

110 GHz 오존 스펙트럼을 이용한 대기의 불투명도 측정

가수현 · 오정진[†]
숙명여자대학교 화학과

Atmospheric Optical Depth Derived from 110 GHz Ozone Spectrum

Soo Hyun Ka and Jung Jin Oh[†]

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

Received April 2009, accepted June 2009

Water vapor in the troposphere contributes on the optical depth of atmosphere in the view of microwave radiation. It induces negative effects when we need to analyze the microwave spectrum of the middle atmosphere by overlapping a molecular line spectrum which contains their concentration, profile and so on. The intensity of optical depth can be represented by the bias temperature of the microwave spectrum which is received on the ground. In this paper, we extracted the atmospheric optical depth from 110 GHz radiative spectrum observed by SORAS(Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul) at Sookmyung Women's University. To verify calculation, the results at 110 GHz were compared with the opacities at 22 GHz measured by the tipping curve calibration of SWARA(Stratospheric Water Vapor Radiometer).

Key words: Ozone, Microwave Radiometer, Atmospheric optical depth, Water vapor, 110 GHz

1. 서 론

지구의 전반적인 기온 상승으로 인해 해빙 속도가 빨라지고, 해수면 상승으로 인해 섬 국가의 존재가 위협받고 있는 가운데, 급작스런 환경 변화의 원인으로 지목되고 있는 것이 대기의 조성 변화로 인한 지구 온난화이다. 성층권에 존재하는 오존층은 지구로 입사되는 UV를 흡수하여 지구 생태계에 유해한 전파를 걸러주는 역할을 하고, 오존이 흡수한 에너지는 성층권의 기온 분포를 결정하는 등 대기의 구조 및 특성을 결정하는데에 중요한 역할을 한다. 이러한 중요성 때문에 현재 세계 각국에서는 여러 기기를 통해 오존이 어떻게 변화하고 있는지 관측하고 있다.

대부분의 관측은 전파를 이용하여 이루어진다. 대기 중의 분자 조성을 관측하는 기기로는 위성, 존데, 라이다 및 지상관측용 전파 수신기 등이 있는데, 이들은 관측 위치에 따라 분류할 수 있다. 위성관측 같은 경

우는 대기권 밖에서 전파를 수신하며, 존데는 대기권 내에서 전파를 수신한다. 지상관측 전파 수신기 같은 경우는 지상에서 전파를 수신하는데 쉽게 접근이 가능하기 때문에 관리가 용이하고, 우천시를 제외하고 거의 연속적인 데이터를 얻을 수 있으며, 10년 이상의 장기간 관측이 가능하다. 전파원이 분자 자체라는 점은 24시간 연속으로 관측값을 얻을 수 있는 환경을 제공한다. 이 연구에서는 오존이 발산하는 110.836 GHz($6_{1,5}-6_{0,5}$) 전파 신호를 110 GHz 지상관측용 전파 수신기를 이용하여 스펙트럼을 얻고, 스펙트럼이 나타나는 기저 온도를 통해 대기의 불투명도를 유도하였다. 불투명도는 대류권 수증기의 기여도가 가장 높다고 알려져 있으며, 지상 전파 관측의 경우 불투명도에 따라 수신 전파의 특성이 달라지므로, 오존 전파 수신기로 얻은 스펙트럼 기저 온도 변화를 통하여 대기의 불투명도를 계산하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jjinoh@sookmyung.ac.kr

2. 실험

2.1. 마이크로파 전달방정식

지상에서의 대기 분자 관측은 성층권의 대기 분자에서 발산되는 마이크로파 영역의 신호를 수신함으로써 이루어진다. 오존의 방출 전파 중 하나인 110.836 GHz의 전파를 수신하여 스펙트럼을 구현하기 위해 개발된 SORAS(Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)는 110.445 GHz~111.353 GHz 영역의 전파를 수신하는 기기로서 2006년부터 관측을 시작한 이래 여러 번의 개선 작업을 거쳐 현재 숙명여자대학교(37.32°N, 126.57°E, 52 m)에서 구동 중이다.

성층권의 오존 분자에서 방출되어 지상에 도달한 신호는 Eq. (1)과 같이 전파전달방정식으로 나타낼 수 있다.²⁾

$$I_{\nu}(0) = I_{\nu}(z_0)e^{-\tau(z_0)} + \int_0^{z_0} B_{\nu}(T)e^{-\tau(z)}\alpha(z)dz \quad (1)$$

$I_{\nu}(0)$ 는 지상($z=0$)에서 관측했을 때의 전파 세기이며, $I_{\nu}(z_0)$ 는 대기권 밖($z=z_0$)에서 입사된 전파 세기를 나타낸다. $B_{\nu}(T)$ 는 온도 T 인 물질이 갖는 플랑크 함수이며, α_{ν} 는 흡수계수이다. 불투명도로 나타나는 τ 는 Eq. (2)와 같이 광학거리에 대한 흡수계수의 적분 값이다.

$$\tau(\nu, z) = \int_0^z \alpha(\nu, z')dz' \quad (2)$$

마이크로파 영역에서 플랑크 함수는 흑체 복사에 관한 Rayleigh-Jeans 근사가 적용되어 흑체의 온도로 표현할 수 있다. 이때의 온도는 물질의 온도가 아닌 물질을 흑체로 가정했을 때의 온도이기 때문에 물질의 온도와 구분 짓기 위해 밝기온도 T_b 로 정의한다.

$$T_b(\nu) \equiv \frac{\lambda^2}{2k} I_{\nu} \quad (3)$$

밝기 온도를 적용했을 때, Eq. (1)의 전파전달방정식은 밝기온도로써 모두 표현할 수 있다. 또한 지상에서 전파를 수신하는 경우 대류권이 균일한 조성을 이루고 있으며 T_{trop} 의 온도를 갖고 있다고 가정한다면 Eq. (1)의 전파전달방정식은 Eq. (4)와 같이 간결하게 표현된다.

$$T_{\nu}(\nu) = T_0 e^{-\frac{\tau(\nu)}{\cos\theta}} + T_{\text{trop}} \left(1 - e^{-\frac{\tau(\nu)}{\cos\theta}} \right) \quad (4)$$

이때의 θ 는 관측 방향에 대한 천정각을 의미하며, T_{trop} 은 대류권의 실효온도로써, 지표면 온도보다 -7 K 이 낮다고 가정한다.¹⁾ T_0 는 우주배경온도인 2.7 K 이다.

2.2. SORAS (Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul) - 성층권 오존 전파 수신기

T_b 로 표현되는 마이크로파 신호를 수신하기 위해 마이크로파 수신기는 파워 전량 수신법에 의해 작동된다. 파워 전량 수신법은 흑체로 가정한 2개의 물질로부터 측정된 온도와 신호를 기준으로하여 그 비율을 적용하여 오존 신호의 온도(T_{sky})를 측정하는 방법이다.

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

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{cold}} + \frac{P_{\text{sky}} - P_{\text{cold}}}{P_{\text{hot}} - P_{\text{cold}}} \times (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) \quad (6)$$

P_{sky} 는 대기 관측 시 얻은 신호 크기이며, P_{hot} 과 P_{cold} 는 실온 상태의 물질과 액체 질소로부터 얻은 신호 크기를 사용한다. 각 신호에 따른 T_{hot} 과 T_{cold} 는 실온과 77 K으로 가정한 액체질소의 끓는점을 대입한다.

SORAS는 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 파워 전량 수신법을 구동하기 위해 기준물질로써 Eccorsorb CV3 전파흡수체를 -90° 방향에 위치시켜 P_{hot} 과 T_{hot} 을 측정하고, 액체질소를 -180° 방향에 위치시켜 P_{cold} 를 얻는다(T_{cold} 는 -77 K으로 가정한다.) T_{hot} 은 Pt100 온도센서를 전파흡수체 내에 삽입하여 매 관측 시 측정한다. 오존 신호는 대기의 49°~65° 방향 신호를 측정한다. SORAS는 실내에서 관측하도록 설계되어 있기 때문에 창문으로 인한 전파 손실을 최소화 하기 위해 창문 대신 2 mm 두께의 스티로폼을 설치하였다. 기준 물질과 오존의 신호는 타원면경이 스테핑 모터에 의해 회전하면서 Hot(-90°) - Cold(-180°) - Sky(49°~65°) 순으로 관측 주기를 이루어 반복 측정하며, 각 물질당 6.6초의 적분 시간을 갖는다. 또한 타원면경은 전파 수신 물질 선택을 위한 회전 구동과 동시에 앞뒤로 진동시켜 고정 전파 경로거리로 인해 발생하는 정상파를 제거하였다. 타원면경에 의해 선택된 각 물질의 신호는 혼안테나를 통해 수신기로 입사되어 2번의 신호 세기 증폭과 주파수 필터링 과정을 거친다. SORAS의 수신 주파수 대역은 110.836 GHz이나, 수백 GHz 대역의 주파수를 분석하는 것보다 주파수 대역을 낮춰서 분석하는 것이 부품 선택적인 면이나 신호 안정성 면에서 훨씬 유리

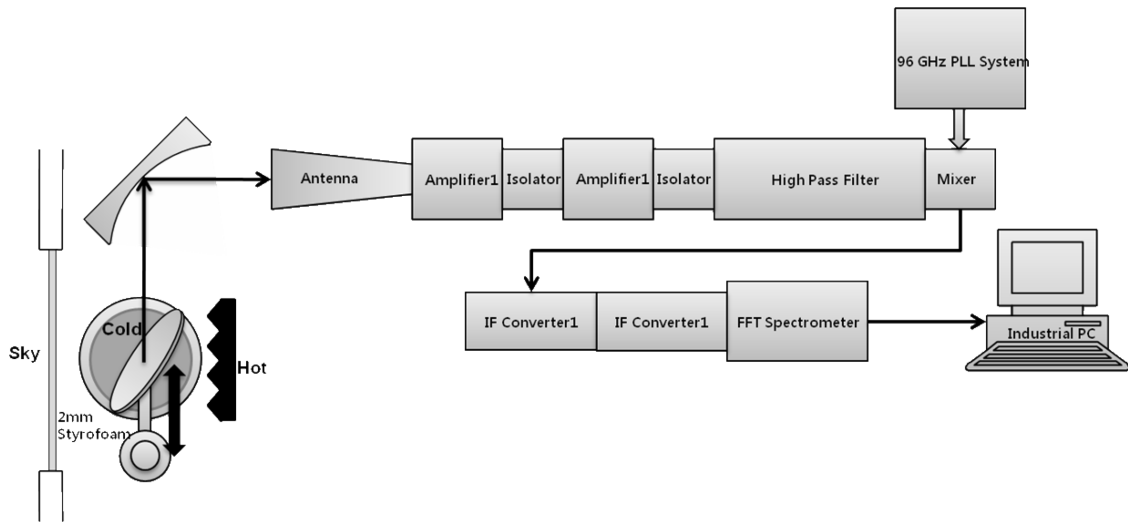


Fig. 1. SORAS(Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul) scheme.

하기 때문에 96 GHz의 안정된 고정 주파수를 이용하여 14.836 GHz로 1차 저주파 변환을 한다. 그 후 IF 변환기1 내에서 1.391 GHz로 2차 변환되고, 최종적으로 IF 변환기2에서 0.609 GHz로 변환되어 FFT 분광기로 입력된다. FFT 분광기는 16384개의 채널로 이루어져 있으며, 0~1 GHz 범위의 신호를 61 kHz의 분해능으로 분석하여, 각 물질에 따른 주파수별 신호 세기를 출력한다. SORAS의 경우, FFT 분광기로 입력되는 주파수가 0.609 GHz이기 때문에 FFT 분광기의 중심 주파수인 0.500 GHz에 비해 0.109 GHz 치우쳐져 나타나며, IF변환기2는 0.5 GHz를 중심으로 830 MHz의 대역폭을 갖기 때문에 주파수 양쪽 경계부터 85 MHz 신호 범위는 사용할 수 없다.

SORAS의 출력 데이터는 6.6초마다 16384개의 데이터가 계속 생성된다. 그러나 이 데이터를 모두 저장하기에는 저장 장치의 용량 문제에 직면하며, 데이터 처리를 위해 너무 많은 시간이 요구된다. 이를 개선하기 위해 SORAS의 데이터는 정보 손실은 최소화하면서 데이터 분석 결과에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 스펙트럼의 압력 넓힘 현상을 고려하여 중심 주파수 대역인 110.714 GHz부터 110.958 GHz 범위에서는 출력 채널을 61 kHz의 분해능을 갖도록 하였으며, 나머지 지역은 양쪽 지역은 305 kHz의 분해능을 갖도록 하여, 데이터 수를 6178개로 조정하였다. SORAS는 실온 상태에서 측정을 하기 때문에, 수신기의 노이즈 정도를 나타내는 잡음 온도가 비교적 높게 나타난다. 잡음 온도는 저온 시스템일수록 낮게 나타나지만, 저온 시스템

을 구축할 경우에 소음 및 기기 관리에 어려움이 발생하기 때문에, 실온 상태에서 관측하는 것이 장기적 관점으로 볼 때 효율적이다. 수신기의 잡음 온도는 Eq. (7)로 정의되는 y factor를 이용하여 계산할 수 있다.

$$y = \frac{P_{\text{hot}} - P_{\text{offset}}}{P_{\text{cold}} - P_{\text{offset}}} = \frac{T_{\text{hot}} + T_{\text{rec}}}{T_{\text{cold}} + T_{\text{rec}}} \quad (7)$$

$$T_{\text{rec}} = \frac{T_{\text{hot}} - yT_{\text{cold}}}{y - 1} \quad (8)$$

P_{offset} 은 FFT 분광기 입력단자에 50 Ω의 부하를 입력시켜 측정된 출력 값이다. SORAS의 y factor는 약 1.16이며, 잡음온도는 1350 K 수준을 나타낸다.

2.3. SORAS Spectrum 및 불투명도 계산

SORAS의 오존 스펙트럼을 나타내기 위해서는 앞서 밝혔듯이 P_{hot} , P_{cold} , P_{sky} 의 FFT 분광기 출력값(Fig. 2)과 T_{hot} , T_{cold} 의 온도 값이 필요하며 Eq. (6)으로 계산할 수 있다(Fig. 3).

SORAS 스펙트럼은 스펙트럼 상에 일정한 정상파가 나타나고, 110.672 GHz 주변에서 갑작스런 신호 감소 현상을 보인다. 이는 기기 내부적으로 발생하는 것으로 추정되며, 앞으로 개선되어야 할 사항이다. 한 번의 관측주기를 통해 계산된 스펙트럼은 노이즈 정도가 크기 때문에 스펙트럼 적분을 하여 노이즈 크기를 줄인다. 이 논문에서는 2시간의 적분 시간을 갖는 스펙트럼을 대상으로 분석하였으며, 표시된 시각은 그리니치 표준시를 의미한다.

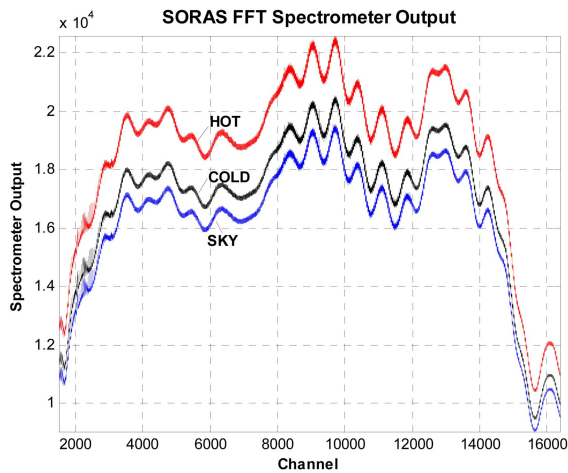


Fig. 2. SORAS FFT spectrometer output.

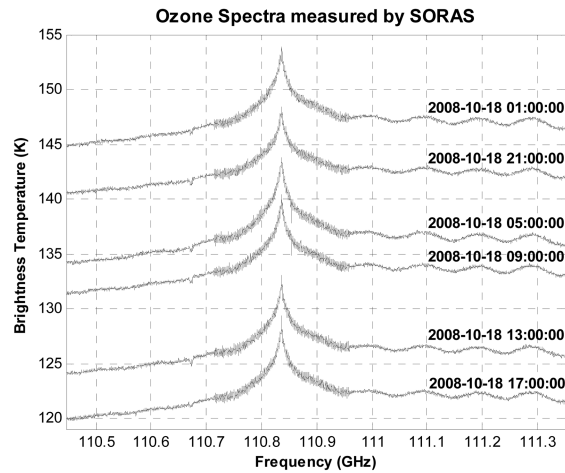


Fig. 4. SORAS spectra for one day (2008-10-18).

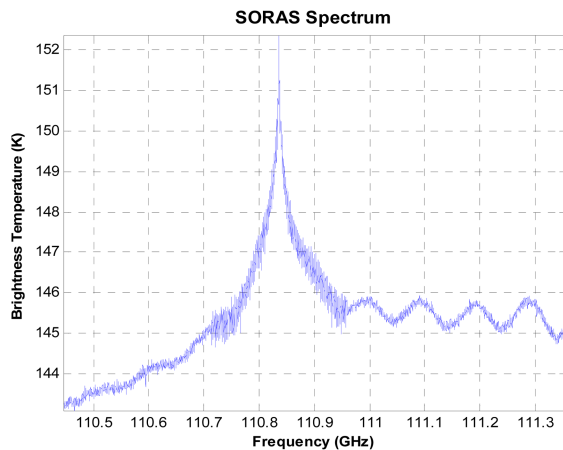


Fig. 3. SORAS 110 GHz spectrum integrated for 2 hours.

Fig. 4는 하루 동안 관측한 스펙트럼을 4시간 간격으로 표시한 것이다. 하루 동안 스펙트럼의 기저 온도는 25 K의 변화를 보이고 있다.

이러한 기저온도의 변화는 수증기의 변동에 의한 영향이 크다. 대류권의 수증기는 전파전달방정식(Eq. (4))의 불투명도(τ)에 반영 되기 때문에 SORAS의 관측 스펙트럼으로부터 불투명도가 어떻게 변하는지 역산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SORAS의 기저온도와 수증기 농도 변화

스펙트럼의 기저 온도는 연속 스펙트럼과 선 스펙트럼의 영향을 동시에 받는다. 따라서 수증기의 영향에

의한 기저 온도의 변화를 살펴보기 위해서는 오존 방출선에 의한 기저 온도의 상승 영향을 최소화하고, 또한 기기 내부적으로 발생한 정류파의 영향을 줄이기 위해 110.445 GHz~110.455 GHz 10 MHz 해당하는 스펙트럼의 평균값을 기저온도로 정하였다.

SORAS는 2008년 7월 26일부터 지금의 시스템 버전으로 관측을 시작하였다. 초기 대기 관측 각도는 49°였으나, 2008년 9월 28일에 65°로 증가시켰다. 대기 관측 각도의 증가는 대기 중 전파 경로를 증가시켜, 더 많은 대기 신호를 수신케 한다. 따라서 각도 증가 시점을 기준으로 하여 기저 온도가 증가 후 감소 경향을 보이고 있다(Fig. 5). 기저온도와 수증기의 상관관계를 구하기 위한 수증기의 절대 농도는 SORAS 관측지에

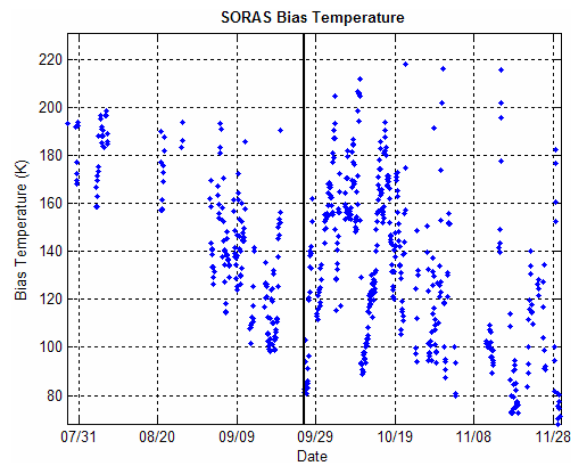


Fig. 5. SORAS bias temperature variation. The black solid line at 09/28 indicates the angle change date.

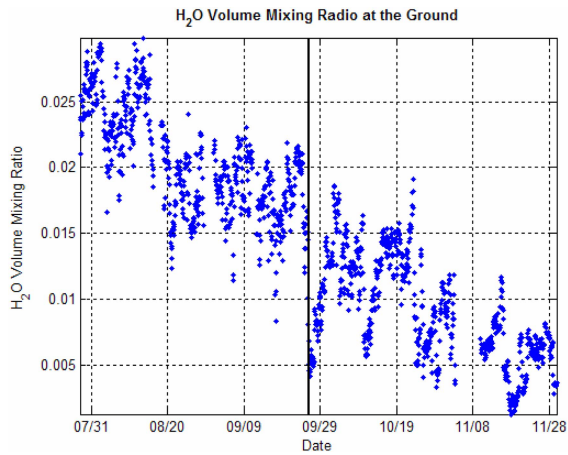


Fig. 6. The water vapor contents at Sookmyung Women's University from 2008-07-26.

있는 기상 관측장비로부터 측정된 상대 습도와 압력, 온도 데이터를 기반으로 부피혼합비(volume mixing ratio)로 계산하였다.³⁾ 상대 습도 및 압력은 기상에 관계없이 15초 간격으로 24시간 연속 측정된다. 전파에 영향을 주는 수증기는 성층권에서 대류권까지 존재하는 대기권 내의 모든 수증기이지만, 이 수증기의 90% 이상은 대류권에 존재하고 있으며 고도가 낮아질수록 그 양은 급격히 증가하기 때문에, 지상에서 측정된 수증기 양을 수증기 농도의 대표 값으로 간주하였다. 수증기는 여름에서 겨울로 지남에 따라 감소추세를 보이고 있다(Fig. 6).

3.2. 불투명도 계산

불투명도는 Eq. (4)로부터 계산할 수 있으며, 불투명도에 대해 나타내면 Eq. (9)와 같다.

$$\tau = -\cos(\theta) \ln \frac{T_b - T_{\text{trop}}}{T_0 - T_{\text{trop}}} \quad (9)$$

θ 는 2008년 9월 28일을 기준으로 49° 에서 65° 로 변화시켰으므로, 불투명도를 구하는 데에 이를 적용시켰다. T_{trop} 은 기상 관측장비에서 측정된 기온에서 7K을 뺀 값을 사용하였으며, T_0 는 2.7K을 대입하였다. 기저 온도로부터 계산된 천정방향의 대류권 불투명도를 구한 결과는 Fig. 7에 나타나있다.

3.3. 불투명도 검증

3.3.1. 22 GHz 불투명도와 비교

불투명도는 SORAS와 동일한 위치에 있는 22 GHz

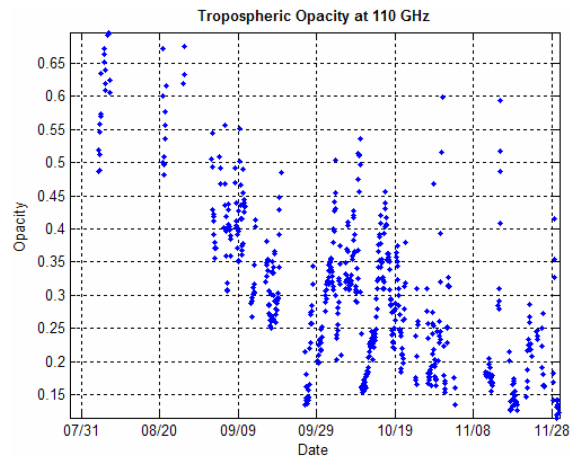


Fig. 7. Calculated the tropospheric opacities at 110 GHz by SORAS.

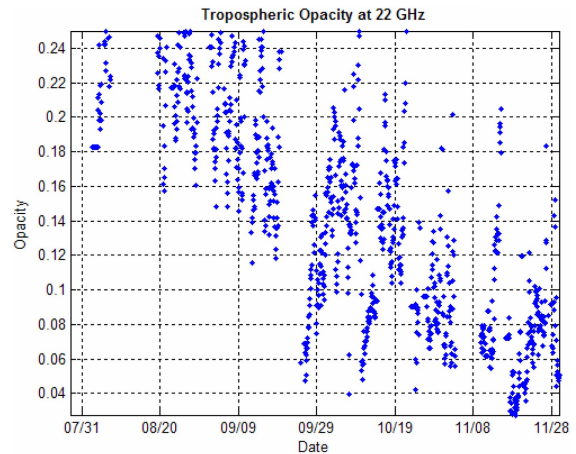


Fig. 8. Derived the 22 GHz tropospheric opacities by SWARA tipping curve calibration.

전파 수신기인 SWARA(Stratospheric Water Vapor Radiometer)에서 티핑커브보정법⁵⁾을 이용하여 매 시간 측정하고 있다. 여기서 구한 불투명도는 22 GHz에 해당하는 불투명도로서, 110 GHz와 결과값은 다르나, 수증기에 의해 증감된다는 특성은 동일하므로, 110 GHz에서의 기저 온도로부터 유도한 불투명도와 변화 패턴을 비교할 수 있다. 비교 결과 불투명도가 낮을 경우, 22 GHz에서의와 110 GHz에서의 경향성이 선형적으로 증가하는 것처럼 보이나, 불투명도가 높을 경우 22 GHz와 110 GHz에서의 불투명도의 분포가 양쪽 모두 넓게 퍼져있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 것은 불투명도가 높아질수록 구름의 영향이 점차 증가하기 때문에 22 GHz 전파 수신기가 바라보는 방향

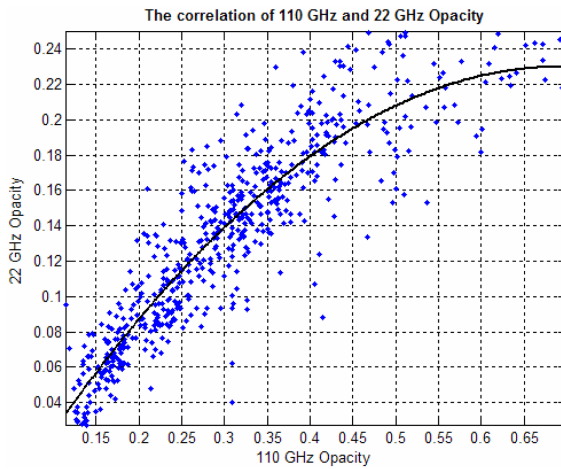


Fig. 9. The correlation of opacities at 110 GHz and 22 GHz.

의 구름 양과 110 GHz 전파 수신기가 바라보는 방향의 구름 양에 따른 차이가 포함될 수 있다.

3.3.2. 시뮬레이션을 통한 비교

수증기의 농도와 110 GHz 불투명도의 상관관계 그래프를 그린 결과, 비선형적인 증가 곡선을 확인할 수 있다. 이러한 비선형적 증가 패턴이 정상적인지 확인하기 위해 ARTS(Atmospheric Radiative Transfer Simulation) 프로그램⁴⁾을 이용하여 지상에서의 수증기 농도 변화에 따른 110 GHz의 흡수 계수 변화를 시뮬레이션 하여 나타내었다. 이때 흡수 계수 계산을 위해 사용된 대기 스펙트럼 모델은 PWR98(Rosenkranz)를

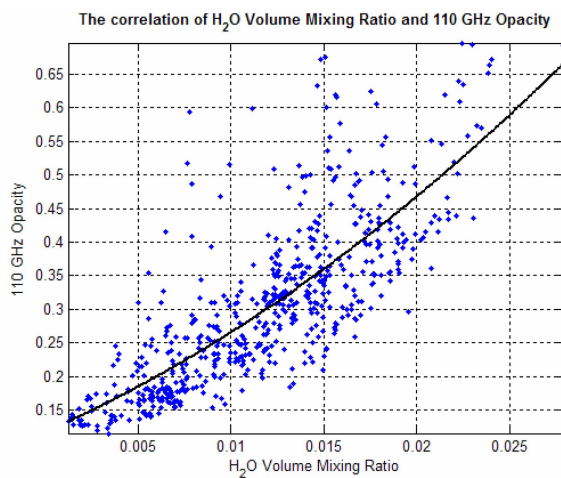


Fig. 10. The correlation of 110 GHz tropospheric opacity and the water vapor concentration at the ground.

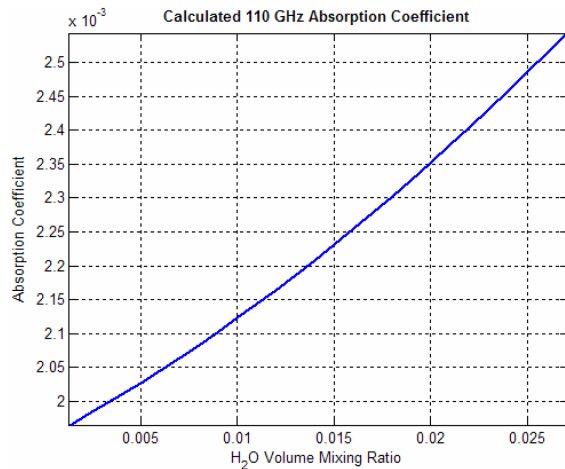


Fig. 11. The simulated 110 GHz absorption coefficient. It reflects only water vapor contents.

사용하였으며⁶⁾, 관측지에서 측정된 수증기 농도 값을 지상에서의 수증기 농도로 대입하여 실제 환경 데이터를 반영하였다. 또한 불투명도의 변화는 수증기에 의한 영향이 크다는 점을 고려하여 시뮬레이션에서는 불투명도 대신 수증기로 인한 흡수 계수에 대하여 나타내었으며, 지상에서 10 km까지의 흡수계수의 합과 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 실제 증가 패턴과 같은 비선형적 특성을 나타내어, 변화 패턴이 분석 결과와 상당히 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

대기 분자의 90%가 존재하는 대류권은 연속 스펙트럼을 생성하여 우주 및 대기 전파를 수신하는데 가리움 역할을 한다. 특히 지상에서 전파를 수신하는 경우, 대류권의 변화에 따라 수신 전파의 질이 결정되기도 한다. 2008년 7월 26일부터 지상에서 오존 전파를 수신하는 SORAS의 경우, 대류권의 습도가 높을수록 기저 스펙트럼의 값이 높아지는 경향을 보인다. 이것은 SORAS의 수신 전파가 대류권을 통과하여 진행하기 때문이며, SORAS 관측 스펙트럼으로부터 불투명도를 유추해볼 수 있다.

SORAS 스펙트럼은 전파 전달 방정식에 의해 표현할 수 있으며, 흑체복사의 Rayleigh-Jeans 근사법을 기반으로 한다. 불투명도는 전파 전달 방정식을 τ 에 대한 항으로 풀이함으로써, 구할 수 있는데, 이때 기저 온도 값은 110 GHz 오존 전파선과 기기 내부에서 발생하는 정류파의 영향을 최소화 하기 위해 스펙트럼의 저주파

경계에서 10 MHz 영역에 해당하는 값의 평균을 취하였다. 또한, 불투명도와 수증기량의 관계를 확인하기 위해 관측지에서 15초 간격으로 측정되는 압력, 습도, 기온 데이터를 이용하여 수증기의 부피 혼합비를 구하였다. SORAS의 기저온도는 계속적 감소 추세를 보이거나, 9월 28일 대기 전파 수신 각도의 변경으로 인해 급작스런 증가 경향이 나타났다. 그러나 변경 당일 이후, 계속적으로 감속 추세가 지속되므로, 수증기의 부피 혼합비의 감소 추세와 일치하는 것을 볼 수 있었다.

기저온도를 반영하여 계산한 대기의 불투명도 값을 검증하기 위해 2가지 방법을 사용하여 검증하였다. 첫 번째는 동일 위치에서 수증기 전파를 관측하고 있는 22 GHz 전파 수신기로부터 다른 과정에 의해 측정된 불투명도와 비교이며, 두 번째는 시뮬레이션을 통한 대기의 흡수 계수와 비교하는 것이다. 첫 번째 방법을 통한 검증 결과 낮은 불투명도에서는 22 GHz와 110 GHz의 불투명도가 선형적으로 관계를 보인 반면, 불투명도가 높아질수록 그 관계성은 급속히 낮아졌다. 이는 두 수신기의 전파 수신 방향이 서로 다름으로 인해 수증기를 많이 포함한 구름의 두께로 인한 측정값이 변화로 추정된다. 두 번째 방법인 시뮬레이션 결과와 비교했을 때, 대류권 수증기 양이 변함에 따라 비선형적 증가 패턴이 서로 일치함을 확인해볼 수 있었다.

110 GHz 관측 스펙트럼의 기저온도를 바탕으로 계산

한 불투명도는 낮은 불투명도인 경우 두 검증 방법에 의해 상당한 일치도를 보이고 있다. 그러나 SORAS의 경우 낮은 수증기량에서도 높은 불투명도 즉, 높은 기저 온도가 나타남을 볼 수 있는데, 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업에 의해 수행되었음.

참고자료

1. A. Parrish, R. L. de Zafra, P. M. Solomon and J. W. Barrette, *Radio Science*, **1988**, 23, p106-p118.
2. Michael A. Janssen, "Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry", **1993**, John Wiley & Sons, USA.
3. P. R. Lowe, *Journal of Applied Meteorology*, **1976**, 10, p100-p103.
4. S.A. Buehler, P. Eriksson, T. Kyhn, A. von Engeln and C. Verdes, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **2005**, 91, p65-p93.
5. Y. Han and Ed R. Westwater, *Geoscience and Remote Sensing*, **2000**, 38, 3, p1260-p1276.
6. P. W. Rosenkranz, *Radio Science*, **1998**, 33, p919-928.