

BF 방법을 이용한 EX Leo의 시선속도 추정
RADIAL VELOCITY ESTIMATION OF EX Leo USING BF ALGORITHM

강동일^{1,2}, 박홍서¹, 한인우², 김강민²

¹한국교원대학교

²천문연구원

DONG-IL KANG^{1,2}, HONG-SUH PARK¹, INWOO HAN², AND KANG-MIN KIM²

¹Korea National University of Education, Kang-Nae, Chung-Buk, 363-791, Korea

²Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: dikang@knue.ac.kr

(Received March 6, 2007; Accepted June 22, 2007)

ABSTRACT

We present the result of radial velocity observation of a W UMa type binary star EX Leo. We observed the star on February 16, 2003, using Long-Slit spectrograph of BOAO (Bohyunsan Optical Astronomical Observatory). Since the spectral lines are broad due to its fast rotation, it is difficult to distinguish two radial velocities from cross correlation function. Instead of cross correlation function, we used broadening function to develop our own code which estimate the radial velocity of the broadened line spectra. With our own code, radial velocities of primary and secondary stars are derived simultaneously. From the radial velocity curve fit, we obtained $K_1 = 50.24 \pm 8.29$ km/s and $K_2 = 254.05 \pm 20.984$ km/s respectively.

Key words: BOES — eclipsing binary — radial velocity — spectroscopic observation — EX Leo

1. 서론

EX Leo (HD 93077, HIP 52580)는 Hipparcos Space Astrometry Mission (ESA 1997)을 통해 분광형이 F5인 β -Lyrae형 변광성으로 분류되었다. 한편 Lu et al. (2001)은 분광관측을 통해 이것의 분광형은 F6V이고 A형의 접촉 쌍성인 것으로 확인하였다. 이후 Pribulla et al. (2002)도 광전관측을 통해 31%의 접촉도를 가진 접촉쌍성으로 분류하였다. 그럼 1은 Hipparcos가 관측한 광도곡선이다.

EX Leo는 우리의 시선 방향에 대해 궤도 경사가 61.1° 정도 기울어져 있으므로 (Pribulla et al. 2002) 이것을 분광 관측하면 서로 다른 시선속도 방향을 가지는 두 별의 스펙트럼이 겹쳐서 나타난다. 또한 두 별이 가까이 있으므로 질량 중심을 서로 빠르게 회전해서 스펙트럼의 선폭이 상당히 넓어진다. 결과적으로 이러한 쌍성계의 관측 스펙트럼은 선폭이 넓고 서로 다른 방향으로의 도플러 편이(Doppler shift)된 두 스펙트럼이 중첩되어 나타나므로 각 별의 시선속도를 분리해 내기가 쉽지 않다.

이 논문에서 우리는 Rucinski(2002)에 의하여 제안된 선폭증가 함수 (Broadening Function, 이후 BF)

를 이용하여 천체의 시선속도를 구하는 프로그램을 개발하고 이 프로그램에 의하여 산출된 EX Leo의 시선속도곡선과 궤도요소를 제시한다. 그리고 이 결과를 같은 방법으로 구한 기존의 관측결과(Lu et al. 2001)와 비교함으로써 보현산 천문대의 긴슬릿 분광기(Long Slit Spectrograph, LSS)의 성능을 제시하려 한다.

2장에서 관측과 자료처리 과정에 대해 설명하고 3장에서는 BF를 구하여 시선속도를 산출하는 알고리즘에 대해 설명한다. 4절에서는 산출된 시선속도를 제시하고 분석한다.

2. 관측 및 자료처리

2.1 관측

EX Leo의 분광 스펙트럼은 보현산천문대 긴슬릿 분광기로 관측하였다. 보현산천문대 긴슬릿 분광기는 기존의 중분산 분광기에 비해 시선속도 분해능이 더욱 향상되어 5-10km/s의 시선속도 정밀성을 가지게 되어 (김강민 외 2003) 앞서 소개한 접촉쌍성의 시선속도를 결정하기에 적합하다.

관측은 2003년 2월 16일에 수행하여 EX Leo의 분

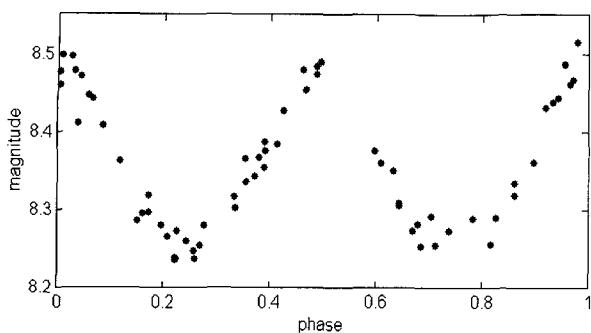


그림 1. Hipparcos 관측 EX Leo 광도 곡선

광 영상 30장을 얻었다. EX Leo는 등급이 $m_V = 8.25$ 로서 보현산천문대 1.8m 망원경과 긴슬릿 분광기로 최소 신호 대 잡음비 $S/N > 100$ 정도를 확보하려면 평균적인 시상을 고려할 때, 5분 혹은 그 이상의 노출시간이 필요하다. 한편, EX Leo는 알려진 시선속도가 $K_1 = 51.28 \text{ km/s}$, $K_2 = 257.98 \text{ km/s}$ 정도로 매우 빠르고 궤도 공전 주기는 대략 0.4086일(대략 9.8시간)로 비교적 짧다 (Lu et al. 2001). 이렇게 빠른 시선속도 변화를 보이고 있는 천체는 노출시간을 길게 줄 경우 노출 중에도 시선속도의 변화가 발생하여 분광스펙트럼에 영향을 미칠 수 있으므로 적절한 노출시간을 설정할 필요가 있다. 이러한 상황을 고려하여 변광성의 노출시간을 궤도 주기의 1.1% 정도에 해당하는 400초로 고정하였다. 신호 대 잡음비는 평균적으로 140 정도였다.

시선속도를 구하기 위한 비교성(template star)은 변광성의 분광형과 비슷하면서 가까이 위치한 낱별로서 시선속도가 알려진 6개의 별을 선정하였다. 이들을 이용하여 변광성의 BF를 모두 구해 본 결과 HD 89449가 가장 만족스런 BF를 보여주었다. 이 논문에서의 모든 결과는 HD 89449를 이용한 것이다.

CCD 영점 보정을 위한 바이어스(bias)는 관측 이전, 도중, 그리고 후에 총 37장을 얻었다. 전처리를 위한 플랫(flat)도 관측 전후에 14장을 얻었고, 파장동정을 위한 비교 광원(arc, FeNeArHe)은 모든 천체 영상의 전후에 획득하여 총 82장을 얻었다. 천체 영상의 파장은 해당 영상을 관측하기 전후에 획득한 두 비교 광원을 평균하여 사용하였다.

2.2 자료처리

자료처리는 GRX(강동일 외 2005)와 대화형 프로그래밍 언어(interactive programming language)인

표 1. 비교성 목록

ID	분광형	시선속도 (km/s)	등급 (V mag)	노출시간 (sec)
HD 22484	F9IV	27.6	4.28	25
HD 89449	F6IV	6.8	4.80	50
HD 102870	F9V	4.6	3.61	15
HD 112299	F8V	4.1	8.38	300
HD 114762	F9V	49.9	7.30	200
HD 122693	F8V	-5.8	8.14	300

MatLab을 이용하였다. GRX를 이용하여 자료를 전처리(pre-processing)하였고, MatLab으로는 전처리 이후 시선속도를 산출하는 모든 과정을 처리하였다. 전처리가 끝난 2차원의 이미지 자료는 공간방향으로 1150 화소, 분산방향으로 1024개의 화소로 이루어진 2차원 이미지이다. 이 2차원 이미지의 분산 방향으로 적절한 구경에 대해 적분하여 1차원 스펙트럼을 추출한다. 그리고 1차원으로 추출된 스펙트럼의 연속선을 결정하여 정규화(continuum normalization)한 후, 모든 화소의 파장을 동정(wavelength identification)한다.

그림 2는 전처리와 1차원 추출, 연속선 정규화, 파장동정을 마친 변광성($P(\lambda)$)과 비교성($S(\lambda)$)의 스펙트럼 일부를 나타낸 그림이다. 스펙트럼의 파장범위는 대략 4700\AA 에서 5300\AA 사이이다. CCD에 기록된 스펙트럼의 파장 간격은 분광기의 기기적 특성에 따라 달라진다. 이러한 파장간격의 함수를 분산함수(dispersion function)라 하는데 이것은 천체의 물리적 특성이 아니다. 따라서 스펙트럼으로부터 천체의 물리량을 측정하기 위해서는 파장 간격을 재조정하여야 한다. 여기에서는 식 (1)의 관계를 이용하여 파장 간격을 등속도로 조정하였다.

$$\lambda_n = \lambda_0 \left(1 + \frac{\Delta V}{c}\right)^n \quad (1)$$

여기서 c 는 광속이고, ΔV 는 화소간의 속도 간격이다. ΔV 는 사용자가 결정하여야 하는데 이 때 나중에 얻을 시선속도의 정밀도를 고려하여 실제 관측된 스펙트럼의 시선속도 분해능보다 2~3배 정도 높아지도록 ΔV 를 결정한다. 우리가 얻은 스펙트럼은 화소당 파장 간격이 대략 0.6\AA/pixel 이고 이것은 중간 파장 범위에서 화소당 대략 35km/s 의 시선속도에 해당한다. 우리의 관측 자료에서는 ΔV 를 10km/s 가 되도록 재배치하였다. 이 결과 스펙트럼의 화소수는 대략

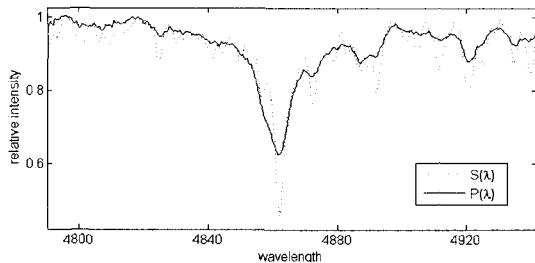


그림 2. 변광성과 비교성의 스펙트럼 일부

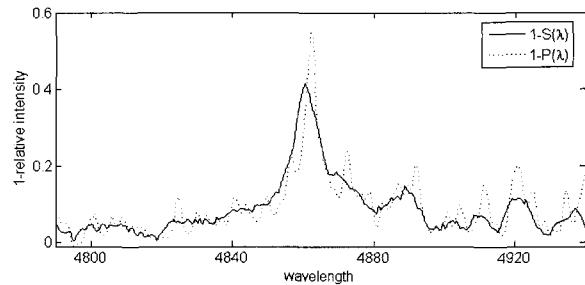


그림 3. CCF와 BF 연산을 위해 세로축이 흡수선의 세기로 나타내어진 스펙트럼의 모습

3500화소로 늘어난다.

다음으로 CCF와 BF 계산 편의를 위하여 흡수선이 방출선처럼 보이기 위하여 스펙트럼을 뒤집었다. 이는 $P(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 를 $1-P(\lambda)$, $1-S(\lambda)$ 로 각각 대체하면 된다. 그림 3은 이렇게 뒤집어진 스펙트럼의 모습을 보여준다. 이후로 언급되는 $P(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 는 모두 그림 3에서의 스펙트럼을 나타낸다.

3. 시선속도 산출 알고리즘

3.1. CCF와 BF

교차상관함수 (Cross Correlation Function, 이후 CCF)는 분광 관측 데이터에서 시선 속도를 구하는데 가장 널리 이용되는 방법이다. CCF는 관측된 스펙트럼 $P(\lambda)$ 와 비교 (template) 스펙트럼 $S(\lambda)$ 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$C(x) = P(x) \star S(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda)S(x-\lambda)d\lambda \quad (2)$$

CCF는 다음과 같이 정의되는 컨벌루션과 유사하다.

$$P(x) * S(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda)S(x-\lambda)d\lambda \quad (3)$$

식 (2), (3)에서 우리는 CCF와 컨벌루션 사이에 $P(x)*S(x) = P(x)\star S(-x)$ 의 관계가 성립하는 것을 알 수 있다.

비교 스펙트럼 $S(\lambda)$ 는 $P(\lambda)$ 의 시선 속도를 구하는데 하나의 기준 역할을 하는 스펙트럼으로서 경우에 따라 $P(\lambda)$ 와 같은 별의 스펙트럼을 쓰기도 하고, 또는 대상별의 물리 화학적 파라미터를 이용하여 계산한 합성 (synthetic) 스펙트럼을 쓰기도 한다. CCF를 이용하여 시선 속도를 구하는 원리는 다음과 같이 쉽게 이해할 수 있다. $P(\lambda)$ 가 $S(\lambda)$ 에 비하여 시선 속도 운동에 의하여 $\Delta\lambda$ 만큼 도플러 편이한 경우, $S(\lambda)$ 를 동일하게 $\Delta\lambda$ 이동시키면 두 스펙트럼이 일치하기 때문

에 CCF의 정의에 의하여 CCF $C(x)$ 는 $x=\Delta\lambda$ 에서 최대가 될 것이다. CCF 방법은 단일 천체 혹은 다 천체 일지라도 실질적으로 하나의 스펙트럼만 관측되는 경우에는 매우 효과적인 방법이다. 그러나 복선 분광상성 (double line spectroscopic binary, 이후 SB2)처럼 두 개 (혹은 그 이상)의 스펙트럼이 동시에 관측되는 경우에 CCF 방법에는 문제점이 나타난다. 우선 각 천체의 분광형이 매우 다를 경우 비교 스펙트럼이 달라지기 때문에 CCF 방법은 사용할 수 없다. 각 천체의 분광형이 유사한 경우에는 동일한 비교 스펙트럼을 이용하여 CCF 방법을 적용할 수 있지만, 자기 자신의 스펙트럼을 비교 스펙트럼으로 사용할 수는 없고, 유사한 형태를 갖는 천체를 관측하거나 혹은 합성 스펙트럼을 만들어 사용해야 된다. 눈의 편의를 위하여 SB2의 경우에 두 별의 스펙트럼 형태가 동일하다고 가정하자. 이 경우 관측되는 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{\text{obs}}(\lambda) = A_1P(\lambda) + A_2P(\lambda) \quad (4)$$

여기서 A_1 , A_2 는 두 천체의 밝기를 나타낸다. 이 경우 CCF는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C(x) &= C_1(x) + C_2(x) \\ &= A_1P(x)\star S(x) + A_2P(x)\star S(x) \end{aligned} \quad (5)$$

두 천체의 도플러 편이를 각각 $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$ 라고 하면 $C_1(x)$ 과 $C_2(x)$ 는 각각 $x=\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$ 에서 최대가 되므로, 두 함수의 합 $C(x)$ 도 두 개의 최대점을 갖게 될 것이다. 그러나 $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$ 의 차이가 두 함수 $C_1(x)$ 과 $C_2(x)$ 의 폭에 비하여 작으면 $C(x)$ 는 두 개의 최대점을 보이지 않게 된다. 즉 $C_1(x)$ 과 $C_2(x)$ 가 분해되지 않게 된다.

이렇게 두 개의 CCF가 잘 분해되지 않는 경우, 분해능을 향상시키고 좀 더 정밀한 시선 속도를 측정할 수 있도록 제시된 것이 BF이다. 이 방법은 비교 스펙

트럼 $S(\lambda)$ 와 BF인 $B(\lambda)$ 가 컨벌루션 되어 스펙트럼 $P(\lambda)$ 로 관측 된다고 가정한다.

$$P(\lambda) = S(\lambda) * B(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} S(x)B(\lambda-x)dx \quad (6)$$

컨벌루션은 관측 결과를 설명하는데 흔히 이용되는 연산으로서, 분광 관측의 경우에도 매우 자연스런 가정이다. BF는 여러 가지로 설명할 수 있는데 예를 들면 원래 날카로운 스펙트럼이 천체의 빠른 자전에 의하여 선이 넓게 뭉개지는 경우 원래 스펙트럼과 적당한 형태 및 폭을 가진 BF를 컨벌루션 하면 관측된 스펙트럼이 된다. 또한 분광기의 분해능이 충분하지 않아 관측된 스펙트럼이 뭉개지는 경우에도 분광기에 기인하는 BF를 도입하여 설명하기도 한다. 도플러 편이에 의하여 관측된 스펙트럼이 $\Delta\lambda$ 만큼 단순 이동하면 Dirac Delta 함수 $\delta(\Delta\lambda)$ 형태의 BF가 된다. 물론 이것은 매우 단순화된 가정이고 실제로는 관측된 스펙트럼과 비교 스펙트럼의 모양이 완전히 일치하지 않으므로 도플러 편이의 BF는 일정한 폭을 갖게 된다. SB2 같은 쌍성에서 두 천체의 분광형이 유사한 경우, CCF에서 한 것처럼 동일한 비교 스펙트럼을 사용하여 BF를 구하면 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ 에서 최대가 되는 두 함수의 합으로 표시된다. 실질적으로 BF를 구하는 방법에 대해서는 뒤에 설명하기로 하고 우선 BF와 CCF의 관계를 알아보기 하자. 우선 식 (2)와 식 (6)을 이용하여 $C(x)$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C(x) &= P(x) \star S(x) \\ &= P(x) * S(-x) \\ &= [B(x) * S(x)] * S(-x) \end{aligned} \quad (7)$$

컨벌루션은 결합법칙 $(A * B) * C = A * (B * C)$ 가 성립하므로 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C(x) &= B(x) * [S(x) * S(-x)] \\ &= B(x) * [S(x) \star S(x)] \end{aligned} \quad (8)$$

위 식의 마지막에 나오는 $S(x) \star S(x)$ 항은 S 의 자기 상관(autocorrelation)함수라고 불리는데, $A_s(x) \equiv S(x) \star S(x)$ 로 정의하면, 최종적으로 CCF는 $C(x) = B(x) * A_s(x)$ 로 표현된다. 이 식에서 우리가 알 수 있는 것은 C (CCF)는 B (BF)가 A_s 에 의하여 컨벌루션 된 것이라는 것이다. 얼마나 뭉개지나는 A_s 의 폭에 따라 달라진다. $A_s(x)$ 는 정의에 의하여 $x=0$ 에서 최대값을 보이고 폭의 크기(scale)는 비교 스펙트럼 S 의 선폭 정도라는 것을 유추할 수 있다.

그림 4는 EX Leo의 관측 스펙트럼으로 구한 B 와 C 의 한 예이다. 앞의 설명에서 예상한대로 B 는 두 봉우리가 잘 분해되는 반면에, C 는 봉우리가 뭉개져 B

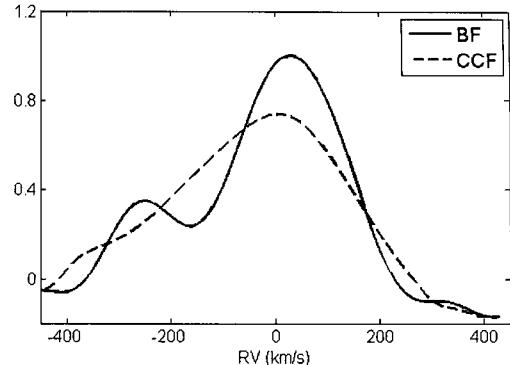


그림 4. BF와 CCF의 결과를 비교한 그림

만큼 잘 분리되지 않는 것을 보여준다.

3.2 SVD 방법에 의한 BF 구하기

앞에서는 CCF를 이용한 시선속도 측정은 BF 방법에 비하여 분해능이 떨어지기 때문에 정밀도가 떨어지고, SB2 경우에는 BF로는 분해가 되어도 CCF로는 분해 자체가 불가능한 경우도 있다는 것을 밝혔다. BF의 이러한 장점에도 불구하고 BF의 문제점은 계산이 복잡하다는 것이다. 식의 정의에서 보듯이 CCF 계산은 비교 스펙트럼을 이동시키고 관측된 스펙트럼과 픽셀 단위로 곱하여 더하는 단순한 계산이다. 실제로 CCF 방법이 도입된 초기에는 비교 스펙트럼을 마스크로 제작하여 H/W적으로 CCF를 계산하였다. 그러나 이제 컴퓨터 성능이 향상되어 BF를 직접 계산하는 것이 더 이상 어려운 일이 아닌 상황이 되었다. 지금부터는 BF를 직접 계산하는 알고리즘에 대하여 알아보기로 한다.

$$\begin{aligned} P(\lambda) &= S(\lambda) * B(\lambda) = B(\lambda) * S(\lambda) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} B(x)S(\lambda-x)dx \end{aligned} \quad (9)$$

위 적분식은 이산(discrete) 관측 데이터의 경우에는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_i = \sum_{j=1}^n S_{i-j} B_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

위 식은 다음과 같이 표시되는 행렬식임을 쉽게 알 수 있다.

$$\mathbf{p} = \mathbf{D} \mathbf{b} \quad (11)$$

식 (11)에서 \mathbf{p} 는 $(m \times 1)$ 차원, \mathbf{b} 는 $(n \times 1)$ 차원의 열 벡터(column vector)로서 식 (10)의 P 와 B 에 해당한다. \mathbf{D} 는 $(m \times n)$ 차원의 행렬로서 흔히 설계 행렬(design matrix)이라고 불린다. \mathbf{D} 는 식 9에 의하여 비교 스펙트럼 S 가 주어지면 $D_{ij} = S_{i-j}$ 와 같이 만들

수 있다. \mathbf{p} 의 차원 (화소 수) m 은 관측된 스펙트럼의 화소 수이고 \mathbf{b} 의 차원 n 은 BF의 화소 수인데, 쌍성의 시선속도 변화 폭과 재배치된 스펙트럼의 등속도 간격 ΔV 을 고려하여 BF가 완전히 포함되도록 결정 하여야 한다. 본 연구에서는 $m = 3500$ 이고, 쌍성의 시선속도 변화 폭은 대략 $\pm 250 \text{ km/s}$ 이고 $\Delta V = 10 \text{ km/s}$ 이다. 따라서 \mathbf{b} 의 범위는 $\pm 500 \text{ km/s}$ 를 포함하도록 $n=101$ 로 잡았다.

식 (11)로 표시된 행렬식은 다름 아닌 선형 최소자승법의 조건방정식이다. 최소자승법 조건방정식에서 \mathbf{p} 는 관측치이고, \mathbf{D} 는 주어진 조건 행렬이며, \mathbf{b} 는 미지파라미터이다. 이와 같이 표시되는 최소자승법의 해는 아래와 같이 잘 알려져 있다.

$$\mathbf{b} = (\mathbf{D}^t \mathbf{D})^{-1} (\mathbf{D}^t \mathbf{p}) \quad (12)$$

여기서 \mathbf{D}^t 는 \mathbf{D} 의 전치 행렬(transpose matrix)을 의미한다. 그런데 이와 같이 표현된 방법으로 최소자승법을 풀 때 $(\mathbf{D}^t \mathbf{D})^{-1}$ 이 존재하지 않거나 불안정한 경우에는 Singular Value Decomposition (이후 SVD, Press et al. 1992) 방법을 사용함으로써 쉽게 해를 구할 수 있다. SVD는 임의의 행렬 \mathbf{D} 를 다음과 같은 성질을 갖는 세 개의 행렬 \mathbf{U} , \mathbf{W} , \mathbf{V} 의 곱으로 분해해 준다.

$$\mathbf{D} = \mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^t$$

- \mathbf{U} ($m \times n$), \mathbf{V} ($n \times n$) : 수직행렬(orthogonal matrix)

$$\sum_{i=1}^m U_{ik} U_{il} = \delta_{kl}, \sum_{j=1}^n V_{ik} V_{jl} = \delta_{kl}$$

- \mathbf{W} ($n \times n$) : 대각 행렬 (diagonal matrix)

위 관계를 표시하면 식 (12)의 최소자승법의 해는 다음과 같다.

$$\mathbf{b} = \mathbf{V} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{U}^t \mathbf{p} \quad (13)$$

편의를 위하여 $\mathbf{U}^t \mathbf{p} = \mathbf{q}$ 로 정의하면 \mathbf{b} 의 i 번 째 원소 $b(i)$ 는 다음과 같다.

$$b(i) = \sum_{j=1}^n V_{ij} (1/W_j) q_j \quad (14)$$

\mathbf{W} 행렬의 원소 W_j 는 항상 양 혹은 0으로서 특이값(singular value)이라고 불린다. W_j 중 일부가 0이면 위 식은 해를 갖지 않는다. 즉 $\mathbf{D}^t \mathbf{D}$ 의 역행렬은 존재하지 않는다. W_j 가 0은 아니지만 아주 작은 값인 경우에 위 식은 불안정한 상태가 된다. 이런 현상은 데이터를 기술하는데 사용한 모델이 적절치 않았음을 의미한다. 여기에서는 SVD의 W_j 가 0이거나 아주 작은 값일 때, $1/W_j$ 를 무한대나 혹은 매우 큰 값으로 두지 않고 오히려 0으로 두면 이러한 영향을 배제할 수

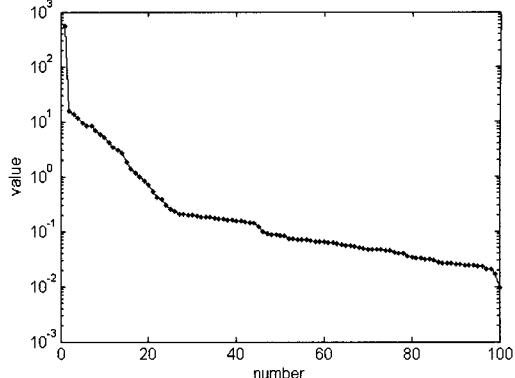


그림 5. SVD로 분해된 대각행렬 요소의 값

있다. 이것은 모델에 별로 도움이 되지 않는 파라메터를 생략하여 관측 데이터의 노이즈가 증폭되는 효과를 줄여주는 의미를 가진다.

일반적으로 SVD로 얻어지는 W_j 는 내림차순으로 정렬하는 것이 관례이다. 그림 5가 101개의 W_j 의 크기를 내림차순으로 보여주는 그림이다. 예상했던 대로 순서가 커질수록 W_j 값이 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 노이즈를 제거하기 위하여 식 (14)에서 $j=1$ 부터 n 까지 모두 사용하지 않고, W_j 가 0에 가까워지는 적절한 곳에서 더하기를 마칠 때 얻어지는 BF 그림이다. 각 그래프의 우측 상단에 각각의 BF를 얻는 데 사용한 W_j 의 개수가 있다. 'n=101-90'은 전체 101개 W_j 중에서 작은 순서대로 90개를 제외하고 11개만을 이용하였다는 의미이다. $n = 11$ 정도에서 노이즈가 적절히 제거되고 뚜렷이 분리된 BF를 얻을 수 있다.

3.3 BF에서 시선속도 결정하기

그림 6의 우측 하단 그래프는 전형적인 BF를 잘 나타낸다. 이 그래프는 주성과 반성의 BF가 각각 비슷한 시선속도로 이동한 것이 더해져서 나타난 모습이다. 각각의 BF를 가우스 함수로 가정하면 전체 BF인 B는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B(v) = a_1 \exp\left(-\left(\frac{v-c_1}{\sigma_1}\right)^2\right) + a_2 \exp\left(-\left(\frac{v-c_2}{\sigma_2}\right)^2\right) + b \quad (15)$$

위 식에서 가우스 함수의 높이에 해당하는 a_1 , a_2 는 주성과 반성의 밝기, σ_1 , σ_2 는 흡수선의 폭과 관련되며, c_1 , c_2 가 주성과 반성의 시선속도를 나타낸다.

우리는 관측한 모든 스펙트럼의 BF를 구하고 식 (15)로부터 시선속도를 계산하면 변광성의 시선속도곡선을 구할 수 있다. 다음 절에서는 위 모든 과정으로 구한 EX Leo의 시선속도 결과와 이를 이용하여 구한 궤도 요소, 그리고 시선속도 곡선을 소개한다.

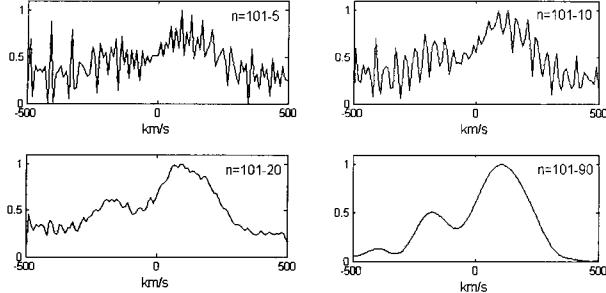


그림 6. 계산에 사용한 대각행렬 요소의 개수를 바꾸어 가며 구한 BF

4. 결과

관측을 통해 구한 30개의 스펙트럼의 시선속도를 3장에서 설명한 알고리즘을 이용하여 얻었다. 이 중, 식 부근에서 두 별의 시선속도가 분리되지 않는 4개를 제외하고 나머지 26개의 결과를 이용하여 시선속도 곡선을 구하였다(표 2). 시선속도 곡선은 두 별의 주기와 부호가 반대인 두 사인 함수의 합으로 표시되는 식 15를 이용하여 함수 맞추기(function fitting) 하였다. 시선속도 함수의 주기는 EX Leo에 대한 Lu et al. (2001)의 결과 0.4086일을 이용하였다.

$$\begin{cases} V_1(\phi_i) = V_0 - K_1 \sin 2\pi\phi_i \\ V_2(\phi_i) = V_0 + K_2 \sin 2\pi\phi_i \end{cases} \quad i = 1 - 26 \quad (16)$$

그림 7에 EX Leo의 시선속도 곡선을 나타내었다. 삼각형으로 나타낸 것이 주성의 시선속도 V_1 이고, 원으로 그려진 것이 동반성의 시선속도 V_2 이다. 아래 두 그래프는 각각 주성과 동반성의 시선속도 함수에 대한 잔차(residual, O-C)이다.

우리가 구한 결과와 비교를 위하여 그림 8에 Lu et al.(2001)이 캐나다 DDO(David Dunlap Observatory)에서 구한 시선속도 곡선을 나타내고, 표 3에 두 결과를 비교해 놓았다. 두 결과가 오차 범위 내에서 잘 일치한다.

보현산 긴슬릿 분광기의 화소당 평균 파장 분해능 0.67 \AA/pixel 과 DDO의 0.204 \AA/pixel (Lu et al. 2001)을 고려해 볼 때, 본 연구에서 구한 결과는 보현산 긴슬릿 분광기의 시선속도 측정의 정밀도가 DDO에 견줄 만한 것으로 판단할 수 있다.

표 2. 시선속도 산출 결과

2452687+ JD	phase	BF			CCF		
		(km/s) V_1	(km/s) V_2	(km/s) $O-C(V_1)$	(km/s) $O-C(V_2)$	(km/s) V_1	(km/s) $O-C(V_1)$
0.0135	0.13	-40.60	175.65	5.14	-3.68	-22.61	-2.41
0.0209	0.14	-54.00	173.48	14.79	-24.82	-22.57	-1.56
0.0312	0.17	-40.60	199.50	-3.01	-21.05	-26.34	-3.28
0.0429	0.20	-50.17	217.94	2.91	-21.10	-24.23	0.27
0.0772	0.28	-56.68	256.97	7.71	9.28	-19.78	5.33
0.0838	0.30	-52.85	248.29	5.13	6.93	-21.37	3.13
0.0908	0.31	-54.77	165.89	8.90	-66.05	-18.37	5.72
0.1304	0.41	-41.36	111.68	15.05	-21.37	-22.46	-6.01
0.1404	0.44	-37.53	92.16	18.05	-6.39	-13.10	0.08
0.1824	0.54	-0.96	-107.34	13.04	-46.26	-14.61	-13.41
0.1911	0.56	8.62	-118.18	9.81	-24.98	-17.18	-18.30
0.1968	0.57	8.62	-107.34	13.84	6.24	-13.82	-16.06
0.2333	0.66	41.17	-243.96	1.59	-27.69	-18.11	-28.48
0.2389	0.68	37.34	-252.63	7.49	-25.91	2.69	-8.86
0.2446	0.69	39.26	-250.46	7.33	-14.89	4.86	-7.17
0.2568	0.72	37.34	-254.80	11.78	-6.37	7.22	-5.83
0.2623	0.73	41.17	-265.86	8.54	-14.44	7.07	-6.17
0.2708	0.76	41.17	-265.86	8.75	-13.38	12.14	-1.22
0.2760	0.77	39.26	-261.52	10.38	-10.51	17.16	3.91
0.2815	0.78	48.83	-252.85	0.15	-5.16	27.20	14.14
0.3036	0.84	35.43	-242.44	7.48	-25.45	19.05	8.67
0.3089	0.85	14.36	-214.25	26.33	-8.43	24.10	14.40
0.3148	0.86	20.11	-194.73	17.80	-3.04	28.06	19.11
0.3312	0.90	18.19	-181.72	10.39	-37.19	20.10	14.70
0.3361	0.92	14.36	-166.54	11.05	-38.00	20.00	16.66
0.3418	0.93	16.28	-88.04	5.27	20.95	14.90	12.65

5. 논의

쌍성의 시선속도는 각 별의 질량, 궤도의 크기 등 천체의 기본 물리량을 결정할 수 있는 매우 중요한 연구이다. 이번 연구를 통해서 우리는 보현산 천문대 긴 슬릿 분광기를 이용하여 선폭이 넓은 SB2의 시선속도를 측정하기 위하여, BF를 이용한 프로그램을 개발하였다. 그림 9는 EX Leo의 시선속도를 BF와 CCF로 구한 결과를 비교한 것이다. CCF는 대부분의 경우에 두 별의 시선속도를 분리해 주지 못해서 주성의 시선속도 곡선만을 나타내었다. 그림에서 보듯이 CCF로 구한 주성의 시선속도(19.43 km/s)는 BF로 구한 시선속도(49.99 km/s)보다 현저히 작게 나타났다. 이것은 그림 4에서 보듯이 CCF로는 두 별의 시선속도가 분리되지 않고, 동반성의 시선속도 곡선이 주성의 시선속도 곡선에 겹쳐지기 때문으로 생각할 수 있다. 또한 시선속도의 오차도 CCF에서 $\sigma_{CCF} = 11.72 \text{ km/s}$ 로 BF의 오차 $\sigma_{BF} = 6.16 \text{ km/s}$ 에 비해 크게 나타났다. 이것으로 우리는 본 연구를 통해 개

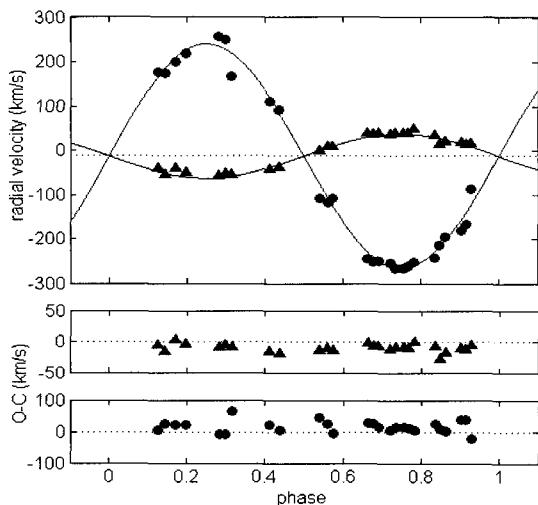


그림 7. EX Leo의 시선속도 곡선

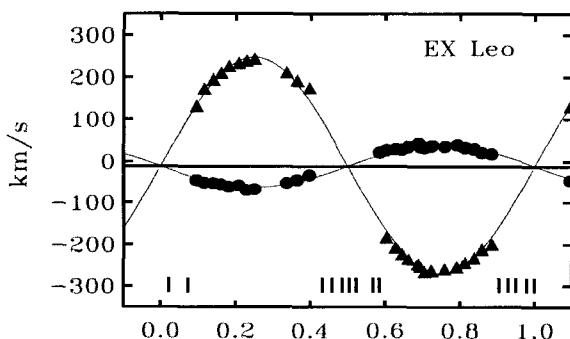


그림 8. Lu et al.(2001)이 구한 EX Leo의 시선속도 곡선

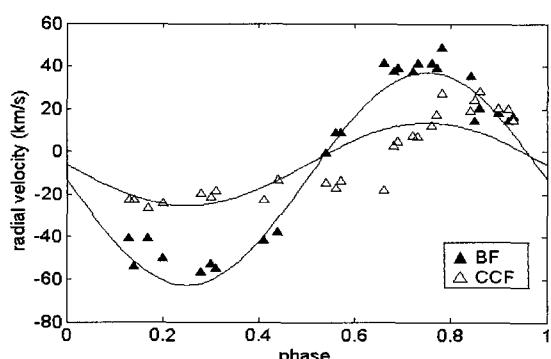


그림 9. BF와 CCF로 구한 EX Leo 주성의 시선속도 곡선

표 3. EX Leo의 궤도 요소 비교

	$K_1(\text{km/s})$	$K_2(\text{km/s})$	$V_0(\text{km/s})$	q
이 논문	49.99 ± 6.16	253.28 ± 18.61	-12.86	0.19
Lu 외	51.28 ± 3.23	257.98 ± 20.10	-11.05	0.199

발한 BF 코드로 접촉상성의 시선속도를 잘 추정할 수 있으며 이것이 CCF를 이용한 것보다 더 신뢰할 수 있는 결과를 준다는 것을 확인하였다.

표 3에 BF를 이용하여 구한 EX Leo 궤도 요소를 Lu et al. (2001)의 결과와 비교하였다. 이 논문에서 구한 EX Leo의 궤도 요소는 Lu et al. (2001)의 결과와 잘 일치한다. 이것으로 우리는 보현산 긴슬릿 분광기의 시선속도 정밀도가 DDO의 것과 비슷한 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

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

참고문헌

- 강동일, 박홍서, 한인우, G. Valyavin, 이병철, 김강민, 2005, BOES 관측데이터의 자동처리 프로그램 개발, PKAS, 20, 97
- 김강민, 이병철, 한인우, 윤태석, 2003, 보현산 천문 긴슬릿 분광기의 성능 분석, PKAS, 18, 81
- ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200
- Lu, Wenxian, Rucinski, Slavek M., & Ogloza, 2001, Waldarem, Radial Velocity Studies of Close Binary Stars. V., AJ, 122, 402
- Pribulla, T., Chochol, D., Vanko, M., & Parimucha, S., 2002, Information Bulletin on Variable Stars, No. 5258
- 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, p59
- Rucinski. M. Slavek, 2002, Radial Velocity Studies of Close Binary Stars. VII. Methods and Uncertainties, AJ, 124, 1746