

BX ANDROMEDAE의 시선속도 연구

이충욱^{1,2†}, 한인우¹, 김강민¹, 김천휘²

¹한국천문연구원

²충북대학교 자연과학대학 천문우주학과, 기초과학연구소

A STUDY OF THE RADIAL VELOCITY OF BX ANDROMEDAE

Chung-Uk Lee^{1,2†}, In-Woo Han¹, Kang-Min Kim¹, and Chun-Hwey Kim²

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

²Dept. of Astronomy & Space Science, College of Natural Science and
Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
E-mail: leecu@kao.re.kr

(Received October 21, 2004; Accepted November 16, 2004)

요 약

한국천문연구원 보현산 천문대(Bohyunsan Optical Astronomical Observatory, BOAO)의 BOES (Bohyunsan Optical Echelle Spectrograph)를 이용하여 2003년 2월 26-27일 이틀간에 걸쳐 BX And의 고분산 관측을 수행하였다. 이 관측을 통하여 얻은 스펙트럼은 총 38개로 위상 0.1 ~ 0.3에 이르는 구간을 제외하고는 전위상에 걸쳐 골고루 관측이 이루어졌다. 시선속도를 구하기 위하여 BF(Broadening Function)와 CCF(Cross-Correlation Function)를 이용한 방법이 모두 사용되었다. CCF를 이용하였을 때는 주성의 시선속도만을 얻은 반면, BF인 경우, 주성과 반성의 시선속도 모두를 잘 결정할 수 있었다. 새로운 시선속도곡선으로부터 주성과 반성의 최대 시선속도를 각각 $K_1 = 96.1\text{km/s}$ 와 $K_2 = 196.6\text{km/s}$ 으로 얻었으며, 이를 Bell *et al.*(1990)의 측광해와 결합하여 BX And의 절대 물리량을 새롭게 결정하였다.

ABSTRACT

High resolution spectroscopic observations of BX And using the BOES (Bohyunsan Optical Echelle Spectrograph) of Bohyunsan Optical Astronomical Observatory (BOAO) were performed during 26-27, Feb. 2003. From the observations, we obtained 38 line spectra of BX And which cover all phases except the phase interval between 0.^P1 and 0.^P3. Both methods of the CCF (Cross-Correlation Function) and BF (Broadening Function) were used to get the radial velocities of primary and secondary components. Both velocities of the primary and secondary stars were calculated with the BF method while only primary velocities were determined with the CCF. Using new radial velocity curves, the maximum radial velocities of the primary and secondary stars were obtained as $K_1 = 96.1\text{km/s}$ and $K_2 = 196.6\text{km/s}$, respectively. New absolute dimension of BX And was deduced with the combination of our spectroscopic solution with the photometric one of Bell *et al.* (1990).

Keywords: eclipsing binary, BX And, spectroscopic observation, radial velocity, absolute dimension

†corresponding author

1. 서 론

BX And(F.D 13078, $m_V = 8.98$)는 Soloviev(1945)에 의하여 알골 형태로 광도가 변한다고 처음 알려진 후, 200장의 Harvard patrol 사진건판을 분석한 Ashbrook(1951)에 의하여 β -Lyrae형 쌍성계로 분류된 천체로써 특이하게 변하는 광도곡선과 더불어 주기변화 및 주성과 반성의 큰 온도차로 인하여 많은 연구자들의 관심을 받아온 천체이다. 측광관측을 통한 광도곡선의 연구는 Svolopoulos(1957)의 최초 광전 측광을 시작으로 여러 차례(Svolopoulos 1957, Chou 1959, Castelaz 1979, Rovithis & Rovithis-Livaniou 1984, Samec, Fuller, & Kaitchuk 1989, Derman, Akalin, & Demircan 1989, Gulmen et al. 1988, Bell et al. 1990, Demircan, Akalin, & Derman 1993, Derman, Demircan, & Akalin 1993, Jassur, Khalaj, & Kermani 2000)에 거쳐 이루어 졌으나, 분광관측은 Bell et al.(1990, 이하 BRHH로 약함)에 의하여 1987년에 단 한차례 이루어졌다.

BRHH는 2.5m Isaac Newton 반사망원경을 사용하여 BX And의 중분산($16.7\text{\AA}/\text{mm}$) 분광관측을 수행하였다. 그들은 시선속도를 구하기 위하여, 표준성 HD36673(Sp.=F0Ib, $m_V = 2.6$)의 1차원 스펙트럼과 BX And의 1차원 스펙트럼을 서로 교차상관(Cross-Correlation) 시켜 CCF(Cross-Correlation Function)를 만들고, 그 CCF를 이중 가우스 프로파일에 최적화(optimization) 시켜 주성과 반성의 시선속도를 구하였다. 이때 획득한 관측점은 총 13점으로 그 수가 많지 않다.

한편, DDO(David Dunlop Observatory)의 S. M. Rucinski와 그의 동료 연구자들은 1.8m 망원경으로 접촉쌍성계를 집중적으로 분광관측하고, 기존의 교차상관방법 대신 관측된 스펙트럼에서 주성과 반성의 시선속도, 흑점, 빠른 자전 등과 같은 여러 효과들에 의한 BF(Broadening Function)를 합성분리(de-convolution)해 내는 방법을 사용하여, 접촉쌍성계의 시선속도를 획득하여 연속적으로 발표하고 있다(Lu & Rucinski 1999, Rucinski & Lu 1999, Rucinski, Lu, & Mochnacki 2000, Lu, Rucinski, & Ogloza 2001, Rucinski et al. 2001, Rucinski et al. 2002, Rucinski 2002, Rucinski et al. 2003, Pych et al. 2004). 그들에 의하면, 접촉쌍성과 같이 위에 열거한 이유들로 인하여 선풍이 증가할 경우, CCF 보다는 BF로 시선속도를 구하는 것이 시선속도를 구하는데 있어 더욱 오차를 줄일 수 있다고 주장하고 있다.

최근 한국천문연구원 보현산 천문대(Bohyunsan Optical Astronomical Observatory, BOAO)의 BOES(BOao Echelle Spectrograph) 분광기가 1.8m 망원경에 부착되어 2002년 하반기부터 관측에 사용됨에 따라, 국내에도 고분산($1.56\text{\AA}/\text{mm}$) 분광관측이 가능하게 되었다(Kim et al. 2002). 이에 따라, BOES를 이용한 국제적으로 경쟁력있는, 실질적인 천문관측 연구 분야의 도출이 필요하게 되었다. 이 논문에서 우리는 BOES로 획득한 BX And의 1차원 스펙트럼으로부터 기존의 CCF와 Rucinski의 BF를 계산하였고, 그것들을 분석하여, 위에서 기술한 두 방법을 상호 비교할 뿐만 아니라 우리가 얻은 새로운 시선속도를 이용하여 BX And의 기본 절대 물리량을 제시하고자 한다.

2. 관측 및 자료처리

2003년 2월 26-27일 이틀간 보현산 천문대 1.8m 망원경과 BOES를 이용하여 BX And의 분광관측을 수행하였다. 우리의 분광관측은 시선속도를 구하는 것이 주 목적이기 때문에 하늘 플랫폼(flat)은 찍지 않고, 텅스텐-할로젠 플랫폼을 10장 획득하고, 곧 바로 바이어스(bias) 영상을 10장 획득하였다. 관측에 사용한 BOES는 카세그레인 초점면에서 광섬유를 이용하여 천체의 상을 분광실로 가져와

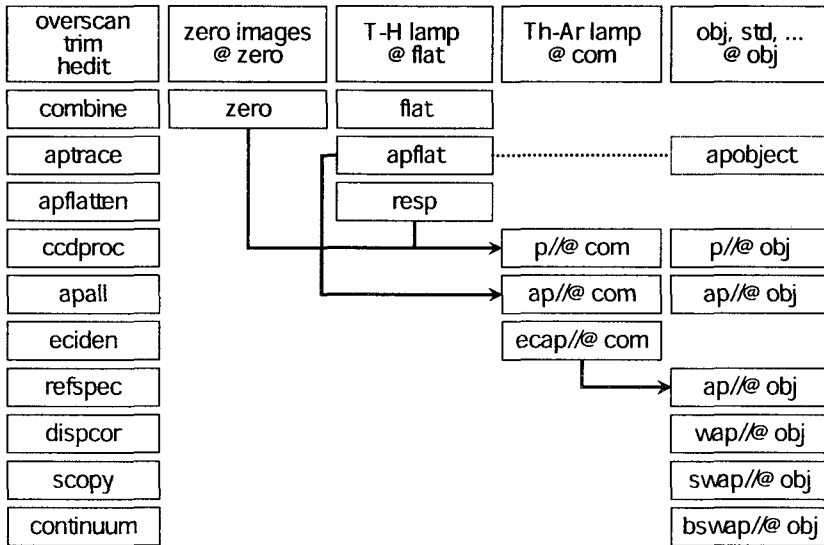


그림 1. 관측자료의 처리단계.

서 분광을 수행하는 방식이므로, 망원경 뒷면에 부착하는 방식의 분광기와는 달리 파장조정을 위한 Th-Ar 비교광원 영상을 대상천체의 관측 전후에 매번 획득하지 않아도 된다. 그러나, 비교광원의 변이에 대한 검토를 위하여 관측 시작 전과 관측 종료 후 2회에 걸쳐 비교광원 영상을 10장씩 획득하였다. BOES는 3개의 각각 다른 지름을 가진 광섬유를 가지고 있으며, 그날의 시상에 따라 광섬유의 직경을 결정하여 사용한다(Kim *et al.* 2002). 관측당시의 시상을 고려하여 우리는 $300\mu\text{m}$ 직경을 갖는 1번 광섬유를 사용하였다. 관측이 진행되는동안 슬릿 모니터링 CCD로 광섬유 안에 천체가 정확히 놓이는지의 여부를 판단하고, 망원경을 조종하여 광섬유 안에 천체가 정확히 놓이도록 유지 하였다.

시선속도 표준성으로 사용한 천체는 HD222368($SP=F7V$, $m_V=4.13$, $RV=5.6\text{km/s}$)이며, 관측이 진행되는 처음-중간-마지막에 각각 2번씩 관측하였다. 시선속도 표준성은 관측대상과 분광형이 비슷하고 관측성 근처에 위치한 것을 선택하였다. 시선속도 표준성의 노출시간은 70초로 설정하였고, BX And의 노출시간은 공전 주기가 약 14.6시간인 것을 고려하여 각 관측점이 얻어지는 샘플링 간격을 공전주기에 대하여 약 1.15% 정도인 600초로 설정하여 스펙트럼선이 위상에 따라 겹쳐지거나 뭉개지는 것을 방지하였다.

관측자료의 처리에는 IRAF를 사용하였다. ccdred 패키지를 이용하여 바이어스 영상과 플랫폼 영상을 만들고, echelle 패키지를 이용하여 2차원 스펙트럼 영상으로부터 1차원 스펙트럼을 얻고 파장보정을 하였다. IRAF에서 자료처리의 각 단계별 절차와 사용한 자료 처리 작업의 이름과 설정 변수들을 각각 그림 1과 표 1로 정리하였다.

3. 시선속도 곡선 산출과 분석

3.1 시선속도 곡선 산출

BX And의 시선속도를 얻기 위해서는 주성과 반성이 시스템의 질량중심에 대해 궤도운동할 때

표 1. 사용한 자료 처리 작업의 이름과 설정 변수.

작업명	설정변수 및 작업 내용
FILES	전처리용 영상을 만들기 위하여 바이어스, 텅스텐-할로겐 플랫폼, 관측성 등 리스트를 만든다.
ZEROCOMBINE	combine = average, reject = crreject, scale = none, rdnoise = 4, gain = 0.5
CCDPROC	overscan = yes, zerocor = yes, readaxi = line, biassec = [2100:2140,*], zero = zero, minrepl = -20, interac = no, functio = legendre, order = 7
FLATCOMBINE	combine = average, reject = avsigclip, scale = mode, rdnoise = 4, gain = 0.5
ECHELLE	dispaxis = 2 또는 hedit .fits dispaxis 2 add+ upd+ ver- 한다. 스펙트럼 이미지를 ds9 등으로 본 다음에 hedit 등을 이용하여 각 이미지의 header 키워드를 입력하거나, 파라미터 값을 바꾼다. 스펙트럼선이 옆으로 누워 있으면 dispaxis = 1로 설정하고, 스펙트럼선이 위아래로 세워져 있으면 dispaxis = 2로 설정한다. 다른 방법으로 hedit를 이용하여 dispaxis 값을 추가한다.
APTRACE	intrerac = yes, find = yes, resize = yes, trace = yes, fitrac = yes, functio = spline3, order = 2 fitting시 구간 sampling은 s s 로 한다. 우리의 경우 aperture는 약 85개 정도 찾았다.
APFLATTEN	reference = flat, flatten = yes, fitspec = yes, pfit = fit1d, rdnoise = 4, gain = 0.5, functio = spline3, order = 7, niterat = 1, low_rej = 1, high_rej = 0, flat 이미지를 nflat으로 만든다. 파라미터 setting에서 aperture에 관련된 항목은 모두 no로 선택한다. profile fitting type은 fit2d로 선택하였다.
CCDPROC	overscan = yes, zerocor = yes, readaxi = line, biassec = [2100:2140,*], zero = zero, flat = nflat, minrepl = -20, interac = no, functio = legendre, order = 7
BACKUP	zero 와 flat과 관련된 관측이미지는 모두 pre/ 라는 디렉토리로 옮기고 object 만 남긴다.
APSCATTER	input = pes*, output = %pes%s%*, reference = flat, interac = yes, subtrac = yes, smooth = yes, fitscat = yes, fitsmo = yes, apscat1,2 functio = spline3, order = 7
APALL	format = echelle, reference = flat, extract = yes, extras = yes, review = yes, lower = -5, upper = 5, b_funct = chebyshev, b_order = 1, b_sampl = -10:-6,6:10, pfit = fit1d, rdnoise = 4, gain = 0.5 imred ccdred echelle로 들어가서 작업을 실시한다.
APSUM	format = echelle, reference = flat, extract = yes, extras = no, pfit = fit1d, rdnoise = 4, gain = 0.5, apall에서 extract = yes, extras = no, review = yes로 한다.
ECIDENTIFY	match = 0.001, maxfeat = 100, thresho = 500000, m l f j k 등의 키를 이용한다.
ECREIDENTIFY	match = 0.001, maxfeat = 100, thresho = 500000, m l f j k 등의 키를 이용한다.
SETJD	date = date-obs, time = ut, exposur = exptime, ra = ra, dec = dec, epoch = epoch, jd = jd, hjd = hjd, ljd = ljd, utdate = yes, uttime = yes
REFSPEC DISPCORR	input = objlist, referen = compl,comp2, ignorea = yes, select = interp dispcor를 실행하여 object 이미지의 헤더에 파장에 따른 calibration 정보를 등록한다.
SCOPY	파장보정을 마친 스펙트럼으로부터 4350 ~ 4440Å, 4520 ~ 4610Å, 5125 ~ 5230Å에 각각 해당하는 25, 29, 41번 구경에 대하여 저장하였다.
CONTINUUM	function = spline3, order = 5, low_rej=2, high_rej=0, niter=10 으로 하여 continuum 보정 하였다.
SPLIT	splot으로 plotting을 하면 파장에 따른 adu 값을 볼 수 있다.

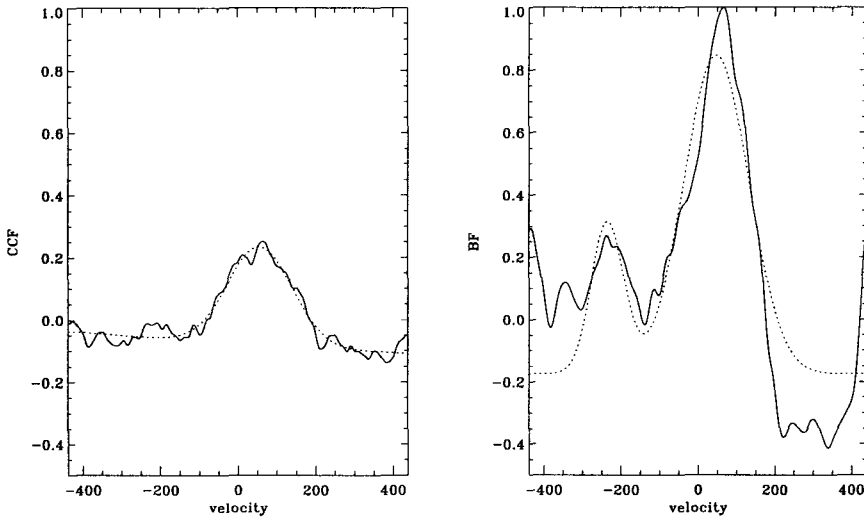


그림 2. CCF(Cross-Correlation Function)와 BF(Broadening Function)의 비교. BX And의 위상이 대략 0.75 근처에 있을 때, 관측한 1차원 스펙트럼을 가지고 CCF와 BF를 구하고 이 결과를 이용하여 2개의 가우스 곡선으로 최적화 하였다. 실선은 각각의 함수를 나타내며, 점선은 2개의 가우스 곡선으로 최적화한 결과이다. CCF의 경우(왼쪽 그림) 가우스 곡선이 1개로 최적화된 반면, BF의 경우(오른쪽 그림)에는 주성과 반성으로 인한 2개의 가우스 곡선으로 최적화되고 있다.

생기는 도플러 변이량을 검출해 내어야 한다. 이 변이값의 측정을 위해서 널리 사용되고 있는 방법 중 하나는 시선속도 표준성의 관측된 스펙트럼($f(k)$)과 BX And의 스펙트럼($g(k)$)을 서로 교차상관(cross-correlation) 시켜 교차상관함수(CCF)를 구하는 것으로써, 두 스펙트럼 사이의 교차상관함수 $c(x)$ 는

$$c(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k)g(k-x)dk \tag{1}$$

와 같이 얻는다(Hilditch 2001). 여기서 k 와 x 는 각각 $k = \log \lambda$ 와 $\log(1 + v/c)$ 으로, 각각 파장과 도플러 이동량을 나타내며, v 와 c 는 각각 별의 시선속도와 광속도이다(McLean 1981). CCF $c(x)$ 는 x 를 연속적으로 변위시켜 얻는데, x 를 변위시켜 가다 보면, $g(k-x)$ 가 $f(k)$ 와 일치되는 x 값이 될 때, $c(x)$ 는 최대값을 가질 것이다. 실제로 $c(x)$ 함수는 두 곳에서 최대값을 보이며, 이 두 정점에 대응하는 x 값은 주성과 반성의 시선속도를 준다.

우리는 교차상관 방법을 이용하여 시선속도를 얻기 위하여 BOES로 얻은 스펙트럼 선들 중에서 구경 29번에 해당하는 부분을 사용하였다. 이 영역의 스펙트럼은 4520~4610Å에 걸쳐 있으며, 대략 한 픽셀의 변이에 해당하는 시선속도는 약 1.46km/s 정도이다. CCF를 얻기 위하여 IDL 패키지에서 제공하고 있는 c.correlate 함수를 이용하였다. c.correlate 함수는 3개의 변수를 받아 1개의 결과를 주는 함수로써, 각각의 1차원 스펙트럼과 함께 -400 ~ +400까지의 범위를 가진 벡터를 입력하여 이 벡터상에서 두 스펙트럼의 관계를 나타낸다. 최종적으로 구한 BX And의 CCF의 한 예가 그림 2의 왼쪽 그림이다. 이 그림에 보인 CCF에서 주성의 시선 속도에 해당하는 한 개의 정점만이 뚜렷하고,

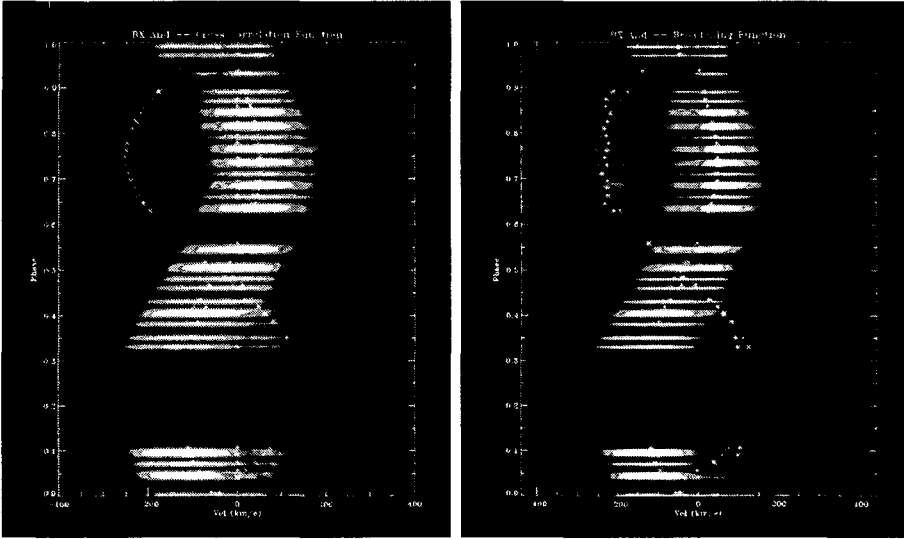


그림 3. 시선속도 표준성에 대한 각 관측 스펙트럼선의 CCF와 BF의 비교.

반성에 해당하는 정점을 찾기는 매우 어렵다. 우리는 각 위상에서 CCF를 이중 가우스곡선에 최적화시켜, 정점에 해당하는 속도를 시선속도로 정하였다. 최종적으로 구한 시선 속도를 표 2의 2행과 6행에 수록하였다.

그림 3의 왼쪽 그림은 모든 위상에 걸친 CCF를 보인 것이다. 그림에서 세로축은 관측시각을 위상으로 표시하여 나타낸 것으로써 Kreiner, Kim, & Nha(2001)의 광도요소($Min I = JD\ Hel\ 2448237.4893 + 0.61011419E$)를 이용하여 변환 시킨 것이다. 가로축은 x 값을 변화시켜 얻은 CCF를 의미하며, x 값을 속도로 변환하여 나타내었다. 그림에서 위상 0에서 1에 걸쳐 사인곡선 형태의 강하게 나타나는 윤곽이 주성에 의한 시선속도이며, 이 윤곽에 대하여 대칭적으로 희미하게 보이는 윤곽이 반성에 의한 시선속도이다(그림 3에서 왼쪽 그림에 표시된 반성의 윤곽은 거의 보이지 않는 반면, 후에 논의할 오른쪽 그림에 표시된 반성의 윤곽은 분간이 가능함에 유의하라). CCF 방법으로 BRHH는 BX And의 주성과 반성의 시선속도를 모두 얻은 반면, 우리의 관측에서 반성의 시선속도를 검출하지 못한 이유는 우리가 관측에 사용한 망원경은 1.8m 망원경과 CCD 중앙에서 약 $1.56\text{\AA}/\text{mm}$ 의 분해능을 가지는 고분산 분광기를 사용한 반면 BRHH는 2.5m의 망원경과 약 $16.7\text{\AA}/\text{mm}$ 의 중분산 분광기를 사용함으로써, 우리의 관측보다 큰 S/N 비를 획득하였기 때문인 것으로 보인다.

한편, Rucinski(1999)는 교차상관으로 구한 CCF에는 주성과 반성의 시선속도 정보 뿐 아니라 별의 자전 및 근접효과 등에 의한 선폭중가 정보가 포함되어 있기 때문에 W UMa형 쌍성과 같이 빠른 자전을 하는 근접쌍성의 시선속도를 구하는 방법으로는 관측한 스펙트럼을 합성분리(deconvolution)하여 BF를 구하고 이를 이용하여 시선속도를 구하면 오차를 줄일 수 있다고 제시하고, 특이값 분해(SVD; Singular Value Decomposition) 방법을 이용하여 BF를 구하는 방법과 절차를 DDO(David Dunlop Observatory)에서 관측한 중분산 관측자료를 이용하여 자세히 소개한 바 있다(<http://www.astro.utoronto.ca/~rucinski/SVDcookbook.html> 참조). 수학적으로 볼 때, BF는 두

스펙트럼을 단순히 교차상관 시켜 구한 CCF와는 달리, 관측된 스펙트럼으로부터 시선속도를 비롯하여 흑점, 자전효과 등과 같이 관측된 스펙트럼을 변형시키는 모든 정보를 합성분해시켜 낸 함수이다. 따라서, 교차상관방법으로 구한 CCF에 비하여 좀더 정확한 시스템의 정보를 담고 있다.

합성분리방법을 이용하여 BF를 얻는 과정은 관측성과 비슷한 분광형을 가진 표준성의 잘 정의된 예리한(sharp) 스펙트럼(\vec{S})이 BF(\vec{B})와 합성(convolution)되어 관측성의 스펙트럼(\vec{P})를 얻게 된다는 가정으로부터 시작된다. 즉, 그 관계는

$$\widehat{Des} \vec{B} = \vec{P} \tag{2}$$

으로 나타낼 수 있으며, 방정식들은 초과조건 선형방정식(over-determined linear equation)을 이룬다. 여기서, \vec{B} 는 특이값들의 집합이며, 디자인 행렬(design matrix) \widehat{Des} 은 표준성의 예리한 스펙트럼(\vec{S})을 수직 방향을 따라 한칸씩 이동시켜 만들 수 있으며,

$$\widehat{Des} = \hat{U} \hat{W} \hat{V}^T \tag{3}$$

와 같이 3개의 행렬의 곱으로 표시할 수 있다. 여기서, \hat{U} 와 \hat{V} 는 column ortho-normal 행렬이며, \hat{W} 은 대각 행렬이다. 식(2)에서 BF(\vec{B})는

$$\vec{B} = \hat{V} \hat{W} \hat{U}^T \vec{P} \tag{4}$$

으로 구할 수 있다.

우리는 Rucinski가 BF를 구하기 위하여 사용한 방법을 BOES 관측 자료에 맞게 각 변수들을 수정하여 각 위상에 따른 BF를 IDL의 svdc 함수와 svsol가 이용하여 구하였다. 중분산 스펙트럼을 사용하여 BF를 구할 경우에는, Rucinski가 지적하였듯이, 모든 특이값(Singular Value)을 사용하여도 별 문제가 없으나, 고분산 스펙트럼을 사용할 경우에는 스펙트럼의 S/N가 충분하지 않은 까닭에 모든 특이값을 사용하는 대신 특이값의 S/N비가 수렴될 때 까지의 특이값만을 이용하였고, 이번 BF를 결정하기 위해 사용한 특이값은 처음 150개 이다. 최종적으로 구한 BX And의 BF 함수의 한 예가 그림 2의 오른쪽 그림이다. 이 그림에서 보듯이, BF 함수에서 주성과 반성의 시선속도에 해당하는 두 개의 정점을 구분할 수 있다. 그림 2는 교차상관방법과 합성분해방법으로 각각 구한 CCF와 BF의 차이를 확연히 나타내고 있다.

CCF에서와 마찬가지로 각 위상에서 구한 BF를 이중 가우스곡선으로 최적화 하였다. 사용한 가우스 곡선의 프로파일(profile)은 주성의 경우에는 높이를 1.2, 폭을 120으로 하고, 반성의 경우에는 각각 0.3, 60으로 고정시킨 상태에서 프로파일의 위치를 사인 함수 형태로 변화시켜 가며 최적화 하였다. 최종적으로 구한 BF를 그림 3의 오른쪽 그림에 나타내었다. 그림 3에서 x로 나타낸 점들이 각각의 관계함수를 이중 가우스 곡선 최적화 시키기위해 사용한 가우스 프로파일의 위치 초기값이다. BF를 최적화 시켜 구한 주성과 반성의 시선속도를 표 2의 3~4행과 7~8행에 수록하였다.

3.2 시선속도 곡선 분석

Hilditch(2001)에 의하면, 쌍성의 시선속도(V)는

$$V_{1,2} = K_{1,2}[\cos(\theta + \omega) + e \cos \omega] + \gamma \tag{5}$$

$$K_{1,2} = \frac{2\pi a_{1,2} \sin i}{P(1 - e^2)^{1/2}} \tag{6}$$

표 2. CCF와 BF로 구한 BX And의 시선속도.

HJD (2452956+)	CCF K_1^* (km/s)	BF		HJD (2452956+)	CCF K_1^* (km/s)	BF	
		K_1 (km/s)	K_2 (km/s)			K_1 (km/s)	K_2 (km/s)
0.9245	-113.4	-121.6	96.6	1.1785	57.0	48.2	-234.3
0.9371	-101.9	-114.4	92.0	1.1881	56.9	47.5	-227.4
0.9584	-85.8	-98.6	82.8	1.1978	53.0	45.0	-221.9
0.9685	-81.4	-91.0	63.0	1.2076	51.4	42.9	-228.2
0.9782	-69.1	-84.2	46.8	1.2175	44.7	34.8	-232.4
0.9881	-61.4	-70.8	26.3	1.2271	42.3	34.9	-224.0
1.0084	-44.5	-42.7	-7.1	1.2371	36.9	30.2	-217.5
1.0183	-34.2	-38.8	-41.7	1.2469	31.9	22.8	-228.9
1.0280	-24.3	-29.8	-40.5	1.2568	24.5	17.9	-227.7
1.0378	-18.8	-24.9	-31.6	1.2667	19.1	15.5	-211.1
1.0543	-2.8	-6.4	-99.2	1.9052	6.6	3.0	-138.2
1.0641	4.4	-3.3	-123.7	1.9269	-38.5	-45.4	-48.8
1.1075	37.3	34.0	-210.0	1.9369	-50.8	-50.5	-44.8
1.1179	45.0	33.6	-232.4	1.9476	-76.2	-54.9	-44.8
1.1279	49.4	41.2	-224.2	1.9677	-94.8	-72.0	-33.6
1.1376	54.0	42.8	-226.6	1.9776	-99.5	-94.8	-2.9
1.1474	60.0	48.6	-225.4	1.9882	-102.2	-108.2	37.9
1.1571	57.7	48.7	-237.3	1.9981	-105.5	-115.6	98.7
1.1686	56.3	45.1	-227.0	2.0078	-111.6	-118.8	101.9

* CCF의 경우, 반성의 시선속도는 윤곽이 희미하여 이중 가우스 곡선 최적화가 이루어지지 않았다.

으로 표시된다. 여기서 θ, ω, e , 그리고 γ 는 진근점 이각, 근성점 이각, 이심률, 그리고 질량중심 속도를 나타내며, $K_{1,2}$ 는 시선속도의 반진폭을 나타낸다. 첨자 1은 주성을, 2는 반성을 의미한다. BRHH는 BX And의 광도곡선 분석을 통하여 BX And의 궤도를 원으로 가정하였다. 가장 최근의 Jassur, Khalaj, & Kermani(2000)의 광도곡선에서도 BX And는 원궤도를 지닌 근접쌍성의 특징을 보이고 있어, 우리도 BX And의 이심률을 0으로 가정하였다. 따라서, 식(5)와 (6)은

$$V_{1,2} = K_{1,2}[\cos(\theta)] + \gamma \quad (7)$$

$$K_{1,2} = \frac{2\pi a_{1,2} \sin i}{P} \quad (8)$$

으로 더욱 간단하게 된다. 여기서, θ 는

$$\theta = \frac{2\pi}{P}(t - T_o) \quad (9)$$

으로 표현된다. 이 식에서 t 와 T_o 는 각각 관측시각과 기산점을 나타낸다. 표 2에 제시된 각각의 방법으로 산출한 BX And의 시선속도를 반복 최소자승법으로 (7)~(9)에 맞추어 시선속도 해($T_o, P, \gamma, K_{1,2}$)를 각각 구하였다. 그 결과를 표 3에 수록하였다. 표 3에서 보듯이 CCF 분석에 의한 주성의 시선속도 해는 BF 방법에 의한 값보다 더욱 크게 나타 났으며, 이는 교차상관 방법으로 CCF를 구할 때 각각의 스펙트럼에 포함된 주성과 반성의 시선속도 효과 뿐 아니라 자전효과, 흑점, 열적 선폭증가 등의 효과가 선폭을 더욱 증가 시켰기 때문으로 여겨진다.

표 3의 시선속도 해를 이용하여 BX And의 시선속도곡선을 그림 4에 나타내었다. 각각의 방법으로 구한 결과를 비교하기 위하여 BF의 분석에서 결정한 시선속도와 CCF 분석으로 얻은 시선속도, 그리고, BRHH가 CCF 분석으로 결정한 시선속도를 그림 4에 모두 나타내었다. 그림 4에서 BF 방법

표 3. 시선속도로 부터 산출한 궤도요소 및 질량.

Parameter	Bell <i>et al.</i> (1990)	이 논문(BF)	이 논문(CCF)
K_1 (km/s)	105.5 ±1.9	96.1 ±4.4	99.4 ±1.8
K_2 (km/s)	212.3 ±4.0	196.6 ±4.1	
γ (km/s)	-45.1 ±2.7	-44.8 ±4.0	-39.4 ±1.2
$q(m_2/m_1)$	0.497 ±0.013	0.489 ±0.012	
$a_1 \sin i (R_\odot)$	1.272 ±0.022	1.158 ±0.053	
$a_2 \sin i (R_\odot)$	2.559 ±0.048	2.370 ±0.049	
$a \sin i (R_\odot)$	3.831 ±0.053	3.528 ±0.072	
$m_1 \sin^3 i (M_\odot)$	1.358 ±0.045	1.065 ±0.066	
$m_2 \sin^3 i (M_\odot)$	0.675 ±0.022	0.520 ±0.038	
$M_1^* (M_\odot)$	1.52 ±0.05	1.19 ±0.08	
$M_2^* (M_\odot)$	0.75 ±0.03	0.58 ±0.09	
$R_1^* (R_\odot)$	1.78 ±0.03	1.64 ±0.03	
$R_2^* (R_\odot)$	1.30 ±0.03	1.19 ±0.04	

*Bell *et al.*(1990)에서 사용한 $i = 74.55 \pm 0.50$, $r_1 = 0.448 \pm 0.005$, $r_2 = 0.326 \pm 0.005$ 적용

으로 구한 시선속도를 주성은 닫힌 원, 반성은 열린 원으로 나타내고, 이론적인 곡선을 실선으로 표시하였다. CCF 방법으로 획득한 주성의 시선속도는 열린 사각형으로 표시하고 이론적인 시선속도 곡선은 짧은 파선으로 나타내었다. 이와 함께 BRHH가 구한 시선속도곡선 해를 점선으로 함께 나타내고, 그들이 관측한 시선속도(주성: 닫힌 삼각형, 반성: 열린 삼각형)를 삼각형으로 표시하였다. 그림 4의 아래 부분에 관측치와 이론치의 차이(잔차)를 보였다.

표 3과 그림 4에서 보듯이 이 연구에서 CCF와 BF를 분석하여 결정한 주성의 시선속도 K_1 은 각각 99.4(±1.8)km/s와 96.1(±4.4)km/s으로, 두 값의 차이는 3.3(±4.8)km/s이다. CCF 분석으로 구한 값과 BRHH의 값과는 6.1(±2.6)km/s의 차이를 보이고 있다. 한편, BF 분석을 통하여 구한 K_1 과 K_2 값은 주성과 반성에 대하여 96.1(±4.4)km/s, 196.6(±4.1)km/s 로써 BRHH가 구한 105.5(±1.9)km/s, 212.3(±4.0)km/s 보다 작은 값이다.

Hilditch(2001)에 의하면, 쌍성의 질량($m_{1,2}$), 장반경($m_{1,2}$), 궤도경사각(i)은 시선속도곡선 반진폭($K_{1,2}$)과 궤도공전주기(P)의 함수로,

$$m_{1,2} \sin^3 i = (1.0361 \times 10^{-7})(1 - e^2)^{3/2}(K_1 + K_2)^2 K_{2,1} P M_\odot \quad (10)$$

$$a_{1,2} \sin i = (1.9758 \times 10^{-2})(1 - e^2)^{1/2} K_{1,2} P R_\odot \quad (11)$$

으로 기술된다. 우리가 구한 K_1 , K_2 값과 BRHH가 구한 측광학적 해($i = 74.^\circ 55 \pm 0.50$, $r_1 = 0.448 \pm 0.005$, $r_2 = 0.326 \pm 0.005$)를 이용하여 식(10)과 (11)로 부터 BX And의 절대 물리량을, 표 3에 수록한 바와 같이, 새롭게 결정하였다.

BF 분석을 통하여 구한 BX And의 주성과 반성의 질량은 1.19(±0.08) M_\odot , 0.58(±0.09) M_\odot 이었고, 반경은 1.64(±0.03) R_\odot , 1.19(±0.04) R_\odot 로써, 표 3에서 제시한 BRHH가 결정한 값과 다소 차이를 보이고 있다. 이 원인에 대한 가능한 설명으로, 첫째, BRHH의 시선속도곡선은 약 16.7Å/mm의 분해능을 갖는 중분산 스펙트럼을 이용하여 얻어진 반면, 우리의 것은 1.56Å/mm의 고분산 스펙트럼으로 부터 획득된 것이기 때문에, 분산의 차이에 따라 시선속도의 차이가 생길 수 있다. 일반적으로 분산이 클수록 정밀도가 향상된 시선속도를 얻을 수 있다(Hilditch 2001). 둘째, Rucinski(1999)가 주

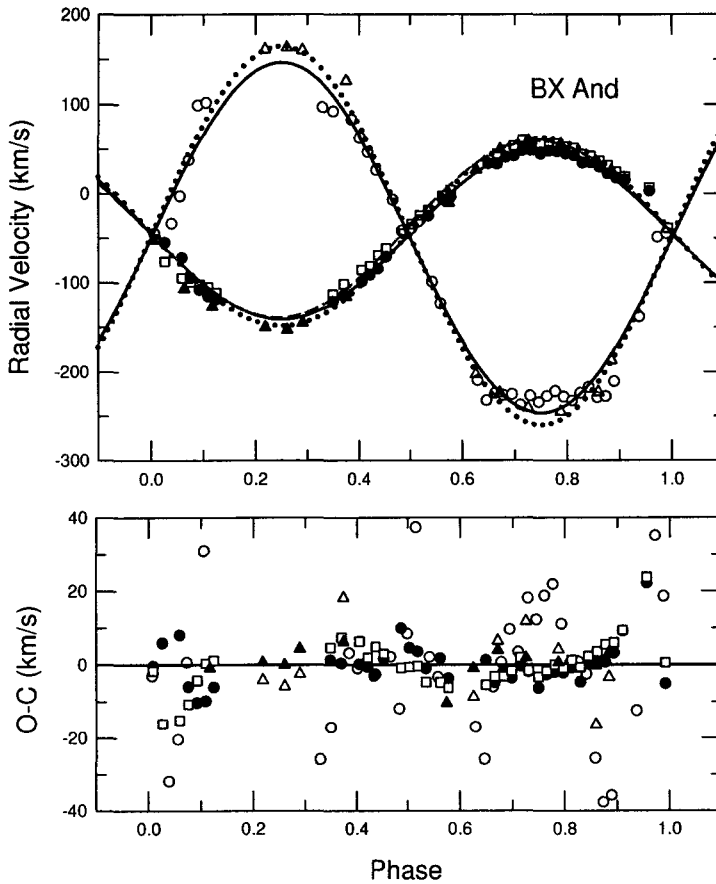


그림 4. 이번 관측으로 얻은 CCF(Cross Correlation Function)와 BF(Broadening Function)의 분석을 통하여 결정된 BX And의 시선속도를 BRHH의 결과와 함께 나타내었다. 자세한 내용은 본문에 기술되어 있다.

장하는 바와 같이, BF 분석 방법이 기존의 CCF 분석 방법보다 주성과 반성의 시선속도 오차를 더욱 최소화 할 수 있었기 때문으로 여겨진다.

4. 요약

우리는 2003년 2월 26-27일 이틀간 BOES로 BX And를 분광관측하여 위상 0.1 ~ 0.3을 제외한 전위상에 걸쳐 총 38개의 1차원 스펙트럼을 얻었다. 시선속도 분석을 위하여 기존에 널리 사용되던 교차상관 방법으로 얻은 CCF와 Rucinski가 제시한 BF를 이용한 방법을 모두 적용하여, 이 스펙트럼들을 분석한 결과, BF를 사용하였을 때 CCF에 비하여 주성과 반성의 시선속도가 더욱 잘 구별됨을 확인하였다. 또한, BRHH의 측광 해와 우리가 구한 분광 해를 결합하여, 표 3에 수록한 것과 같이, BX And의 절대 물리량을 산출하였다. 새롭게 결정된 주성과 반성의 질량은 각각 $1.19(\pm 0.08)M_{\odot}$,

0.58(\pm 0.09) M_{\odot} 이며, 반경은 1.64(\pm 0.03) R_{\odot} , 1.19(\pm 0.04) R_{\odot} 이다. 이 값들은 BRHH의 값과는 다소 차이를 보이고 있는데, 이 차이는 첫째, BRHH의 시선속도가 중분산 관측으로 얻은 반면, 우리의 시선속도는 고분산 관측을 통하여 이루어 졌다는 점과 둘째, 교차상관방법과 상관분해방법의 차이에 기인한 것으로써, 교차상관으로 부터 구한 CCF에는 시선속도뿐 아니라 자전 및 흑점 등으로 인한 영향이 그대로 포함되어 있는 반면, 상관분해방법이 관측된 스펙트럼을 변형시키는 모든 요인을 분해하여 오차를 더욱 최소화 시켰기 때문으로 여겨진다. 한편, 그림4에서 나타나고 있는 잔차값은 반성의 경우 충분한 S/N 비를 갖는 스펙트럼을 얻지 못하여 생긴것으로 생각되고, 주성에서 나타나고 있는 사인형태의 잔차는 식부근에서 그 크기가 큰 것으로 보아 근접효과에 의한 영향으로 생각된다.

결론적으로 우리는 한국천문연구원 보현산 천문대의 BOES 분광기를 이용하여 근접쌍성계의 정밀 시선속도의 획득이 가능하다는 것을 이 연구를 통하여 확인하였을 뿐만 아니라, 1.8m 망원경에 적합한 근접쌍성계를 잘 선택하여 분광관측을 장기적으로 수행한다면, 국제적으로 경쟁력있는 질 좋은 천문관측 자료를 국내에서도 축적할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글: 이 연구는 과기부 특정연구개발사업(과제번호: M1-0222-00-0004)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Ashbrook, J. 1951, AJ, 56, 54
 Bell, S. A., Rainger, P. P., Hill, G., & Hilditch, R. W. 1990, MNRAS, 244, 328
 Castelaz, M. 1979, IBVS, 1554
 Chou, K. C. 1959, AJ, 64, 468
 Demircan, O., Akalin, A., & Derman, E. 1993, A&AS, 98, 583
 Derman, E., Akalin, A., & Demircan, O. 1989, IBVS, 3325
 Derman, E., Demircan, O., & Akalin, A. 1993, Ap&SS, 205, 327
 Gulmen, O., Gudur, N., Sezer, C., Eker, Z., Keskin, V., & Kilinc, B. 1988, IBVS, 3266
 Hilditch, R. W. 2001, An Introduction to Close Binary Stars (New York: Cambridge University Press)
 Jassur, D. M. Z., Khalaj, A., & Kermani, M. H. 2000, IBVS, 5006
 Kim, K.-M., Jang, B.-H., Han, I., Jang, J. G., Sung, H. C., Chun, M.-Y., Hyung, S., Yoon, T.-S., & Vogt, S. S. 2002, JKAS, 35, 221
 Kreiner, J. M., Kim, C.-H., & Nha, I.-S. 2001, An Atlas of O-C Diagrams of Eclipsing Binary Stars (Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej: Krakow)
 Lu, W., & Rucinski, S. M. 1999, AJ, 118, 515
 Lu, W., Rucinski, S. M., & Ogloza, W. 2001, AJ, 122, 402
 McLean, B. J. 1981, MNRAS, 195, 931
 Pych, W., Rucinski, S. M., DeBond, H., Thomson, J. R., Capobianco, C. C., Blake, R. M., Ogloza, W., Stachowski, G., Rogoziecki, P., Ligeza, P., & Gazeas, K. 2004, AJ, 127, 1712
 Rovithis, P., & Rovithis-Livaniou, H. 1984, Ap&SS, 105, 171

Rucinski, S. M. 1999, ASP Conf., 185, 82

Rucinski, S. M. 2002, AJ, 124, 1746

Rucinski, S. M., & Lu, W. 1999, AJ, 118, 2451

Rucinski, S. M., Capobianco, C. C., Lu, W., DeBond, H., Thomson, J. R., Mochnacki, S. W., Blake, R. M., Ogloza, W., Stachowski, G., & Rogoziecki, P. 2003, AJ, 125, 3258

Rucinski, S. M., Lu, W., Capobianco, C. C., Mochnacki, S. W., Blake, R. M., Thomson, J. R., Ogloza, W., & Stachowski, G. 2002, AJ, 124, 1738

Rucinski, S. M., Lu, W., & Mochnacki, S. W. 2000, AJ, 120, 1133

Rucinski, S. M., Lu, W., Mochnacki, S. W., Ogloza, W., & Stachowski, G. 2001, AJ, 122, 1974

Samec, R. G., Fuller, R. E., & Kaitchuk, R. H. 1989, AJ, 97, 1159

Soloviev, A. 1945, Astronomical Circular of the USSR Academy of Science, 44, 3

Svolopoulos, S. N. 1957, AJ, 62, 330