

접촉쌍성의 광도와 시선속도곡선의 분석에 의한 절대 물리량과 거리의 결정 – II. CK Bootis

이재우^{1,2†}, 이충욱², 김천휘¹, 강용범², 구재림²
¹충북대학교 자연과학대학 천문우주학과, 기초과학연구소, ²한국천문연구원

DETERMINATIONS OF ITS ABSOLUTE DIMENSIONS AND DISTANCE BY THE ANALYSES OF LIGHT AND RADIAL-VELOCITY CURVES OF THE CONTACT BINARY – II. CK Bootis

Jae Woo Lee^{1,2†}, Chung-Uk Lee², Chun-Hwey Kim¹,
Young Beom Kang², and Jae-Rim Koo²

¹Department of Astronomy & Space Science, College of Natural Sciences and Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

²Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea
E-mail: jwlee@ast.chungbuk.ac.kr

(Received October 18, 2004; Accepted November 18, 2004)

요 약

2004년 6월부터 7월까지 총 13일간 레몬산천문대의 1m 망원경과 BVR 필터를 사용하여 접촉 쌍성 CK Boo의 광도곡선을 완성하고, 4개(주극심 3개, 부극심 1개)의 새로운 극심시각을 산출하였다. 1998년에 개정한 Wilson-Devinney 쌍성모델의 접촉모드를 이용하여, 우리의 BVR 광도곡선과 Rucinski & Lu(1999)의 시선속도곡선을 분석하였다. 그 결과, 우리는 CK Boo가 질량비($q=0.11$)와 궤도 경사각($i=65^\circ$)이 작은 A형 과접촉쌍성($f=84\%$)임을 확인하였다. 우리의 측광 및 분광학적 해로부터 이 쌍성계의 절대 물리량을 $M_1=1.42M_\odot$, $M_2=0.15M_\odot$, $R_1=1.47R_\odot$, 그리고 $R_2=0.59M_\odot$ 으로, 거리를 129pc으로 산출하였다. 우리가 구한 거리는 Hipparcos 삼각시차에 의한 거리(157 ± 33 pc)와 오차의 범위 내에서 일치한다.

ABSTRACT

We completed the light curves of the contact binary CK Boo for 13 nights from June to July in 2004 using the 1-m reflector and BVR filters at Mt. Lemmon Optical Astronomy Observatory, and determined four new times of minimum light (three timings for primary eclipse, one for secondary). With contact mode of the 1998-version Wilson-Devinney binary model, we analyzed our BVR light curves and Rucinski & Lu (1999)'s radial-velocity ones. As a result, we found CK boo to be A-type over-contact binary ($f=84\%$) with the low mass ratio ($q=0.11$) and orbital inclination ($i=65^\circ$). Absolute dimensions of the system are determined from our new solution; $M_1=1.42M_\odot$, $M_2=0.15M_\odot$, $R_1=1.47R_\odot$, $R_2=0.59M_\odot$, and the distance to it is derived as about 129pc. Our distance is well consistent with that (157 ± 33 pc) from the Hipparcos trigonometric parallax within the limit of the error yielded by the latter.

Key words: contact binary, CK Boo, absolute dimension, distance

[†]corresponding author

1. 서 론

접촉쌍성들은 주기가 짧고 공간밀도가 높을 뿐만 아니라, 변광 진폭이 크기 때문에 발견 및 관측이 용이하고, 성단이나 외부은하 등의 거리결정을 위한 새로운 도구로써 최근 이용되고 있다(Rucinski 1997, 2003). 이 연구는 캐나다 토론토 대학의 David Dunlap Observatory에서 분광 관측한 약 80개의 접촉쌍성 중에서 Hipparcos 측성위성에 의해 관측된 삼각시차를 가진 항성을 연구대상으로 선정하여 절대 물리량과 거리를 합리적으로 결정하는데 그 목적이 있다.

이재우 등(2004)에 의해 시작된 접촉쌍성의 광도와 시선속도곡선의 분석에 의한 절대 물리량과 거리 결정의 두 번째 시도으로써, 우리는 A형 접촉쌍성 CK Boo(HD128141, BD+9°2916, $m_V = 8.99$)을 연구대상으로 선정하였다. CK Boo는 Bond(1975)에 의해 주기가 $0^d.355$ 이고 분광형이 G형인 W UMa형 식쌍성으로 발견된 이후에 Aslan & Derman(1986), Dermircan(1987), 그리고 Krzesiński et al.(1991)에 의해 광전 광도곡선이 얻어졌고, 분광관측에 의한 시선속도곡선은 Hrivnak(1993)과 Rucinski & Lu(1999, 이하 RL)에 의해 수행되었다. 불행하게도, Hrivnak의 관측 자료는 발표되지 않았다.

Aslan & Derman은 1976년부터 1982년까지 수행된 BV 광전관측으로부터 주극심과 부극심의 깊이가 서로 바뀌고, 식현상 외에도 밝기변화를 일으키는 요인이 있음을 발견하고 이를 7년 주기의 흑점모형으로 설명하였다. 그 후에, Krzesiński et al.은 광도변화의 원인을 온도가 더 높은 별 표면에 cool spot 혹은 hot spot이 있기 때문으로 가정하고, 그들의 V 광도곡선을 Wilson-Devinney(Wilson & Devinney 1971, 이하 WD) 프로그램을 이용하여 분석함으로써 각각의 경우 질량비가 0.518 혹은 0.588인 W형 과접촉쌍성이라고 하였다. 그러나, Hrivnak과 RL은 각각 그들 자신의 분광관측으로부터 CK Boo는 질량비가 0.16과 0.111인 A형 접촉쌍성임을 보였다. 한편, Dermircan은 이 쌍성계의 궤도 공전주기가 1978년 이후로 증가하고 있음을 제시하였다.

이상에서 살펴보았듯이, CK Boo는 A형 접촉쌍성으로 광도곡선 분석에서 중요한 인자 중의 하나인 질량비가 관측방법(즉, 측광과 분광)에 따라 매우 다르게 나타나고, 시선속도곡선도 쌍성의 근접효과에 대한 고려 없이 분석되었다. 이 연구에서는 레몬산천문대 1m 반사망원경으로 관측한 우리의 BVR 광도곡선과 RL의 시선속도곡선을 분석함으로써 CK Boo의 새로운 측광 및 분광해 뿐만 아니라, 이 쌍성계의 절대 물리량과 거리 등을 정량적으로 산출하고자 한다.

2. 관측 및 자료처리

CK Boo의 CCD 측광관측을 2004년 6월 5일부터 2004년 7월 2일까지 13일간 레몬산천문대 1m 망원경에 열전냉각방식의 FLI IMG4301E CCD 카메라와 BVR 필터를 부착하여 수행하였다. 관측에 사용한 1m 망원경은 초점비가 f/7.5인 광학계를 가지고 있으며, 관측시야는 약 $22'.2 \times 22'.2$ 이다. 관측시 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위하여 관측기간 동안 별이 CCD 상의 동일한 위치에 놓이도록 하였고, 관측이 진행되는동안 초점을 계속 조정하여 모두 비슷한 시상크기를 가질수 있도록 노력하였다. 또한, 관측된 자료의 전처리를 위한 바이어스 및 다크영상을 관측 시작전후에 각각 10장씩 얻었고, 초저녁과 새벽녘에 하늘 플랫폼영상을 각 필터별로 얻었다. 관측자료의 처리는 이충욱 등(2003)이 작성한 스크립트와 IRAF를 이용하여 처리하였다. 전처리 과정을 마친 관측영상들은 apphot 꾸러미로 구경측광하여 기계등급을 구하였다. 이때, 구경의 크기는 각각의 영상에서 포화

표 1. CK Boo의 관측된 극심시각.

극심시각 ^a	필터	형태	가중 평균치 ^a	극심시각 ^a	필터	형태	가중 평균치 ^a
61.6766 ±4	B	I	61.6770 ±4	67.7149 ±2	B	I	67.7152 ±3
61.6781 ±5	V	I		67.7154 ±4	V	I	
61.6767 ±4	R	I		67.7164 ±5	R	I	
64.6972 ±3	B	II	64.6975 ±3	78.7334 ±42	B	I	78.7259 ±21
64.6978 ±2	V	II		78.7242 ±17	V	I	
64.6966 ±5	R	II		78.7266 ±21	R	I	

^a: HJD2453100+

되지 않고 노출이 잘된 10개의 별에서 얻은 시상크기를 평균한 값에 4를 곱한 값을 사용하였다.

한편, CK Boo와 비슷한 색을 가진 천체를 비교성(U0975.07528063, RA = 14^h35^m46.^s1, DEC = +09°09′31.[″]1)과 검토성(U0975.07527500, RA=14^h35^m53.^s6, DEC = +09°06′13.[″]1)으로 선정하여 대기투과량의 변화에 따른 색변화의 영향을 최소화하였다. 또한, 우리가 정한 비교성은 검토성과의 차등측광으로 최소한 우리의 관측기간 동안에는 밝기가 일정함을 확인하였다. 우리는 이번 관측으로 총 1467점(B: 498점, V: 492점, R: 477점)의 관측자료를 얻었고, Δm(검토성-비교성)으로부터 얻은 우리 관측치의 표준오차는 B, V, R 필터에서 모두 약 ±0.^m015 에 이르렀다. CK Boo의 측광관측으로부터 각 필터별로 Kwee & van Woerden(1956)의 방법으로 극심시각을 산출하고, 각 필터별 극심시각을 가중 평균하여 총 4개(주극심 3개, 부극심 1개)의 새로운 극심시각을 표 1과 같이 결정하였다. 그림 1은 우리가 새롭게 구한 CK Boo의 BVR 광도곡선과 색 곡선이다.

3. 광도와 시선속도곡선의 분석

접촉쌍성 CK Boo의 측광 및 분광해를 산출하기 위하여, 우리의 BVR 광도곡선과 RL의 시선속도곡선의 모든 관측점을 입력자료로 하여 1998년에 개정된 WD 쌍성모델(Wilson 1998, 이하 WD98)의 Mode 3을 사용하여 분석하였다. 여기서, 우리는 광도와 시선속도곡선을 두 단계로 나누어 분석하였다. 첫 번째 단계(이하 Model 1)는 RL의 분광질량비(q=0.111)와 우리의 BVR 광도곡선만을 이용하여 측광인자들을 구하고, 두 번째 단계(이하 Model 2)에서 이 측광인자들을 초기값으로 사용하여 광도와 시선속도곡선을 함께 분석함으로써 최종적인 측광 및 분광학적 해를 산출하였다. 이 연구에서는 혼동을 피하기 위해 질량과 반경이 크고 온도가 높은 성분별을 주성, 그렇지 않은 경우를 반성으로 정의하였으며, 이를 각각 아래 첨자 1과 2로 표시하였다.

우리는 WD98의 인자 중에서 주성의 온도(T₁)는 연구자에 따라 F6V(Krzesiński *et al.* 1991), F8V(Hrivnak 1993), F7-F8V(Rucinski 1999)로 분류되기 때문에 평균 분광형 F7V와 색지수 (B - V)₀ ≈ 0.54를 이용하여 각각 Harmanec (1988)과 Flower(1996)의 표로부터 결정한 온도의 평균 값인 6250K로 고정시켰다. 또한, 반사율(A₁=A₂)은 0.5(Rucinski 1969), 중력감광지수(g₁=g₂)는 0.32(Lucy 1967), 주연감광계수(x₁=x₂, y₁=y₂)는 Van Hamme(1993)가 제시한 비선형 로그함수법칙에 의한 이론적인 값을 사용하여 고정시켰고, 그 외의 다른 인자들은 조정인자로 사용하였다. 이

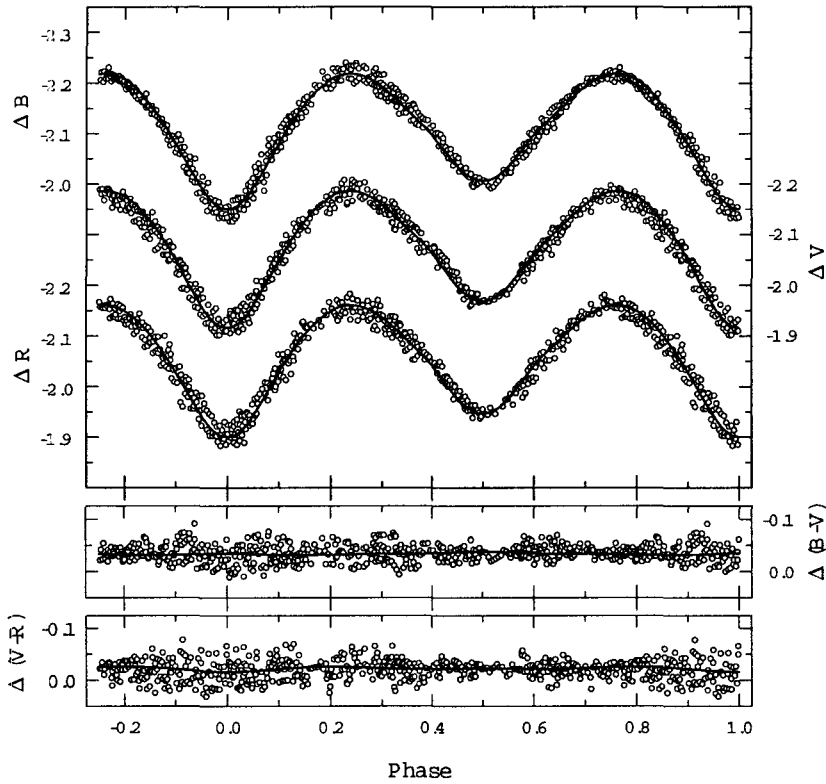


그림 1. CK Boo의 BVR 광도곡선과 색 곡선. 실선은 우리의 광도곡선과 RL의 시선속도곡선을 WD98로 함께 분석하여 산출한 이론적인 광도곡선이다.

때, 질량비(q)는 RL이 산출한 0.111을 초기치로 사용하였다.

그림 1에서 보듯이, 우리의 BVR 광도곡선은 위상 0.4 ~ 0.9에서는 비교적 안정된 광도를 보이는 반면, 그 외의 위상(특히, 주극심과 제1극대점)에서는 약 0.03 등급의 광도변화를 보인다. 따라서, 우리의 광도곡선을 분석하기 위하여, 위상 0.75를 기준위상으로 하고 이때의 광도를 1로 하기 위하여 B, V, R의 모든 관측치에 각각 -2.22, -2.19, -2.16 등급을 더하여 규격화시켰고, 규격화된 광도곡선을 다중 부그룹(multiple subsets) 방법으로 분석하여 그 결과(Model 1)를 표 2의 2-3번째 열에 수록하였다. 이때, 광도변화의 원인을 흑점에 의한 것으로 가정하여 가능한 4가지 경우(즉, 주성에 cool spot, 또는 hot spot가 존재할 때와 반성에 cool spot, 또는 hot spot가 존재할 때)로 나누어 광도곡선을 분석하였는데, 만족할만한 흑점인자를 얻지 못하였다. 그 이유는 우리의 3색 광도곡선이 위상 0.25 근처에서 0.03 등급의 광도변화를 나타내지만, 이 위상의 평균 광도는 위상 0.75의 밝기와 거의 일치하여, 전체적으로 대칭적인 모양을 하고 있기 때문이다.

두 번째 단계에서 위에서 산출한 CK Boo의 측광인자와 RL의 분광계도요소를 초기값으로 사용하여 광도와 시선속도곡선을 함께 분석하였다. 원칙적으로, 광도와 시선속도곡선은 동시에 분석할 수 있으나, 두 관측 자료는 관측시기와 관측점의 개수 그리고 관측방법이 다르기 때문에, 상대적인 가중치와 표준편차(WD98 프로그램의 SIGMA 변수)를 적절하게 할당하기 어렵다. 또한, 시선속도

표 2. CK Boo의 측광 및 분광학적 해.

Parameter	Model 1		Model 2	
	Primary	Secondary	Primary	Secondary
$\gamma(\text{km s}^{-1})$			37.0(9)	
$a(R_{\odot})$			2.45(2)	
T_0 (HJD)	2450248.3365(1)		2450248.3365(1)	
P (d)	0.35515535(1)		0.35515535(1)	
q		0.111 ^a	0.108(3)	
$i(^{\circ})$		64.5(1)	64.6(1)	
Ω_{in}		1.992	1.983	
Ω_{out}		1.920	1.913	
$f(\%)$		82.1	83.8	
$T(K)$	6250 ^a	5823(11)	6250 ^a	5840(11)
Ω	1.933(1)	1.933	1.924(1)	1.924
X	0.644 ^a	0.644 ^a	0.644 ^a	0.644 ^a
Y	0.231 ^a	0.231 ^a	0.231 ^a	0.231 ^a
x_B	0.817 ^a	0.817 ^a	0.817 ^a	0.817 ^a
x_V	0.728 ^a	0.728 ^a	0.728 ^a	0.728 ^a
x_R	0.635 ^a	0.635 ^a	0.635 ^a	0.635 ^a
y_B	0.215 ^a	0.215 ^a	0.215 ^a	0.215 ^a
y_V	0.269 ^a	0.269 ^a	0.269 ^a	0.269 ^a
y_R	0.276 ^a	0.276 ^a	0.276 ^a	0.276 ^a
$L/(L_1 + L_2)_B$	0.903(1)	0.097	0.903(1)	0.097
$L/(L_1 + L_2)_V$	0.897(1)	0.103	0.897(1)	0.103
$L/(L_1 + L_2)_R$	0.892(1)	0.108	0.893(1)	0.107
$r(\text{pole})$	0.5448(3)	0.2171(4)	0.5466(4)	0.2156(6)
$r(\text{side})$	0.6138(5)	0.2290(5)	0.6166(7)	0.2275(7)
$r(\text{back})$	0.6374(6)	0.3013(20)	0.6400(9)	0.3013(32)
$r(\text{volume})^b$	0.5978	0.2437	0.6000	0.2422

^a: fixed parameter, ^b: mean volume radius.

곡선은 광도곡선에 비하여 관측점의 개수는 적을지라도, 질량비 등에 대해서는 더 좋은 제한을 준다. 따라서, 우리는 두 관측 자료를 분리하여 분석하였다. 즉, 먼저 광도곡선을 분석하여 측광인자들을 산출한 후, 그 측광인자들을 이용하여 시선속도곡선을 분석함으로써 분광인자들을 정한다. 그 다음에는 그 분광인자를 고정하고, 광도곡선을 분석하는 방식을 취하였다. 이때, 질량비는 두 단계 모두에서 조정인자로 사용되었다. 이 과정을 두 관측 자료가 모두 만족할 때까지 반복 계산하여 측광 및 분광해를 구하였고, 그 결과를 표 2의 4-5번째 열에 수록하였다. 또한, 이 해를 이용하여 산출한 이론적인 광도곡선과 색 곡선을 그림 1에 실선으로 그렸다. 그림 2는 RL의 관측된 시선속도곡선(열린 원)과 이론적인 시선속도곡선(실선과 점선)으로, 점선은 근접효과를 고려하지 않고 순수 sine 곡선에 맞춘 RL의 분석결과를 나타내고, 실선은 이 연구에서 구한 이론적인 시선속도곡선을 나타낸다.

4. 절대 물리량과 거리의 결정

이 논문에서 새로 산출한 측광 및 분광학적 해를 이용하여 CK Boo의 절대 물리량을 표 3와 같이 산출하였다. 여기서, 반경은 Mochnacki(1984)의 표를 이용하여 계산한 평균 체적반경(mean volume

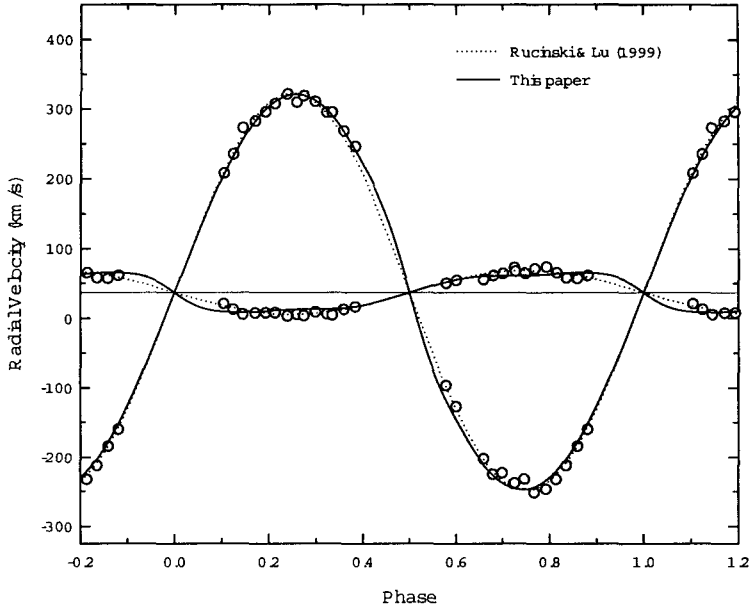


그림 2. CK Boo의 시선속도곡선. 열린 원과 점선은 RL의 관측과 이론적인 시선속도곡선이고, 실선은 이 연구에서 구한 이론적인 시선속도곡선이다.

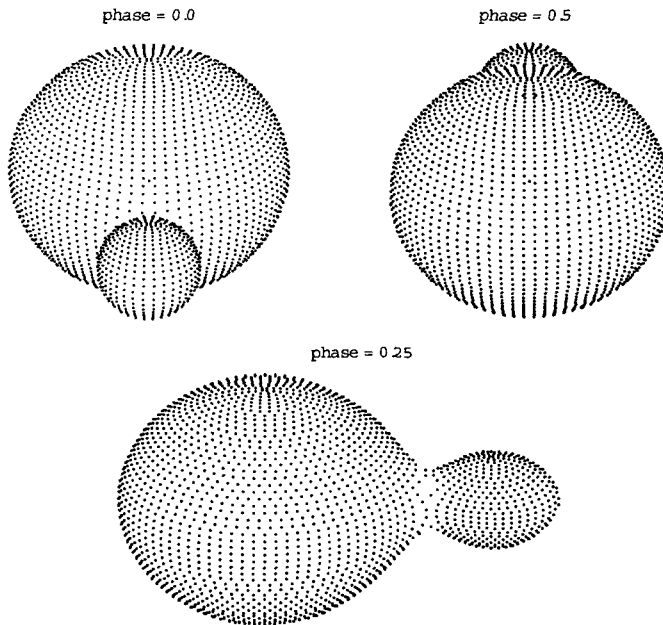


그림 3. 위상에 따른 CK Boo의 로슈모형. 이 쌍성계는 접촉도(f)가 83.8%인 과접촉 쌍성계이다.

표 3. CK Boo의 절대 물리량.

Parameter	Primary	Secondary
M/M_{\odot}	1.42	0.15
R/R_{\odot}	1.47	0.59
$\log g(cgs)$	4.25	4.08
$T(K)$	6250	5840
L/L_{\odot}	2.96	0.37
$M_{bol}(mag)$	3.51	5.78
$M_V(mag)$	3.53	5.85
$M_{V, Tot}(mag)$	3.41	

radius)이다. 이 연구에서는 절대광도(L/L_{\odot})와 등급(M_{bol})을 계산하기 위하여, 태양의 온도와 복사 등급은 각각 Popper(1980)가 산출한 5780K와 4.69를 사용하였다. 또한, 주성과 반성의 안시 절대 등급(M_V)은 각각 Flower(1996)의 복사보정 -0.02와 -0.07을 사용하여 계산하였다. 한편, CK Boo의 Roche 기하를 알아보기 위하여 표 2에 주어진 질량비($q=0.108$)와 표면 포텐셜($\Omega=1.924$)을 사용하여 이 쌍성계의 위상에 따른 로쉬모형을 계산하고, 그 결과를 그림 3에 제시하였다. 이 그림에서 보듯이, CK Boo은 접축도(fill-out factor)가 83.8%인 과접축쌍성임을 알 수 있다.

우리는 성간흡수계수 A_V 와 색초과 $E(B - V)$ 의 관계식(Cox 2000):

$$A_V/E(B - V) = 3.30 + 0.28(B - V)_0 + 0.04E(B - V) \tag{1}$$

과 $E(B - V) \simeq 0.01$ 에 의해 성간흡수계수 $A_V \simeq 0.03$ 을 구하고, CK Boo의 최대 밝기($m_V = 8.99$)를 이용하여 거리지수와 거리를 각각 5.55와 129pc로 산출하였다. 우리가 구한 거리는 Hipparcos 측성 위성의 삼각시차 $6.4 \pm 1.3mas$ 에 의한 거리 $157 \pm 33pc$ 와 오차의 범위 내에서 일치하다.

5. 요약과 논의

CK Boo는 광도곡선 분석에 의한 측광질량비가 최근에 DDO에서 관측한 분광질량비보다 매우 큰 값으로 산출되었고, 시선속도곡선도 쌍성의 근접효과에 대한 고려 없이 분석되었다. 이 연구에서는 우리가 관측한 BVR 광도곡선과 RL의 시선속도곡선을 1998년에 개정한 WD98 쌍성모델의 접축 모드(mode 3)를 사용하여 분석함으로써 이 쌍성계의 새로운 측광 및 분광해 뿐만 아니라, 절대 물리량과 거리를 새롭게 산출하였다.

우리는 광도와 시선속도곡선을 두 단계로 나누어 분석하였다. 첫 번째 단계는 RL의 분광질량비를 고정인자로 사용하여 우리의 3색 광도곡선만을 분석하였고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구한 측광인자들을 초기값으로 사용하여 광도와 시선속도곡선을 분석하였다. 이때, 질량비는 두 단계 모두에서 조정인자로 사용되었다. 그 결과, CK Boo는 질량비($q=0.11$)와 궤도 경사각($i=65^\circ$)이 작은 A형 과접축쌍성($f=84\%$)임을 알았다.

우리의 해로 부터 CK Boo의 절대 물리량을 $M_1=1.42M_{\odot}$, $M_2=0.15M_{\odot}$, $R_1=1.47R_{\odot}$, 그리고 $R_2=0.59M_{\odot}$ 으로, 거리를 129pc으로 산출하였다. 우리가 구한 거리는 Hipparcos 삼각시차에 의한 거리($157 \pm 33pc$)와 오차의 범위 내에서 일치한다. 한편, Rucinski & Duerbeck(1997)의 관계식

$M_V = M_V(\log P, B - V)$ 을 이용한 이 쌍성계의 안시 절대등급과 거리는 각각 3.75 등급과 110pc로 Hipparcos 삼각시차에 의한 거리보다 우리의 측광 및 분광해로부터 산출한 값에 가깝다. 이재우 등(2004)이 제시한 것처럼, 이것은 약 100pc보다 먼 거리에서는 Hipparcos 삼각시차에 의한 거리보다 광도와 시선속도곡선의 분석에 의한 거리가 보다 더 신뢰도가 높다는 주장을 뒷받침하는 결과이다. 그러나, 우리가 유추한 주성의 온도는 약 200K의 오차를 포함하고, 이것이 광도와 시선속도곡선의 분석에 의한 거리결정에 영향을 주기 때문에, 두 방법에 의한 거리를 보다 정밀하게 비교 분석하기 위해서는 스펙트럼 관측에 의한 쌍성의 에너지 곡선 등이 절실히 요구된다.

감사의 글: 이 연구는 2002년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음(과제번호: KRF-2002-015-CP0150).

참고문헌

- 이재우, 김천휘, 이충욱, 오규동 2004, 한국우주과학회지, 21, 73
 이충욱, 박성수, 김천휘, 변용익 2003, 한국우주과학회지, 20, 143
 Aslan, Z. & Derman, E. 1986, A&AS, 66, 281
 Bond, H. E. 1975, PASP, 87, 877
 Cox, A. N. 2000, Allen's Astrophysical Quantities (Springer-Verlag: New York)
 Demircan, O. 1987, Ap&SS, 135, 169
 Flower, P. J. 1996, ApJ, 469, 355
 Harmanec, P. 1988, BAICz, 39, 329
 Hrivnak, B. J. 1993, in New Frontiers in Interacting Binary Star Research, ed. by K. C. Leung & I. -S. Nha (ASP Conf.: Seoul), 269
 Krzesiński, J., Mikolajewski, M., Pajdosz, G. & Zola, S. 1991, Ap&SS, 184, 37
 Kwee, K. K. & van Woerden, H. 1956, BAN, 12, 327
 Lucy, L. B. 1967, Zeitschrift für Astrophysik, 65, 89
 Mochnacki, S. W. 1984, ApJS, 55, 551
 Popper, D. M. 1980, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 18, 115
 Rucinski, S. M. 1969, A&A, 19, 245
 Rucinski, S. M. 1997, AJ, 113, 407
 Rucinski, S. M. 2003, IAUJD, 13, 7
 Rucinski, S. M. & Duerbeck, H. W. 1997, PASP, 109, 1340
 Rucinski, S. M. & Lu, W. 1999, AJ, 118, 2451
 Wilson, R. E. 1998, ftp://ftp.astro.ufl.edu/pub/wilson/
 Wilson, R. E. & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605
 Van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 209