

바데의 창 영역에서 발견된 접촉형 쌍성의 절대량¹

강영운

세종대학교 지구과학과, 대양천문대

ABSOLUTE DIMENSIONS OF CONTACT BINARY STARS IN BAADE WINDOW

Young Woon Kang

Daeyang Observatory, Department of Earth Science, Sejong University

E-mail: kangyw@astro.sejong.ac.kr

(Received October 10, 1999; Accepted November 1, 1999)

요 약

우리는하안에서 암흑물질을 찾는 OGLE 프로젝트가 발견한 식쌍성중에서 6개의 대표적인 접촉형 쌍성을 선택하여 광도곡선을 분석하여 측광학적인 해를 구하였다. 이들 쌍성들은 태양 근방의 쌍성과 비교할 때 기울기가 낮게 나타났으며, Roche lobe를 채우는 정도인 filling factor는 0.12-0.90로 다양하게 나타났다. 분광관측이 수행되지 않은 쌍성이므로 케플러 궤적과 isochrone 궤적의 교점을 이용한 간접적인 방법으로 쌍성계의 질량을 구하고, 이를 기초로 각 쌍성의 절대량과 거리를 구하였다. 이와같은 방법으로 산출한 쌍성들의 거리는 1 kpc - 6 kpc 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 이는 주기가 1일 이하인 접촉형 쌍성이 보일 수 있는 한계 거리로 추정하며, 대부분의 접촉형 쌍성은 은하벌지에 속하지 않은 별들이다.

ABSTRACT

The light curves of the representative 6 contact binary stars observed by OGLE Project of searching for dark matter in our Galaxy have been analyzed by the method of the Wilson and Devinney Differential Correction to find photometric solutions. The orbital inclinations of these binaries are in the range of $52^\circ - 69^\circ$ which is lower than that of the solar neighborhood binaries. The Roche lobe filling factor of these binaries are distributed in large range of 0.12 - 0.90. Since absence of spectroscopic observations for these binaries we have found masses of the 6 binary systems based on the intersection between Kepler locus and locus derived from Vandenberg isochrones in the mass - luminosity plane. Then absolute dimensions and distances have been

¹이 연구는 한국과학재단의 '97 국제공동연구비 (과제번호: 975-0200-013-2)의 지원에 의한 것임

found by combining the masses and the photometric solutions. The distances of the 6 binary systems are distributed in the range of 1 kpc - 6 kpc. This distance range is the limiting range where the contact binaries which have period shorter than a day are visible. Most contact binaries discovered in the Baade window do not belong to the Galactic bulge.

1. 서 론

쌍성을 주제로 하는 연구는 쌍성을 이용하여 별의 물리적인 인자를 구하는 연구가 쌍성 자체를 연구하는 것 이상으로 중요하게 인식되고 있다. 특히 식쌍성을 이용하면 별의 크기, 온도, 질량을 절대량으로 구할 수 있고, 나아가서는 별의 거리를 결정하는데 사용된다. 그러나 모든 식쌍성에 대하여 절대량과 거리를 구할 수 있는 것은 아니다. 관측 기술이 현격하게 향상된 현 시점에서 식쌍성에 대한 시선속도 곡선을 완성하기 위해서는 대형 망원경의 관측 시간을 상대적으로 많이 요구하기 때문에 현실적으로 어려움이 많다.

이러한 상황에서 최근에는 CCD를 이용하여, 한 지역을 집중적으로 측광 관측하는 연구 프로젝트가 여러 곳에서 수행되고 있다. 그 대표적인 예로 중력렌즈 효과를 이용하여 은하하에서 암흑 물질을 찾기 위한 목적으로 별 밀집 지역의 반복적인 측광관측이 MACHO, EROS, OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Udalski *et al.* 1994) 등의 프로젝트에 의해서 수행되고 있다. 이러한 프로젝트들은 관측 결과 수 많은 변광성을 부산물로 발견하였다. 그 중 OGLE 프로젝트는 은하벌지에 속한 별을 관측하기 위하여, 바데의 창 영역 (Baade, 1944, 1951)을 *V*와 *I* 필터를 사용하여 CCD 측광관측을 집중적으로 수행하여 수 천개의 변광성을 발견하였다. Udalski *et al.* (1994)은 이들 변광성 중에서 주기성이 확인된 것들을 맥동변광성, 식쌍성, 그리고 미분류변광성으로 구분하여 광도곡선을 발표하였다.

이와같이 수 많은 식쌍성이 태양 근방이 아닌 지역에서 새롭게 발견되고, 그들의 광도곡선이 발표됨에 따라 Guinan *et al.* (1996), Kang (1997) 등은 EROS팀이 발표한 광도곡선과 IUE 스펙트럼을 이용하여 마젤란 은하에 속한 별의 온도를 구하고, OGLE팀이 발표한 은하벌지에 속한 기타 변광성의 광도곡선을 분석하여 이들의 특성을 채층활동이 강한 별들로 설명하였다. 그러나 쌍성의 광도곡선을 분석하여 물리적인 인자와 거리를 구하는 작업은 구체적으로 진행되지 못하고 있다. 그 이유는 첫째, 새롭게 발견된 쌍성이므로 아직까지 분광관측 자료가 전혀 없다는 것이다. 그러므로 물리적 인자의 절대량 산출이 불가능하고, 쌍성의 인자를 상대적으로 구하는 측광학적인 해를 구하는데도 온도의 결정이 문제점으로 대두되기 때문이다. 둘째는 새롭게 발견된 쌍성의 밝기가 대부분 15 등급보다 어두우므로 상대적으로 식의 깊이에 비하여 관측 scatter가 크게 나타나고 있는 점이다.

이 논문에서는 위에서 언급한 문제점을 보완하여 OGLE 프로젝트에 의해서 발견된 접촉형 쌍성의 광도곡선을 분석하고, 이들에 대한 분광관측이 없으므로 간접적인 방법으로 각 쌍성에 대한 질량을 구하는 방법을 제시하였다. 이들 질량을 기초로 각 쌍성에 대한 절대량과 거리를 산출하고, 바데 창에서 발견된 쌍성의 특성을 조사하였다.

표1. 6개 접촉형 쌍성에 대한 OGLE 정보.

별이름	적경 (2000)	적위 (2000)	Epoch (+2448000)	I	V-I	식의 깊이
BW1 V26	18:02:44.24	-29:48:45.3	724. ^d 2225	15. ^m 45	1. ^m 06	0. ^m 27
BW1 V37	18:02:31.67	-29:45:33.3	724.4776	15.67	0.97	0.31
BW1 V38	18:02:27.73	-29:52:25.0	724.8872	15.67	1.25	0.52
BW1 V48	18:01:57.49	-29:44:54.8	724.5516	15.91	1.17	0.44
BW1 V69	18:01:48.32	-29:51:47.1	724.5832	16.20	1.26	0.41
BW1 V79	18:02:28.33	-29:49:45.3	724.5317	16.31	1.33	0.27

2. 은하별지에 속한 접촉형 쌍성

은하별지 지역은 가시광선 영역에서는 단지 바데의 창에서만 관측이 가능하므로 OGLE 팀 (Udalski *et al.*, 1994)은 바데의 창을 12개 지역으로 나누어 칠레에 있는 Las Campanas 천문대의 1 m 망원경과 V와 I 필터를 사용하여 CCD 측광관측을 하였다. 각 지역의 크기는 15' x 15'이며 12개의 지역에서 수 백만 개에 달하는 별에 대하여 V와 I 등급을 결정하였다. 이 중에서 광도 변화가 0.^m1 이상이면서 주기성을 가진 약 2,000개의 변광성을 1 차적으로 발견하였고 이들의 광도곡선과 주기를 발표하였다. 이들 변광성에는 맥동변광성이 약 300 여 개, 식쌍성이 약 900 여 개 그리고 기타 변광성 (miscellaneous variables)이 약 800 여 개 포함되었다.

이 논문에서는 바데의 창에서 발견된 쌍성의 거리를 구하기 위하여 식쌍성 중에서 접촉형 쌍성을 분리 선택하여 이들의 광도곡선을 분석하였다. 쌍성 개개의 광도곡선을 분석하여 해를 구하는 일은 많은 시간을 요하는 작업이므로 12 개의 영역으로 구분된 바데의 창 중에서 BW1에 속한 약 50 여 개의 접촉형 쌍성을 조사한 결과, 해를 구하는데 무리가 없을 정도로 관측 scatter가 적은 6 개의 접촉형 쌍성을 선정하여 Wilson and Devinney (1971, 이후부터는 WD라고 함) 차등보정법을 사용하여 측광학적인 해를 구하였다. 접촉형 쌍성의 광도곡선은 비대칭인 경우가 자주 나타나므로 필요에 따라서 Kang and Wilson (1989)과 Kang (1993)의 흑점모델을 적용한 분석도 겸하였다. 이들 6개 접촉형 쌍성들의 정보는 표 1에 수록하였다.

바데의 창에서 발견된 쌍성들은 해에 대한 연구가 전혀 이루어지지 않은 것들이므로 WD 차등보정법의 초기 입력 인자를 다음과 같이 구하였다. 주기는 OGLE팀이 발표한 값을 사용하였고, 원궤도를 가정하였으므로 이심율은 0.0을 사용하였다. 공전궤도 기울기는 90°, 그 밖에 근접효과 (gravity darkening coefficients, albedos, limb darkening coefficients) 등은 이론적인 값을 사용하였다. 마지막으로 가장 중요한 초기값은 두 성분별의 온도이다. WD 모델은 상대적인 밝기를 사용하여 관측 값과 이론 값을 비교하면서 인자를 구하는 방법이므로 두 별 중에서 적어도 한 별의 온도는 관측으로부터 결정되어야 한다. OGLE 팀이 발견한 변광성은 아직까지 분광관측이 수행되지 않아서 분광형에 대한 정보는 전혀 없고, 다만 쌍성계의 V - I 색지수 값이 발표되었을 뿐이다.

표 2. 접촉형 쌍성의 측광학적인 해.

쌍성인자	BW1 V26	BW1 V37	BW1 V38	BW1 V48	BW1 V69	BW1 V79
Period (day)	0.8556	0.7007	0.4814	0.4419	0.5024	1.0180
i°	53.73	51.72	67.51	68.87	66.00	58.621
T_1	6573K	7024K	5830K	6047K	4413K	6103K
T_2	6573K	6814K	5770K	6006K	4413K	5495K
Ω_1	2.6014	2.5387	2.3281	2.6269	2.5928	0.6543
q	0.4060	0.4003	0.3178	0.4144	0.4043	0.4029
Filling factor	0.359	0.574	0.897	0.319	0.382	0.121

그러므로 Stanek (1996)과 Wozniak and Stanek (1996)이 제작한 바데의 창에 대한 extinction A_v 와 reddening E_{V-I} 지도를 이용하여 $(V-I)_0$ 구하였다. 이 값들은 은하별지의 거리를 8 kpc로 가정했을 때 유도된 $A_v = 2.5E_{V-I}$ 를 만족시키고 있다. 한편 Rucinski (1997)가 제시한 $(V-I)_0$ 와 유효온도의 상관관계로부터 쌍성계의 온도를 구하고, 각 성분 별의 초기 온도는 쌍성계의 온도를 사용하였다.

WD 차등보정법의 mode 3을 이용하여 반복계산한 결과 대부분의 쌍성계가 처음 한 두번의 반복 계산과정에서 공전궤도 기울기가 초기값의 90° 에서 $52^\circ - 69^\circ$ 의 낮은 값으로 수렴되는 현상을 보였다. 포텐셜은 6개의 쌍성계에 대하여 모두 두 성분 별이 inner critical potential을 초과하지만 outer critical potential은 초과하지 않는 것으로 나타났다. Roche lobe를 채우고 있는 정도를 나타내는 Roche filling factor는 정의에 따라서 조금씩 다르지만 여기서는 $(\Omega_{in} - \Omega)/(\Omega_{in} - \Omega_{out})$ 로 정의하고 6개 쌍성에 대하여 filling factor를 구하였다. 이 값은 0에서 1 사이를 변화하는 값으로 inner critical lobe만을 채우고 있을 때는 0이 되고 outer critical lobe까지 채울 때 1이 된다. 우리가 분석한 6개의 접촉형 쌍성은 filling factor가 0.12 - 0.90 사이의 다양한 값을 보이고 있다. 표 2에는 6개 접촉형 쌍성에 대한 측광학적인 해가 filling factor와 함께 수록되어 있다. 한편 그림 1과 2에는 6개 쌍성계의 광도곡선을 이론적인 광도곡선과 함께 나타내었다. 각 그림에서 점은 관측 대표점이고 실선은 WD의 최종인자를 사용하여 계산된 이론적인 광도곡선이다.

3. 접촉형 쌍성의 질량

접촉형 쌍성인 경우 분광 관측이 수행되지 않았어도 간접적인 방법으로 별의 절대량을 산출하는 방법이 Rucinski (1995), Maceroni and van't Veer (1996) 등에 의해서 일부 제시되었다. 이들의 방법을 응용하면 OGLE팀이 관측한 접촉형 쌍성의 광도곡선을 이용하여 은하별지까지의 거리를 구할 수 있다. 즉 측광학적인 해에서는 별의 온도와 상대적인 크기를 구하였으므로, 별의 질량을 다음과 같이 구하면, 접촉형 쌍성의 절대량을 구할 수 있다. 접촉형 쌍성에 대한 절대량을 간접적으로 구할 때 일반적으로 다음의 두 가정에 기초한다: a) 두 별사이의 상호작용은 계의 총광도에 영향을 주지 않는다. 그러므로

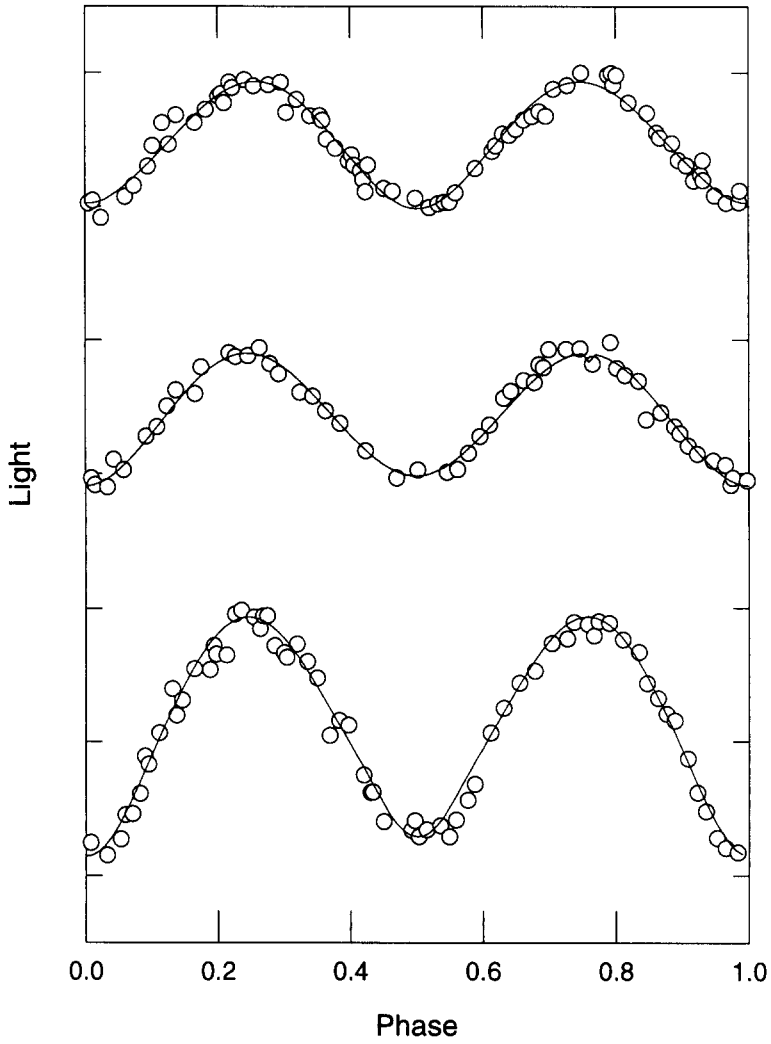


그림 1. 바데의 창에서 관측된 접촉형 쌍성 BW1 V26, BW1 V37, BW1 V38의 광도곡선. 점은 1 필터를 사용하여 얻은 관측이고, 곡선은 WD 모델의 최종인자를 이용하여 계산된 이론적인 곡선이다.

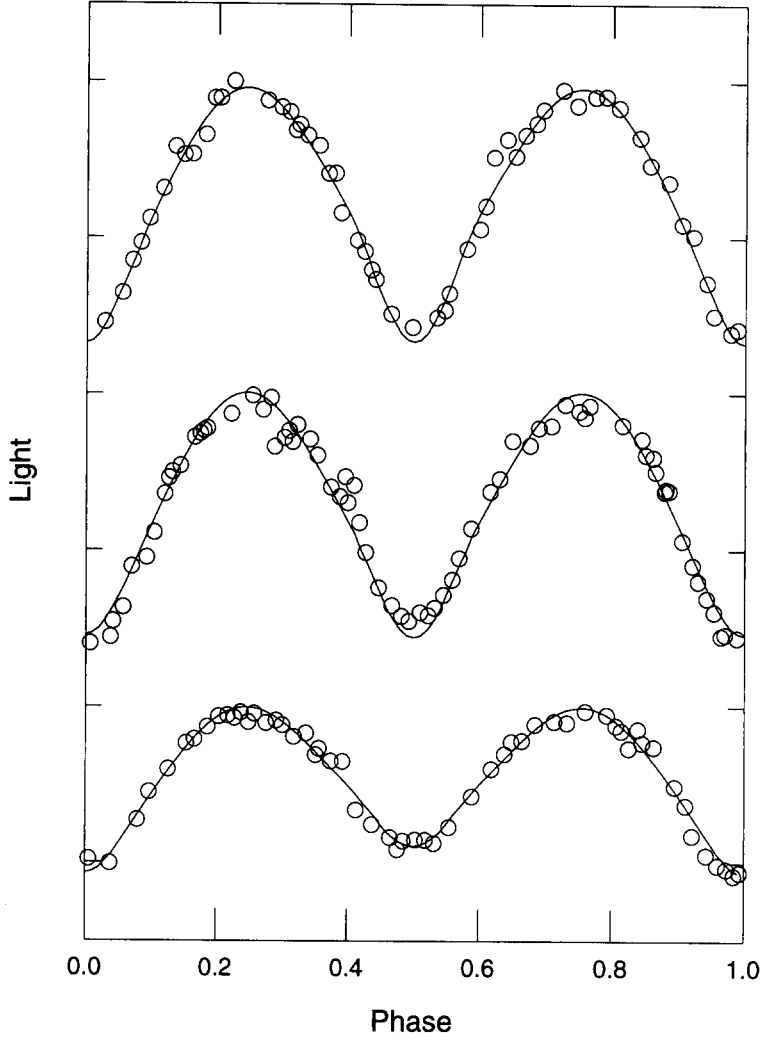


그림 2. 바데의 창에서 관측된 접촉형 쌍성 BW1 V48, BW1 V69, BW1 V79의 광도곡선. 점은 I 필터를 사용하여 얻은 관측이고, 곡선은 WD 모델의 최종인자를 이용하여 계산된 이론적인 곡선이다.

common envelope 에서는 내부 두 별 광도의 합에 해당하는 광도를 복사한다. 다시 말해서, 총광도는 나이와 질량이 같은 완전 분리된 두 별의 광도합과 같은 광도를 복사한다. b) 태양계 근방의 접촉형 쌍성은 H-R도에서 모두 주계열 부근에 나타나며, W형 별은 ZAMS로, A형 별은 TAMS로 추정한다.

이러한 가정으로 각 계의 총 질량과 광도는 질량과 광도관계 그래프에서 케플러 궤적과 isochrone (ZAMS/TAMS) 궤적의 교차점에서 구할 수 있다. 첫 번째 가정을 이용하여 계의 광도를 정의하는 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$L = 4\pi\sigma a^2(r_1^2 T_1^4 + r_2^2 T_2^4) \quad (1)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며, a 는 궤도 장반경, r_1, r_2 는 별의 상대반경, T_1, T_2 는 별의 유효온도이다. 식 (1)을 케플러의 제 3법칙을 이용하여 장반경 a 를 질량과 주기의 함수로 치환하여 표현하면 다음과 같다.

$$L = cm^{2/3} p^{4/3} (r_1^2 T_1^4 + r_2^2 T_2^4) \quad (2)$$

여기서 m 은 쌍성계의 질량, p 는 공전궤도 주기이며, 상수 c 는 다음과 같이 표현된다.

$$c = (4\pi)^{1/3} G^{2/3} \sigma \quad (3)$$

여기서 G 는 만유인력 상수이다. 그러므로 식 (2)와 (3)을 이용하면 각 쌍성에 대한 질량 대 광도에 대한 궤적, 소위 케플러 궤적을 그릴 수 있다.

두 번째 궤적은 ZAMS (혹은 TAMS) isochrone에서 각 질량비에 따른 질량-광도 관계를 계산함으로써 구할 수 있다. 그러므로 두 궤적을 질량-광도 도면에 그리면, 두 궤적사이의 교차점은 위의 두 가정을 만족시키는 계의 총 질량과 광도를 뜻한다. 이러한 방법으로 계의 총 질량을 구하면, 측광학적인 질량비로부터 계에 속한 성분 별의 질량, 반경 등을 절대값으로 구할 수 있다.

이 논문에서는 Vandenberg (1985)의 isochrone에 태양 성분 값 ($X=0.7, Z=0.0169$)을 사용하였다. W UMa형에는 거성이 없기 때문에 isochrone은 전향점 바로 밑까지가 한계이다. 그림 3에는 케플러 궤적과 나이가 8 Gyrs와 1 Gyr인 isochrone 궤적을 제시하였다. 그림 3에서 보는바와 케플러 궤적은 수평으로 이동하고 isochrone 궤적은 수직으로 이동하기 때문에 쉽게 교점을 구할 수 있고, 나이에 따른 isochrone 궤적이 큰 차이를 보이지 않기 때문에 접촉형 쌍성의 나이를 추정할 수 없어도 교점으로부터 질량을 구하는데 큰 문제점이 없다.

4. 접촉형 쌍성의 절대량과 토론

앞절에서 언급한 두 궤적의 교점에서 결정된 쌍성계의 질량을 기초로 쌍성계에 속한 성분 별의 절대량을 구하여 표 3과 4에 수록하였다. 표 3에 수록된 절대량은 나이가 8 Gyrs에 해당되는 isochrone과 케

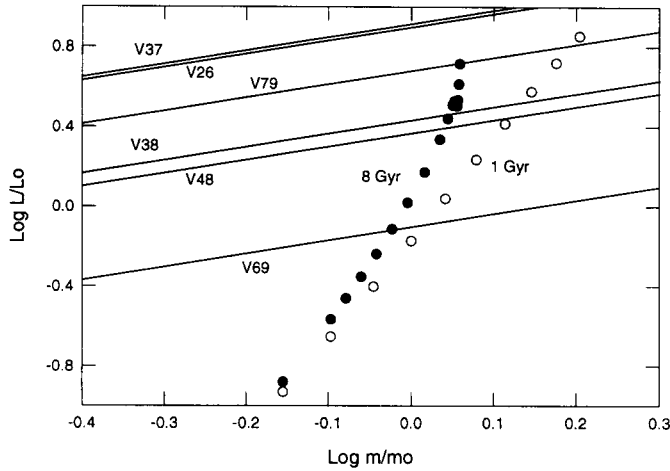


그림 3. 케플러 궤적과 isochrone. 수평으로 지나가는 사선들이 6개 쌍성계에 대한 케플러 궤적이고, 검은 원과 흰 원은 각각 8 Gyr와 1 Gyr의 isochrone이다. 두 궤적의 교점에서 각 쌍성계의 총질량과 총광도를 구할 수 있다.

플러 궤적과 만난 교점에서 구한 질량을 기초로 산출된 절대량이고, 표 4에 수록된 값은 1 Gyr에 해당되는 isochrone을 이용하여 구한 질량을 기초로 산출한 절대값이다. 각 접촉형 쌍성까지의 거리는 Flower (1996)가 제시한 bolometric correction값을 이용하여 M_v 를 구하고, 바데 창 영역의 extinction, $V - I$ 색지수, $A_I = 1.5E_{V-I}$ 를 이용하여 V_0 를 구하여 거리지수를 산출하였다. 6개 쌍성계에 대한 거리지수는 약 $10.^m3 - 15.^m7$ 의 넓은 분포로 나타난다. 따라서 각 쌍성계의 거리는 1 kpc - 6 kpc 사이에 분포하고 있다. 이 값은 은하별지의 거리 8 kpc에 미치지 못하는 값이다.

Rucinski (1997)는 쌍성계의 해를 구하지 않고, 거리와 extinction/reddening을 반복 계산하여 거리를 구한 결과, 바데 창 영역에서 발견된 접촉형 쌍성의 거리가 0.6 kpc에서 6 kpc까지 분포하고 있으며 약 5 kpc에서 가장 많이 분포하고 있음을 발표하였다. 이는 OGLE팀이 사용한 관측 시설에서 18 등급이 관측 한계 등급이고, 특히 쌍성의 광도변화가 효과적으로 관측되는 한계 등급이 16 등급으로 실제로 8 kpc 거리에 위치한 쌍성은 관측되지 않은 것으로 판단된다. 그러므로 OGLE팀이 발표한 대부분의 접촉형 쌍성은 은하별지의 foreground star임을 유추할 수 있다.

감사의 글: 이 연구는 한국과학재단의 '97 국제공동연구비 (과제번호: 975-0200-013-2)의 지원에 의한 것이며, 논문 심사위원의 심도있는 지적과 세심한 교정에 감사드립니다.

표 3. 6개 접촉형 쌍성에 대한 절대량과 거리 (나이 8 Gyr 가정)

별이름	$M_{\odot 1}$	$M_{\odot 2}$	$R_{\odot 1}$	$R_{\odot 2}$	$\text{Log } L/L_{\odot}$	M_v	$m - M$	$\text{Log } d(\text{pc})$
BW1 V26	0.88	0.36	1.95	1.30	0.96	2.29	12.72	3.54
BW1 V37	0.88	0.35	1.78	1.17	0.97	2.23	12.91	3.58
BW1 V38	0.83	0.26	1.44	0.88	0.46	3.63	11.79	3.36
BW1 V48	0.77	0.32	1.20	0.80	0.39	3.77	11.81	3.36
BW1 V69	0.68	0.27	1.26	0.84	-0.12	5.66	10.30	3.06
BW1 V79	0.82	0.33	2.10	1.34	0.83	2.70	13.44	3.69

표 4. 6개 접촉형 쌍성에 대한 절대량과 거리 (나이 1 Gyr 가정)

별이름	$M_{\odot 1}$	$M_{\odot 2}$	$R_{\odot 1}$	$R_{\odot 2}$	$\text{Log } L/L_{\odot}$	M_v	$m - M$	$\text{Log } d(\text{pc})$
BW1 V26	1.26	0.51	2.20	1.47	1.06	2.03	12.98	3.60
BW1 V37	1.27	0.51	2.01	1.33	1.08	1.97	13.17	3.63
BW1 V38	1.02	0.33	1.54	0.94	0.52	3.48	11.94	3.39
BW1 V48	0.91	0.38	1.27	0.85	0.44	3.64	11.94	3.39
BW1 V69	0.75	0.30	1.30	0.86	-0.09	5.59	10.37	3.07
BW1 V79	1.13	0.46	2.33	1.49	0.93	2.47	13.67	3.73

참고문헌

- Baade, W. A. 1944, ApJ, 100, 137
 Baade, W. A. 1951, Publ. Univ. Mich. Obs., 10, 7
 Flower, P. J. 1966, ApJ, 469, 335
 Guinan, E. F., Kang, Y. W. & Gudel M. 1996, proceedings of the IAP meeting
 Kang, Y. W. 1997, JA&SS, 14, 207
 Kang, Y. W. 1993, Ap&SS, 201, 35
 Kang, Y. W. & Wilson, R. E. 1989, AJ, 97, 848
 Maceroni, C. & van't Veer F. 1996, A&A, 311, 523
 Rucinski, S. M. 1997, AJ, 113, 407
 Rucinski, S. M. 1995, PASP, 107, 648
 Stanek, K. Z. 1996, ApJ, 460, L37
 Udalski, A., Kubiak, M., Szymanski, M., Kaluzny, J., Mateo, M., & Krzeminski, W. 1994, ACTA Astro., 44, 317
 Vandenberg, D. 1985 ApJSS, 58, 711

Wilson R.E. & Devinney E. J. 1971, *ApJ*, 166, 606

Wozniak, P.R. & Stanek, K.Z. 1996, *ApJ*, 464, 233