

대기 흡수선을 이용한 시선속도 측정 정밀도 향상
IMPROVEMENT OF RADIAL VELOCITY MEASUREMENT ACCURACY
BY TELLURIC LINES

한인우¹, 김강민¹, 강동일², 이병철^{1,3}

¹한국천문연구원
²경상남도과학교육원
³경북대학교

INWOO HAN¹, KANG-MIN KIM¹, DONG-IL KANG², AND BYEONG-CHEOL LEE^{1,3}

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

²Gyeongsangnamdo Institute of Science Education, 75-18 Gajinri, Jinsungmyeon, Jinju,
Gyeongnam 660-851, Korea

³Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

E-mail: iwhan@kasi.re.kr

(Received November 04, 2009; Accepted November 26, 2009)

ABSTRACT

We present a method to improve the RV (radial velocity) measurements accuracy by using telluric lines. Telluric lines are used to estimate the wavelength scale drift over the detector of the spectrograph. In the case of BOES, the Echelle spectrograph at BOAO (Bohunsan Optical Astronomical Observatory), the wavelength scale drift can be several hundreds m/s over 24 hours. Due to the wavelength scale drift, the RV measurements accuracy of BOES is limited to several hundreds m/s. By estimating the wavelength scale drift by telluric lines, we can remove its effect to improve the RV measurements accuracy to about 40 m/s.

key words: BOES - radial velocity - spectroscopic observation - telluric line

1. 서론

천체 스펙트럼의 도플러 편이를 이용하여 측정하는 천체의 시선속도는 우주를 연구하는 가장 중요한 수단 중의 하나이다. 이를 이용하여 쌍성의 궤도 운동이나 항성 맥동부터 우주의 팽창 등 많은 문제를 연구할 수 있다. 시선 속도 측정 정밀도가 향상됨에 따라 과거에는 다룰 수 없었던 주제들을 연구할 수 있게 되었다. 1990년대 들어 시선 속도 측정 정밀도가 10 m/s 정도로 향상되어 1995년에 최초로 외계행성을 발견하게 된 것이 대표적인 예라고 할 수 있다.

천체의 시선 속도 측정 정밀도에 영향을 미치는 요인은 광량자 잡음, 분광기 분해능, 스펙트럼에 있는 흡수선 분포 등 여러 가지가 있지만, 궁극적인 한계는 기본적으로 천체 스펙트럼의 파장 동정 오차에 의하여 주어진다. 스펙트럼의 파장 동정은 다수의 방출선을 내는 비교 광원의 스펙트럼을 이용하는데, 비교 광원으로는 대개 Th-Ar 램프를 사용한다. 스펙트럼의 파장 동정 과정은 다음과 같이 간략하게 설명할 수 있다. 먼저 분광기에 비교 광원 빛을 통과시켜 얻은 스펙트럼 이미지에서 1차원 스펙트럼을 추출하면 다수의 방출선이 나타난다. 이 중에서 파장이 알려져 있고 세기가 적당하며

주변 방출선과 잘 구분되는 선들을 선택한다. 이렇게 선택된 선들의 중심 위치를 1차원 스펙트럼 화소 좌표계에서 구한 값 $X(j)$ 와 파장 값 $\lambda(j)$ 를 적당한 차수의 다항식으로 피팅을 하면 1차원 스펙트럼의 임의의 화소에 해당하는 파장을 결정할 수 있게 된다. 이렇게 계산된 다항식 함수 $\lambda = f(X)$ 에 의하여 각각의 스펙트럼 화소에 파장이 결정된 것을 **파장 눈금**이라고 부르기로 한다.

파장 눈금 오차 및 그 제거 방법

보통 분광 관측 절차는 하루 밤 관측 중 시작 혹은 마지막에 비교 광원 스펙트럼을 얻는다. 더 주의 깊은 관측자는 중간에 몇 번 비교 광원 스펙트럼을 얻기도 한다. 이렇게 얻은 스펙트럼들을 이용하여 파장 눈금을 결정하고, 이 결과를 적절히 평균하거나 분배하여 그날 밤 얻은 다른 천체 스펙트럼에 적용한다. 그런데 이런 방식의 파장 동정에서 문제가 되는 것은 관측 중 온도, 습도 등 주변 환경의 변화에 따라 분광기의 광기계적 구조가 변하기 때문에 분광기 검출기에 맺히는 스펙트럼의 위치가 변하게 된다는 점이다. 따라서 특정 시점에 얻은 비교 광원 스펙트럼을 이용하여 얻은 파장 눈

금을 다른 시점의 스펙트럼에 적용하면 오차가 발생한다. 이렇게 발생하는 파장 눈금 오차가 시선속도 측정에서 가장 큰 오차 요인으로 작용한다. 이 파장 눈금 오차를 줄이려면 우선 분광기 주변의 환경 (온도, 습도, 기압 등)을 최대한 일정하게 유지시켜야 한다. 정밀한 환경 제어에 더하여 파장 눈금 오차를 줄이기 위한 방법으로 크게 다음의 두 가지 방법이 이용된다.

가) 병렬 기록법: 분광기 검출기에 기록되는 천체 스펙트럼 옆에 비교 광원 스펙트럼이 동시에 기록될 수 있도록 분광기를 설계하여 천체와 비교 광원의 스펙트럼을 동시에 얻는다. 그러면 각 스펙트럼마다 고유한 파장 눈금을 결정할 수 있으므로 파장 눈금 오차를 거의 완벽하게 줄일 수 있다. 이러한 접근법을 병렬 기록법이라고 부르기로 하자. 병렬 기록법을 이용한 대표적인 예로는 ESO에서 개발하여 사용하는 HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher)를 들 수 있다 (Pepe et al. 2000, Mayor et al. 2003). HARPS의 시선속도 측정 정밀도는 1 ~ 2 m/s 이하인 것으로 알려져 있다.

나) 중첩 기록법: 천체의 빛이 통과하는 구간에 흡수선이 많은 매체를 삽입한다. 그러면 천체 스펙트럼에 매체의 흡수선이 겹쳐서 나타난다. 이렇게 스펙트럼에 겹쳐서 기록된 매체의 흡수선을 이용하여 스펙트럼의 파장 동정을 할 수 있다. 이 과정은 수학적으로 다소 복잡하고 시간이 많이 걸리기 때문에 컴퓨터 기술의 발전으로 실제 적용이 가능하게 되었다. 이렇게 흡수 매질을 통과하여 천체 스펙트럼을 얻는 기법을 중첩 기록법이라고 하자. 중첩 기록법의 장점은 천체 스펙트럼과 비교 스펙트럼이 시간적으로 동시에, 그리고 공간적으로는 광학계에서 같은 경로를 거쳐 기록된다는 점이다. 따라서 시간 차이에 따른 파장 눈금 오차가 원천적으로 사라지고, 천체 빛과 비교 광원 빛이 광학계에서 다른 경로를 거쳐 기록되는 것에서 기인되는 파장 눈금 오차도 거의 없다. 이 방법의 단점은 매체의 스펙트럼이 중첩되어 기록되기 때문에 천체 스펙트럼의 S/N 값이 나빠지고, 다음으로는 정밀 시선속도 측정에 이용할 수 있는 스펙트럼 영역이 흡수 매체의 흡수선이 많이 나타나는 영역으로 제한된다는 것이다. 중첩 기록법은 1970년대에 HF 가스를 이용하여 Campbell & Walker (1979)이 개발한 것을 시작으로 하여 1980년대에 요오드 분자 I₂를 이용한 기술이 성숙되어 널리 이용되게 되었다 (Marcy, G. & Butler, P. 1992, Butler 등 1996). 보현산천문대의 BOES에도 정밀 시선 속도 측정을 위하여 요오드 통이 설치되어 있다 (Kim et al. 2002, Kim et al. 2007).

앞에서 정밀한 시선 속도 측정을 위한 중첩 기록법을

설명했는데, 분광기에 특별히 흡수 매체를 설치하지 않아도 대기 흡수선이 천체 스펙트럼에 중첩되어 기록된다. 이 대기 흡수선은 지상에서 행하는 분광 관측에서 방해가 되는 가장 큰 두통거리 중의 하나이다. 그러나 이것을 이용하여 시선 속도 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 파장 눈금 오차를 줄이는 방법이 제안되어 이용되었다 (Griffin & Griffin 1973, Gray & Brown 2006). 이 방법의 요점은 다음과 같다.

시간에 따른 분광기의 광기계적 변형에 의해 분광기 감지기에 기록되는 스펙트럼의 위치가 변하므로 특정 시점 T(i)에 얻은 스펙트럼 S(i)에 기록된 대기 흡수선의 파장 $\lambda(i)$ 는 일정하지 않고 변하게 된다. 따라서 파장 동정을 위하여 이용한 비교 광원 스펙트럼을 얻은 시점 T(0)에 해당하는 파장 눈금을 다른 시점 T(i)의 스펙트럼에 적용하면 오차가 발생하게 된다. 시간의 변화에 따라 파장 눈금 변화가 분광기 검출기 전면에서 나타나는 양상은 상당히 복잡하다. 그러나 검출기 전면에서 평균적으로 나타나는 눈금 변화량은 몇몇 대기 흡수선의 파장 변화를 측정하여 그 평균값을 이용하여 어림할 수 있다. 이렇게 하여 파장 눈금 변화를 보정하면, 파장 눈금 오차를 완벽하게 제거할 수는 없지만, 검출기 전면에서 평균적으로 발생하는 파장 이동 오차를 제거할 수 있을 것이다. 이 방법을 사용할 경우 제트 기류 등에 의한 상층 대기의 흐름에 의한 대기 흡수선 파장 이동 오차는 보정되지 않아 궁극적인 정밀도 한계가 주어진다.

이렇게 대기 흡수선을 잘 이용하면, 앞에 소개한 특별한 기법을 적용할 수 없는 스펙트럼의 경우에도 시선속도 측정 정밀도를 상당히 향상시킬 수 있다. 이 방법을 이용하려면 천체 스펙트럼과 대기 흡수선이 동시에 기록되어야 하기 때문에, 넓은 파장 영역을 동시에 관측하는 에셀 분광기로 얻은 스펙트럼에 적합하다. (대기 흡수선은 거의 대부분이 6,000Å 이상의 장파장 영역에 존재한다.)

이 논문의 목적은 대기 흡수선을 이용한 기법을 보현산천문대의 에셀 분광기 BOES로 얻은 스펙트럼에 적용하기 위한 구체적 절차와 프로그램을 개발하고, 그 결과 얼마나 시선 속도 정밀도가 향상되고 그 한계가 얼마나 되는지 조사하는 데 있다.

2. Th-Ar 비교 광원을 이용한 파장 눈금 이동 조사

BOES에서 시간에 따른 파장 눈금 변화를 조사하기 위하여 Th-Ar 비교 광원 스펙트럼을 이용하였다. Th-Ar 비교 광원 스펙트럼을 일정 시간 간격으로 얻어 CCD 상에 맺히는 방출선의 위치 변화를 측정하는 것이다. 2009.02.17 과 2009.04.04 양 일에 각각 약 24 시간 데이터를 얻었다. CCD 전면에서 걸쳐 파장 눈금이 변하

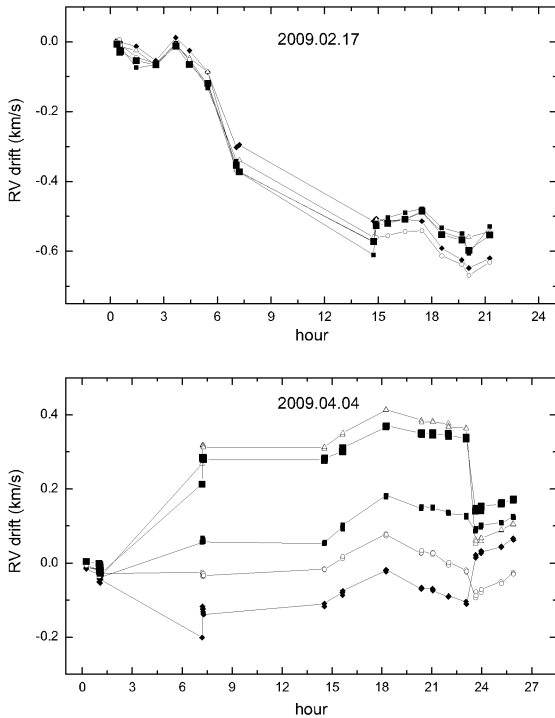


그림 1. 시간에 따른 파장 눈금 이동

는 양상을 보기 위하여 CCD의 네 귀퉁이와 중앙의 다섯 군데에서 방출선의 위치 변화를 측정하였다. 방출선의 위치 변화는 속도 변화로 환산하였다. 그림 1이 파장 눈금 변화 측정 결과를 보여준다.

그림 1을 보면 2009.02.17에는 약 21 시간동안 0.6 km/s 정도의 파장 눈금 변화가 있었고, 이 변화 양상은 CCD 표면 전반에 걸쳐 거의 동일하다. 그러나 2009.04.04의 경우에는 변화 양상이 상당히 복잡하다. 그림에서 맨 위에 보이는 두 줄은 CCD의 오른쪽 귀퉁이에 있는 방출선의 움직임으로 거의 동일한 양상을 보인다. 그러나 왼쪽 귀퉁이와 중앙에 위치한 방출선은 다소 다른 양상을 보인다. 그렇지만 그림을 잘 보면 6 시간 이후의 변화 양상은 다섯 군데 모두 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있다.

이 실험을 통해 우리는 BOES의 파장 눈금 변화가 24 시간 동안 수 백 m/s 정도의 변화를 보이며, 대체로 CCD 전면에서 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있다.

3. 대기 흡수선을 이용한 시선 속도 향상 방법

여기에서는 대기 흡수선을 이용하여 시선속도 측정 정밀도를 향상시키기 위한 구체적 절차에 대하여 설명하기로 한다. 우선 앞으로 진행하는 논의의 편의를 위하여 몇몇 용어와 기호를 정의하기로 한다.

용어 및 기호의 정의

$T(i)$: 특정한 관측 시각

$S(i)$: $T(i)$ 에 얻은 스펙트럼

$SPECT(i,j)$: $S(i)$ 의 특정 파장 영역을 잘라내어 얻은 파장 조각.

$SPECT(j)$: 영역 j 에 해당하는 건본 (template) 스펙트럼. 건본 스펙트럼은 합성 스펙트럼 혹은 관측된 여러 스펙트럼의 평균 등 여러 가지 방식으로 만들 수 있다.

$V(i,j)$: 건본 스펙트럼 $SPECT(j)$ 에 대한 $SPECT(i,j)$ 의 상대 시선속도.

특정 영역 j 의 건본 스펙트럼 $SPECT(j)$ 만들기.

A.0 전체 스펙트럼 중에서 S/N 비 등을 고려하여 가장 질이 좋은 스펙트럼이 얻어진 특정 시점 $T(i)$ 를 고른다. 이 스펙트럼에서 만들어진 $SPECT(i,j)$ 를 영역 j 의 초기 건본 스펙트럼으로 $SPECT(j)$ 로 삼는다.

A.1 건본 스펙트럼 $SPECT(j)$ 에 다른 스펙트럼 $SPECT(i,j)$ 을 최소자승법을 이용하여 피팅한다. 이 피팅 과정에서 조정하는 파라미터는 3가지로서 시선 속도 $V(i,j)$, 정규선 레벨의 스케일, 그리고 정규선 레벨의 기울기이다. 이 피팅의 의미는 건본 스펙트럼으로 정의되는 파장 눈금과 연속선 레벨에 다른 스펙트럼의 파장 눈금과 연속선 레벨을 맞추는 것이다. 이렇게 하여 각 스펙트럼의 연속선 레벨 결정 오차에 의한 영향이 제거된다. 피팅 과정에 대한 자세한 설명은 Butler 등 (1996)과 한인우 등 (2007)을 참조. 이렇게 피팅된 스펙트럼을 $SPECT_C(i,j)$ 라고 하자.

A.2 A.1에서 피팅된 스펙트럼 $SPECT_C(i,j)$ 을 시간 i 에 대하여 모두 더하여 평균값을 구하여 새로운 건본 스펙트럼 $SPECT(j)$ 을 계산한다. A.1의 피팅 과정에서 피팅 오차가 어떤 정해진 값보다 크게 나오는 스펙트럼은 평균 스펙트럼을 얻는 과정에서 배제할 수 있다. 이 과정에서 평균 스펙트럼과 다른 스펙트럼과의 차이값의 표준 편차, (즉 $SPECT_C(i,j)$ 의 i 의 분포에 대한 표준 편차)를 각 파장의 함수로 보여주는 시그마 함수가 부산물로 만들어진다. 이를 $SIGMA(j)$ 라고 하자. $SIGMA(j)$ 의 값은 S/N 비의 역수와 대체로 일치해야 된다.

A.2에서 얻은 평균 스펙트럼을 새로운 건본 스펙트럼으로 하여 A.1 - A.2 과정을 되풀이 한다. 이 되풀이 과정은 A.1의 건본 스펙트럼과 새로 얻어지는 건본 스펙트럼의 차이가 무시할 만큼 작을 때까지 계속한다. 대개는 2번의 되풀이로 충분하다.

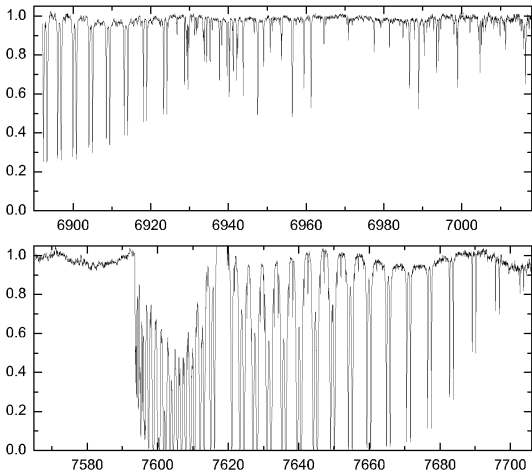


그림 2. 대기 흡수선이 강하게 보이는 스펙트럼의 예. 위 패널: 고립된 흡수선이 많이 보인다. 아래 패널: 7,600Å 근처에 강한 흡수선 밴드가 보인다.

천체 스펙트럼의 SPECT(i,j) 선택

천체 스펙트럼에서 SPECT를 정하는 기준은 흡수선이 충분하고, S/N 비가 충분한 영역에서 조각의 크기를 적당한 파장 범위 크기로 하면 된다. 조각의 크기는 A.1에서 연속선 레벨 피팅이 1차 함수로 잘 되어야 하므로 너무 크면 안된다.

대기 흡수선의 SPECT(i,j) 선택

대기 흡수선은 거의 대부분이 6,000Å 이상의 장파장 영역에 존재한다. 대기 흡수선의 전체적 분포는 매우 빠르게 회전하는 조기형 별의 스펙트럼을 보면 잘 알 수 있다. 즉 이런 조기형 별들은 6,000Å 이상에서 거의 흡수선이 없으므로 대기를 통해서 얻은 스펙트럼 중 이 영역에서 보이는 흡수선은 대부분 대기에 의한 것으로 생각할 수 있다. 그림 2는 HD 21845의 스펙트럼의 일부인데, 여기 보이는 흡수선은 대부분이 대기 흡수선으로 6,900Å 근처에서는 고립된 흡수선들을 볼 수 있으며 7,600Å 근처에서 강한 흡수선의 밴드를 볼 수 있다.

시선속도 측정을 위한 파장 동정에 사용할 대기 흡수선 영역을 선택하는 기준은 강도가 강한 선이 많이 존재하고, 관측하는 천체의 흡수선은 없는 영역이 좋을 것이다. 그러나 실제로 어느 것이 대기 흡수선이고 어느 것이 천체의 흡수선인지 구분하기는 쉽지 않다. 대기 흡수선의 SPECT를 선정하는 절차는 다음과 같이 정리할 수 있다.

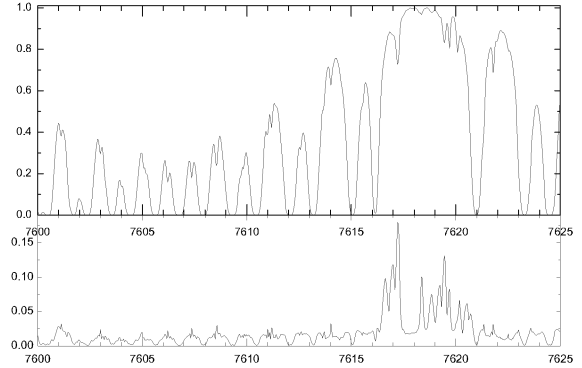


그림 3. 위 패널: 견본 (평균) 스펙트럼, 아래 패널: 시그마 함수 (평균 스펙트럼에 대한 r.m.s. 편차).

B.1 앞에서 설명한 조기형 별의 스펙트럼에서 대기 흡수선이 조밀하게 보이는 몇몇 영역을 선정한다.

B.2 B.1에서 선정된 각각의 영역에 대하여 앞에 설명한 과정에 따라 견본 스펙트럼을 만든다. 이 과정에서 부산물로 만들어지는 견본 스펙트럼과 다른 스펙트럼들의 차이의 표준 편차 시그마 값을 살펴본다. 이 시그마 값은 각 스펙트럼의 S/N비의 역수와 대체로 일치해야 된다. 어떤 영역에서 시그마 값이 크게 나오면 이는 거기에 별 흡수선이 존재하는 것으로 해석하고 그 부분은 스펙트럼 조각에서 제외하여야 한다.

그림 3이 앞에 설명한 과정으로 얻은 견본 스펙트럼을 보여준다. 이 그림의 아래 패널에 보이는 시그마 값을 보면 대체로 대부분 영역에서 0.02 이하인데, 이는 100보다 클 것으로 예상되는 스펙트럼의 S/N 비의 역수 0.01에 비해서 약간 큰 값이다. 그러나 대기 흡수선의 강도가 날씨에 따라 상당히 변하므로 시그마 값이 스펙트럼의 S/N 비에 비하여 다소 크게 나오는 것은 쉽게 이해할 수 있다. 그러나 7,616Å에서 7,621Å에 이르는 영역은 시그마 값이 0.02에서 0.15로 매우 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 이것은 거기에 별의 흡수선이 존재하기 때문일 것으로 추측된다. (대기 흡수선의 파장은 일정한데, 별의 흡수선은 지구 운동으로 파장이 변하므로, 여러 시점에 관측한 스펙트럼을 더해서 평균을 내면 별 흡수선 부근의 시그마 값이 커진다.) 따라서 이 영역을 제외하고 스펙트럼 조각을 다시 만들어야 한다.

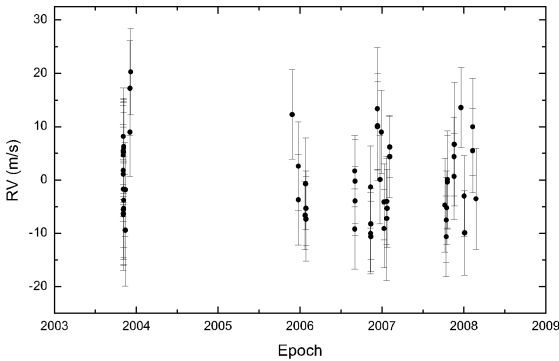


그림 4. 요오드+BOES로 측정한 Tau Ceti의 RV 정밀도

4. RV 표준성 Tau Ceti와 HD 57727 관측 결과

여기에서는 보현산천문대의 고분산 분광기 BOES를 이용하여 RV 변화가 매우 적은 RV 표준성 Tau Ceti와 HD 57727를 관측하여 얻은 스펙트럼에 앞에서 설명한 절차를 적용한 결과를 보여주기로 한다.

Tau Ceti는 시선 속도가 매우 안정된 RV 표준성으로, 정밀 시선 속도 측정 결과를 점검하기 위한 RV 표준성으로 널리 이용되고 있다. 보현산천문대에서도 요오드 통을 이용한 BOES의 시선속도 측정 정밀도를 점검하기 위하여 Tau Ceti를 장기적으로 관측하고 있다. 요오드 통을 이용한 경우 BOES의 RV 측정 정밀도는 그림 4에 나타나 있다. 4년이 넘는 관측 기간 동안 r.m.s. 정밀도가 약 8m/s 정도를 유지하고 있다.

이제 별과 대기 흡수선의 SPECT를 어떻게 설정했는지 설명하기로 한다.

별의 SPECT 결정

BOES의 각 구경 (order) 은 4,000 화소로 이루어져 있는데, 양쪽 가장자리는 S/N 비가 좋지 않고 이미지 상태도 좋지 않으므로, 왼쪽과 오른쪽 가장자리 쪽 500 화소는 사용하지 않고, 나머지 3,000 화소를 4등분하여 4개의 스펙트럼 조각을 만들었다.

별의 SPECT를 선정하는데 사용하는 파장 영역은 다음을 고려해야 된다. 우선 이 연구에서 사용한 스펙트럼은 대부분 요오드 통을 통하여 얻은 것이다. 요오드 통을 통과한 스펙트럼은 5,000 ~ 6,000Å에 요오드의 흡수선이 기록되기 때문에 여기서는 사용할 수 없다. 또한 6,000Å보다 더 장파장은 대기 흡수선이 많으므로 사용하기에 적합하지 않다. BOES의 경우 4,000Å 이하는 효율이 낮아 S/N 비가 좋지 않으므로 사용하는 데 어려움이 있다. 따라서 별의 SPECT를 선정하는데

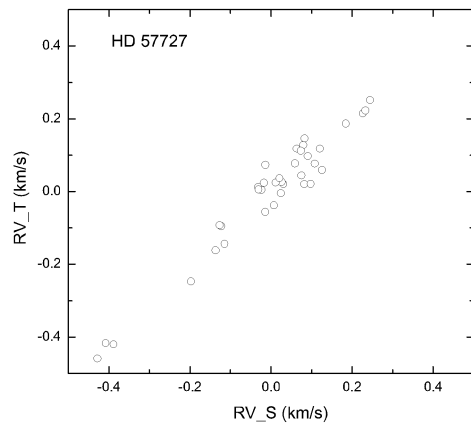
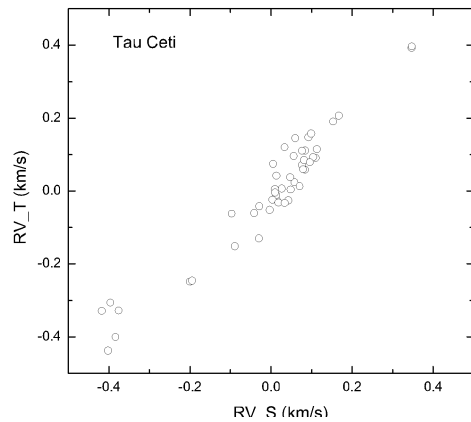


그림 5. RV_S와 RV_T의 상관 관계

사용하는 영역은 대체로 4,000 ~ 5,000Å으로 제한된다. 실제 우리가 별의 SPECT를 선정하는데 사용한 구경은 16 ~ 26번의 11 개 구경으로, 이는 파장으로는 약 4,350 ~ 4,900Å에 해당한다. 각 구경에서 4개의 스펙트럼 조각이 나오므로 총 44개의 별 스펙트럼 조각을 만들었다.

대기 흡수선의 SPECT 결정

6,000Å 이상의 장파장 영역을 두루 조사한 결과 대기 흡수선이 조밀하게 모여 밴드를 이루고 있는 두 영역이 가장 좋다는 결론을 얻었다. 두 영역은 (1) 구경 번호 55에 위치한 6,860 ~ 6,900Å 영역과, (2) 구경 번호 62에 위치한 7,590 ~ 7,670Å 영역이다. 각 영역을 두 섹터로 나누어 총 4 개의 SPECT를 구성하였다. 이 중 세 섹터는 앞 그림 3에서 설명했듯이 일부 구간에 별의 흡수선이 강하게 나타나 그 부분은 제외하고 SPECT를 구성하였다.

표 1. RV 시계열 정밀도 (시그마 값)

| 천체 | RV_S (km/s) | RV_T (km/s) | RV_Sc (km/s) |
|----------|----------------|----------------|-----------------|
| Tau Ceti | 0.168 | 0.174 | 0.048 |
| HD 57727 | 0.161 | 0.169 | 0.042 |

처리 결과

논의의 편의를 위하여 다음과 같이 용어를 정의하기로 한다.

용어의 정의

| | |
|-------|--|
| RV_S | 별의 RV |
| RV_T | 대기 흡수선의 RV |
| RV_Sc | RV_T로 파장 눈금 오차를 보정한 별의 RV. $RV_{Sc} = RV_S - RV_T$ |

그림 5는 RV_S와 RV_T의 상관 관계를 보여준다. 예상했던대로 두 RV의 상관 관계는 아주 높게 나타난다. 이는 RV 측정 오차의 대부분이 RV_S 혹은 RV_T의 자체 측정 오차가 아니라, 파장 눈금 오차에 기인한다는 것을 의미한다. RV_S 혹은 RV_T의 변화 범위가 ±0.4 km/s 정도 되는 것은 2 절에서 확인한 파장 눈금 변화의 크기와 부합된다.

그림 6은 대기 흡수선의 RV_S와 RV_Sc 시계열을 보여주고, 표 1은 각 RV 시계열 정밀도 (표준 편차)를 보여준다. 그림 6과 표 1에서 RV_T를 이용하여 파장 눈금 오차를 보정한 결과 RV_Sc의 정밀도가 3 ~ 4 배 정도 크게 향상된 것을 볼 수 있다. 이는 앞 그림에서 보았듯이 RV_S 측정 오차의 대부분이 파장 눈금 오차이고, RV_T를 이용한 파장 눈금 오차 보정이 매우 효과적임을 보여준다. 특히 RV_S가 ±0.2km/s 보다 큰 경우 (즉 오차가 큰 경우)에 보정 효과가 두드러진다는 것을 알 수 있다.

5. 논의 및 결론

본 연구를 통하여 요오드 통을 쓰지 않는 경우 BOES 스펙트럼에서 시선 속도 측정 정밀도는 150 m/s 정도이고, 이는 대부분 파장 눈금 오차에 기인하는 것을 확인하였다. 흡수선을 이용하여 파장 눈금 오차를 보정할 경우 RV_Sc의 정밀도가 40 m/s 정도로 향상되었다.

RV_Sc의 정밀도에 미치는 요인과 한계에 대하여 알아보기로 한다. $RV_{Sc} = RV_S - RV_T$ 이므로

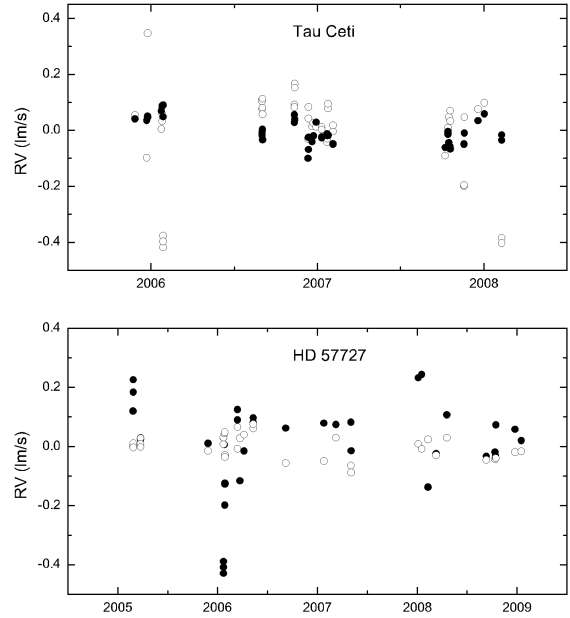


그림 6. RV 시계열
검은 원반: RV_S, 흰 원반: RV_Sc

RV_Sc의 정밀도 $\sigma(RV_{Sc})$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma^2(RV_{Sc}) = \sigma^2(RV_S) + \sigma^2(RV_T)$$

별의 시선 속도 RV_S는 44개의 SPECT에서 얻은 $RV_S(i,j)$ 의 평균이므로 $RV_S(i,j)$ 의 분포로부터 RV_S의 정밀도를 추정할 수 있는데, 10 m/s 정도로 나타난다. 반면에 대기 흡수선의 시선 속도 RV_T의 정밀도는 훨씬 떨어진다. 우선 RV_T는 오직 4개의 SPECT의 평균으로 구했고 대기흡수선의 SPECT는 별의 흡수선에 오염될 가능성이 있고 대기 상태에 따라 흡수선 세기가 변하므로 3절의 A.2에서 설명한 피팅이 잘 안된다. 4 절의 Tau Ceti와 HD 57727의 경우에 RV_T의 정밀도는 약 40 m/s 정도이다. 따라서 기본적으로 RV_Sc의 정밀도는 RV_T의 정밀도에 의하여 한계가 주어진다. 따라서 RV_Sc의 정밀도를 높이려면 RV_T의 정밀도를 높여야 되는데, RV_T의 정밀도를 높이는 첫 번째 과제는 SPECT 수를 늘리는 것이다. 본 연구에서는 2 개 밴드에서 4 개의 파장 조각을 구성했는데, 별의 흡수선에 오염되지 않은 대기 흡수선 영역을 찾아내는데 더 노력을 기울여야 한다.

본 연구에서 대기 흡수선을 이용하여 얻은 40 m/s 정도의 시선 속도 정밀도는 요오드 통을 이용한 정밀

도 (10 m/s 이하) 에 비하면 매우 큰 값이지만 요오드 통 같은 특별한 장치를 사용하지 않고 얻은 스펙트럼의 시선 속도를 이용한 연구에 큰 도움이 될 것으로 생각된다. 외계 행성 탐색 등 매우 높은 정밀도를 요구하지 않는 과제일 경우 40 m/s 정도의 정밀도로도 많은 것을 연구할 수 있을 것이다. 원래 연구 목적이 시선 속도 측정이 아닌 시계열 관측 스펙트럼이 있으면 부산물로 시선 속도를 측정해보는 것도 좋을 것으로 생각된다. 별에 따라서는 요오드 통을 이용하여 정밀 시선속도 측정이 아예 불가능한 경우도 있다. 즉 요오드 통 흡수선 영역인 5,000 ~ 6,000Å에 강한 흡수선이 거의 없는 조기형 별이 이에 해당한다. 이 경우 본 연구에서 제시한 방법이 매우 유용할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 한인우, 김강민, 이병철, Valyavin, G., 2007, BOES 데이터를 이용한 정밀 시선 속도 추정 프로그램 RVI2CELL 개발, 천문학논총, 22, 75
- Butler, P., Marcy, G., Williams, E., McCarthy, C., & Dosanjh, P., 1996, Attaining Doppler Precision of 3 M s⁻¹, PASP, 108, 500
- Campbell, B. & Wlaker, G., 1979, Precision radial velocities with an absorption cell, PASP, 91, 540
- Griffin, D. F., 1973, On the possibility of determining stellar radial velocities to 0.01 km/s, MNRAS, 162, 243
- Gray, D., Brown, K. 2006, PASP, 118, 399
- Kim, Kang-Min, Han, Inwoo, Valyavin, G. G., Plachinda, S., Jang, Jeong Gyun., Jang, Be-Ho., Seong, Hyeon Cheol., Lee, Byeong-Cheol., Kang, Dong-II., Park, Byeong-Gon., et al., 2007, The BOES Spectropolarimeter for Zeeman Measurements of Stellar Magnetic Fields, PASP, 119, 1052
- Kim, K. M., et al., 2002, Design and Manufacturing of the Cassegrain Interface Module of the BOAO Echelle Spectrograph, JKAS, 35, 221
- Marcy, G. & Butler, P., 1992, Precision radial velocities with an iodine absorption cell, PASP, 104, 270
- Mayor, M., Pepe, F., Quelotz, D., et al., 2003, Setting New Standards with HARPS, Msngr, 114, 20
- Pepe, F., Mayor, M., Delabre, B., et al., 2000, HARPS: a new high-resolution spectrograph for the search of extrasolar planets, Proc. SPIE, 4008, 582