

BOES 데이터를 이용한 정밀 시선 속도 추정 프로그램 RVI2CELL 개발
DEVELOPMENT OF RVI2CELL - A PRECISE RADIAL VELOCITY ESTIMATION
PROGRAM WITH BOES DATA

한인우, 김강민, 이병철, G. Valyavin
한국천문연구원

INWOO HAN, KANG-MIN KIM, BYEONG-CHEOL LEE, AND G. VALYAVIN

Korea Astronomy and Space Science Institute, 61-1 Whaam-dong Yuseong, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: iwhan@kasi.re.kr

(Received September 28, 2007; Accepted November 15, 2007)

ABSTRACT

In this study we present basic principles and features of RVI2CELL, a precise RV (radial velocity) estimation program to process stellar spectra obtained through iodine cell. RVI2CELL is very robust and fast program. The instrument profile can be modeled as a sum of Gaussian functions or a non-parametric arbitrary shape. The RV accuracy estimated by observation of a RV standard star Tau Ceti indicates about 9 m/s.

key words : BOES – radial velocity – spectroscopic observation

1. 서론

분광 관측을 통하여 얻을 수 있는 중요한 정보 중의 하나가 관측하는 천체의 시선 속도이다. 천체의 시선 속도 측정을 통하여 쌍성의 궤도부터 우주 팽창까지 다양한 천문 현상을 연구할 수 있다. 시선 속도 측정을 응용한 연구 중 또 하나 중요한 예는 외계행성 탐색을 들 수 있다. 이는 행성에 의한 별 시선 속도의 미세한 변화를 관측하여 행성의 존재를 간접적으로 확인하는 방법이다. 목성에 의한 태양의 시선 속도 변화가 약 10 m/s 정도이기 때문에 초기 외계행성 탐색을 시작할 때 10 m/s 정도의 시선 속도 측정 정밀도가 목표로 설정되었다.

분광 관측을 통한 정밀 시선 속도 측정에서 가장 문제가 되는 것은 기록된 스펙트럼의 정밀한 파장을 결정하는 것이다. 분광 관측에서 스펙트럼의 파장을 결정하는 방법은 먼저 천체의 스펙트럼을 기록하고, 이어서 방출선이 많은 비교 광원 스펙트럼을 기록하는 것이다. 비교 광원 스펙트럼에는 파장이 정확히 알려진 많은 방출선이 기록되므로 이를 이용하여 스펙트럼의 공간 좌표를 파장으로 변환하는 관계식을 구할 수 있다. 이 과정에서 가장 문제가 되는 것이, 천체 스펙트럼과 비교 광원 스펙트럼이 기록되는 경로와 시간이 다르다는 사실이다. 우선 천체 빛과 비교 광원 빛이 분광기를 통하여 기록 장치 (CCD 혹은 과거의 사진 건판) 까지 도달

하는 경로가 다르다. 따라서 천체의 스펙트럼과 비교 광원의 스펙트럼은 파장 스케일이 체계적으로 달라질 가능성이 있다. 또한 스펙트럼이 기록되는 시간이 차이 나기 때문에, 시간 변화에 따른 기기의 구조적인 변형 등으로 인하여 천체 스펙트럼과 비교 광원의 스펙트럼은 파장 스케일이 체계적으로 달라질 가능성이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 분광기는 구조적으로 최대한 견고하게 설계 제작하여야 한다. 그러나 분광기를 아무리 견고하게 제작하여도, 망원경에 부착할 경우 분광기가 망원경을 따라 움직이므로 구조 변형 문제를 근원적으로 해결하기 힘들다. 따라서 분광기를 온도 습도 등이 제어되는 안정된 장소에 고정으로 설치하고 쿠데 초점이나 혹은 광섬유를 이용하여 천체의 빛을 분광기에 입력시키기도 한다. 이렇게 분광기를 견고하게 하여도 천체와 비교 광원의 경로와 시간이 다른데서 생기는 문제는 근원적으로 해결되지 않는다. 이 문제를 해결하기 위하여 이용된 방법의 하나가 대기 흡수선을 파장 동정에 이용하는 것이다 (Griffin 1973). 이 방법은 천체 빛이 대기를 통과하기 때문에 천체 스펙트럼에 겹쳐서 기록되는 대기 흡수선을 파장 동정에 이용하는 것이다. 이 경우 대기 흡수선 스펙트럼은 천체 스펙트럼과 동시에 같은 경로를 통하여 기록되기 때문에 파장 동정에 체계적인 오차가 발생하지 않는다. 이 방법의 단점으로는 대기 흡수선이 있는 영역에서만 정밀한 파

장 동정이 가능하고, 대기 흡수선이 기상 상태에 따라 변한다는 점이다.

대기 흡수선 방법의 단점을 극복하기 위하여, 망원경을 통과한 별 빛의 경로 중간에 흡수선을 만들 수 있는 매체를 놓는 방안이 고안되었다. Campbell & Walker (1979)는 흡수선 매체로 HF 가스를 이용하였다. 이 기법을 이용하여 그들은 약 20 m/s 이하의 시선 속도 정밀도를 얻을 수 있었다. 그러나 HF는 유독성 가스이고, 사용 파장 범위가 100Å 이하로 제한되고, 100°C 정도의 높은 온도로 가열시켜야 하며, 가스 통과 길이가 1 m 정도로 길어야 되는 단점이 있다. 이에 HF 대안으로 제시된 것이 I₂ 가스이다 (Marcy & Butler 1992). I₂ 가스는 흡수선 범위가 5000 ~ 6300 Å 정도로 넓고, 요구되는 통과 길이가 10 cm 정도로 짧으며, 가열 온도가 50°C 정도로 낮고, 독성이 없는 장점이 있다. 그러나 I₂ 가스는 흡수선이 매우 많기 때문에 천체의 스펙트럼과 섞이게 되어 잘 구분이 되지 않는다. 따라서 이를 수학적으로 정교하게 모형화하여 구분하는 과정이 필요하다. I₂ 가스를 이용한 정밀 시선 속도 측정 기법은 1990년대 초반부터 관측에 실제 적용되기 시작하여 정밀 시선 속도 측정에 가정 널리 이용되는 기법이 되었다. 현재 이 기법을 이용한 측정 정밀도는 최고 3 m/s 정도인 것으로 알려졌다 (Butler et al. 1996). 앞에서 말했듯이 I₂ 가스는 흡수선이 매우 많기 때문에 정교한 수학적 모델이 필요하고 이를 구현하여 시선 속도를 추정하는 데이터 처리 프로그램이 상당히 복잡하다. I₂ 가스를 이용한 관측 기법과 데이터 처리법은 Butler et al. (1996), Endl et al. (2000), Sato et al. (2002) 등에 자세히 설명되어 있다.

보현산천문대 1.8 m 망원경용으로 개발된 고분산 분광기 BOES에는 정밀 시선속도 측정을 위한 I₂ 가스통이 설치돼 있다 (Kim et al. 2007). BOES는 2003년부터 본격적인 관측을 시작하여 현재 높은 효율과 뛰어난 성능을 보이고 있다. 본 연구에서는 BOES와 I₂ 가스통을 이용하여 얻은 스펙트럼을 처리하여 정밀 시선 속도를 추정하는 프로그램 RVI2CELL에 대하여 설명하고자 한다. RVI2CELL은 Butler et al. (1996)에 설명된 알고리즘을 기반으로 개발하였다. 2006년 중반에 개발이 완료되어 BOES 데이터를 처리하는데 이용되고 있다.

2. 요오드 통을 통하여 기록된 스펙트럼의 수학적 모델

기기 프로파일 (instrument profile)을 $IP(\lambda)$, 요오드 통 투과율 함수를 $T_2(\lambda)$, 별의 건본 스펙트럼

(template spectrum)을 $I_{temp}(\lambda)$ 라고 하면, 요오드 통을 통하여 기록되는 별 빛의 스펙트럼은 다음과 같은 컨벌루션 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{obs}(i) = SF(i) \times [I_{temp}(\lambda_i + \Delta\lambda) \times T_2(\lambda_i)] * IP(\lambda_i) \quad (1)$$

식 1에서 $I_{obs}(i)$ 는 관측된 스펙트럼의 i 번째 화소의 값이고, λ_i 는 i 번째 화소에 해당하는 파장이다. (λ_i 는 비교 광원을 관측하여 근사값은 알 수 있지만, 10 m/s 이하의 정밀 시선속도 측정에 필요한 정밀한 값은 요오드 통을 통한 관측 모델, 식 1을 이용하여 정밀하게 결정해야 되는 미지수임을 유의할 것.) $SF(i)$ 는 관측된 스펙트럼의 전체 모습을 나타내주는 스케일 함수로서 관측된 스펙트럼의 연속선 레벨 (continuum level)을 결정할 때 생기는 오차를 보정하기 위하여 필요하다. $\Delta\lambda$ 는 시선 속도에 의하여 생기는 스펙트럼의 도플러 편이를 나타낸다. $SF(i)$, λ_i , $\Delta\lambda$ 는 다음과 같은 다항식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} SF(i) &= s_0 + s_1 i + s_2 i^2 + \dots \\ \lambda(i) &= w_0 + w_1 i + w_2 i^2 + \dots \\ \Delta\lambda &= (v/c) \lambda = z \lambda \end{aligned} \quad (2)$$

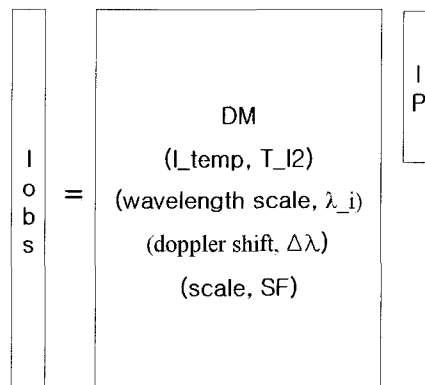
대개의 경우 $SF(i)$, λ_i 는 1차 선형식으로 충분하다. 식 1은 다음과 같이 이산 형태로 나타낼 수 있다.

$$I_{obs}(i) = SF(i) \times \sum_{j=1}^m I_{temp}(i-j) T_2(i-j) IP(j) \quad (3)$$

$$1 \leq i \leq n$$

식 3에서 I_{temp} 는 건본 스펙트럼이 $\Delta\lambda$ 만큼 이동된 함수, 즉 $I_{temp}(\lambda) = I_{temp}(\lambda + \Delta\lambda)$ 을 의미한다.

식 3은 다음과 같은 행렬식으로 표현하면 그 구조를 좀 더 쉽게 이해할 수 있다.



$$LOBS = A IP \quad (4)$$

LOBS는 관측된 스펙트럼으로 차원이 n 인 벡터, IP는 기기 프로파일로서 차원이 m 인 벡터이다. A는 흔히 Design Matrix로 불리는 행렬로서 차원이 $n \times m$ 이다. A의 원소는 식 3으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$A(i, j) = SF(i)I'_{temp}(i-j)T_{\ell}(i-j) \quad (5)$$

Design Matrix를 만드는 데는 기본 스펙트럼 I_{temp} 와 I_2 투과함수 T_{ℓ} 가 필요하고, 미지수 SF, 파장, 도플러 편이 z 가 필요하다.

기기 프로파일 IP 모델링

IP를 표현하는 방법은 두 가지가 있다. 우선 몇 개의 가우스 함수 $G(\sigma, x_c) = \exp[-\frac{1}{2}(\frac{x-x_c}{\sigma})^2]$ 의 합으로 나타내는 방법이다. 아래 그림 1은 중앙의 가우스와 양 옆에 있는 위성 가우스 한 쌍을 보여준다. 필요에 따라 몇 쌍의 위성 가우스 함수를 추가할 수 있다. 이렇게 표현되는 IP를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$IP = a_0G(\sigma_0, 0) + a_1G(\sigma_1, x_1) + b_1G(\sigma_1, -x_1) + a_2G(\sigma_2, x_2) + b_2G(\sigma_2, -x_2) + \dots \quad (6)$$

그림 1과 같이 표현하는 IP에서 중앙 가우스안은 높이와 폭을 모두 조정하지만, 옆에 있는 위성 가우스안은 폭과 위치는 고정하고 높이만 조정한다. 즉 미지수는 $a_0, \sigma_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots$ 이다. 따라서 IP를 잘 묘사할 수 있도록 위성 가우스 개수와 위성 가우스안의 위치 x_i 와 폭 σ_i 를 잘 정해야 된다.



그림 1. IP를 세 가우스안의 합으로 표현하는 예

3. 모델식 풀기

식 4는 행렬식으로 표현되어 선형 방정식처럼 보이지만 미지 파라미터에 대하여 비선형 방정식이다. (다만 IP 전체를 미지 벡터로 보면 IP에 대해서는 선형이다. 그렇지만 A에 있는 미지수에 대해서는 비선형이므로 전체적으로는 비선형 방정식이다.) 비선형 방정식은 다음과 같이 일반적으로 표현할 수 있다.

$$y = f(x) \quad (7)$$

y는 관측값으로 차원이 n 인 벡터, x는 미지 파라미터로서 차원이 m 인 벡터이다. 우리 경우에는 LOBS가 y에 해당하고, $SF(i), \lambda_i, \Delta\lambda, IP$ 에 들어 있는 미지수가 x에 해당한다. y와 x의 관계는 비선형 벡터 함수 f로 표시된다. 우리 경우에 함수 f는 식 3의 행렬식으로 표현된다.

비선형 최소자승법 식을 푸는 방법은 여러 가지가 알려져 있지만 Levenberg-Marquardt 방법이 널리 이용된다 (Press et al. 1992). Levenberg-Marquardt 방법에 대한 자세한 설명은 참고 문헌으로 돌리고, 여기에서는 아래와 같은 편미분식으로 표현되는 $n \times m$ 행렬을 계산하는 것이 핵심적인 과제이므로 이에 대하여 자세히 설명하기로 한다.

$$A(i, j) = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

3.1. 파라미터에 대한 모델식 편미분

비선형 최소자승식을 풀기 위한 핵심이 미지 파라미터에 대한 편미분을 계산하는 것이므로, 식 4에 대한 편미분을 좀 자세히 살펴보기로 한다. 식 4의 편미분을 계산하기 위하여 식 4를 다음과 같이 표현하면 편리하다. A의 i번째 행 (row)를 A^i 라고 하면 LOBS의 i번째 원소 LOBS(i)는 A^i 와 IP의 내적으로 표현된다.

$$LOBS(i) = y(i) = A^i \cdot IP$$

IP에 대한 편미분 : IP와 관련된 파라미터, 식 6의 $\sigma_0, a_0, a_1, b_1, a_2, b_2$ 에 대한 편미분은 A^i 와는 관계가 없으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial y_i}{\partial a_j} = A^i \cdot \frac{\partial IP}{\partial a_j}$$

위 편미분식은 해석학적으로 쉽게 계산할 수 있다.

SF에 대한 편미분 : SF에 관련된 파라미터, 식 2의 s_0, s_1, s_2 에 대한 편미분은 IP와는 관계가 없다. 따라

서

$$\frac{\partial y_i}{\partial s_j} = \frac{\partial A^i}{\partial a_j} \cdot IP$$

위 식도 해석적으로 쉽게 계산할 수 있다.

파장 스케일, 도플러 편이에 대한 편미분 : 식 2의

w_0, w_1, w_2, z 에 대한 편미분은 IP와는 관계가 없다. 따라서

$$\frac{\partial y_i}{\partial w_j} = \frac{\partial A^i}{\partial w_j} \cdot IP$$

그런데 이 파라메타에 대한 편미분은 해석적으로 구할 수 없고 수치적으로 구해야 한다. 식 4에서 가장 까다로운 편미분 계산 부분이다.

3.2. 재귀 절차

Gaussin IP

파장 스케일 파라메타와 위성 가우스 함수 파라메타를 동시에 조정하면 식이 불안해진다. 따라서 처음에는 위성 가우스는 모델에 포함하지 않고 식을 푼다. 모든 파라메타가 충분히 수렴하면, 이때 다른 파라메타를 고정하고 위성 가우스를 모델에 포함시켜 위성 가우스 파라메타를 조정한다. 위성 가우스 파라메타가 수렴하면, 위성 가우스는 고정하고, 다른 파라메타를 조정한다.

Non-parametric IP 벡터

step 0 : 앞에서 설명한 위성이 없는 Gauss IP 방법으로 파라메타를 구한다.

step 1 : step 0에서 구한 파라메타를 이용하여 식 4의 design matrix \mathbf{A} 를 구한다. \mathbf{A} 가 고정되면 식 4는 IP 전체를 미지 파라메타로 간주할 때 선형 최소자승법 문제가 된다. 이 선형 최소자승법 문제는 SVD (Singular Value Decomposition) 알고리즘을 이용하여 푼다 (Press et al. 1992). SVD 알고리즘에서 IP의 미지수 개수를 적절하게 정하는 것이 매우 중요하다.

step 2 : step 1에서 결정된 IP를 고정하고 식 4에서 \mathbf{A} 에 있는 파라메타를 다시 구한다.

step 1, 2를 모든 파라메타가 수렴할 때 까지 반복한다.

IP 전체를 미지수로 간주하는 알고리즘은 위성 가우스에 대하여 신경 쓸 필요가 없이 어떤 IP든지 잘 모델링 해주는 장점이 있지만 Gauss IP에 비하여 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

3.3. 데이터 처리를 위한 몇 가지 준비

관측된 데이터를 실질적으로 처리하는데 필요한 사항들을 설명하기로 한다.

데이터 처리 파장 범위

I_2 흡수선이 충분히 강한 5000 ~ 5900Å을 사용한다. 이 범위 내에서 관측하는 천체에 따라 천체의 흡수선이 충분히 있는 부분을 선택해야 된다.

데이터 처리 파장 범위

기기 프로파일의 파장 대역에 따라 변하기 때문에 이를 충분히 정확하게 모델링하기 위하여 한번에 처리하는 스펙트럼의 파장 대역을 제한한다. 이렇게 한번에 처리하는 스펙트럼의 한 부분을 구역 (chunk) 이라고 부른다. 구역 크기는 식 4의 \mathbf{Lobs} 벡터의 크기를 의미한다. BOES의 경우에는 100에서 200 화소 정도가 적당하다. 구역의 크기는 천체 스펙트럼에 흡수선이 얼마나 베게 있는지를 고려해야 된다. 흡수선이 성기면 구역을 좀 크게 잡는 것이 좋다.

IP 크기 : 식 4의 IP 벡터의 크기

IP가 영으로 떨어지는 부분을 충분히 포함하도록 잡아야 한다. BOES의 경우에는 15 픽셀이면 충분하다.

Over-sampling factor

IP를 충분히 잘 표시하기 위하여 식 4에서 \mathbf{Lobs} 의 한 픽셀을 몇 개의 서브 픽셀로 잘게 나누어 처리한다. 즉 인위적으로 \mathbf{Lobs} 의 분해능을 높이는 것이다. BOES의 경우 한 픽셀을 5 개 정도의 서브 픽셀로 나누는 것이 적당한 것으로 보인다.

I_2 투과 함수 $T_L(\lambda)$

식 4에서 보듯이 I_2 를 이용한 정밀 시선속도 추정에는 오드통의 투과 함수 $T_L(\lambda)$ 가 필요하다. 이 함수는 요 오드 통에 플랫 비교 광원을 입사시키고 통과된 빛을 고분산 분광기를 이용하여 스펙트럼을 얻어 측정할 수 있다. BOES의 경우 Kitt Peak의 푸리에 변환분광기 (Fourier Transformation Spectrograph)를 이용하여 $T_L(\lambda)$ 를 측정하였다.

전본 스펙트럼 $I_{temp}(\lambda)$ 만들기

$I_{temp}(\lambda)$ 를 만드는 과정은 다음과 같다.

(1) 흡수선이 없는 텅스텐 할루겐 비교 광원, 혹은 빨리 자전하는 조기형 별 빛을 요오드 통에 통과시키고 스펙트럼을 얻는다. 이렇게 하여 얻은 스펙트럼은 다음과 같이 수학적으로 묘사된다.

$$Y_{obs}(i) = SF(i) \times [T_E(\lambda_i)] * IP(\lambda_i)$$

위 식은 2 장의 식 1과 비슷하지만 도플러 편이가 없어 더 간단한 형식이다. 따라서 2 장에 설명한 절차에 따라 최소 자승법 식을 풀 수 있다. 그 결과 얻는 것은 얻은 스펙트럼의 각 픽셀의 파장과 매 구역 (CHUNK)의 기기 프로파일 IP 이다.

(2) 앞의 스펙트럼을 얻기 바로 전 혹은 후에 관측하고자 하는 별의 스펙트럼을 요오드 통 없이 얻는다. 이렇게 얻어진 스펙트럼은 다음과 같이 수학적으로 표현할 수 있다.

$$I_{obs}(i) = SF(i) \times I_{temp}(\lambda_i) * IP(\lambda_i)$$

위 식에서 우리는 파장 스케일과 각 구역의 IP는 (1)과 동일하다고 가정한다. 두 스펙트럼을 기록하는 시간 차이가 아주 작기 때문에 타당한 가정이다. 이제 우리의 목표는 관측된 스펙트럼 I_{obs} 과 (1)에서 구한 $\lambda_i, IP(\lambda_i)$ 을 이용하여 분해능이 향상된 건본 스펙트럼 $I_{temp}(\lambda_i)$ 를 구하는 것이다. 이를 간단히 말하면 위 식을 디컨벌브하는 것이다. 디컨벌브션 방법에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 다음과 같은 재귀법을 사용하였다. I_{temp} 의 i 번째 근사값을 I_i 라고 하고, 다음과 같이 ΔI_i 를 구한다.

$$\Delta I_i = I_{obs} - I_i * IP$$

그리고 $i+1$ 번째 근사값을 다음과 같이 구한다.

$$I_{i+1} = I_i + \Delta I_i$$

위 재귀 과정에서 맨 처음 초기 근사값 I_0 는 I_{obs} 를 이용한다. 위 재귀 과정은 ΔI_i 가 관측값 I_{obs} 의 신호대 잡음비 내에서 일치할 때 멈춘다.

4. RVI2CELL

앞에서 설명한 알고리즘에 따라서 요오드 통을 통과한 스펙트럼을 처리하여 정밀한 시선 속도를 추정하는 프로그램 RVI2CELL을 개발하였다. RVI2CELL은 National Instrument 사에서 제공하는 C 컴파일러인 LabWindows/CVI를 이용하여 개발하였다. 이 프로그램은 기본적으로 GUI 환경을 제공하며, 사용자가 처리하고자 하는 스펙트럼의 각 구역 (chunk)를 IP 파라미터 등을 바꿔 가며 하나 하나 처리할 수도 있다.

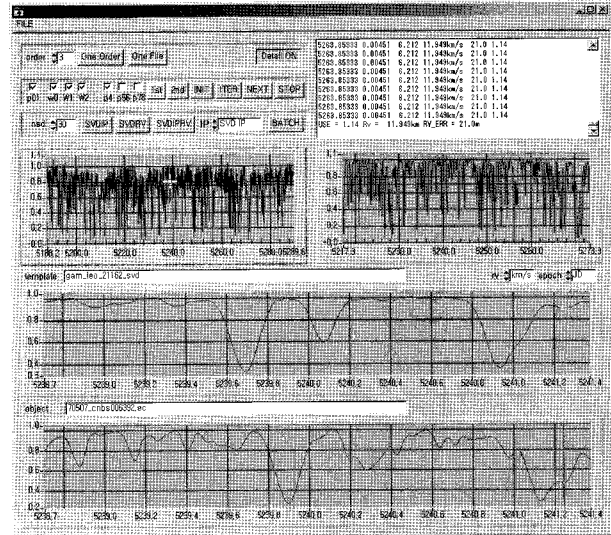


그림 2. RVI2CELL의 메인 창

이는 초기에 분광기의 특성을 잘 모를 때 최적의 처리 조건을 찾는 데 이용된다. 대부분의 경우는 많은 스펙트럼을 사용자 개입 없이 자동으로 처리하는 배치 모드로 사용된다.

RVI2CELL을 실행시키기 위해서는 몇 개의 입력 파일이 필요하다.

- RVI2CELL.INP : 위성 가우스의 개수, 위치와 폭 등의 정보가 들어있고, 또한 3.3 절에 있는 몇 가지 파라미터 (구역 화소 개수, IP 화소 개수 등)가 들어있다.
- STARINFO.INP : 지구의 공전 및 자전에 의한 천체의 시선 속도 변화를 보정해주고, 관측 시간을 태양계 중심으로 바꾸어 주어야 한다. 이에 필요한 관측 천체의 좌표와 관측지의 경위도 등이 이 파일에 들어있다. RVI2CELL에서는 JPL에서 배포하는 DE200/LE200을 이용하여 지구의 위치와 속도를 정밀하게 계산한다.

RVI2CELL을 실행하면 아래 그림 2와 같은 화면이 보인다.

그림 2 맨 위쪽 좌측 그래프가 요오드 통을 통하여 관측된 천체 스펙트럼의 한 오더 (order)를 보여주고, 우측 그래프는 그에 해당하는 건본 스펙트럼이다. 그 아래 중간 그래프가 건본 스펙트럼의 한 구역 (chunk), 맨 아래가 천체 스펙트럼의 한 구역을 보여준다. 천체 스펙트럼과 건본 스펙트럼을 살펴보면 천체 스펙트럼이 건본 스펙트럼에 비하여 도플러 편이가 있고, 요오드 통 흡수선이 중첩되어 기록되어 있는 것

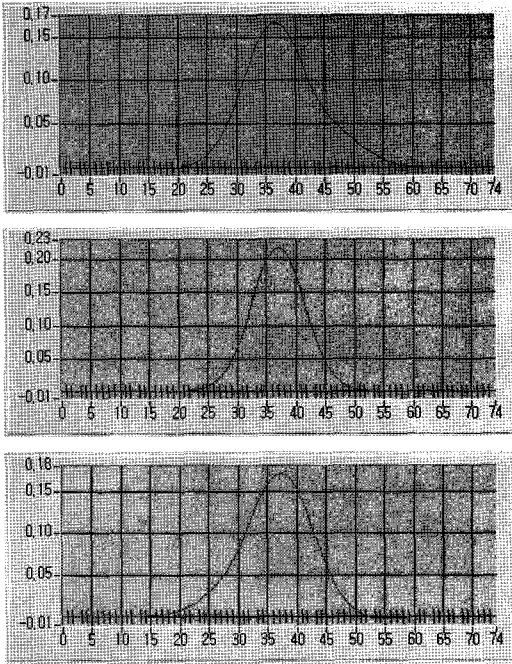


그림 3. 스펙트럼 오더 내의 위치에 따른 기기 프로파일의 변화. 위: 단파장 부분, 중간: 중앙 부분, 아래: 장파장 부분

을 알 수 있다. RVI2CELL의 주 임무는 두 스펙트럼의 관계를 묘사하는 식 4를 풀어 미지 파라미터, 기기 프로파일 IP와 도플러 편이 등을 구하는 것이다. BOES의 경우 오더 내에서 IP의 모습이 위치에 따라서 그림 3과 같이 상당히 변하는 것을 알 수 있다. 이는 결상 카메라의 광학계 특성에 의한 것으로 보인다. 아래 그림이 이를 잘 보여준다. 중앙부에서는 상이 거의 대칭적이고 폭도 좁지만, 오더의 가장자리 장파장, 단파장 쪽에서는 IP 폭이 커지고 대칭성이 깨지는 것을 볼 수 있다. 중앙부에서는 중앙 가우시 함수의 시그마 값이 0.9 픽셀 정도인데, 장파장이나 단파장 쪽에서는 1.2 픽셀 정도로 커진다. 모델링 정밀도는 관측 S/N 비에 따라 달라지는데, 보통 중앙 부분에서 0.5 % 정도이고 가장자리로 가면 1 % 정도로 떨어진다.

5. 논의 및 결론

RVI2CELL과 BOES의 정밀도를 체크하기 위하여 RV 표준성인 Tau Ceti를 지속적으로 관측하였다. 아래 그림 4가 2003년부터 관측한 Tau Ceti의 RV 이다. RV 표준 편차가 8.9 m/s 정도이다. 이는 데이터 처리

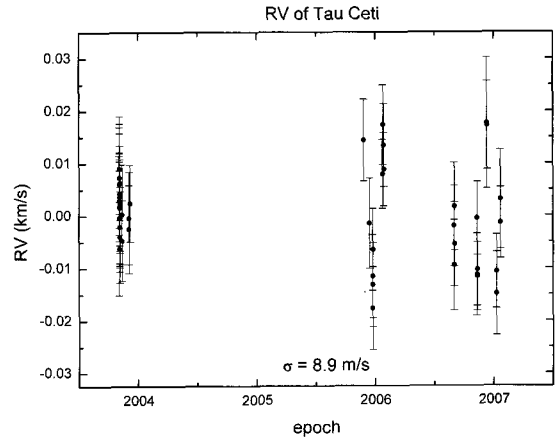


그림 4. RV 표준성 Tau Ceti 관측 결과

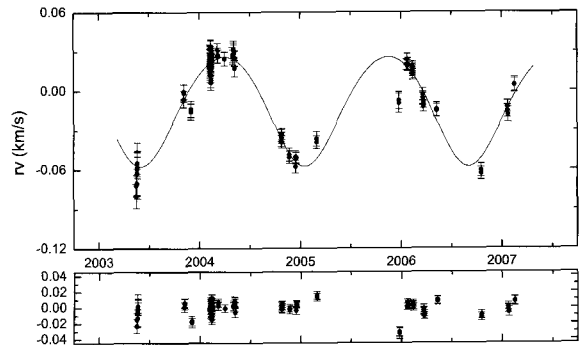


그림 5. 위 그림 : Beta Gem의 RV 관측 결과와 궤도 (주기 584일, RV 진폭 42 m/s).

아래 그림 : 관측 값에서 궤도를 뺀 잔차 (r.m.s. 8.1 m/s).

과정에서 예측한 정밀도 (그림 4의 에러 바)와 잘 일치하는 값이다.

RVI2CELL과 BOES의 정밀도를 추정할 수 있는 또 하나의 예로 외계 행성이 발견된 Beta Gem (HD 62509)의 관측 결과를 그림 5에 제시한다. BOES를 이용한 Beta Gem의 자세한 관측 결과는 Han et al. (2007)에 자세히 설명되어 있다. Beta Gem은 K 거성으로 고유한 RV 변화가 있을 것으로 생각된다. 따라서 Beta Gem의 관측 결과는 BOES와 RVI2 CELL의 정밀도가 8 m/s 이내로 들어온다는 것을 시사해준다.

현재 BOES의 RV 정밀도를 제한하는 요소가 무엇 인지는 확실치 않다. RVI2CELL의 한계일 수도 있고, 관측 데이터의 S/N 비, IP 변화 등에 기인할 수도 있다. 프로그램 측면에서는 건본 스펙트럼을 만드는 과

정에서 디컨버루션 알고리즘을 개선할 필요가 있으며, BOES 측면에서는 오더의 가장자리에서 IP가 나빠지는 것을 개선할 필요가 있는 것으로 추측된다.

Precise Radial Velocity Measurements, PASJ 54, 873

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학재단에서 지원한 한일공동연구 과제 (과제 번호 F01-2005-000-10114-0) 연구비 지원을 받았습니다.

참고 문헌

- Butler, P., Marcy, G., Williams, E., McCarthy, C., and Dosanjh, P. 1996, Attaining Doppler Precision of 3 M s⁻¹, PASP, 108, 500
- Campbell, B., and Walker, G. A. 1979, Precision radial velocities with an absorption cell, PASP, 91, 540
- Endl, M., Kurster, M., & Els, S. 2000, The planet search program at the ESO Coudé Echelle spectrometer. I. Data modeling technique and radial velocity precision tests, A&A 362, 585
- ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200
- Griffin, R. F. & Griffin, R. E. 1973, On the possibility of determining stellar radial velocities to 0.01 km s⁻¹, MNRAS, 162, 243
- Han, Inwoo., Lee, Byeong-Cheol., & Kim, Kang-Min., 2007, PKAS submitted
- Kim, Kang-Min, Han, Inwoo, Valyavin, G. G., Plachinda, S., Jang, Jeong Gyun., Jang, Be-Ho., Seong, Hyeon Cheol., Lee, Byeong-Cheol., Kang, Dong-Il., Park, Byeong-Gon., et al., 2007, The BOES Spectropolarimeter for Zeeman Measurements of Stellar Magnetic Fields, PASP, 119, 1052
- Marcy, G. & Butler, P., 1992, Precision radial velocities with an iodine absorption cell, PASP, 104, 270
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P., 1992, Numerical Recipes in C : the art of scientific computing, 2nd ed. Cambridge University Press
- Sato, B., Kambe, E., Takeda, Y., Izumiura, H., & Ando, H., 2002, Development of Iodine Cells for the Subaru HDS and the Okayama HIDES: II. New Software for