

근접촉쌍성 XZ CMi의 CCD 측광관측과 광도곡선 분석

김천휘^{1,2†}, 박장호^{1,3}, 이재우³, 정장해^{1,2}, 오준영¹

¹충북대학교 천문우주학과

²충북대학교 천문대

³한국천문연구원

CCD Photometric Observations and Light Curve Synthesis of the Near-Contact Binary XZ Canis Minoris

Chun-Hwey Kim^{1,2†}, Jang-Ho Park^{1,3}, Jae Woo Lee³, Jang-Hae Jeong^{1,2}, and Jun-Young Oh¹

¹Dept. of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

²Chungbuk National University Observatory, Cheongju 361-763, Korea

³Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: kimch@chungbuk.ac.kr, pooh107162@kasi.re.kr, jwlee@kasi.re.kr, jeongjh@chungbuk.ac.kr, jyoh3324@naver.com

(Received May 18, 2009; Accepted May 23, 2009)

요 약

근접촉쌍성 XZ CMi의 BV 측광관측을 수행하여 새로운 광도곡선과 총 7개의 극심시각을 획득하였다. 관측한 극심시각과 지금까지 발표된 극심시각을 수집하여 XZ CMi의 궤도 공전주기를 분석한 결과, 이 쌍성계의 공전주기가 지난 70년간 영년 주기감소와 더불어 규칙적으로 변화함을 확인하였다. 규칙적인 변화를 제3천체에 의한 광시간 효과로 가정하여 0.0056일의 진폭, 약 29년의 주기, 그리고 0.71의 궤도이심율의 광시간 궤도를 결정하였다. 관측된 영년 주기감소(-5.26×10^{-11} d/P)를 자기제동 항성풍의 각운동량 손실에 의한 주기감소(-8.20×10^{-11} d/P)와 질량이 작은 반성에서 주성으로 질량 이동에 의한 주기 증가(2.94×10^{-11} d/P)가 동시에 일어나는 것으로 해석하였다. 이런 관점에서 AML에 의한 주기감소율은 질량 이동에 의한 공전주기 증가율보다 그 크기가 약 3배 정도 크며, 반성에서 년간 $3.21 \times 10^{-8} M_{\odot}$ 의 질량이 주성으로 이동된다. 관측된 BV 광도곡선을 최근의 Wilson & Devinney 쌍성코드로 주성의 온도를 달리하는 두가지 모형(8200K와 7000K)을 상정하여 분석하였다. 두가지 모형 해 모두 XZ CMi가 반성이 로쉬 로브를 채웠으나, 주성은 아직 로쉬 로브를 채우지 않은 근접촉 쌍성임과 약 15-17%의 제3광도가 이 계에 있음을 보여준다. 그러나, 제3광도를 내는 천체가 주기연구에서 제안한 제3천체와 동일 천체가 아닌 것은 확실하다. 두 모형의 $\sum(O - C)^2$ 의 차이는 너무 미미하여, 현 시점에서 어느 해가 더 관측치를 잘 맞추는 지를 가릴 수는 없었다. 그간 연구자간에 불일치하였던 질량비의 다양성 문제는 아직도 풀리지 않는 숙제로 남아있다. 이를 해결하기 위해서 분광시선속도곡선과 스펙트럼의 관측과 더불어 정밀 측광관측이 필요하다.

Abstract

Through the photometric observations of the near-contact binary, XZ CMi, new BV light curves were secured and seven times of minimum light were determined. An intensive period study with all published timings, including ours, confirms that the period of XZ CMi has varied in a cyclic period variation superposed on a secular period

[†]corresponding author

decrease over last 70 years. Assuming the cyclic change of period to occur by a light-time effect due to a third-body, the light-time orbit with a semi-amplitude of 0.0056d, a period of 29y and an eccentricity of 0.71 was calculated. The observed secular period decrease of -5.26×10^{-11} d/P was interpreted as a result of simultaneous occurrence of both a period decrease of -8.20×10^{-11} d/P by angular momentum loss (AML) due to a magnetic braking stellar wind and a period increase of 2.94×10^{-11} d/P by a mass transfer from the less massive secondary to the primary components in the system. In this line the decreasing rate of period due to AML is about 3 times larger than the increasing one by a mass transfer in their absolute values. The latter implies a mass transfer of $\dot{M}_s = 3.21 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ y}^{-1}$ from the less massive secondary to the primary. The *BV* light curves with the latest Wilson-Devinney binary code were analyzed for two separate models of 8200K and 7000K as the photospheric temperature of the primary component. Both models confirm that XZ CMi is truly a near-contact binary with a less massive secondary completely filling Roche lobe and a primary inside the inner Roche lobe and there is a third-light corresponding to about 15-17% of the total system light. However, the third-light source can not be the same as the third-body suggested from the period study. At the present, however, we can not determine which one between two models is better fitted to the observations because of a negligible difference of $\sum(O - C)^2$ between them. The diversity of mass ratios, with which previous investigators were in disagreement, still remains to be one of unsolved problems in XZ CMi system. Spectroscopic observations for a radial velocity curve and high-resolution spectra as well as a high-precision photometry are needed to resolve some of remaining problems.

Keywords: eclipsing binary, XZ CMi, period variation, third-body, photometric solution

1. 서 론

Hoffmeister(1934)에 의하여 처음으로 알골형 근접쌍성으로 발견된 XZ CMi(BD+04 1850, GSC 185 1659)은 분광형이 F3인 주성 주위로 분광형이 K1인 반성이 약 0.5792일마다 공전하고 있는 근접쌍성이다(Samec et al. 2006, 이하 SRF로 약함). 이 별의 최초의 광전관측이 이루어지기 전까지의 관측역사는 Wilson(1966, 이하 WI로 약함)과 Mardirossian & Giuricin(1981, 이하 MG로 약함)의 논문에 자세히 소개되어 있다.

WI는 최초의 *BV* 광전관측 광도곡선을 완성하여 Russell & Merrill(1952, 이하 RM으로 약함) 쌍성 모형으로 광도곡선 해를 시도하였으나 전체 광도의 최소 25%에 달하는 제3광도를 도입하지 않으면 식의 형태와 깊이를 모두 만족하는 해를 구할 수 없었다. 그는 제3광도의 고려는 RM 쌍성 모형이 갖고 있는 한계 때문으로 결론지었다. 그는 관측된 색지수로부터 주성의 분광형을 A5로 분류하였다. 그 후 WI의 광도곡선은 많은 연구자들에 의하여 두가지 쌍성모형으로 재분석되었다. WINK 쌍성 모형(Wood 1972)을 사용하여 MG는 제3광도의 고려없이 WI의 *BV* 광도곡선을 각각 만족시키는 해를

구하였다. 이 때 MG는 주성의 분광형을 Kukarkin et al.(1969)의 목록에서 수록된 F0로 채택하였다. MG는 주성과 반성의 질량을 각각 $1.7M_{\odot}$ 와 $0.7M_{\odot}$ 으로, 반경을 각각 $1.5R_{\odot}$ 와 $0.7R_{\odot}$ 으로 산출하여, 주성(F0)은 경험적인 질량-광도관계와 질량-반경관계를 잘 따르는 전형적인 주계열별이나 반성은 질량과 분광형(K0)에 비하여 너무 밝고, 너무 큼을 보였다. 반면, Terrell & Wilson(1990, 이하 TW로 약함)은 로쉬 기하에 기반을 둔 쌍성 모형(Wilson & Devinney 1971, 이하 WD로 약함)을 도입하여 역시 제3광도의 고려없이 WI의 BV 광도곡선을 동시에 만족시키는 해를 구하였다. TW는 WI가 식의 형태와 깊이를 만족시키는 해를 구할 수 없었던 것은 실제 그 계에 매우 큰 제3광도가 존재하기 때문이 아니라 사용한 RM 모형이 실제 별의 물리적 모형과 다른 타원체 모형을 사용한 결과 때문이라고 결론지었다. 또한, TW는 그때까지 제안된 주성에 대한 두가지 분광형(A5와 F0) 각각에 대응되는 주성의 이론적인 온도(8200K와 7200K)를 나누어 해를 산출한 결과 A5에 해당하는 해가 F0의 해보다 $\sum(O-C)^2$ 이 약간 더 작게 나타났다. 같은 온도(7200K)를 사용하였으나 MG의 WINK 모형 해와 TW의 WD 모형 해가 궤도경사각, 반성의 온도, 그리고 질량비에 있어 무시할 수 없는 차이가 난 이유를 TW는 일부는 로쉬 모형과 타원체 모형의 차이에 기인한 결과로, 또, 일부는 BV 광도곡선을 동시에 푼 것과 각각 푼 결과 때문으로 설명하였다. TW는 다색 광도곡선을 동시에 푸는 것이 더 일관된 해를 얻을 수 있다고 조언하였다. 더불어 TW는 주성은 안쪽 로쉬 한계면 안에 놓여 있으면서 그 한계면에 근접해 있고, 반성은 로쉬 한계면을 채운 준분리형의 쌍성으로 XZ CMi를 분류하였다. 한편, Rafert(1990, 이하 RA로 약함)는 WD 쌍성 모형으로 WI의 광도곡선을 제3광도를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 해를 산출한 결과, 전자의 경우가 후자의 경우보다 $\sum(O-C)^2$ 의 값이 더 작게 나타났기 때문에 그는 전자의 경우를 더 선호한다고 하였다. 그가 구한 제3광도는 BV 파장영역에서 전체광도의 각각 약 11%와 17%이다. 또한, 그는 Gotz & Wenzel(1967)이 제시한 분광형 A5를 주성의 온도(8876K)를 추산하는데 사용하였다.

그 이후 Terrell et al.(1994, 이하 TGK로 약함)은 광전관측을 시도하여 새로운 BV 광도곡선을 완성하여 새로운 해를 산출하였다. 그들은 XZ CMi계에 RA가 제안한 제3광도를 굳이 고려할 필요가 없음을 강조하면서 이 쌍성계가 반성이 로쉬 한계면을 채운 준분리형임을 재확인 하였다. 그러나, 최근에 Terrell & Henden(2002, 이하 TH로 약함)은 UBVRi 다색측광을 수행하여 XZ CMi보다 약 1.98등급 어두우면서, XZ CMi에서 약 2.5각초 떨어져 있는 제3천체가 있음을 발견하였다. 또한, 그들은 두 관측소에서 서로 다른 관측 장비를 가지고 약 두달의 시간 간격이 있는 두개의 비대칭적 모양을 보이는 광도곡선을 각각 완성하였는데, 두 광도곡선은 0.95-0.55 위상까지는 그 모양이 잘 일치하나 0.55-0.95 위상에서는 심한 차이가 보이고 있다. 이는 두달의 짧은 기간동안에도 XZ CMi가 심한 광도변화를 겪고 있음을 보여주는 것이다. 그들은 제3천체의 광도가 전체광도에 약 15% 정도 기여한다고 가정하여 XZ CMi의 새로운 광도곡선의 해를 산출하였다. 이때 그들은 측광관측으로부터 XZ CMi의 주성의 분광형을 F2로 정하고, 해를 산출하는데 이를 사용하였다. 가장 최근에 SRF은 XZ CMi의 UBVRi 측광을 시도하여 다색 광도곡선을 완성하여, 제3광도를 고려한 새로운 광도곡선 해를 산출하였다. 그들은 약 17-18%에 이르는 제3광도를 검출하여 위에서 여러 연구자들에 의하여 제기된 제3광도를 재확인하였다. 표 1에 WD 쌍성모형으로 여러 연구자들이 구한 XZ CMi의 측광학적 해를 수록하였다. 이 표에서 보면 XZ CMi의 측광학적 해 중 가장 중요한 변수 중의 하나인 질량비가 연구자간에 일치되지 않고 있음을 보며, 또한, 주성의 온도가 아직 확정되지 않고 있다.

표 1. 여러 학자들이 구한 XZ CMi의 측광해.

Parameters	RA ^a		TW ^a				TGK ^a		TH ^a		SA ^a	
q	0.377		0.439				0.418		0.421		0.680	
$i(^{\circ})$	81.9		77.1				77.7		77.6		78.8	
star	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ω	2.972	2.630	3.189	2.756	3.165	2.715	3.040	2.720	3.480	-	3.755	3.468
$T(K)$	8,876	5,181	8,200	4,837	7,200	4,412	8,200	5,098	7,000	4,910	7,000	5,036
l/L_u^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.629	0.226
l/L_b^b	0.877	0.021	0.946	0.054	0.950	0.050	0.950	-	-	-	0.663	0.191
l/L_y^b	0.855	0.043	0.915	0.085	0.921	0.079	0.920	-	0.739	0.130	0.694	0.153
l/L_r^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.751	0.097
l/L_i^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.786	0.061
l_{3uv}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.17
l_{3b}	0.114	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.17
l_{3y}	0.171	-	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-	0.18
l_{3r}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18
l_{3i}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18

a: RA=Rafert(1990), TW=Terrell & Wilson(1990), TGK=Terrell et al.(1994), TH=Terrell & Henden(2002), SRF=Samec et al.(2006)
 b: $L=l_1+l_2+l_3$

Shaw(1994)는 XZ CMi를 근접축쌍성으로 분류한 바 있다.

XZ CMi의 궤도공전주기의 변화에 관하여 처음으로 언급한 연구자는 WI으로 그는 주기 변화가 약하나마 존재한다고 지적하였고, Gimenez & Costa(1979)는 이를 재확인하였으나 초기 극심시각들의 심한 분산으로 인하여 주기변화의 자세한 성질을 파악할 수 없었다. 그로부터 23년 후 XZ CMi의 궤도공전주기의 일반적인 변화에 대한 연구가 Qian(2002, 이하 QI로 약함)에 의하여 수행되었다. 그는 이 쌍성계의 공전주기가 포물선 모양으로 영년 주기감소와 그 위에 주기적인 변화가 겹쳐 있다는 것을 발견하였다. 그가 제안한 영년 주기감소율은 약 $dP/dt = -3.40 \times 10^{-8}d/y$ 이며, 주기적인 변화의 주기와 반진폭은 각각 30.5년과 0.0051일이다. 그는 주기적인 변화의 원인에 대하여 보이지 않는 제3천체에 의한 광시간 효과이거나 성분별의 자기활동에 의한 것일 수 있으나 이전 연구자들의 측광자료 분석에서 제3광도의 존재가 검출되었기 때문에 광시간 효과를 선호한다. 그는 XZ CMi의 영년 주기감소는 항성풍의 자기제동에 의하여 일어나며, XZ CMi와 같은 근접축쌍성은 결국 주기가 계속 줄어들어 공통대기를 갖는 W UMa형 접촉쌍성으로 진화한다고 주장한다. 가장 최근에 SRF은 더 축척된 극심시각을 분석하여 QI가 발견한 영년 주기감소와 주기적인 변화를 확인하였다. 그는 약 $dP/dt = -6.80 \times 10^{-8}d/y$ 의 영년 주기감소율을 구하였고, 주기적인 변화의 주기와 반진폭을 각각 23년과 0.0051일로 산출하였다. 그의 영년 주기감소율의 크기는 QI의 것보다 두배로 크며, 주기적인 변화의 변화주기는 약 7년이나 짧은 것이다. 그러나 그는 XZ CMi의 궤도주기의 주기적인 변화의 원인을 제3천체보다는 자기활동에 의한 것으로 더 생각하고 있다.

이 연구는 XZ CMi을 CCD 관측하여 얻은 새로운 극심시각과 BV 광도곡선을 분석하였다. 이를 통하여 XZ CMi계에 풀리지 않고 남아있는 문제나 아직도 의견이 분분한 문제들을 재고찰하여 이 쌍성계를 더 잘 이해하고자 한다.

2. 관 측

근접축쌍성 XZ CMi를 충북대학교 41동 교내관측소에서 2008년 2월 15일부터 3월 14일까지 총 10일간 측광관측을 하였다. 구경 35cm 카세그레인 망원경과 ST-8 CCD 카메라가 관측에 사용되었

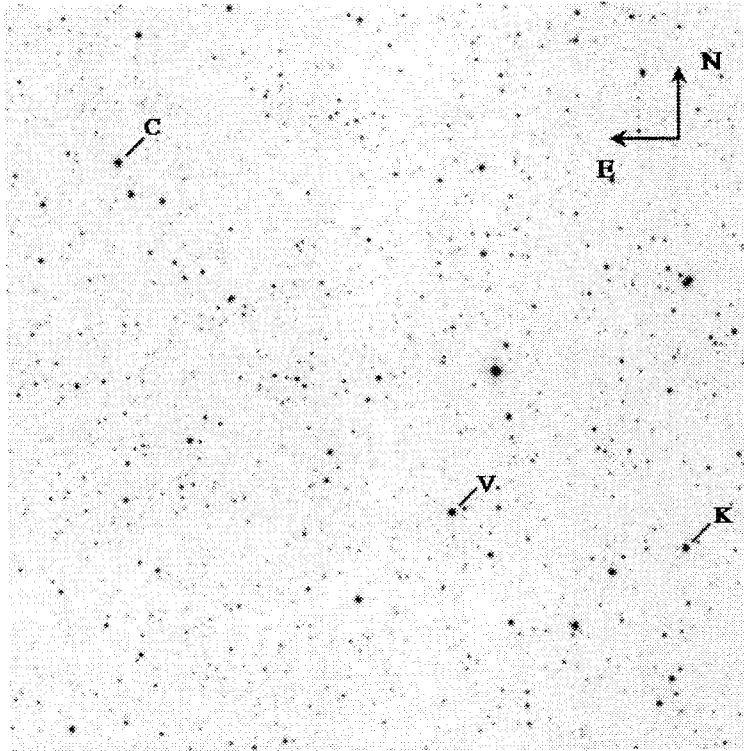


그림 1. XZ CMi(V), 비교성(C), 그리고 점검성(K)을 포함한 성도($30' \times 30'$).

다. CCD 카메라의 앞면에 초점거리 감소장치를 장착하여 확보된 시야는 약 $19'.1 \times 12'.6$ 이다. 관측에 사용한 필터는 Johnson의 *UBV* 필터와 근사한 유효파장을 보이는 *BV* 필터이다. 또한, 전기냉각 장치로 SBIG ST-8 CCD 칩을 영하 20도까지 냉각시켰다. 우리가 사용한 망원경과 자료처리에 관한 자세한 내용은 이충욱 외(2003)에 기술되어 있다

관측에 사용한 XZ CMi의 비교성과 점검성은 각각 GSC 0189-1635($V=9.81$, $Sp=A5$)와 GSC 0189-1397($V=10.2$)으로 TGK가 사용하여 변광이 없는 것으로 알려진 별들이다. 그림 1은 XZ CMi(V), 비교성(C), 점검성(K)의 성도이다. 관측기간 동안 총 1,873점(V : 900점, B : 973점)을 얻었다. 모든 관측점들은 충북대학교 우주동역학연구실 웹서버¹에서 구할 수 있다. 그림 2는 우리가 얻은 XZ CMi와 점검성의 *BV* 광도곡선으로 XZ CMi의 광도곡선(상단)은 0.25 위상의 밝기가 0.75 위상보다 약간 밝은 것으로 보이나 그 차이는 미미한 대칭적인 모습을 하고 있다. 그림의 하단에 보인 점검성의 광도곡선의 표준오차는 *BV* 파장영역에서 각각 $\pm 0.^m014$ 와 $\pm 0.^m013$ 으로 계산되었다. 우리의 관측으로부터 총 7개의 가중 평균 극심시각을 Kwee & van Woerden(1956) 방법을 사용하여 표 2에 수록한 바와 같이 결정하였고, Kreiner et al.(2001, 이하 KKN으로 약함)의 극심시각 database에 저장하였다.

¹<http://binary.cbnu.ac.kr/>

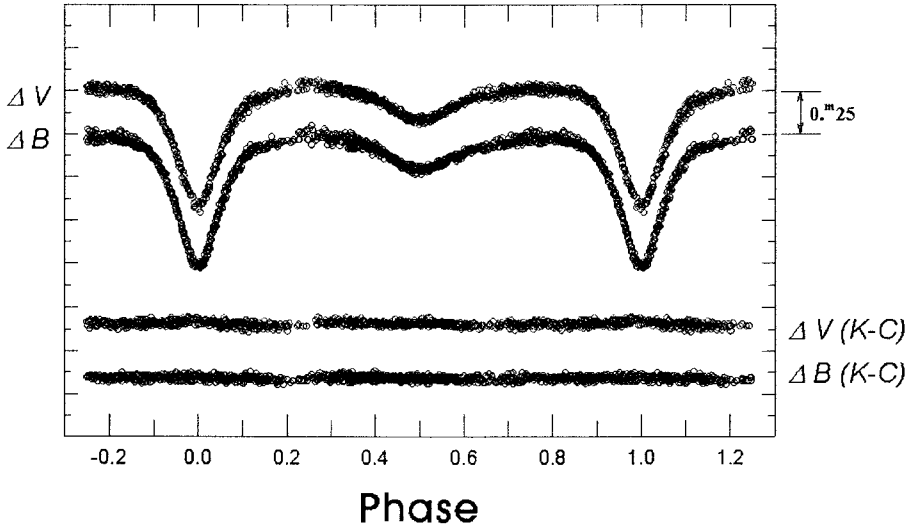


그림 2. XZ CMi와 점검성의 BV 광도곡선. C와 K는 각각 비교성과 점검성을 나타낸다.

표 2. XZ CMi의 관측된 극심시각.

가중 평균 극심시각 (JD Hel 2450000+)	필터	형태
4511.9929 ±1	B, V	I
4517.2025 ±1	B, V	I
4520.0960 ±2	B, V	I
4527.0426 ±2	B, V	I
4514.0193 ±9	B, V	II
4518.0730 ±17	B, V	II
4529.0715 ±9	B, V	II

3. (O - C)도 분석

XZ CMi의 공전 주기 변화 양상을 파악하기 위하여, KKN의 database에 저장된 XZ CMi의 극심시각을 이용하였다. 수집된 XZ CMi의 극심시각은 총 201개(안시 관측치: 127개, 사진 관측치: 7개, 사진 plate 관측치: 2개, 광전 및 CCD 관측치: 65개)로 이 중 제1극심시각은 182개이다. 먼저, 우리는 KKN이 제시한 광도요소

$$C_1 = \text{HJD } 2449016.7882 + 0.^d57880974E \tag{1}$$

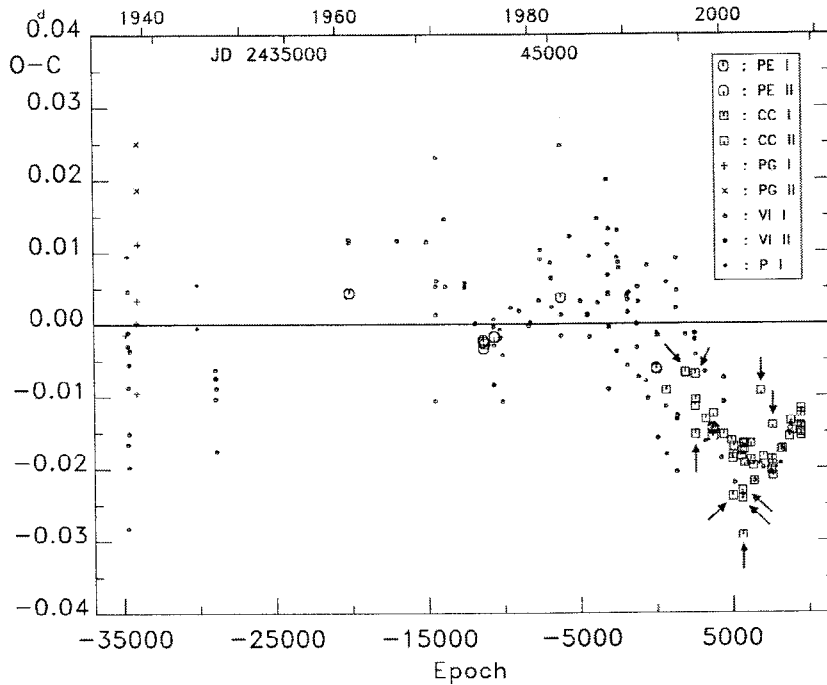


그림 3. XZ CMi의 $(O - C_1)$ 도. 화살표는 근접 잔차의 변화 경향에 많이 빗겨나는 극심시각을 나타낸다.

를 사용하여 그림 3과 같이 XZ CMi의 $(O - C_1)$ 도를 작성하였다. 그림에서 보듯이, 최초의 극심시각이 관측된 1937년부터 1980년까지 XZ CMi의 극심시각 관측은 산발적이고, 또, 정확도가 떨어지는 안시, 사진, 그리고 사진 plate 관측에 의한 관측치이어서 그것들의 $(O - C_1)$ 잔차 값들은 큰 분산을 보이고 있어 공전주기 변화 양상을 살피는데는 무리가 있음을 보게된다. 1980년 이후 2000년까지 연속적으로 관측된 안시관측치의 잔차는 상당히 크지만 일반적인 경향을 파악하는데 도움을 준다. 이 기간동안 $(O - C_1)$ 잔차 값들은 전체적으로 감소하여 왔다. 그 감소는 1993년 12월부터 연속적으로 관측된 광전 및 CCD 관측에 의한 $(O - C_1)$ 잔차의 감소와 궤를 같이 하여 2004년 1월까지 지속된다. 그 이후부터 현재까지 잔차 값들은 연속적으로 증가하고 있다. 광전 및 CCD 관측에 의한 $(O - C_1)$ 잔차의 분산 폭은 다른 관측들에 비하여 상대적으로 매우 작음에 주목하라. 특별히 광전 및 CCD 관측에 의한 $(O - C_1)$ 잔차 중에 그 주변의 잔차값에 비하여 비교적 크거나 작은 극심시각(그림에서 화살표로 표시한 것)들이 있음을 본다. 이러한 극심시각의 잔차 값들이 그 당시에 갑자기 공전주기가 커지거나 작아져서 발생되었기 보다는 부정확하게 측정된 것으로 생각하기 때문에, 이후의 분석에서 그 극심시각들을 제외시켰다.

관측 방법에 따른 $(O - C_1)$ 잔차의 분산 폭을 살펴보면, 광전이나 CCD 관측치들은 사진 및 육안 관측치들에 비하여 그 폭이 상당히 작다. 따라서, 그 분산 폭이 관측방법에 따른 가중치를 줄 수 있다는 생각에서 관측 방법에 따른 분산 폭의 표준편차(안시, 사진, plate 관측치: $\pm 0.^d0083$, 광전 및 CCD 관측: $\pm 0.^d0011$)에 의거하여 사진 plate 관측은 1, 광전과 CCD 관측은 6의 가중치를 할당하였다.

표 3. XZ CMi의 광시간 궤도 및 포물선 해.

궤도요소	XZ CMi	단위
T_0	2449016.78141 (8)	JD Hel
P	0.578808735 (11)	day
A	$-2.63(11) \times 10^{-11}$	day
$a_{12} \sin i'$	$1.98(4) \times 10^8$	km
K	0.0054	day
e	0.735(16)	
ω	345(2)	deg
T	2442674 (33)	JD Hel
P_3	30.02 (6)	year

그림 3에서 보듯이 1937년부터 현재까지 70여년동안 XZ CMi의 ($O - C_1$) 잔차들은 약 +0.01일에서 -0.03일 범위 내에서 변화하여 왔다. QI와 SRF은 XZ CMi의 공전주기가 연속적으로 감소하면서 동시에 주기적으로 변화하고 있다고 분석하였다. 따라서, 이차항과 주기적인 항을 합한 광도요소에 관측된 극심시각을 맞추는 작업을 시도하였다. 여기서, 주기적인 항으로 제3천체에 의한 광시간 함수를 선택하였다. 그 이유는 광시간 함수는 주기적인 변화를 나타내는 매우 유연한 함수이기 때문이다. 채택한 광도요소는

$$C_2 = T_0 + PE + AE^2 + \tau \quad (2)$$

으로 표현할 수 있다. 여기서 τ 는 광시간으로,

$$\tau = \frac{K}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}} \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cos \nu} \sin(\nu + \omega) + e \sin \omega \right], \quad K = \frac{a_{12} \sin i' \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}}{2.59 \times 10^{10}}, \quad (3)$$

이다. 여기서, e, ω, ν, a_{12} , 그리고 i' 은 각각 광시간 궤도의 이심율, 근성점 이각, 진근점 이각, 장반경, 궤도경사각을 나타낸다. 식 (3)은 모두 8개의 미지수를 갖고 있다(τ 의 더 자세한 기술은 Irwin(1952, 1959)의 논문을 참조). 그 미지수란 $T_0, P, A, a_{12} \sin i', \omega, e, P'$, 그리고 T 인데, 여기서 P' 은 광시간 궤도의 주기이며, T 는 식쌍성의 질량중심이 광시간 궤도의 근성점을 통과하는 시각이다. 관측된 극심시각을 식 (3)에 맞추어 8개의 미지수를 결정할 때 Levenberg-Marquart 방법(Press et al. 1992)을 사용하였다. 최종 계산 결과를 표 3에 수록하였다. 표 3에 제시한 선형 광도요소를 이용하여 작성한 XZ CMi의 새로운 ($O - C_2$)도를 그림 4에 그렸다. 이 그림에서 보듯이 점선은 이차항을, 물결치는 실선은 이차항과 광시간 궤도의 합을 각각 나타낸다. 따라서, 지난 70년동안 XZ CMi의 공전주기는 아래로 향한 포물선 모양의 영년 주기 감소 위에 주기적인 항이 겹쳐 변화하고 있다고 결론짓는다.

새로 산출된 이차항의 계수(A)로부터 XZ CMi의 공전주기 변화율 $\Delta P/P (= 2A)$ 는 -5.26×10^{-11} d/P로서 이는 연간 3.432×10^{-8} 율로 공전주기가 연속적으로 감소하는 것을 의미한다. 이 양은 QI이 구한 것과 거의 일치한다. 보존적인 질량 이동 이론(Pringle 1975)에 의하면, 이와 같은 공전 주기의 영년 감소는 로쉬 안쪽 한계면 로브를 채운 질량이 큰 주성(M_p)의 질량이 반성(M_s)으로 이동할 때 일어난다. 그러나 제4절에서 구한 XZ CMi의 로쉬 기하는 모든 연구자(TW, RA, TGK, SA 등)가 구한 것과 마찬가지로 반성이 로쉬 안쪽 한계면을 채웠고, 주성은 로쉬 한계면 안쪽에 있기 때문에, 주성에서 반성으로의 질량 이동이라기 보다는 그 반대로 반성에서 주성으로 질량 이동이 일어나

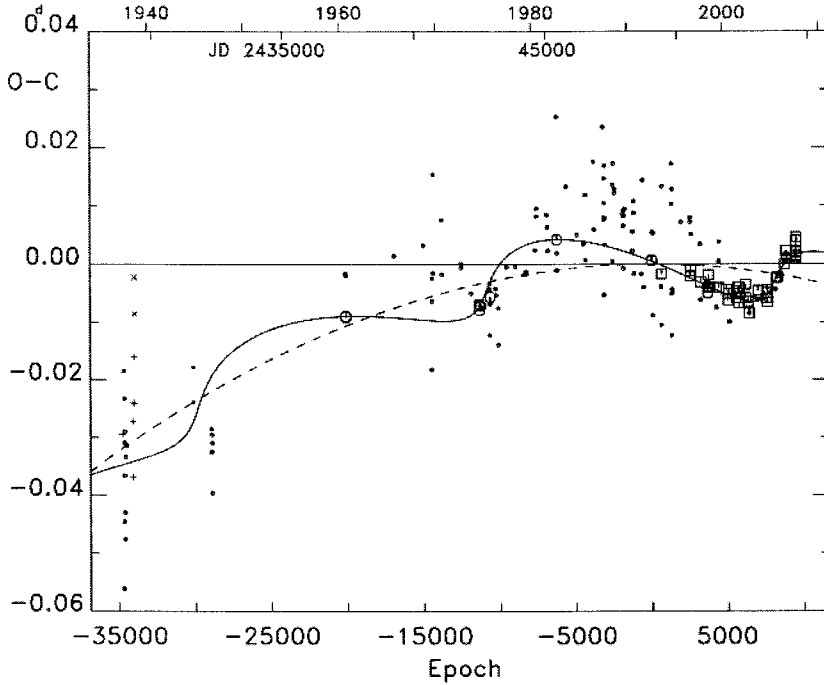


그림 4. XZ CMi의 ($O - C_2$)도. 실선은 광시간궤도와 포물선 해를 더한 이론적인 곡선이며, 점선은 포물선 해만을 나타낸다.

야 한다. 따라서, 로쉬 기하만을 보면 영년 주기 증가가 일어나야 한다. 그러나 관측된 것은 그 반대 양상이다. 이러한 결보기 모순은 근접쌍성의 진화과정에서 일어나는 여러 물리 현상이 동시에 진행 되는 반면 관측된 현상(예를들면, 공전주기 변화와 같은)은 동시에 일어난 여러 물리 현상의 합쳐진 결과로 이해한다면 극복될 수 있을 것이다(Kim 1991). 즉, 공전주기의 영년 변화에 영향을 주는 질량 이동 그리고 자기제동에 의한 각운동량 손실(AML) 등이 동시에 일어나서 관측된 주기변화는 그 여러가지 원인들의 합으로서 나타나는 것이다.

관측된 영년 주기변화가 질량교환과 자기제동에 의한 AML이 동시에 작용하여 나타난 결과라 가정하면, 관측된 영년주기 변화율은

$$\left. \frac{\Delta P}{P} \right]_{\text{OBS}} = \left. \frac{\Delta P}{P} \right]_{\text{MT}} + \left. \frac{\Delta P}{P} \right]_{\text{AML}} \quad (4)$$

으로 기술된다. 여기서 좌변의 첫번째 항과 두번째 항은 각각 질량 이동(MT)과 자기제동에 의한 AML에 의한 주기 변화율을 나타낸다. 질량 이동에 의한 주기변화율은

$$\left. \frac{\Delta P}{P} \right]_{\text{MT}} = \frac{3\Delta M_s(M_s - M_p)}{M_p M_s} \quad (5)$$

으로 기술된다(Pringle 1975). 여기서, M_p , M_s , 그리고 ΔM_s 은 각각 질량이 큰 주성, 질량이 작은 반성, 그리고 반성의 질량 이동율(< 0)을 나타낸다. 또한, 자기제동에 의한 AML에 의한 주기 변화율

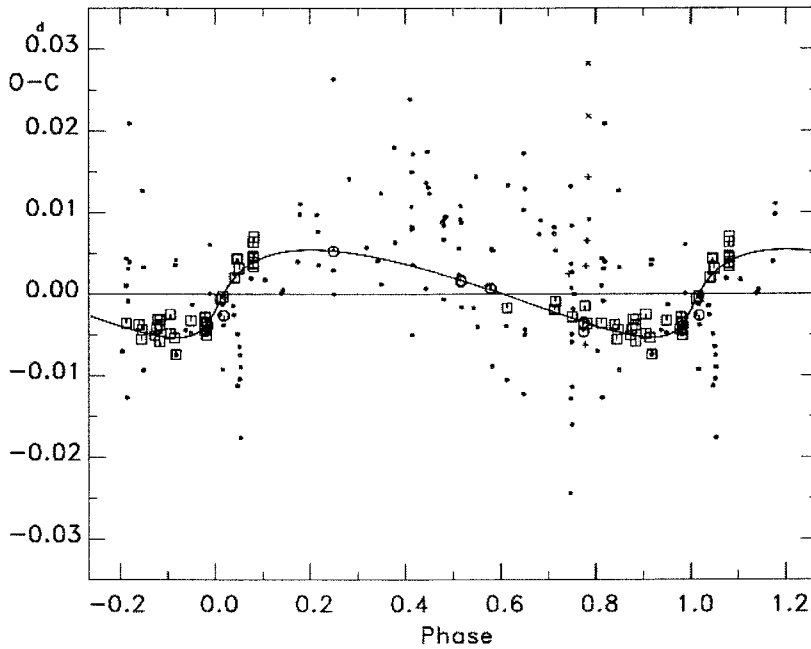


그림 5. XZ CMi의 광시간 궤도. 그림의 가로축은 이 논문에서 정한 30.02년 주기로 위상화 하였다. 실선은 표 3에 수록된 해로 그린 광시간 궤도를 나타낸다..

은 Guinan & Bradstreet(1988)에 의하면,

$$\left. \frac{\Delta P}{P} \right]_{\text{AML}} = -1.1 \times 10^{-8} q^{-1} (1 + q)^2 (M_p + M_s)^{-5/3} k^2 (M_p R_p^4 + M_s R_s^4) P^{-7/3} \quad (6)$$

으로 표시된다. 이 식에서 q 는 질량비이며, R_p 와 R_s 는 각각 주성과 반성의 반경을 나타낸다. 또한, k 는 선회(gyration) 반지름 상수로, 태양과 같은 만기형 별에 대해서 0.07 ~ 0.15의 값을 갖는다. 우리는 $k^2 = 0.1$ 을 사용하였다(Webbink 1976, Guinan & Bradstreet 1988). 먼저, XZ CMi의 절대량(표 5의 모형 2)과 식 (6)을 이용하면, AML에 의한 주기 변화율은 $-8.20 \times 10^{-11} \text{ d/P}$ 로 산출된다. 이 값과 관측된 주기 변화율($-5.26 \times 10^{-11} \text{ d/P}$)을 식 (4)에 대입하면 질량 이동에 의한 공전주기 변화율은 $2.94 \times 10^{-11} \text{ d/P}$ 이다. 또, 이 값을 식 (5)에 대입하여 우리는 연간 $\dot{M}_s = 3.21 \times 10^{-8} M_\odot$ 을 얻는다. 이는 그만큼의 질량이 반성으로 부터 주성으로 이동하는 것이다. 이상과 같은 간단한 계산을 통하여 우리는 XZ CMi계에서 공전주기 영년감소는 AML에 의한 주기감소율이 질량 이동에 의한 주기증가율보다 약 3배정도 커서 일어난 것으로 결론지을 수 있다.

한편, 표 3에서 보듯이 광시간 궤도의 반진폭, 궤도주기, 이심율은 각각 $0.^d0054$, $30.^y02$, 0.734 이다. 이 논문에서 구한 광시간 궤도의 반진폭은 QI와 SRF의 것과 거의 비슷하며, 궤도주기는 QI의 것과 비슷하다. 그러나, QI와 SRF은 모두 원궤도를 가정하여 광시간 궤도를 구하였으나, 최근 극심시각을 포함하면, 이 연구에서 구한 이심율이 큰 타원 궤도가 관측치를 더 잘 맞추는 것으로 나타났다. 그림 5는 XZ CMi의 관측된 극심시각에서 이차항을 빼준 잔차를 광시간 궤도 주기로 위상화한 ($O-C$)도 이다. 여기서 실선은 이론적인 광시간 궤도를 나타낸다. 이 그림에서 보듯이 0.1에서 0.7까

지의 위상에서 관측자료가 다른 위상에 비해 상당히 작지만 광전 및 CCD 극심시각의 ($O - C$) 잔차는 전체적으로 광시간 궤도를 잘 따르고 있다.

표 3과 5에 주어진 광시간 궤도와 질량으로부터 제3천체의 질량함수는 $f(m) = 0.00256M_{\odot}$ 으로 계산된다. 이 질량함수로 제3천체의 질량(M_3)을 여러 궤도 경사각(i_3)에 대하여 구해보면, 최소 질량($i_3 = 90^\circ$)은 약 $0.27M_{\odot}$ 이고, $i_3 = 30^\circ$ 일 때의 질량은 약 $0.58M_{\odot}$ 이다. 따라서, $i_3 \geq 30^\circ$ 일 때의 제3천체의 질량 범위는 $0.27M_{\odot} \leq M_3 \leq 0.58M_{\odot}$ 이다. 질량함수와 제3천체의 질량을 구하는 일련의 과정은 Kim(1995)의 논문에 자세히 설명되어 있다. 제3천체를 주계열성이라 가정하고, 질량-광도 관계(Drilling & Landolt 1999)를 이용하면 제3천체의 밝기는 $0.0083L_{\odot} \leq L_3 \leq 0.15L_{\odot}$ 의 범위에 놓인다.

4. 광도곡선 분석

그림 2의 BV 광도곡선을 WD 쌍성 모형의 가장 최신 모델²을 이용하여 분석하였다. 우리의 광도곡선은 0.5 위상을 중심으로 상당히 대칭이기 때문에 항성 흑점을 고려하지 않고, 해를 산출하였다. WD 모형은 근접쌍성의 로쉬 기하의 형태에 따라 모두 8가지 mode를 제공한다. XZ CMi의 로쉬 기하 형태가 근접축형이고, WD 쌍성모형으로 해를 산출하였던 이전의 모든 연구자들이 일관성 있게 질량이 작은 반성이 안쪽 로쉬 한계면을 채운 반면, 질량이 큰 주성이 로쉬 한계면에 근접한 준분리형 쌍성으로 XZ CMi를 분류하였기 때문에, 이 논문에서는 WD 모형의 mode 5을 사용하였다. 시스템 인자로서 주원 감광계수는 van Hamme(1993)가 제시한 비선형 상용대수 법칙(logarithmic law)에 의거한 이론적인 값을 사용하여 고정시켰고, 중력감광계수와 반사계수는 Lucy(1967)의 모델에 따라 주성에 대해서는 모두 1.0으로, 부성에 대해서는 각각 0.32와 0.5로 고정시켰다. 그런데, XZ CMi의 주성의 분광형에 대해서 연구자 간에 의견 일치가 아직 이루어 지고 있지 않다. WI, RA 그리고 TGK은 주성의 분광형을 A5로, TH과 SRF은 그 보다는 만기형인 F2로 보고 있다. 각각에 대한 대응하는 이론적인 온도는 8,200K와 7,000K이다. 따라서, 우리는 각각의 온도를 주성의 온도로 하여 두 그룹의 해를 산출하였다.

Mode 5에서 조종할 수 있는 인자는 총6개로, 궤도경사각 i , 질량비 $q(= m_2/m_1)$, 반성의 온도 T_2 , 주성의 무차원 포텐셜 Ω_1 , 주성의 상대 밝기 l_1 , 그리고 제3광도 l_3 이다. 여기서, 각 인자의 첨자 1과 2는 각각 주성과 반성을 나타낸다. 또한, l_3 를 포함시킨 것은 TH과 SRF이 제3광도를 고려하였고, 우리의 주기연구에서 제3천체에 의한 광시간궤도가 가능하기 때문이다.

조정인자들 중 i 와 q 는 상호 매우 연관되어 있어 해의 수렴에 영향을 끼치기 때문에 이러한 효과를 피하기 위하여 서로 연관이 없는 부그룹(subset) 인자들을 모아 부그룹 인자들을 순차적으로 조정하는 방법을 택하였다(Wilson & Biermann 1976). 즉, A(i, T_1, Ω)와 B(l_1, q, l_3)으로 A와 B의 두 부그룹으로 나눈 뒤, 이 두 그룹을 A-B-A-B 등으로 조정하는 방식을 취하였다. 이 과정을 인자들의 확률오차가 그 수정량보다 커질 때까지 반복하였다.

그 결과를 표 4에 수록하였다. 표 4에서 보듯이 주성의 온도가 8200K일 때의 $\sum W(O - C)^2$ 값이 7000K일 때 보다 더 크게 산출된 점으로 보아 주성의 온도가 7000K인 모형이 관측치를 약간 더 잘 맞추는 것으로 보이나 그 차이가 너무 미미하여 두 해 모두 가능하다. 주성의 온도가 7000K인 모

²ftp://ftp.astro.ufl.edu/pub/wilson/lcdc2008

표 4. XZ CMi의 측광학적 해.

변수	모형 1($T_1 = 8200K$)		모형 2($T_1 = 7000K$)	
	주성	반성	주성	반성
$q(= m_2/m_1)$	0.495(± 0.003)		0.669(± 0.003)	
$i(^{\circ})$	81.78(± 0.07)		78.26(± 0.05)	
l_{3b}	0.149(± 0.001)		0.148(± 0.001)	
l_{3y}	0.169(± 0.001)		0.168(± 0.002)	
$T(K)$	8200 ^a	5307(± 16)	7000 ^a	4665(± 13)
Ω	3.124(± 0.005)		3.521(± 0.005)	
A	1.0 ^a		1.0 ^a	
g	1.0 ^a		1.0 ^a	
X	0.544 ^a		0.471 ^a	
x_b	0.577 ^a		0.601 ^a	
x_y	0.502 ^a		0.495 ^a	
$l/(l_1 + l_2)_b$	0.931(± 0.008)		0.918(± 0.008)	
$l/(l_1 + l_2)_y$	0.899(± 0.007)		0.879(± 0.007)	
$r(pole)$	0.3760		0.3462	
$r(point)$	0.4290		0.3912	
$r(side)$	0.3926		0.3592	
$r(back)$	0.4091		0.3751	
\bar{r}	0.3931		0.3606	
$\sum W(O - C)^2$	0.1613		0.1611	

^a고정인자

표 5. XZ CMi의 천문학적 기본변수.

변수	모형 1($T_1 = 8200K$)		모형 2($T_1 = 7000K$)	
	주성	반성	주성	반성
$M (M_{\odot})$	1.86	0.92	1.50	1.00
$R (R_{\odot})$	1.84	1.50	1.56	1.49
$L (L_{\odot})$	13.74	1.60	5.25	0.95

형을 이용하여 산출한 이론적인 광도곡선을 관측점과 함께 그림 6에, 대응하는 XZ CMi의 로쉬모형을 그림 7에 각각 그렸다. 표 5는 표 4에 수록된 해를 기반으로 하여 WD 프로그램에서 산출한 XZ CMi의 천문학적 기본변수이다.

4. 요약과 논의

이 논문에서 우리는 근접쌍성 XZ CMi의 BV 측광관측을 수행하여 얻은 극심시각과 광도곡선을 기반으로 하여 주기연구와 광도곡선 분석을 수행하였다. XZ CMi의 공전주기는 지난 70년동안 연속적으로 감소하면서 동시에 주기적으로 변화하고 있다. 관측된 영년 주기감소율(-5.26×10^{-11} d/P)을 단지 질량 이동에 의한 것이라고 가정할 경우, 측광해에서 결정한 로쉬기하와 상치되기때문에 관측된 영년 주기감소가 질량교환과 자기제동에 의한 AML이 동시에 작용하여 나타난 결과라 가정하였다. 이 가정에 의하여, XZ CMi의 관측된 영년 주기감소율은 AML에 의한 주기 감소율 -8.20×10^{-11} d/P와 질량 이동에 의한 공전주기 증가율은 2.94×10^{-11} d/P의 합에 의하여 일어

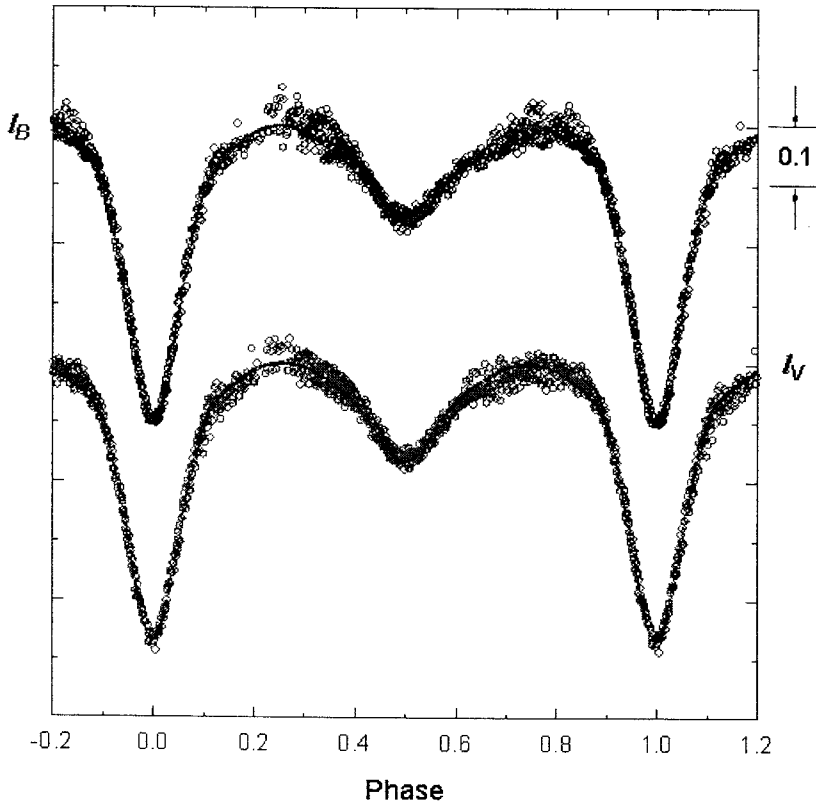


그림 6. XZ CMi의 관측된 BV 광도곡선과 이론적인 광도곡선. 후자는 표 4의 모형 2를 이용하여 그렸다.

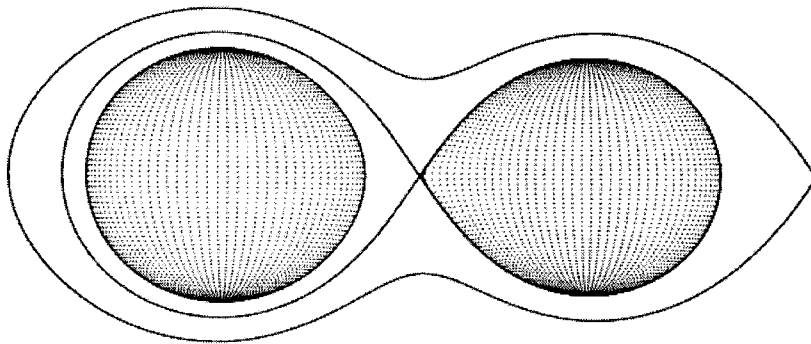


그림 7. XZ CMi의 로쉬 기하. 표 4의 모형 2의 해를 이용하여 그렸다.

나며, 질량이 작은 반성에서 연간 $\dot{M}_s = 3.21 \times 10^{-8} M_{\odot}$ 의 질량이 주성으로 이동된다. 근접쌍성의 진화에 관한 연구에 의하면, 근접촉쌍성은 A형 W UMa형 쌍성의 전단계 별로 인식되고 있다(Hilditch et al. 1988, Selam & Demircan 1994, Shaw 1994, Shaw et al. 1996, Qian 2002). 또한, 자기제동에

의한 AML가 근접쌍성의 진화와 W UMa형 쌍성의 형성과 진화에 중요한 역할을 한다(Webbink 1976, Vilhu 1982, Hilditch et al. 1988, Guinan & Bradstreet 1988, Bradstreet & Guinan 1994). 따라서, AML에 의한 주기감소율이 질량 이동에 의한 공전주기 증가율보다 절대값으로 약 3배정도 큰 XZ CMi는 주기감소에 의한 궤도의 축소와 반성에서 주성으로의 질량 이동에 의하여 결국 주성도 로쉬 로브를 채워 접촉형 쌍성이 될 것으로 추측된다. 최근에 Lee et al.(2008)에 의하여 연구된 근접쌍성 RU UMi는 공전주기의 변화와 성분별들의 로쉬 기하가 XZ CMi와 매우 비슷하여, XZ CMi와 같은 진화를 겪고 있는 근접쌍성으로 생각된다.

XZ CMi계에 여러 연구자들이 제안한 제3천체에 의한 광시간 원궤도를 우리가 관측한 극심시각을 포함한 최근 자료를 이용하여 더 개선하였다. 우리가 산출한 광시간 궤도의 반진폭, 궤도주기, 이심율은 각각 $0.^d0054$, $30.^y02$, 0.734 이며, 제3천체의 질량은 $0.27M_{\odot} \leq M_3 \leq 0.58M_{\odot}$ 의 범위에 있다. 이에 대응하는 제3천체의 밝기는 $0.0083L_{\odot} \leq L_3 \leq 0.15L_{\odot}$ 의 범위에 놓인다. 이 밝기는 XZ CMi의 전체 밝기에 기껏해야 1-2% 정도 밖에 기여할 수가 없다. 따라서, RA, TH, SRF 등 이전의 연구자들이 그들의 광도곡선 분석을 통하여 제안한 전체 밝기의 약 11-18%에 해당하는 제3광도를 가진 천체, 그리고, TH가 그들의 R 밴드 CCD 영상에서 보인 제3천체는 이 연구의 공전주기 분석으로 부터 제안된 광시간 궤도를 일으키는 제3천체와 동일하지 않은 것은 확실하다.

그간 연구자들 간에 불일치가 있었던 주성의 온도와 질량비(표 1 참조)는 이 연구를 통해서도 해결되지 못하였다. 그 이유는 이 연구에서 구한 두가지 모형 해(표 4 참조)에서 보듯이 두 해 모두 관측된 광도곡선들을 잘 맞추는 것으로 나타났기 때문이다. 특히 문제가 되는 것은 두 모형 해가 서로 다른 질량비를 준다. XZ CMi계에서 연구자들간에 이견이 없는 것은 이 계의 로쉬모형과 제3광도의 크기 뿐이다. 질량비 문제를 해결하기 위해서는 분광시선속도곡선의 획득이 필수적이다. 비록 SFR은 그들이 측정된 표준 등급과 색지수로 부터 주성의 분광형을 F2.5로 결정하였고 그에 대응하는 온도를 7000K로 하였으나, 광도곡선은 주성이 8200K인 해도 허용한다. 이의 해결을 위해서 정밀 광도곡선의 관측과 분광형 측정을 위한 분광관측이 필요하다. 이와 더불어 광시간 궤도의 개선을 위하여 극심시각의 관측오차가 $\pm 0.^d0003$ 이내의 정밀 극심시각이 측정되어야 한다.

감사의 글: 이 연구는 프랑스의 Strasbourg의 CDS에서 운용하는 SIMBAD database를 이용하였음을 밝힙니다. 이 관측에 참여하여준 충북대학교 우주동역학 연구실 여러분께 감사 드립니다. 이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- 이충욱, 박성수, 김천휘, 변용익 2003, 한국우주과학회, 20, 143
- Bradstreet, D. H. & Guinan, E. F. 1994, in *Interacting Binary Stars*, ed. A. W. Shafter (San Francisco: ASP), 56, 228
- Drilling, J. S. & Landolt, A. U. 1999, *Allen's Astrophysical Quantities*, ed. A. N. Cox (Los Alamos: Springer), p.382
- Gimenez, A. & Costa, V. 1979, *IBVS*, No.1643
- Gotz, W. & Wenzel, W. 1967, *Mitt. Veranderl. Sterne*, 4, 121
- Guinan, E. F. & Bradstreet, D. H. 1988, in *Formation and Evolution of Low Mass Stars*, eds. A.

- K. Dupree & M. T. V. T. Lago (Dordrecht: Kluwer), p.345
- Hilditch, R. W., King, D. J., & McFarlane, T. M. 1988, MNRAS, 231, 341
- Hoffmeister, C. 1934, AN, 253, 195
- Irwin, J. B. 1952, ApJ, 116, 11
- Irwin, J. B. 1959, AJ, 64, 149
- Kim, C.-H. 1991, AJ, 102, 1784
- Kim, C.-H. 1995, Journal of Korean Astronomy & Space Sciences, 12, 179
- Kreiner, J. M., Kim, C.-H., & Nha, I.-S. 2001, An Atlas of (O-C) Diagrams of Eclipsing Binary Stars (Krakow: Press of Pedagogical Univ.)
- Kukarkin, B. V., Kholopov, P. N., Efremov, Yu. N., Kukarkina, N. P., Kurochkin, N. E., Medvedeva, G. I., Perova, N. B., Fedorovich, V. P., & Frolov, M. S. 1969, General Catalogue of Variable Stars (Moscow: Nauka Publishing House)
- Kwee, K. K. & van Woerden, H. 1956, BAN, 12, 327
- Lee, J. W., Kim, C.-H., Kim, S.-L., Lee, C.-U., Han, W., & Koch, R. H. 2008, PASP, 120, 720
- Lucy, L. B. 1967, Zeit. f. Astrophys., 65, 89
- Mardirossian, F. & Giuricin, G. 1981, A&A, 96, 415
- Press, W., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., & Vetterling, W. T. 1992, Numerical Recipes (Cambridge: Cambridge Univ. Press), Chap.14
- Pringle, J. E. 1975, MNRAS, 170, 633
- Qian, S. 2002, MNRAS, 336, 1247
- Rafert, J. B. 1990, AJ, 100, 1253
- Russell, H. N. & Merrill, J. E. 1952, Contrib. Princeton No.26
- Samec, R., Rook, I. B., Faulkner, D. R., Hawkins, N. C., & van Hamme, W. 2006, Observatory, 126, 255
- Selam, S. O. & Demircan, O. 1994, Mem. Soc. Astron. Italiana, 65, 405
- Shaw, J. S. 1994, Mem. Soc. Astron. Italiana, 65, 95
- Shaw, J. S., Caillault, J.-P., & Schmitt, J. H. M. M. 1996, ApJ, 461, 951
- Terrell, D., Gunn, J. B., & Kaiser, D. H. 1994, PASP, 106, 149
- Terrell, D. & Henden, A. A. 2002, IBVS, No.5310
- Terrell, D. & Wilson, R. E. 1990, PASP, 102, 646
- van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 2096
- Vilhu, O. 1982, A&A, 109, 17
- Webbink, R. F. 1976, ApJ, 209, 829
- Wilson, R. E. 1966, AJ, 71, 32
- Wilson, R. E. & Biermann, P. 1976, A&A, 48, 349
- Wilson, R. E. & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605

Wood, D. B. 1972, A Computer Program for Modelling Nonspherical Eclipsing Binary Systems
(Maryland: Goddard Space Flight Center)