

지구 대기 흡수선 스펙트럼 계산 CALCULATION OF TELLURIC ABSORPTION SPECTRA

정광희^{1,2}, 한인우^{1,2}, 이병철^{1,2}

¹한국천문연구원

²과학기술연합대학원대학교

GWANGHUI JEONG¹, INWOO HAN¹, AND BYEONG-CHEOL LEE²

¹Korea Astronomy and Space Science Institute 776, Daedeokdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-348, Korea

²Astronomy and Space Science Major, University of Science and Technology, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: tlotv@kasi.re.kr, iwhan@kasi.re.kr, blee@kasi.re.kr

(Received August 12, 2014; Revised October 19, 2014; Accepted October 20, 2014)

ABSTRACT

In ground-based astronomical spectroscopic observations, there are many telluric absorption lines that are laid on the spectra of celestial objects. To study the physical properties of the celestial objects with these contaminated spectra, the telluric lines should be removed. A conventional method for removing the telluric lines is using the standard stellar spectrum as telluric line. In this paper, we introduce a technique to calculate synthetic telluric spectra and use them to remove telluric lines from a spectrum of a celestial object. We used Line-by-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for calculating a synthetic spectrum and selected Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS) model as atmospheric model. We apply our method to some spectra obtained by Bohyunsan Observatory Echelle Spectrograph (BOES) to show that the telluric lines are well removed from the observed spectra by our model within an accuracy of 2% which is close to the 1-sigma rms of the original spectra.

Key words: telluric absorption line; synthetic spectra

1. 서론

별빛은 지구 대기를 통과하면서 특정 분자에 의해 일부 흡수가 되는데 이를 일으키는 주요 분자로는 H₂O, CO₂, O₃, O₂, CH₄ 등이 있다. 이 과정에서 생긴 흡수선을 지구 대기 흡수선(telluric line)이라고 하며 일반적으로 적외선 영역에서 많이 나타난다. 지구 대기 흡수선은 연구 대상 천체의 순수한 별 스펙트럼에 겹쳐 나타나기 때문에 이를 효과적으로 제거해주어야 한다. 대기 흡수선을 제거하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 조기형 별을 표준성으로 사용하는 것이다. 조기형 별은 높은 온도로 인해 별 자체의 흡수선이 별로 없으며 빠르게 자전하여 흡수선이 깊지 않아 순수한 대기 흡수선 스펙트럼과 거의 일치한다. 물론 표준성 자체의 흡수선이 존재하지만 선폭이 크기 때문에, 자전이나 도플러 효과 등 선폭을 넓히는 원인이 없어 뾰족한 모습을 띠는 대기 흡수선과 쉽게 구분이 가능하며, 연속선을 잘 결정할 경우 표준성 고유의 흡수선을 제거할 수 있

다. 대상천체의 고유 스펙트럼을 얻기 위한 과정은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{obs\ object} = I_{stellar} \times I_{telluric} \quad (1)$$

$$I_{obs\ standard} = I_{standard} \times I_{telluric} \quad (2)$$

$$I_{stellar} \simeq I_{obs\ object} \div I_{obs\ standard} \quad (3)$$

($\because I_{standard} = \text{일정}$)

대기 흡수선은 관측환경에 따라 다르게 나타나는데, 온도 및 대기의 상태는 시간에 따라 빠르게 변하므로 대상천체를 관측한 직후 곧바로 표준성도 관측을 하는 것이 좋다. 또한 흡수선의 외적변화 요소를 줄이기 위하여 성간흡수가 없는 가까운 별을 선정하여 연구대상 별과 유사한 고도에서 획득하는 것이 좋다.

두 번째 방법은 이론적인 계산을 통해 인공 흡수선 스펙트럼을 만들어 대기 흡수선을 제거하는 것이다. 대기 흡수선을 계산하려면 적절한 복사전달(radiative

transfer) 코드와 대기모델, 그리고 분자선 정보가 필요하다. 최근에는 이와 관련하여 우수한 코드 및 데이터베이스가 개발되어 대기흡수선을 더욱 정밀하게 계산할 수 있게 되었다. 이렇게 모델링 할 경우 따로 표준성을 관측하지 않아도 되므로 시간이 절약된다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 인공 흡수선 스펙트럼을 계산하기 위해 필요한 정보는 2장에서 기술하고, 3장에서는 대기 흡수선 스펙트럼을 계산하는 과정에 대해 설명한다. 4장에서는 계산한 흡수선 스펙트럼을 관측한 스펙트럼에 피팅(fitting)하는 과정을 다루기로 하겠다. 마지막으로 5장에서는 계산한 스펙트럼을 이용하여 실제 관측한 스펙트럼에 대기 흡수선을 제거한 결과를 보여주기로 한다.

2. 인공 흡수선 스펙트럼

2장에서는 지구 대기 흡수선을 계산하는데 이용되는 복사전달 코드와 대기모델 그리고 분자선 정보 데이터베이스에 대하여 기술하기로 한다.

2.1. 복사전달 코드

STRANSAC(Scott, 1974)는 대기 흡수선 스펙트럼을 계산하기에 알맞은 복사전달 코드 중 가장 오래 되었으며, GEISA(Jacquinet-Husson et al., 1999) 데이터베이스를 사용한다. Scott & Chedin(1981)에 의해 개발된 Automatized Atmospheric Absorption Atlas(4A) 코드 역시 GEISA 데이터베이스를 사용하며 빠르고 정확하게 스펙트럼을 계산한다. 이 코드를 이용하여 계산할 수 있는 주파수의 범위는 $600 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ 이다. ATRAN(Lord, 1992)은 2000/2001 HITRAN 데이터베이스를 이용하여 $0.8 - 10,000 \mu\text{m}$ 파장대까지 계산할 수 있으며, 웹 페이지에서 직접 관측지 정보를 입력하여 계산결과를 받아볼 수 있다. FASCOD(Clough et al., 1981)를 기반으로 개발된 코드는, 상업버전의 FASCOD3P/ PcLnWin과 무료로 제공되는 Line-by-Line Radiative Transfer Model¹(LBLRTM)으로 나뉜다.

본 연구에서 사용한 코드는 Clough et al.(1992)에 의해 개발된 LBLRTM이다. LBLRTM은 High Resolution Transmission²(HITRAN; Rothman et al., 2009)을 이용하며 다른 코드에 비해 사용하기 쉽고 융통성이 있다는 장점이 있다. 소스 코드는 포트란(FORTRAN)으로 되어 있으며 다양한 OS 환경에서 컴파일 하여 사용할 수 있다. 다만 계산할 주파수 간격이 2020 cm^{-1} 가 넘으면 안 된다는 제한이 있다.

2.2. 대기 모델

대기모델은 연직온도, 압력 및 분자함량 윤곽(profile)에 관한 정보를 가지고 있다. 이 정보는 흡수선 스펙트럼을 계산하는 데에 이용되기 때문에 실제 스펙트럼과 일치하는 이론 대기 스펙트럼을 계산하려면 기준이 되는 대기 모델을 잘 선택해야 한다. 모델로는 Global Data Assimilation System³(GDAS), Penn State Mesoscale Model⁴(MM5), Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding⁵(MIPAS) 등이 있으며 각각의 특징은 아래와 같다.

GDAS와 MM5 두 모델은 특정지역의 기후와 관측된 대기 상태를 고려하여 세분화되어 만들어졌기 때문에 사용자가 관측을 실시한 지역의 환경에 맞는 모델을 선택할 수 있다. 하지만 이 기상모델은 성층권 하부까지 관측한 기상 데이터에 기초하였기 때문에 GDAS는 26 km 이하, MM5는 22 km 이하의 정보만을 가지고 있다. 따라서 보다 높은 위치의 대기 정보를 얻고자 하는 경우 대안을 찾아야 한다.

우리가 사용한 모델인 MIPAS는 범지구적으로 쓰이는 모델로 중위도 지방의 낮과 밤, 극지방의 여름과 겨울, 적도지방의 낮 이렇게 5개의 모델로 이루어져 있다. 이 중 관측 환경에 가장 유사한 중위도 지방의 밤 시간대 대기모델을 선택하였다. MIPAS 모델은 0 - 120 km 구간을 1 km 간격으로 나눠 각각의 고도에 해당하는 대기의 정보(압력, 온도, 30개 분자의 농도)를 가지고 있다. 이 중에서 스펙트럼을 계산할 때 대기 모델의 30개 분자 중 의미가 있는 12개 분자(중요 순서에 따라 H₂O, CO₂, O₃, N₂O, CO, CH₄, O₂, NO, SO₂, NO₂, NH₃, HNO₃)의 농도만 사용한다.

2.3. 분자 라인 데이터 베이스

HITRAN은 인공 흡수선 스펙트럼을 계산하는데 사용되는 분자 라인의 데이터베이스이다. HITRAN은 47개의 서로 다른 분자들(동위원소 포함 120개)의 7,400,447개 스펙트럼 선 정보를 가지고 있다. 라인 정보에는 계산에 필요한 주파수, 라인 세기, 선평 확대 계수 등이 있다. 가장 최신 버전의 LBLRTM(v12.2; 2012)은 2008년 버전의 HITRAN 데이터베이스에 기반을 두고 있으며 총 39개의 분자를 채택하였다. HITRAN은 지속적으로 업데이트 되고 있으며 이에 따라 LBLRTM도 변경된 내용을 업데이트 한다.

³ <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-data-assimilation-system-gdas>.

⁴ <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>.

⁵ <http://www-atm.physics.ox.ac.uk/RFM/atm/>.

¹ http://rtweb.aer.com/lblrtm_description.html.

² <http://www.cfa.harvard.edu/hitrان/>.

3. 흡수선 스펙트럼 계산과정

인공 흡수선 스펙트럼을 계산하는 과정은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫 단계에서는 MIPAS 대기모델과 관측지의 정보를 가지고 관측환경에 맞는 대기모델을 만든다. 그 다음은 LBLRTM을 이용하여 스펙트럼을 계산하고, 마지막으로 계산된 스펙트럼 파일을 사용자의 목적에 알맞게 변환한다.

3.1. 관측환경에 따른 대기모델 수정

MIPAS 대기모델은 넓은 지역에서 공통으로 사용하는 모델이므로 특정지역의 정확한 대기모델로 채택하기에는 문제가 있다. 다시 말해 관측지의 대기 상태를 반영하기 위해 MIPAS 윤곽 데이터를 수정해야한다. 이를 위해 관측소에서 측정한 값(예를 들어, 기압, 온도, 습도, 분자의 농도 등)을 관측소와 같은 고도의 MIPAS 데이터 값으로 각각 나눈 척도인자(scale factor)를 MIPAS 윤곽 전체에 일괄적으로 곱한다. 예외적으로 H₂O의 농도는 온도, 압력, 습도를 가지고 계산한 값을 사용한다. 계산식은 Humidity Conversion Formulas⁶ (Vaisala Oyj, 2013)에서 인용하였다.

$$P_{sat} = 6.1164 \times 10^{\frac{7.5913 \times (T - 273.15)}{240.73 + (T - 273.15)}} \quad (4)$$

$$P_w = \frac{P_{sat} \times humidity}{100} \quad (5)$$

$$H_2O = \frac{P_w}{P - P_w} \times 10^6 \quad (6)$$

(P_{sat} : 포화수증기압(hPa), P_w : 수증기압(hPa), T : 절대온도)

3.2. LBLRTM을 이용한 스펙트럼 계산

LBLRTM 코드는 대기모델 데이터와 옵션 정보가 포함된 파일을 읽어 스펙트럼을 계산한다. 계산과 관련된 옵션은 사용자의 필요에 맞게 설정할 수 있으며 상당히 많은 종류가 있다. 자세한 내용은 LBLRTM 관련 웹페이지⁷ 또는 LBLRTM 패키지에 있는 설명서에서 확인할 수 있다. 중요한 옵션으로는 계산할 파장 영역, 분해능, 관측소 고도, 천정거리가 있다. LBLRTM에서는 가시광선, 적외선 영역 모두 스펙트럼 계산이 가능하다. 그러나 계산할 수 있는 파장 범위의 제한이 주파수 단위로 주어지기 때문에 파장이 짧을수록 계산하려는 파장 범위가 좁아진다. 분해능($R = \lambda / \Delta\lambda$)은 계산하고자 하는 파장영역의 중심파장과 파장넓음 사이 간격을 가지고

Table 1. The structure of 'TAPE12' file

File header		
Data block(<i>i</i>)	(1)	block header
	(2)	radiance
	(3)	transmittance

계산이 가능하다. LBLRTM을 이용하면 수백만 이상의 분해능으로 스펙트럼을 계산할 수 있으므로 고분산 분광기를 이용하여 관측한 스펙트럼($R \approx 100,000$)과 유사한 스펙트럼을 계산하기에 충분하다. 관측소 고도와 천정거리는 광학적 깊이를 계산하는데 필요한 요소이다. 이와 함께 앞서 설명한 옵션들과는 약간 성격이 다르지만 중요한 옵션인 분자의 농도가 있다. 이는 LBLRTM에서 읽는 대기모델 데이터에 농도 수치가 반영되어 사용된다. 농도 척도를 결정하는 것은 스펙트럼 피팅 과정에서 다시 설명한다.

3.3. LBLRTM을 이용하여 계산한 결과 파일 변환

LBLRTM을 이용하여 계산한 스펙트럼 정보는 'TAPE12'라는 이름의 이진(binary) 파일에 저장된다. 이 파일에는 앞에 파일 헤더가 있고 이어서 스펙트럼 정보가 기록된다(Table 1).

파일헤더에는 사용한 대기 모델 이름, 분자 목록 등 파일의 정보가 담겨 있으며 1256개의 문자열로 되어있다. 데이터 블록에는 블록헤더, 복사휘도, 투과율 정보가 포함되어 있다. 블록헤더는 차례대로 해당 블록 주파수(cm^{-1})의 처음과 끝, 주파수 간격, 데이터 개수 정보를 가진다. 보통 한 블록에는 2400개의 데이터가 들어간다.

데이터 블록에는 (1) - (3)이 스펙트럼 전 영역을 커버할 때까지 반복된다. 우리는 파장(또는 주파수)과 세기(진폭)의 스펙트럼 정보를 사용하기 위해 블록헤더에 있는 정보를 읽어 주파수 배열을 만들고 각각의 주파수에 해당하는 투과율을 정합하였다. 만약 사용자가 목적에 따라 원하는 정보를 얻고자 한다면 위의 파일정보를 참고하고 필요한 정보만 추출하여 사용할 수 있다.

4. 흡수선 스펙트럼 피팅

우리는 계산된 인공 흡수선 스펙트럼을 관측 스펙트럼과 유사하게 맞춰주기 위해 스펙트럼 피팅 코드를 개발하였다. 이 코드는 C언어 기반의 CVI 개발환경에서 작성되었으며 앞서 설명한 인공 흡수선 스펙트럼 계산 및 피팅 과정을 한 번에 진행할 수 있다. 피팅은 최소자승법을 이용하여 수행하였다. 피팅 과정은 크게 (1)파장논

⁶ http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-F.pdf.

⁷ http://shadow.eas.gatech.edu/~vvt/lblrtm/lblrtm_inst.html.

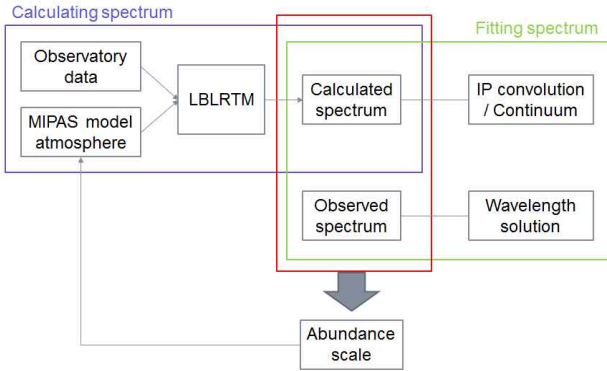


Figure 1. The procedure of calculating and fitting spectrum to observed data.

금조정, (2)기기 윤곽과 연속선 교정, (3)총 수증기량과 분자의 농도 척도 조정으로 나눌 수 있다. 이 함수들을 순서에 맞게 반복하여 사용하면 인공 스펙트럼을 관측 스펙트럼과 일치하도록 조정할 수 있다. Figure 1은 각 과정을 개념도로 표현한 것이다.

가장 먼저 해야 할 일은 관측기기의 분해능을 고려하여 적당한 분해능(관측 스펙트럼의 파장눈금보다 3 - 5배 많이 샘플링)의 인공 스펙트럼을 계산하는 것이다. 실제로 관측하여 얻은 스펙트럼의 파장은 이론적으로 계산된 스펙트럼의 파장과 정확히 일치하지 않는다. 따라서 관측 스펙트럼과 인공 스펙트럼을 비교하기 위해서는 파장눈금을 맞추도록 조정해주어야 한다. 우리는 눈금조정을 위해 관측 스펙트럼의 파장을 인공 스펙트럼의 파장과 일치하도록 다시 계산하였다. 계산에 쓰인 식은 다음과 같다.

$$W_{obs}(i) = w_0 + w_1 \times (i - i_c) + w_2 \times (i - i_c)^2 \quad (7)$$

w_0 는 스펙트럼 파장의 이동을 결정하는 계수이고 w_1 은 파장눈금 간격을 의미하는 계수이다. 스펙트럼의 파장함수는 거의 선형에 가까운 모습을 보이지만 파장이 길수록 눈금 간격이 소폭 넓어지기 때문에 이를 고려하여 파장계산식에서 2차 항(w_2)을 포함시켜 계산하였다.

기기윤곽과 연속선 교정 파라미터를 결정하는 것은 정확한 피팅을 하는데 중요한 요소이다. 관측 스펙트럼의 흡수선(S)은 관측기기의 윤곽(IP)이 반영되기 때문에 인공 스펙트럼(Y_{calc})에 비해 선폭이 넓게 나타난다. 따라서 인공 스펙트럼에 기기윤곽 효과를 덧대야 관측 스펙트럼과 같은 흡수선을 얻을 수 있다. 이 효과를 입히기 위해 인공 스펙트럼에 기기윤곽을 포갠다(convolution).

$$S = Y_{calc} \star IP \quad (\star : \text{convolution}) \quad (8)$$

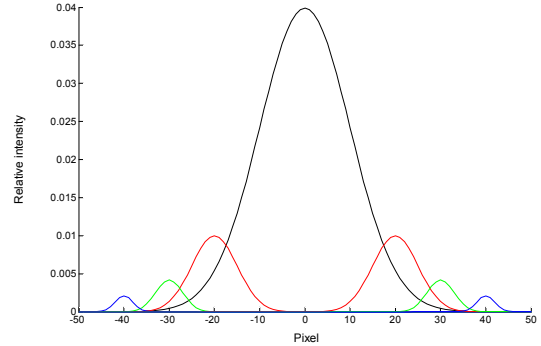


Figure 2. Main Gaussian function (black) and three pairs of Gaussian satellites (red, green, blue) to model instrumental profile.

기기윤곽은 Nonlinear Least-Squares(NLLS; Valenti et al., 1995) 최적화 또는 Singular-Value Decomposition(SVD, Rucinski et al., 1999) 기법 등을 이용하여 결정할 수 있다. 본문에서는 가우스 함수를 사용하여 기기윤곽을 결정하였다. 단일 가우스 모델을 기기윤곽으로 사용하는 경우 흡수선의 가장자리 부분이 실제 스펙트럼과 다소 차이가 있다. 우리는 이 점을 고려하여 총 7개의 가우스 모델(주 모델 1개, 보조 모델 6개)을 혼합하여 기기윤곽을 모델링하였다. 기기윤곽의 가우스 모델은 Figure 2와 같다.

기기윤곽을 포개고 난 후에는 스펙트럼의 연속선을 맞춰주어야 한다. 연속선 결정은 관측 스펙트럼의 연속선에 맞는 2차 항의 연속선 교정 파라미터를 구하고 인공 스펙트럼에 교정 파라미터 값을 적용하여 완료한다. 교정 파라미터 관련 식은 다음과 같다.

$$Y_{obs}(i) = [a + b(i - i_c) + c(i - i_c)^2] \times S(i) \quad (9)$$

지금까지 인공스펙트럼과 관측스펙트럼이 일치하도록 수정한 과정을 하나의 식으로 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_{obs}(i) = [a + b(i - i_c) + c(i - i_c)^2] \times (Y_{calc} \star IP)[W_{obs}(i)] \\ = [a + b(i - i_c) + c(i - i_c)^2] \times (Y_{calc} \star IP) \\ [w_0 + w_1(i - i_c) + w_2(i - i_c)^2] \quad (10)$$

(1)파장눈금조정, (2)기기윤곽과 연속선 교정 파라미터 결정을 하면 이론상으로는 모델링한 스펙트럼과 관측스펙트럼이 일치해야한다. 하지만 실제로 피팅을 할 경우 모델링한 스펙트럼이 관측 스펙트럼에 정확히 일치하지 않는다. 그 이유는 대기모델이 실제 관측환경을 제대로 반영하지 못하기 때문이다. 따라서 우리는 대기 모델에서 흡수를 일으키는 주요 분자의 농도 척도를 조정하여 모델을 수정할 필요가 있다. 그 과정이 바로 (3) 총 수증기량과 분자의 농도 척도 결정이다.

Table 2. Log of standard star observed with BOES

Object	Sp	B	V	RA (2000)	DEC (2000)	remark
HD 87901	B7V	1.24	1.40	10 08 22.31	+11 58 01.9	α Leo, Regulus
HD 120315	B3V	1.67	1.86	13 47 32.44	+49 18 47.8	η UMa
HD 218045	B9III	2.44	2.48	23 04 45.65	+15 12 19.0	α Peg

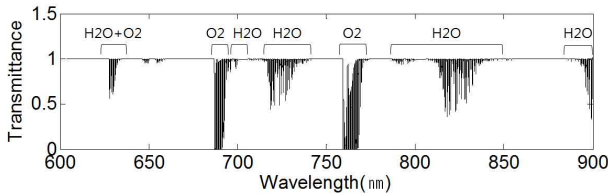


Figure 3. Calculated synthetic spectrum (600 - 900 nm).

다시 말해 (1)과장눈금조정, (2)기기유평과 연속선 교정 파라미터 결정은 LBLRTM을 이용한 후 얻은 인공 스펙트럼을 관측 스펙트럼에 맞도록 수정하는 과정이라면 (3)층 수증기량과 분자의 농도 척도 결정은 피팅을 하고난 후 인공 스펙트럼과 관측 스펙트럼 깊이를 비교하여 분자의 함량을 조정하는 과정이다.

5. 결과

실제로 코드를 사용하여 흡수선 스펙트럼을 계산하고 피팅을 함으로써 지구대기선을 제거할 수 있다. 일련의 과정으로 지구대기흡수선 모델을 사용하기 위해 관측한 데이터와 인공적으로 계산한 스펙트럼을 비교하여 제대로 된 결과를 얻을 수 있는지 검증할 필요가 있다. 이를 위해서 우리는 Bohyunsan Observatory Echelle Spectrograph(BOES)로 관측한 표준성 스펙트럼 자료를 이용하였다(Table 2).

이들은 모두 2006년부터 2010년까지 관측된 자료로 380 - 880 nm 파장의 스펙트럼 정보를 가지고 있다. 380 - 600 nm 범위에서는 대기흡수선이 거의 없고 일부 존재하는 흡수선도 세기가 매우 약하기 때문에 우리는 600 - 900 nm 범위에서 인공 스펙트럼을 계산하였다. 더군다나 LBLRTM을 이용하여 계산하는 파장영역이 단파장인 경우 50 nm가 되지 않을 정도로 매우 좁아 380 - 600 nm 영역을 사용하는 것은 효율적이지 못한 방법이다. 일반적으로 가시광선 영역에서는 H₂O, O₂, O₃에 의해 흡수를 일으키지만 계산한 영역인 600 - 900 nm 파장대에서는 H₂O와 O₂의 흡수선으로만 이루어져 있다(Figure 3). 대기흡수선을 모델링 하는데 있어 가장 중점을 두어야 할 부분은 대기분자의 농도 척도를 결정하는 것인데 여기에서는 H₂O와 O₂의 농도만 고려되기

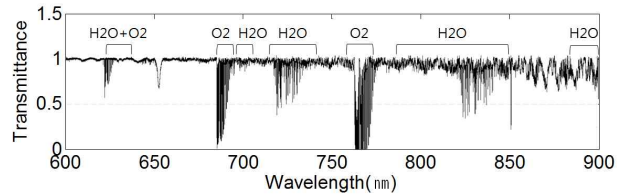


Figure 4. Observed standard star (HD 87901) spectrum (600 - 900 nm).

때문에 큰 어려움 없이 진행할 수 있었다.

다만 대기분자의 농도 척도를 결정할 때 관측 스펙트럼과 인공 스펙트럼을 비교할 수 있는 기준 영역을 제대로 선정해야 한다. 대기 흡수선에는 보통 여러 분자의 흡수선이 혼합되어 나타나기 때문에 정확한 대기 흡수선을 모델링하기 위해서는 단일 분자에 의한 흡수선 영역을 찾아야 한다. 이때 흡수선의 깊이를 확인하여 포화(saturation)되지 않은 영역을 선택해야 한다. 또한 노이즈가 심한 스펙트럼 영역에서는 세기가 약한 흡수선의 깊이와 노이즈 깊이에 큰 차이가 없기 때문에 피팅이 잘 되지 않으므로 이런 영역은 피하는 것이 좋다.

관측된 표준성 스펙트럼(Figure 4)에서는 상대적으로 긴 파장의 스펙트럼에 노이즈가 심하게 나타나는데 모델링하여 얻은 스펙트럼(Figure 3)과 비교하면 깊은 스펙트럼을 제외한 나머지 흡수선은 노이즈와 구분이 안 되는 것을 확인할 수 있다.

앞서 설명한 내용에 유의하여 계산하고자 하는 영역을 결정하고 난 후에는, 인공 흡수선 스펙트럼을 계산하고 관측 스펙트럼에 피팅하는 과정을 반복하여 적절한 분자의 농도 척도 변수 값을 찾는다. 우리는 이 과정을 통해 분자의 농도 척도를 결정하고 나서 모델링한 인공 흡수선 스펙트럼과 관측 스펙트럼이 얼마나 근접하게 일치하는지 살펴보기 위해 스펙트럼 잔차를 확인해 보았다.

5.1. H₂O 흡수선

H₂O 흡수선은 가시광선과 적외선 영역에서 골고루 나타나며 대기흡수선 중 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 그렇기 때문에 대기흡수선을 모델링 할 때 가장 신경써

Table 3. Measured H₂O density scale after fitting on absorption region

Wavelength	H ₂ O density scale			
	HD 120315 (2006)	HD 218045 (2007)	HD 87901 (2008)	HD 87901 (2010)
7195 Å	0.18	1.22	0.34	0.58
8180 Å	0.17	1.23	0.34	0.58

야하는 분자라인이다. 가시광선 영역에서 피팅하기 위해 선택한 H₂O의 흡수선 파장은 7195 Å와 8180 Å이다. 두 파장 모두 H₂O 분자의 단일 흡수선으로 다른 분자에 의한 흡수가 없으며 흡수선의 세기가 약하지 않고 포화되지도 않아 분자의 농도를 결정하기에 적절하다. 이렇게 선택된 영역을 가지고 피팅한 결과는 Table 3과 같다.

같은 날 관측한 스펙트럼은 두 파장 영역에서 거의 유사한 농도를 가지므로 전체 스펙트럼에 일정한 농도 척도 값을 적용할 수 있다. 반면 다른 시기에 관측한 스펙트럼의 농도 척도는 서로 차이가 있다. 이는 관측 환경이 달라졌기 때문이므로 관측시기가 다른 경우 각각의 농도 척도를 따로따로 찾아야 한다. 관측일자에 따라 변하는 H₂O 농도 척도의 차이가 크다는 점을 미루어보면 MIPAS 대기모델의 H₂O 농도 값이 매우 부정확하다고 해석할 수 있다. 그렇지만 농도 척도를 조정할 경우 피팅한 결과가 제대로 나오기 때문에 큰 문제는 없다.

Figure 5와 Figure 6은 각각 7195 Å 및 8180 Å 영역에서 피팅을 한 결과를 보여준다. 7195 Å 영역은 몇몇 깊은 스펙트럼을 제외하면 관측 스펙트럼과 계산한 스펙트럼과 잘 맞고 8180 Å 영역에서는 노이즈가 많고 연속선의 변화도 있지만 대기 흡수선이 만족스럽게 피팅된다. 피팅 후 계산한 RMS(Root Mean Square; 제곱 평균 제곱근: $\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2/N}$)는 관측한 시기에 따라 각각 0.005 - 0.03 사이의 값을 가진다. 이는 파장영역과 전처리된 스펙트럼의 질에 따라 차이를 보인다. 이 요인을 배제하고 스펙트럼의 정확한 세기 비교를 위해 관측스펙트럼을 계산한 스펙트럼으로 나눈 값과 관측스펙트럼에서 계산한 스펙트럼을 뺀 값도 살펴보았다. 관측 표준성 스펙트럼과 계산한 스펙트럼의 세기의 차이는 전반적으로 2% 이내로 좋은 결과를 보여주고 있다. 최근에 관측한 2010년도 자료는 관측 표준성 스펙트럼과 계산한 스펙트럼의 세기가 1% 이내의 차이를 보인다.

5.2. O₂ 흡수선

O₂ 흡수선은 가시광선 적외선 영역에서 모두 나타나지

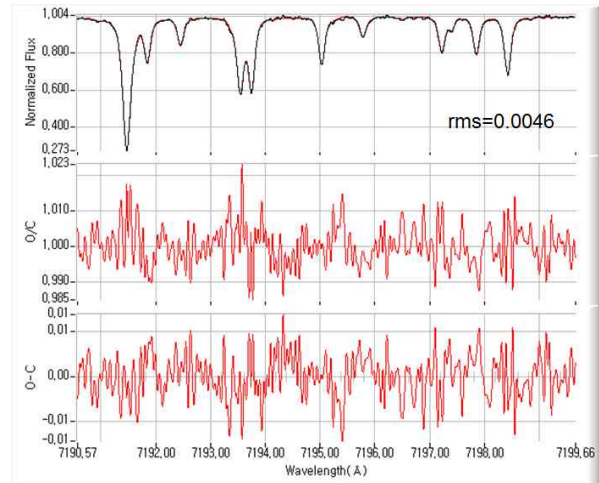


Figure 5. Water vapor (H₂O) lines on 7195 Å region. Top panel : observed standard star (HD87901) spectrum (black) and calculated spectrum (red). Mid panel : observed-minus-calculated spectrum (O - C). Bottom panel : observed/observed-minus-calculated spectrum (O/C).

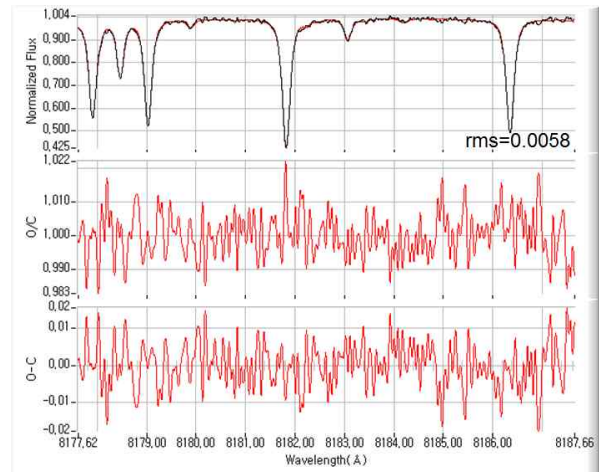


Figure 6. Same as Figure 5 but spectral region lies on 8180 Å.

만 흡수선이 많지 않다. 또한 우리가 사용한 600 - 900 nm 범위에서는 흡수선이 포화되거나 H₂O 흡수선과 혼합된 흡수선이 대부분이므로 단일 O₂ 흡수선을 선택하는데 큰 어려움이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 흡수선이 포화되지 않으면서 H₂O의 흡수가 거의 없는 부분을 선택하여 O₂ 분자농도의 근사치를 결정하였다. 이를 위하여 우리는 순수한 O₂ 영역인 7690 Å 파장영역을 선택하여 수행하였지만 노이즈가 심하고 H₂O 분자에 의한 영향도 약간 있기 때문에 구한 O₂ 농도 척도 값을 신뢰하기에는 무리가 있다. 따라서 정확한 농도 척도를 구하기 위해 다른 파장영역에서 피팅을 시행하였

Table 4. Measured O₂ density scale after fitting on absorption region

Wavelength	O ₂ density scale			
	HD 120315 (2006)	HD 218045 (2007)	HD 87901 (2008)	HD 87901 (2010)
7690 Å	1.35-1.45	1.17-1.23	1.33-1.42	0.99-1.07
6300 Å	1.40	1.11	1.41	1.02
6935 Å	1.33	1.20	1.41	1.12

다. 만약 단일 흡수선에서 정확히 계산한 H₂O 농도 척도를 적용하여 스펙트럼을 계산하면 H₂O에 의한 흡수를 제외한 나머지 흡수선의 세기는 O₂ 농도 척도를 조정하여 맞춰줄 수 있다. 이 방법을 이용하면 보다 정확한 O₂ 농도 척도를 추정할 수 있다고 판단하여 혼합된 선에서 다시 농도 척도를 계산하였다. 또한 처음에 계산한 O₂ 농도 척도와 비교하여 최종 O₂ 농도 척도가 전체 스펙트럼에 잘 적용되는지도 검토하였다. 새로 측정된 O₂ 흡수선 영역은 6300 Å 및 6935 Å이며 H₂O 흡수선과 함께 나타난다.

H₂O 분자에 의한 영향이 가장 적은 7690 Å 영역에서는 노이즈가 심해 O₂ 농도를 0.01 척도 단위로 바꿔가면서 모델을 수정하고 잔차를 확인하여 범위로 값을 매겼다. 이렇게 구한 O₂ 농도 척도는 0.99 - 1.45 정도의 변화폭을 가졌다. 그리고 앞서 계산한 H₂O 농도 척도를 적용하여 구한 O₂ 농도 척도는 Table 4와 같다.

전체적으로 7690 Å 영역에서 계산한 O₂ 농도 척도와 6300 Å 및 6935 Å 영역에서 계산한 O₂ 농도 척도가 크게 다르지 않기 때문에 유효한 값으로 판단할 수 있다. 그러나 O₂ 농도 척도는 H₂O의 농도 척도와 반대로 같은 날짜에 관측한 스펙트럼에서 파장에 따라 변화가 소폭 있으며 다른 시기에 관측한 스펙트럼에도 차이가 있다.

Figure 7, 8 및 9는 각각 7690 Å, 6300 Å 그리고 6935 Å 영역에서 피팅한 결과이다. 7690 Å 영역은 노이즈가 심하지만 흡수선 피팅 결과는 상당히 만족스럽다. 6935 Å 영역은 H₂O 흡수선과 혼합되어 있음에도 대부분의 흡수선이 노이즈 수준 이하의 차이를 보인다. 6300 Å 영역은 노이즈가 심하지 않기 때문에 피팅이 더욱 잘 된다. 특히 O₂에 의한 흡수 대비 H₂O에 의한 흡수가 다른 영역보다 상대적으로 큰 부분인데도 불구하고 관측스펙트럼과 인공 스펙트럼의 차이가 거의 없다. 세 영역에서 계산된 RMS는 0.003 - 0.03 사이 값을 가진다. 관측한 표준성 스펙트럼과 계산한 스펙트럼의 세기의 차이는 H₂O 영역의 피팅 결과와 유사한 값을 보여주고 있다(1 - 2%).

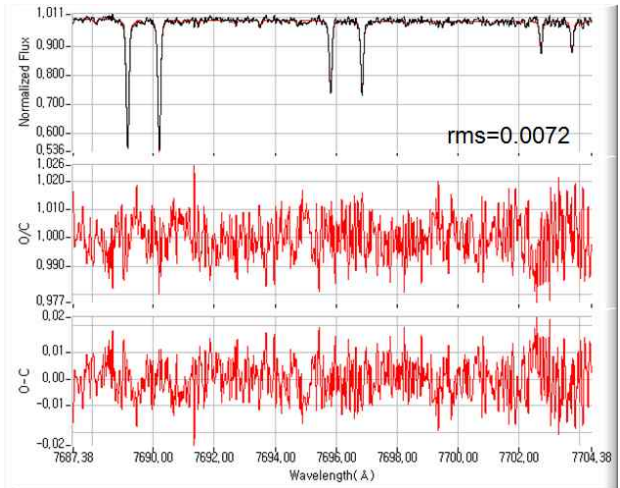


Figure 7. Same as Figure 5 but for Oxygen (O₂) lines on 7690 Å region.

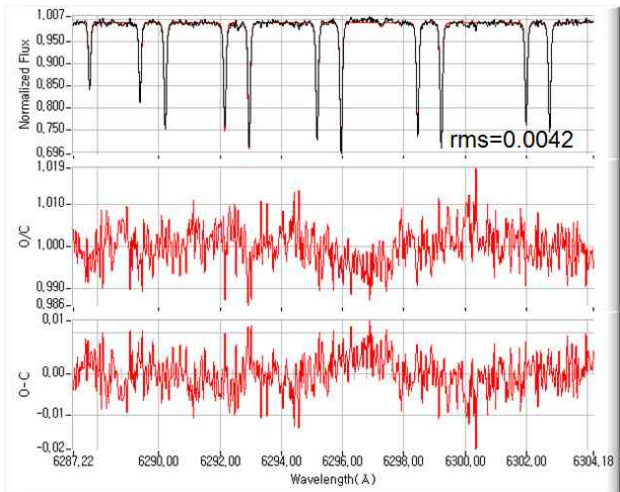


Figure 8. Same as Figure 7 but there are some blending with H₂O on 6300 Å region.

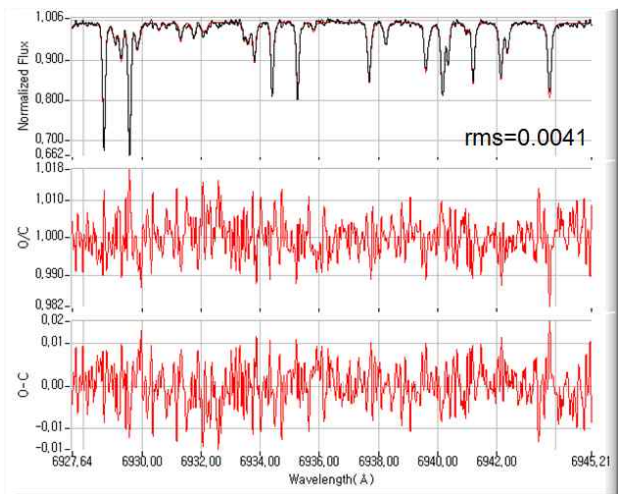


Figure 9. Same as Figure 7 but there are some blending with H₂O on 6935 Å region.

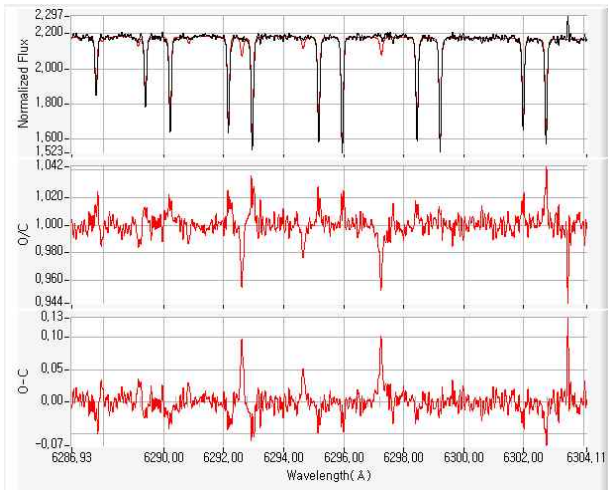


Figure 10. The disparity between observed and calculated spectrum.

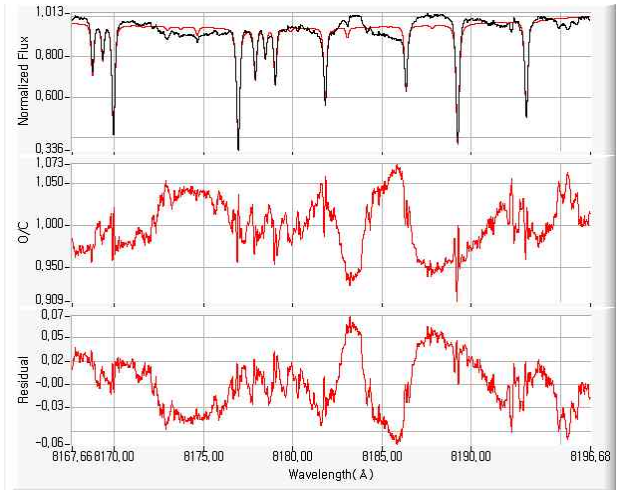


Figure 12. The fit where a continuum is irregular.

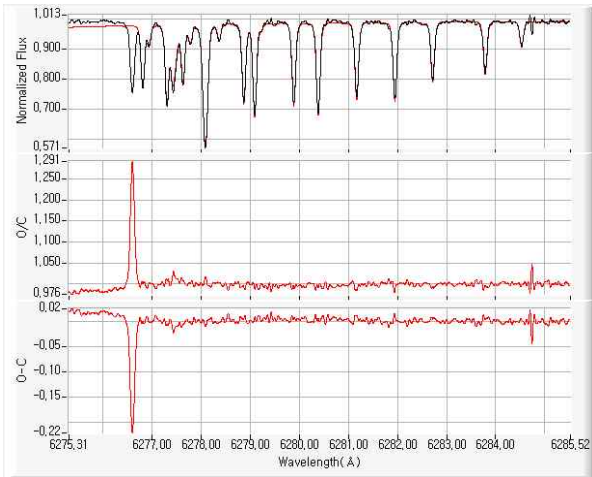


Figure 11. The result of fit on 6280 Å region.

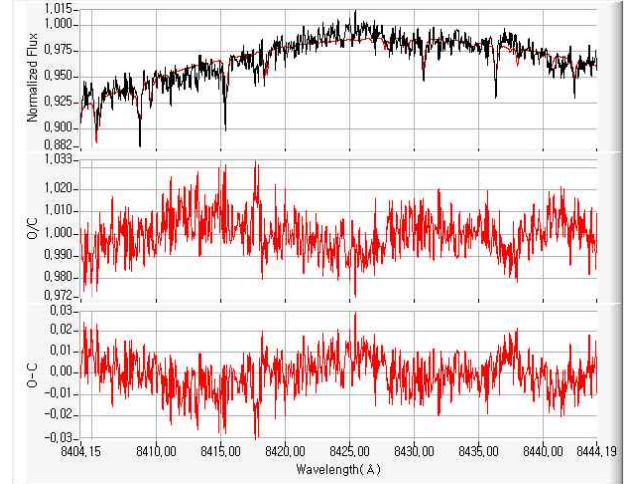


Figure 13. The fit in noisy region.

5.3. 피팅한계

앞선 결과에서 대기흡수선이 깔끔하게 피팅되었음을 알 수 있다. 하지만 경우에 따라서는 피팅이 잘 되지 않거나 피팅한 결과가 이상하게 나타나는 경우가 있다. Figure 10(맨위 그림) 에서 관측 스펙트럼과 달리 계산된 스펙트럼 상에서 여러 개의 흡수선들이 보인다. 이 원인으로는 몇 가지를 추정해 볼 수 있겠다. 모델링 할 때 쓰이는 라인정보가 잘못 입력되었거나 관측 스펙트럼의 전처리가 잘못된 경우 혹은 농도 척도를 제대로 결정하지 못한 경우에 해당이 될 수 있다. 확인한 결과, 제대로 피팅이 되지 않았던 것은 농도 척도를 정확히 결정하지 못해 나타난 현상이었다. 따라서 이처럼 인위적으로 발생한 경우가 아닌 시스템 상에서 나타날 수 있는 보다 근본적인 문제점에 대해 다루고자 한다.

5.3.1. HITRAN 데이터베이스에 의한 문제점

피팅과정에서 관측 스펙트럼을 모델링한 스펙트럼으로 나눈 값이 급격하게 튀는 부분이 가끔씩 보인다. 이런 부분은 라인정보가 잘못 입력되어 생기는 경우가 많다.

Figure 11에서 6276.6 Å 부근이 뚜렷하게 다른 모습을 보인다. 그림의 맨 위의 그래프는 관측 스펙트럼(검은색)과 모델링한 스펙트럼(빨간색)을 비교하기 위해 겹쳐서 보여주고 있다. 스펙트럼의 왼쪽 부분을 보면 관측 스펙트럼에는 흡수선이 있지만 모델링한 스펙트럼에는 흡수선이 보이지 않는다. 이렇게 나타나는 원인을 파악하기 위해 세 표준성(HD 87901, HD 120315, HD 218045)의 관측 스펙트럼을 살펴보았다. 그 결과 모든 표준성에 똑같은 세기의 흡수선이 존재함을 확인하였다. 때문에 이는 표준성의 흡수선이 아니라 대기흡수선

이라는 결론을 내릴 수 있었다. 다시 말해 HITRAN 데이터베이스에 해당 라인정보가 누락되었다고 판단된다.

5.3.2. 연속선과 노이즈에 의한 문제점

본 연구에서 사용된 스펙트럼은 자료처리과정을 거쳐 얻은 1차원 스펙트럼으로 상대적으로 장파장 영역에서 노이즈가 심하다. 또한 스펙트럼 각각의 차수(order) 양 끝 부분은 데이터의 질이 좋지 않으므로 이 부분들을 사용할 때 유의하여야 한다. 일반적으로 연속선이 지지 분하더라도 대부분의 경우 피팅이 가능하다. 간혹 본래의 스펙트럼 모습에서 크게 벗어난 경우는 피팅이 불가능한 경우도 있는데 이런 상황에서는 다른 구간을 찾는 것이 좋다(Figure 12).

반면 흡수선의 세기와 노이즈의 세기에 큰 차이가 없어도 피팅이 가능하다(Figure 13). 하지만 관측 스펙트럼을 모델링한 스펙트럼으로 나눈 값이 기존의 관측 스펙트럼보다 좋지 않은 경우가 있으므로 결과를 비교하여 피팅여부를 결정하는 것이 좋다. 대기 흡수선을 제거하면 대개 노이즈 진폭 범위 안으로 들어오기 때문에 노이즈는 정확한 농도 척도를 구하는 데 방해가 되지만 피팅을 할 경우에는 문제가 되지 않는다. 연속선의 경우 조금만 틀어지거나 3차 이상의 곡선 형태를 보이는 경우 피팅 결과가 좋지 않으므로 연속선이 잘 결정된 파일을 사용하는 것이 좋다.

5.3.3. 기기윤곽에 의한 문제점

앞서 4장에서 기기윤곽 모델링에 대해 알아보았다. 이렇게 가우스 모델이 혼합된 기기윤곽을 이용하기 위해 각각의 가우스 모델 사이의 거리, 보조 모델의 분산(σ)을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 쉽게 모델링하기 위해 주 가우스 모델을 기준으로 보조 가우스 모델이 서로 대칭이 되도록 설정하였다. 먼저 기준 가우스 모델과 떨어진 거리를 임의로 결정하였다. 거리는 σ 를 기준으로 삼아 적절하게 바꾸어주었다. 다음 각각의 모델 σ 값을 변화시켜주면서 피팅을 하였다(Table 5). 이 과정을 반복하여 RMS가 최소가 되는 지점을 찾고 단일 가우스 모델을 이용하여 피팅한 결과와 비교하여 기기윤곽을 모델링 하였다. RMS가 최소가 되는 모델은 $\sigma_1 = 0.5, \sigma_2 = 1, \sigma_3 = 1.5$ 인 모델이었다. 다음으로 잘 맞는 모델은 $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 2, \sigma_3 = 3$ 인 모델이었다.

우리는 RMS와 나뉜 스펙트럼을 확인하였을 때 보조 가우스 모델이 기준 가우스 모델과 가까이 있을 때 대체로 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 RMS 값만으로는 모델링한 기기윤곽이 실제 기기윤곽에 얼마나 근접하는지 판단할 수 없다. 그렇기 때문에 피팅하고 난 후 모델링한 기기윤곽의 모습과 비교해가

Table 5. Examination of modeling instrumental profile

1	distance	0.5σ	1σ	1.5σ
Set	$\sigma_d(\times\sigma)$	0.01	0.8	1.4
2	distance	0.7σ	1.4σ	2.1σ
Set	$\sigma_d(\times\sigma)$	0.05	0.7	0.6
3	distance	1σ	1.5σ	2σ
Set	$\sigma_d(\times\sigma)$	0.1	0.2	0.7
4	distance	1σ	2σ	3σ
Set	$\sigma_d(\times\sigma)$	0.2	0.7	0.2
5	distance	1.5σ	2σ	2.5σ
Set	$\sigma_d(\times\sigma)$	1.2	1.1	0.8
6	distance	2σ	2.5σ	3σ
Set	$\sigma_d(\times\sigma)$	0.7	1	2

며 가장 적당한 모델을 선택하였다. 비교적 보조 가우스 모델이 기준 가우스 모델과 가까이 있을 때 피팅이 더 잘 되었으나, 피팅을 하고난 후 기기윤곽을 보면 이는 모델로 적합하지 않다(Figure 14). 보조 가우스 모델이 기준 가우스 모델 사이 거리가 1σ 이하인 경우에는 모두 부적절한 모습의 기기윤곽으로 모델링 되었다. 스펙트럼에 적용하여 계산한 RMS, 잔차(residual)의 경향성, 기기윤곽의 모습 등을 종합하여 살펴본 결과 $\sigma_1 = 1.5, \sigma_2 = 2, \sigma_3 = 2.5$ 모델의 기기윤곽이 가장 적합하다고 판단하여 이 모델을 기기윤곽으로 채택하였다(Figure 15). 최종으로 결정된 모델은 단일 가우스 함수 모형과 크게 다르지 않다.

6. 토의

우리는 계산된 인공 흡수선 스펙트럼을 표준성 스펙트럼에 피팅한 결과 흡수선 스펙트럼 세기가 2% 이내에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 표준성 관측 스펙트럼의 질이 좋을 경우 1% 이내의 차이로써 노이즈와 구분이 되지 않을 정도로 대기 흡수선이 잘 계산되었다. 이는 Seifahrt et al.(2010) 이 발표한 결과 (~2%) 보다 조금 더 개선된 결과로 앞으로 대기 흡수선 제거에 더욱 유용하게 사용될 수 있을 것으로 본다.

우리는 여러 가지 변수들을 조정하면서 흡수선 계산 및 피팅을 하였는데 전체 과정에서 가장 중요한 요소는 분자의 농도를 결정하는 것이다. 왜냐하면 MIPAS 대기 모델이 부정확하기 때문에 계산된 스펙트럼의 흡수선의 세기가 실제 관측한 스펙트럼과 상당한 차이를 보인다. 이 문제의 해결방안은 농도 척도를 조정해주는 것으로 농도 척도를 잘 결정하면 만족스러운 피팅 결과를 얻을 수 있다. HITRAN 데이터베이스에서 라인정보가 누락된 문제 역시 해결해야 하는데 다행히도 가시광선 영역에서는 누락된 라인이 거의 없어 스펙트럼 전체를 피팅할

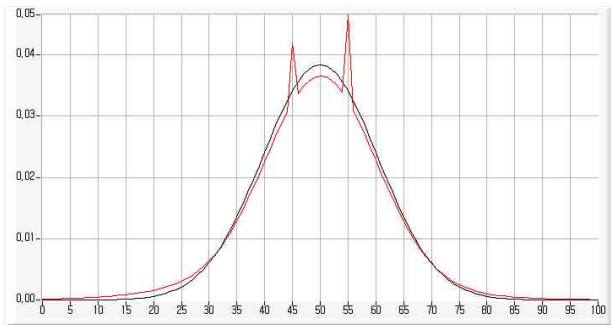


Figure 14. Instrumental profile after fit single Gaussian function (black) to model as $\sigma_1 = 0.5$, $\sigma_2 = 1$, $\sigma_3 = 1.5$ (red).

때 문제가 되지 않았다. 다만 다른 파장영역에서도 정확한 라인정보를 가지고 있는지 검증하고 라인목록을 정립할 필요가 있다. 이미 가시광선 영역의 라인정보는 명확히 알고 있기 때문에 BOES로 관측한 데이터를 활용할 경우 별도의 표준성이 없어도 대기흡수선을 제거할 수 있다. 이는 표준성을 따로 관측하지 못한 별의 아틀라스 제작이 가능하도록 만들어준다.

지금까지는 분광 스펙트럼 연구가 가시광선 영역에서만 주로 이루어졌지만, 최근 적외선분광기 개발이 활발해지면서 적외선 영역으로 연구의 폭이 넓어지고 있다. 따라서 대기 흡수선이 더욱 밀집된 적외선 영역에서 대기 흡수선 스펙트럼 계산 연구가 이루어져야 하겠다. 또한, 대기 흡수선 연구는 적외선 영역에서 정밀시선속도 측정을 위한 거리 잣대로 사용할 수 있으며, 외계행성 탐색연구 및 별 진동 연구 등 적외선 연구 분야의 초석이 될 것으로 기대한다.

REFERENCES

- Clough, S. A., Kneizys, F. X., Rothman, L. S., & Gallery, W. O., 1981, Atmospheric Spectral Transmittance and Radiance - FASCOD1B, SPIE, 277, 152
- Clough, S. A., Iacono, M. J., & Moncet, J. -L., 1992, A Research Program on Radiative Transfer Model Development in Support of the ARM Program, J. Geophys. Res., 97, 15761
- Jacquinet-Husson, N., et al., 1999, The 1997 Spectroscopic GEISA Databank, JQSRT, 62, 205
- Lord, S. D., 1992, A New Software Tool for Computing Earth's Atmospheric Transmission of Near- and Far-infrared Radiation, NASA Technical Memorandum 103957
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. C., et al., 2009, The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database, JQSRT, 110, 533

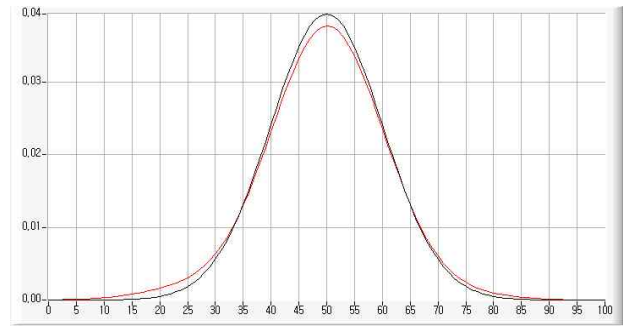


Figure 15. Same as Figure 14 but for $\sigma_1 = 1.5$, $\sigma_2 = 2$, $\sigma_3 = 2.5$ model.

- Rucinski, S., 1999, Determination of Broadening Functions Using the Singular-Value Decomposition (SVD) Technique, ASPC, 185, 82
- Scott, N. A., 1974, A Direct Method of Computation of the Transmission Function of an Inhomogeneous Gaseous Medium, JQSRT, 14, 691
- Scott, N. A. & Chedin, A., 1981, A Fast Line-by-line Method for Atmospheric Absorption Computations - The Automated Atmospheric Absorption Atlas, JApMe, 20, 802
- Seifahrt, A., Käufel, H. U., Zängl, G., et al., 2010, Synthesising, Using, and Correcting for Telluric Features in High-Resolution Astronomical Spectra, A&A, 524, 11
- Valenti, J. A., Butler, R. P., & Marcy, G. W., 1995, Determining Spectrometer Instrumental Profiles Using FTS Reference Spectra, PASP, 107, 966