변환된다. 주파수를 1.5 GHz 대역으로 변환시키는 주파수 변환 기술은 전파 처리에 사용되는 소자가 저주파일수록 다양하고, 경제적이기 때문에 대부분의 마이크로파 수신기에서 사용하는 기술이다.

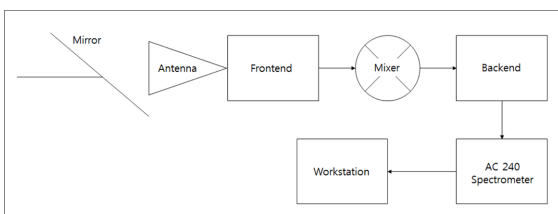


Fig. 1. The basic block diagram of 22 GHz water vapor radiometer.

1.5 GHz의 수증기 전파 신호는 기저대역변환기를 통해 다시 0.5 GHz 대역으로 변환되며, 고속푸리에변환(FFT) 분광기를 통해 각 주파수별 전파세기로 분석된다. FFT 분광기는 Acqiris AC240을 사용하고 있으며, 61 kHz의 분해능으로 1 GHz 대역의 전파 스펙트럼을 출력할 수 있다.

2.2. 마이크로파 전달식

대기 중의 마이크로파 신호는 대기복사전달식으로 표현할 수 있다.⁸⁾

$$T_b(v, z_0) = T_0 e^{-\tau(v, z_0)} + \int_{z_0}^{\tau_1} \alpha(v, z) T(z) e^{-\tau(v, z)} dz$$

T_b 는 밝기온도, T_0 는 우주 배경온도인 2.7 K, α 는 흡광계수, T 는 물리적 온도를 의미한다. 광학두께라고 불리는 τ 는 흡광계수 α 를 거리에 따라 적분한 값이며, 지상관측의 경우 z_0 를 지상에서의 고도위치, z_1 을 대기 상층의 고도위치라 볼 수 있다. 마이크로파 대기 신호는 위의 식을 사용하여 스펙트럼의 세기는 온도의 단위인 켈빈(K)을 이용하여 표현할 수 있다.

만일 대기가 T_b 의 온도를 갖는 하나의 층이라고 가정한다면, 위의 대기복사전달식은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$T_b = T_0 e^{-\tau/\cos(\theta)} + T_{tr} [1 - e^{-\tau/\cos(\theta)}]$$

θ 는 수증기 신호를 관측하는 천정각을 의미한다. T_{tr} 은 지상에서 관측된 대기 온도로부터 추정하여 적용한다. T_{amb} 는 지상에서 관측한 섭씨온도를 의미한다.⁹⁾

$$T_{tr} = 0.69(T_{amb} - 273) + 266.3$$

광학두께인 τ 는 아래의 보정법을 통해 계산할 수 있다.

2.3. 보정법

수증기 스펙트럼은 대기 신호만으로는 나타낼 수 없으며, 별도의 보정 신호가 있어야 스펙트럼으로 표현할 수 있다. 보정신호의 조건으로는 흑체에서 발산되는 신호이어야 하며, 우리는 흑체의 온도를 정확하게 알 수 있어야 한다. 대부분의 마이크로파 수신기의 경우 흑체로 사용될 수 있는 전파흡수체를 흑체로 가정하여, 실온상태(약 297 K)의 전파흡수체와 액체질소(약 77 K) 속에 담긴 전파흡수체로부터 각각 보정 신호를 관측한

다. 이들의 보정신호는 광학계의 반사경이 회전함으로써 반복적으로 관측될 수 있다.

그러나 이 실험에 사용된 수증기 전파 수신기의 경우 반사경의 장축 길이가 60 cm에 달하여, 반사경의 입사 면적을 채울 수 있는 액체질소를 계속적으로 공급하기에 어려움이 있다. 따라서 액체질소에서 발산되는 신호를 대체할만한 대체 신호를 이용해야 한다. 또한 지상에서 관측되는 22 GHz의 수증기 신호는 매우 약한 세기를 보이기 때문에 기기의 입력과 출력이 비선형적인 환경에서는 신호의 왜곡이 발생할 수 있다.

본 실험에서는 티핑커브보정법(Tipping curve calibration)을 사용하여 액체질소 대신 30°의 천정각에서 관측한 대기 신호를 기준 물질로 사용하였다.

$$T_{b,cold} = T_0 e^{-\tau/\cos(\theta)} + T_{tr} [1 - e^{-\tau/\cos(\theta)}] \quad (\theta = 30^\circ)$$

이 과정에서 필요한 광학두께(τ) 값은 다양한 각도에서의 관측 신호를 측정하여 광학두께에 대해 풀이함으로써 계산할 수 있다. 본 연구에서는 45°에서 70° 사이의 다섯 각도로부터 전파를 수신하여 광학두께를 구하였다. 티핑커브보정법에 대한 본 관측기기의 유효성은 (De Wachter, 2011)에서 나타내었다.

또한 기기의 비선형성은 밸런싱 보정법(Balancing calibration)을 사용하여 대기의 신호와 비슷한 세기를 갖는 신호를 입력하여 비선형적 특성을 상쇄시켜주었다. 대기의 신호와 비슷한 세기의 신호(P_{ref})는 천정방향(0°)에서 관측한 대기 신호에 약간의 전파 흡수체를 삽입하여 줌으로써 신호 세기를 조정하였으며, 밸런싱보정법의 결과 수증기 전파 스펙트럼의 세기는 T_b 가 아닌 ΔT_b 로 표현된다.

$$\Delta T_b = T_{b,sky} - T_{b,ref} = \frac{P_{sky} - P_{ref}}{P_{hot} - P_{cold}} (T_{hot} - T_{b,cold})$$

P 는 각 물질로부터 측정된 신호이다. 그러나 P_{sky} 는 대류권의 상태에 따라 계속적으로 변하며, 이에 따라 P_{ref} 도 같이 변해야 한다. 매번 전파 흡수체를 달리할 수 없기 때문에 천정방향을 중심으로 -10°에서 +2°까지 자동적으로 변화할 수 있도록 구성하여 전파 세기를 조정하였다. +2°까지 제한한 이유는 양의 각도 방향으로 건물의 구조물이 존재하여 전파 수신에 영향을 주기 때문이다.

2.4. 고도별 분포도 계산

지상에서 관측한 스펙트럼은 고도에 따라 분포해 있

는 수증기로부터 발산된 신호의 합이라고 할 수 있다. 특히 마이크로파 스펙트럼의 경우 압력넓힘효과로 형성된 스펙트럼의 모양으로부터 고도에 대한 정보를 알아낼 수 있으며, 이것을 통해 수증기의 고도별 분포도를 계산할 수 있다. 스펙트럼의 역산 과정은 최적화 추정법(Optimal Estimation Method)¹⁰를 사용하였으며, ARTS 소프트웨어(version 2)를 통해 계산하였다.¹¹

3. 결과 및 고찰

3.1. 수증기 농도

수증기 전파 수신기를 통해 관측한 22 GHz 전파 스펙트럼은 Fig. 2와 같이 나타난다. Fig. 2는 여름철과 겨울철의 특정일에 대해서 992개의 관측스펙트럼을 적분한 결과를 보여준다. 두 개의 스펙트럼을 비교한 결과, 같은 적분시간을 가졌음에도 불구하고 여름철의 경우 0.0187 K의 잡음크기를 보이는 반면, 겨울철의 경우 0.0038 K의 잡음크기를 보여 여름철의 잡음이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 지상에서 관측한 전파는 대류권을 통과하기 때문에 대류권의 구성에 따른 영향을 크게 받는다. 특히 습도가 높은 여름철의 경우 대기 신호의 잡음이 증가하며, 그 결과 스펙트럼의 잡음이 겨울철에 비해 매우 크게 나타난다.

이 실험에서의 역산 과정은 0.01 K의 잡음 크기를 만족하는 경우에 실시하도록 하였으며, 이 수준을 만족하기 위해 여름철의 경우 긴 시간 동안의 적분을 필요로 한다. 즉, 여름철의 높은 잡음세기는 겨울철에 비해 고도별 분포도 계산에 있어서 시간 분해능을 낮추는 요

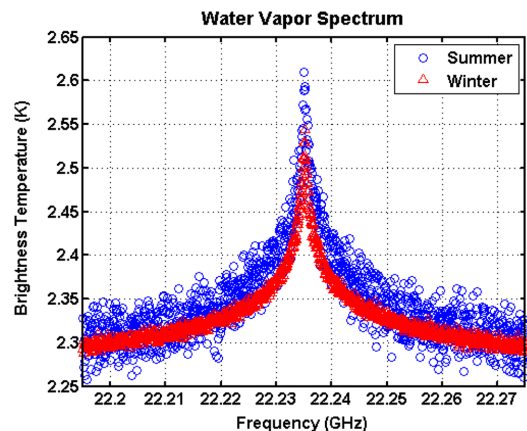


Fig. 2. The spectrum of 22 GHz water vapor measured on July 16, 2012 (blue circle) and December 1, 2012 (red triangle).

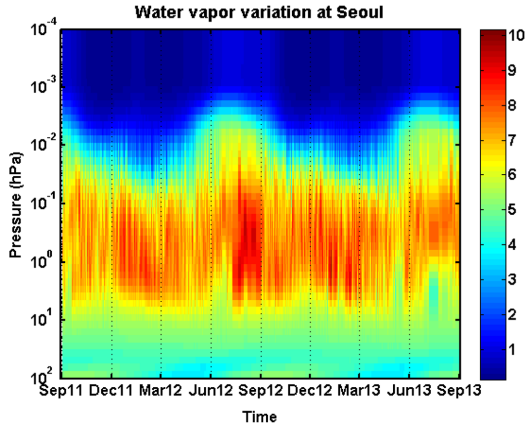


Fig. 3. Water vapor profile above Seoul measured by 22 GHz radiometer (unit: ppmv).

인으로 작용한다.

Fig. 3는 수증기전파수신기로 2011년 9월부터 2013년 8월까지 2년 동안 관측한 수증기 분포도를 보여준다. 여름철의 낮은 시간 분해능에도 불구하고 뚜렷한 계절적 변화를 관측할 수 있다.

3.2. 광학두께

티커파브보정법을 통해 계산된 22 GHz에서의 광학두께는 Fig. 4에 나타내었다. 건조한 겨울철에 경우 0.1 이하의 매우 낮은 광학두께를 보이는 반면, 습한 여름철의 경우 0.5 이상의 광학두께를 보이기도 한다.

광학두께를 이용하여 대류권 내의 수증기 총량을 계산할 수 있으며, 전파 전달 지연 현상 등 전파 전달의 보정 자료로써 활용 가능하다. 광학두께와 수증기 총량

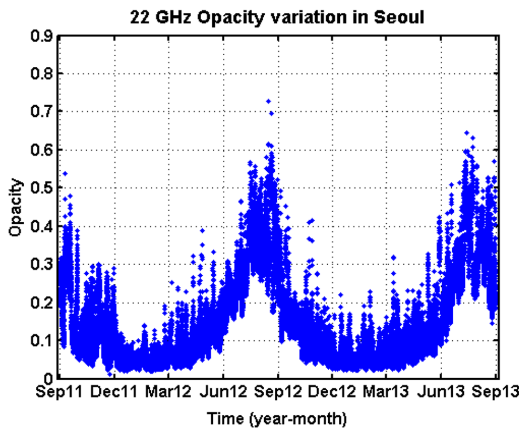


Fig. 4. The opacity variation at 22 GHz measured at Seoul.

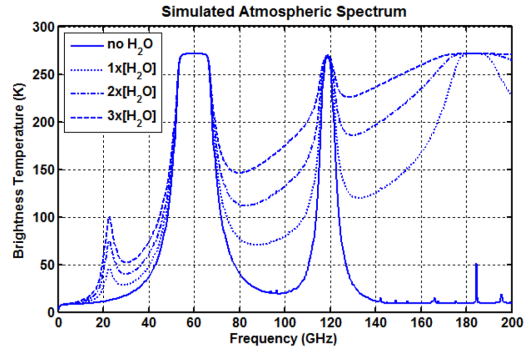


Fig. 5. The atmospheric microwave spectrum simulated by ARTS.

과의 연관성을 알아보기 위해 110 GHz 오존전파수신기로 관측한 오존 스펙트럼을 활용하였다. 110 GHz 오존 스펙트럼은 수증기 전파 수신기와 유사한 관측 원리를 갖고 있으나, 오존 전파의 세기가 비교적 강하게 나타나기 때문에 밸런싱 보정법을 적용하지 아니하고, 직접 밝기온도 향으로 전파 세기가 나타난다.

대류권의 수증기 농도에 따른 대기 마이크로파 스펙트럼은 Fig. 5와 같이 나타난다. Fig. 5의 시뮬레이션은 FASCOD 대기 정보 중 수증기와 산소, 오존의 정보를 이용하여 구성하였으며, 대류권에 분포하는 수증기의 농도만을 변화시켜 나타내었다. 시뮬레이션 결과 대류권의 수증기는 연속 스펙트럼을 형성하기 때문에 수증기 농도가 증가할수록 스펙트럼선이 나타나는 기본 레벨이 점점 증가하는 것을 볼 수 있으며, 여러 스펙트럼선이 대류권 수증기로 인해 가려지는 현상이 나타난다. 이러한 대기의 연속스펙트럼 현상은 실험적으로 나타나는 현상으로 아직 이론적으로는 완전한 해석을 못하고 있으며, MPM, Rosenkranz 등의 여러 모델들이 발표되어 적용되고 있다.

대기권 내의 수증기 농도 변화에 따른 111.2217 GHz에서의 스펙트럼 세기 변화를 시뮬레이션 하여 Fig. 6에 표현하였다.¹²⁾ 대기권의 수증기가 증가함에 따라 오존 스펙트럼이 형성되는 스펙트럼의 세기가 점점 증가하는 것을 볼 수 있으며, 일정 수준을 넘을 경우 대기 내 수증기 포화로 인해 증가율이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다.

수증기 전파 수신기로부터 측정된 광학두께가 대류권의 수증기 농도와 연관성을 갖는다는 가정 하에 2013년 6월부터 9월까지 동시간대에 관측된 22 GHz 광학두께와 111.2217 GHz에서의 스펙트럼 세기를 같은 방법으

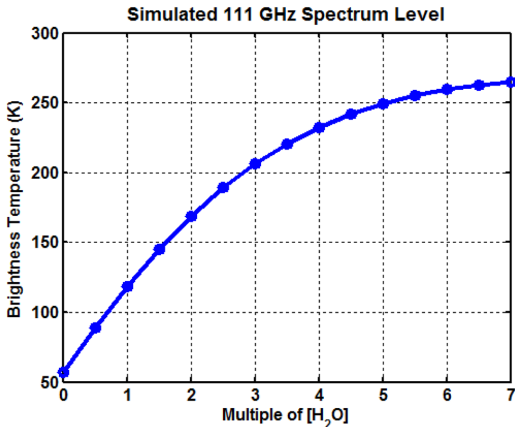


Fig. 6. Relation of 111 GHz atmospheric signal level to the tropospheric water vapor concentration.

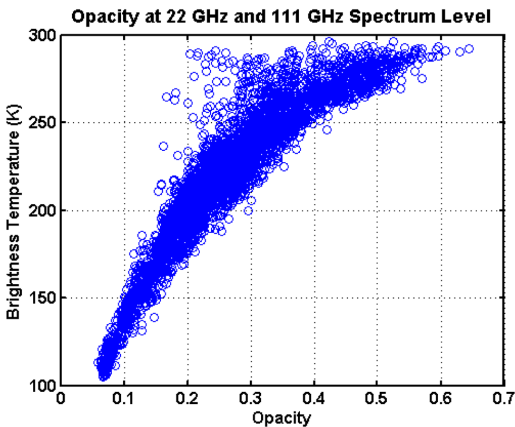


Fig. 7. Relation of opacity at 22 GHz to atmospheric signal level at 111 GHz. Both are experimental values with the microwave radiometer.

로 나타내었다(Fig. 7). Fig. 6과 Fig. 7의 두 그래프를 비교한 결과 수증기 증가에 따른 밝기온도의 변화와 유사한 증가 현상이 광학두께를 증가시킬 경우에도 나타나고 있음을 볼 수 있다. 즉, 수증기의 농도 증가에 따라 111 GHz 대역의 스펙트럼 세기 증가가 둔화되는 모양과 광학두께 증가에 따라 스펙트럼의 세기 증가가 둔화되는 모양이 상당히 비슷한 경향성을 보이고 있다. 비록 시뮬레이션 과정에서는 대류권의 각 고도별 농도를 같은 비율로 증폭한 값을 적용하여 실제의 수증기 농도 분포의 변동과는 차이가 있으나, 대류권 수증기에 대한 정확한 모델값 적용 및 다양한 주파수에서 나타나는 변화를 추가적으로 적용할 경우 22 GHz에서의 광학두께에서 대류권의 수증기 농도 변화를 측정할 수 있

음을 의미하며, 또한 110 GHz 오존전파 스펙트럼에서도 수증기 농도를 계산할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서 사용되는 22 GHz 수증기 전파 수신기는 한반도 상공 중층대기에 분포하는 수증기의 고도별 분포도를 관측하는 기술이다. 중층대기의 수증기는 계절별로 뚜렷한 변화 주기가 나타남을 확인할 수 있다. 수증기 전파 수신기에서 관측한 스펙트럼은 지상에서 관측되었기 때문에 전파 경로에 해당하는 대류권의 정보도 포함하고 있다. 특히 광학두께로 표현되는 양은 대류권 내에 분포하는 수증기의 총량과 연관되어 있으며, 오존전파 수신기로 관측된 111 GHz에서의 스펙트럼이 수증기 농도 변화에 따라 나타나는 시뮬레이션 결과와 비교해 봤을 때 유사한 변화 양상을 보였다.

대기에 존재하는 수증기는 기후변화를 유발하는 주요 온실기체로서, 수증기 농도의 변화는 인위적 배출량보다 지구의 온도 변화 등의 자연적 환경의 변화에 따라 나타난다. 즉, 근래에 나타나는 기후의 급변화에 따라 대기 중에 분포하는 수증기의 농도가 변화할 가능성이 높으며, 어떻게 변화하는지 관측하여 어떠한 결과를 가져올지 주목할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 숙명여자대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음(과제번호 1-1203-0204).

참고문헌

1. J. M. Wallace, and P. V. Hobbs, "Atmospheric Science: An Introductory Survey", 2006, 2nd edition. Chapter 1, Academic Press.
2. G. J. S. Bluth, S. D. Doiron, C. C. Schnetzler, A. J. Krueger, and L. S. Walter, "Global tracking of the SO2 clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions", *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(2), 151-154.
3. M. P. McCormick, L. W. Thomason, and C. R. Trepte, "Atmospheric Effects of the Mt Pinatubo Eruption", *Nature*, 1995, 373(2), 399-404.
4. D. T. Shindell, "Climate and ozone response to increased stratospheric water vapor", *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8), 1551-1554.

5. J. M. Haywood, N. Bellouin, A. Jones, O. Boucher, M. Wild, and K. P. Shine, "The roles of aerosol, water vapor and cloud in future global dimming/brightening", *Journal of Geophysical Research*, **2011**, 116(D20), D20203.
6. E. de Wachter, A. Haeferle, N. Kampfer, S. Ka, J. E. Lee, and J. J. Oh, "The Seoul Water Vapor Radiometer for the Middle Atmosphere: Calibration, Retrieval, and Validation", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **2011**, 49(3), 1052-1062.
7. E. de Wachter, A. Murk, C. Straub, A. Haeferle, S. Ka, J. J. Oh, and N. Kampfer, "Effects of Resonances in corrugated horn antenna for a 22-GHz balancing radiometer", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **2009**, 6(1), 3-7.
8. M. A. Janssen, "Atmospheric remote sensing by microwave radiometry", **1993**, Wiley-Interscience.
9. Y. Han, and E. R. Westwater, "Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **2000**, 38(3), 1260-1276.
10. C. D. Rodgers, "Inverse Methods for Atmospheric Soundings: Theory and Practice", **2000**, World Scientific.
11. P. Eriksson, S. A. Buehler, C. P. Davis, C. Emde, and O. Lemke, "ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, Version 2", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **2011**, 112, 1551-1558.
12. 가수현, 오정진, "110 GHz 오존 스펙트럼을 이용한 대기의 불투명도 측정", *한국환경분석학회지*, **2009**, 12(2), 96-102.