

측광학적 방법을 이용한 TU UMi의 변광성 분류

이 호^{1,*} · 김승리² · 조미선¹ · 이재우² · 박홍서¹

¹한국교원대학교 제3대학 지구과학교육과, 363-791 충북 청원군 강내면 다락리 산7

²한국천문연구원, 305-348 대전광역시 유성구 화암동 61-1

Photometric Classification of the Variable Star TU UMi

Ho Lee^{1,*}, Seung-Lee Kim², Mi-Sun Jo¹, Jae Woo Lee² and Hong-Suh Park¹

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education,
Chungbuk 363-791, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

Abstract: We present B, V, I time series CCD photometry for the variable star TU UMi to classify its variable type. The observations were performed using 61cm telescope equipped with 2K CCD camera at Sobaeksan Optical Astronomy Observatory (SOAO). Judging from the amplitude ratio ($\Delta i/\Delta v$) and color variation ($\Delta(b-v)$, $\Delta(v-i)$), TU UMi should be a W UMa type eclipsing binary. We obtained two primary times of minimum lights (HJD 2453848.0446, HJD 2453848.2309) from our observations and determined new orbital elements (Min I = HJD 2452500.1344 + 0.37708907 × E) for TU UMi.

Keywords: TU UMi, W UMa type eclipsing binary, photometry

요약: 변광성 TU UMi의 변광 유형의 분류를 위하여 소백산 천문대 0.6 m 광학 망원경과 2K CCD 카메라를 이용하여 B, V, I 필터를 이용한 시계열 측광 관측을 수행하였다. 변광성의 분류를 위하여 V 필터와 I 필터로부터 얻은 광도 곡선의 진폭의 비($\Delta i/\Delta v$), 색의 변화($\Delta(b-v)$, $\Delta(v-i)$)로 부터 TU UMi가 W UMa형 식쌍성임을 확인하였으며, 우리의 관측 자료에서 2개의 극심 시각(HJD 2453848.04456, HJD 2453848.23088)을 구하였고, 새로운 광도 요소(Min I = HJD 2452500.1344 + 0.37708907 × E)를 결정하였다.

주요어: TU UMi, W UMa 형 식쌍성, 측광

서론

변광성의 연구에서 가장 기본적인 일은 변광성의 유형을 결정하는 것이다. 최근에 ROTSE(Akerlof et al., 2000), Hipparcos mission(ESA 1997) 등의 전천 탐사 프로젝트와 우리은하 중심부와 대·소 마젤란은하 방향으로 암흑물질을 찾기 위한 OGLE(Udalski et al. 1997), MACHO(Alcock et al. 2000) 등의 탐사 프로젝트가 수행되면서 부수적으로 많은 변광성이 발견되었고 이들의 변광성 분류 작업이 동시에 수행되었다. 많은 수의 변광성 분류를 위하여 자동화된 알

고리즘으로 결정한 주기를 기준으로 분류를 하다 보니 진폭이 작은 W UMa 형 식쌍성을 주기가 비슷한 δ Scuti 형 변광성(DSCT)으로 분류하는 오류가 나타났다(Jin et al., 2003, 2004). W UMa 형 식쌍성은 강한 중력장에 의해 두 별이 대기를 공유하고 있는 접촉 쌍성계이며, 같은 대기를 가지고 있기 때문에 두 천체는 거의 같은 표면온도를 가지며, 광도곡선의 주극소와 부극소의 진폭 역시 거의 일치한다(Henden and Kaitchuck, 1982). DSCT는 세페이드 불안정 대(Cepheid instability strip)의 연장선이 주계열과 만나는 지점 근처에 주계열을 기준으로 2등급 가량의 광도 범위를 가지고 분포하며, 분광형은 대부분 A2~F2이며, 대부분은 중원소 함량이 태양과 비슷한 종족 I이다(Breger, 2000., Rodriguez and Breger, 2001). W UMa 형 식쌍성은 식에 의한 변광 현상인데 반하

*Corresponding author: leeho119@blue.knue.ac.kr

Tel: 82-43-230-3794

Fax: 82-43-233-2960

Table 1. Observation log

Date	Starting HJD (+2452000)	Filter			Total	Remarks
		B	V	I		
2006.04.21	846.9771	12	70	10	92	cirrus
2006.04.22	847.9671	19	135	42	196	clear
2006.05.24	880.1661	14	28	14	56	cloudy, high moisture
Total		45	233	66	344	

여, DSCT형 변광성은 온도변화에 의한 변광 현상이 나타내기 때문에 Jin et al.(2003, 2004) 등은 V와 I 필터를 이용한 진폭의 비를 이용한 두 변광성의 분류방법을 제안하였다.

연구의 대상으로 선정한 TU UMi(HIP 73047, BD +76 544)는 HIPPARCOS(High Precision PARallax Collecting Satellite) 위성 에 의해 처음으로 발견되었다(ESA 1997). HIPPARCOS는 천체의 위치, 시차, 고유운동 등을 측정하기 위한 탐사위성으로써 12만 여 개의 별들에 대해 천분의 1초(1 milli-arc-second)의 수준으로 시차를 측정하였다. 아울러 이 위성 에 TYCHO라는 측광장치를 탑재함으로써 관측한 별들에 대한 대략적인 광도곡선을 얻었다. Duerbeck (1997)은 TU UMi를 W UMa 형 식쌍성 또는 맥동 변광성 중 하나일 것이라 분류하였으며, Kazarovets et al.(1999)은 TU UMi를 DSCT로 분류하였고, Rodriguez et al.(2000) 역시 DCST로 분류하였다. Rolland et al.(2002)은 *wbyj* 필터를 이용한 Strömgren 측광으로 TU UMi를 W UMa형 식쌍성이라고 발표 하였다. Rucinski et al.(2005)은 시선속도 관측과 측광 관측을 통해 TU UMi가 Triple system에 의한 접 측쌍성계일 가능성이 있다고 발표하였으며, Pribulla and Rucinski(2006)는 통계적인 방법을 이용하여 TU UMi가 Triple system이라고 밝혔다. 그러나 2006년 4월에 새로 갱신된 대표적인 변광성 목록인 GCVS (General Catalogue of Variable Stars, Samus et al., 2006)에는 TU UMi를 DSCT로 분류하고 있다. 본 연구에서는 변광성의 물리량 중 색지수 변화와 파장 별 변광 진폭비를 이용하여 TU UMi의 변광성 분류를 하고, 새로운 극심 시각은 O-C도를 이용한 Triple system의 연구에 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 이 자료들은 Triple system자 한다. 2절에는 관측과 자료처리를 3절에는 B, V, I 필터를 이용한 진폭비와 색의 변화, 위상-등급도를 이용하여 변광성의 분류 방법과, O-C도를 이용하여 변광성의 극심시각과 주

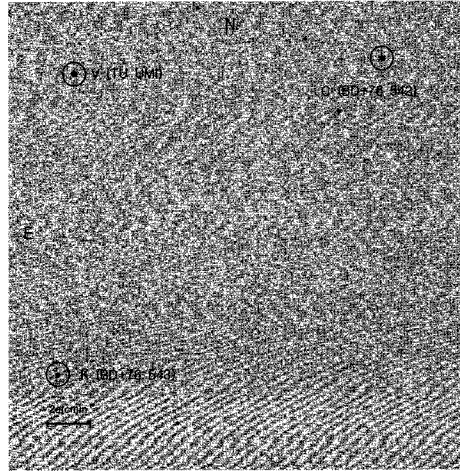


Fig. 1. CCD image of observed field ($20'.5 \times 20'.5$). The variable star labeled as V, comparison star as C, and check star as K.

기를 결정하고, 4절에는 결과를 요약하도록 하겠다.

관측 및 자료처리

TU UMi의 CCD 측광 관측은 한국천문연구원 소백산천문대(SOAO)의 61 cm Ritchy-Chretien형 반사 망원경(F/13.5)과 SITe 2K CCD 카메라를 사용하여 2006년 4월 21과 21일, 5월 24일의 총 3일간 이루어 졌으며 B 필터 영상 45장, V 필터 영상 233장, I 필터 영상 66장 총 344장의 CCD 영상을 얻었다. 검출기로 사용한 SITe 2K CCD 카메라의 이득값(gain)은 $2.37e^-/ADU$, 읽기 잡음(readout noise)은 $5.43e^-$ 로 한 화소당 $0.60''$ 의 시야로 전체 시야는 $20'.5 \times 20'.5$ 를 갖는다. CCD 냉각은 액체질소 냉각방식으로 $-110^\circ C$ 로 CCD를 유지하므로 열전자 발생량을 무시할 수 있다. 관측 기간 동안에 시상은 평균 $2'' \sim 3''$ 이었으며, 사용한 필터는 Johnson B, V, I 필터를 사용하였고, 평균 노출시간은 V 필터는 25초, B 필터는 40초, I

Table 2. Basic data for variable and comparison stars

	Star ID	R.A.(2000)	Dec.(2000)	V	B-V	Sp	Reference
Variable	TU UMi (HIP 73047)	14 ^h 55 ^m 43 ^s .80	+76° 18' 23".6	8 ^m .76	0.436	F2	Hipparcos Catalogue [†]
Comparison	BD + 76 542	14 ^h 51 ^m 54 ^s .39	+76° 19' 02".04	9 ^m .34	-	G5	Hog et al.(1998)
Check	BD + 76 543	14 ^h 55 ^m 53 ^s .27	+76° 05' 36".10	9 ^m .84	-	M	Hog et al.(1998)

[†]<http://archive.ast.cam.ac.uk/hipp/hipparcos.html>

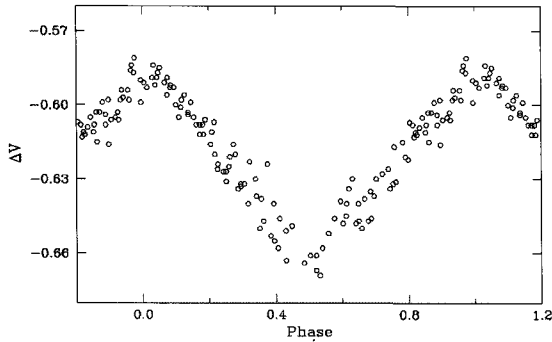


Fig. 2. V photometric data for TU UMi, phased with the period of 0.188544535 day.

필터는 10초로 날씨의 상태에 따라 적절하게 조절하였다. 관측일지는 Table 1에 정리하였다. Fig. 1은 관측영역의 CCD 영상으로 TU UMi와 비교성으로 사용한 BD + 76 542, 점검성으로 사용한 BD + 76 543를 V(Variable), C(Comparison), K(Check)로 각각 나타내었다. 소백산 CCD에서 잡음의 무늬가 보이거나 픽셀 최대값이 10,000ADU 이상으로 관측하는 경우 진폭이 0.01-0.02등급 정도의 진폭 보이는 변광성의 관측이 가능하다(Kim et al., 2005). 변광성, 비교성, 점검성의 등급과 색지수는 Table 2에 정리하였다. CCD 측광 관측 자료의 처리는 미국 국립 광학천문대(NOAO)의 IRAF(Image Reduction and Analysis Facility) 2.12를 이용한 일반적인 측광 순서에 따라서, 관측한 자료에서 기기 요소에 의한 성분을 제거하는 전처리단계(Preprocessing)를 수행하고, 구경측광(APHOT)으로 등급을 구한 다음 비교성과의 차등 등급을 구하였다. 전체 자료에 대한 비교성과 점검성의 등급차에 대한 표준오차는 B, V, I 각 필터에 대하여 각각 ±0.010, ±0.013, ±0.027이다.

결 과

위상-등급도와 색의 변화

Fig. 2는 TU UMi를 DSCT형 변광성으로 가정한

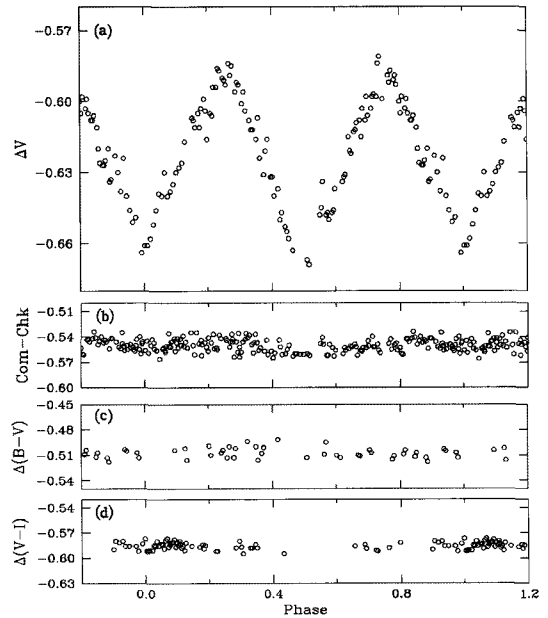


Fig. 3. (a) V photometric data for TU UMi, phased with the period of 0.37708907 day (b) Difference comparison minus check (c),(d) Color variation of TU UMi over the period.

위상-등급도이고, Fig. 3-(a)는 W UMa형 식쌍성으로 가정한 위상-등급도이다. DSCT형 변광성은 진폭이 작을 경우 전형적인 맥동변광성의 광도곡선을 보이지 않고 대칭적인 모양을 나타낸다. 따라서 위상-등급도를 이용하여 분류하기에는 어렵다. Fig. 3의(b)는 비교성과 점검성의 차등등급을 나타낸 것으로 비교성에 특이한 변화가 보이지 않는다. 다만 분산이 비교적 크게 나타났는데 이는 관측일의 대기 상태와 변광성에 비하여 상대적으로 어두운 비교성 때문으로 판단된다. Fig. 3의(c)는 값의 변화를, (d)는 값의 변화를 나타낸 것이다. DSCT형 변광성은 온도변화에 의한 맥동현상이므로 위상 간에 색의 변화가 나타나야 하는데 색의 변화가 거의 보이지 않는 것으로 보아 W UMa형 식쌍성으로 판단된다.

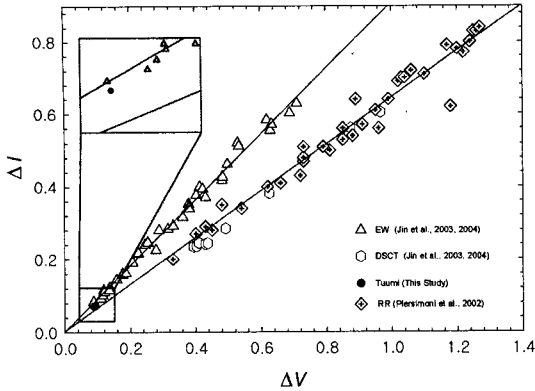


Fig. 4. ΔI vs ΔV amplitudes difference diagram. Open triangles denote EW, open hexagons denote DSCT, diamond x-hairs denote RR Lyrae, and filled circles denote TU UMi.

$\Delta I/\Delta V$

DSCT는 변광 현상을 일으키는 주된 원인이 두 별의 온도가 거의 같은 W UMa형 식쌍성과는 달리 온도변화에 의한 변광현상이 나타나므로 관측 파장에 따라 큰 진폭의 변화를 보인다(Jin et al., 2003, 2004). Fig. 4는 ΔV 에 대하여 ΔI 를 맥동변광성과 식쌍성을 함께 나타낸 것이다. DSCT형 변광성과 RR Lyrae형 변광성은 $\Delta I/\Delta V \approx 0.6$ 의 값을 나타내고, W UMa형 식쌍성형 변광성은 $\Delta I/\Delta V \approx 0.92$ 의 값을 나타낸다(Jin et al., 2003, 2004). TU UMi의 경우 광도곡선으로부터 구한 $\Delta I/\Delta V$ 는 0.8 ± 0.1 으로 DSCT형 변광성보다 W UMa형 식쌍성으로 판단된다. 오차는 관측일의 대기 상태 불안정으로 인한 광도곡선의 읽기 오차 때문에 나타난 것이다.

O-C도

변광성의 극심/극대 시간의 결정은 광도요소를 결

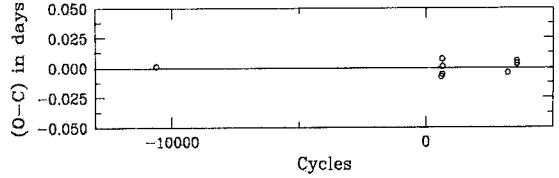


Fig. 5. O-C diagram for TU UMi.

정하는 기본 자료로서 매우 중요하다. TU UMi의 극심 시각은 KW(Kwee and Woerden, 1956)방법을 이용하여 HJD 2453848.04456와 2453848.23088를 결정하였고, 극대 시각은 광도 곡선을 읽어서 HJD 2453847.9502로 결정하였다. 극대시각은 맥동변광성일 경우를 가정한 것이기 때문에 특별한 알고리즘이 없이 광도곡선을 읽어서 얻어도 충분하기 때문에 광도곡선으로부터 직접 읽었다. 새롭게 구한 극심시각은 이전의 연구와 함께 Table 3에 정리하였으며, O-C도는 Fig. 5에 나타내었다. 모든 극심시각을 일차함수 광도요소에 최소자승법을 사용하여 맞추었다. 그 결과 산출한 광도요소는

$$\text{Min I} = \text{HJD}2452500.1344(\pm 0.0020) + 0.37708907 \times E(\pm 0.00000047)\text{이다.}$$

이 값들은 Kreiner(2004)에 있는 극심 시각 2452500.133, 공전주기 0.3770891과 거의 일치하고 있다.

결론

TU UMi의 측광학적 방법을 이용한 변광성의 분류에서 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 위상-등급도와 변광성의 색의 변화를 보아 TU UMi는 W UMa 형 식쌍성으로 판단된다.

Table 3. O-C Data for TU UMi

Minimum Light (HJD)	O-C	Type	Reference
2448499.97473 [†]	0.0012	primary	Hipparcos (ESA 1997)
2452725.62604	-0.0076	primary	Pych and Rucinski (2004)
2452739.59307	0.0071	primary	Pych and Rucinski (2004)
2452739.76890 [‡]	-0.0056	secondary	Pych and Rucinski (2004)
2452741.66087 [‡]	0.0009	secondary	Pych and Rucinski (2004)
2453713.41419 [†]	-0.0043	Primary	Klingenberg et al.(2006)
2453848.04456	0.0053	Primary	This Study
2453848.23088	0.0031	Primary	This Study

[†]Shifted by 1/4 of the period because these epochs thought to be delta scuti.

[‡]Shifted by 1/2 of the period because these epochs are secondary.

2) 우리의 광도 곡선으로부터 TU UMi의 $\Delta i/\Delta v$ 의 값은 약 0.8이다. 맥동 변광성의 $\Delta i/\Delta v \approx 0.6$ 과 W UMa형 식쌍성의 $\Delta i/\Delta v \approx 0.92$ 과 비교하여 보면, 이 값은 W UMa형 식쌍성에 더 가까운 것으로 보아 TU UMi는 DSCT형 변광성이라기보다 W UMa형 식쌍성으로 판단된다.

3) TU UMi의 새로운 극심 시각을 HJD 2453848.04456와 2453848.23088로 결정하고, 모든 극심 시각을 일차 함수 광도 요소에 최소 자승법을 사용하여 맞추어 새로운 광도요소

$$\text{Min } I = \text{HJD}2452500.1344(\pm 0.0020) + 0.37708907 \times E(\pm 0.00000047)$$
를 결정하였다.

참고문헌

- Akerlof, C., Amrose, S., Balsano, R., Bloch, J., Casper-son, D., Fletcher, S., Gisler, G., Hills, J., Kehoe, R., Lee, B., Marshall, S., McKay, T., Pawl, A., Schaefer, J., Szymanski, J., and Wren, J., 2000, ROTSE All-Sky surveys for variable stars, I: Test Fields. *The Astronomical Journal*, 119, 1901-1913.
- Alcock, C., Allsman, R.A., Alves, D.R., Axelrod, T.S., Becker, A.C., Bennett, D.P., Cook, K.H., Freeman, K.C., Geha, M., Griest, K., Lehner, M. J., Marshall, S. L., McNamara, B.J., Minniti, D., Nelson, C., Peterson, B.A., Popowski, P., Pratt, M.R., Quinn, P.J., Rodgers, A.W., Sutherland, W., Templeton, M.R., Vandehel, T., and Welch, D. L., 2000, The MACHO project sample of Galactic bulge high-amplitude delta Scuti stars: Pulsation behavior and stellar properties. *The Astrophysical Journal*, 536, 798-815.
- Breger, M., 2000, delta Scuti stars (Review), *Delta Scuti and Related Stars, Reference Handbook and Proceedings of the 6th Vienna Workshop in Astrophysics. ASP Conference Series*, 210, 3-42.
- Duerbeck, H.W., 1997, True and Possible Contact Binaries in the Hipparcos Catalogue. *Information Bulletin on Variable Stars*, 4513, 1-4.
- Henden, A.A. and Kaitchuck, R.H., 1982, *Astronomical Photometry*. Van Nostrand-Reinhold, New York, USA, 269 p.
- Hog, E., Fabricius, C., Makarov, V.V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwekendiek, P., and Wicenc, A., 2000, The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *Astronomy and Astrophysics*, 355, 27-30.
- ESA, 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*. European Space Agency, SP-1200.
- Hog, E., Kuzmin, A., Bastian, U., Fabricius, C., Kuimov, K., Lindegren, L., Makarov, V.V., and Roeser, S., 1998, *The TYCHO Reference Catalogue*. *Astronomy and Astrophysics*, 335, 65-68.
- Jin, H., Kim, S.-L., Kwon, S.G., Youn, J.H., Lee, C.U., Lee, D.J., and Kim, K.S., 2003, Multiband photometric re-classification of ROTSE-I delta Scuti type stars, *Astronomy and Astrophysics*, 404, 621-629.
- Jin, H., Kim, S.L., Lee, C.U., Lee, D.J., and Kim, K.S., 2004, Reclassification of ROTSE-I delta Scuti stars with multiband photometry and fourier decomposition. *The Astronomical Journal*, 128, 1847-1856.
- Kazarovets, A.V., Samus, N.N., Durlевич, O.V., Frolov, M.S., Antipin, S.V., Kireeva, N.N., and Pastukhova, E.N., 1999, *The 74th Special Name-list of Variable Stars, Information Bulletin on Variable Stars*, 4659, 1-27.
- Kim, S.-L., Lee, C.-U., Koo, J.-R., Kang, Y.B., Lee, J.W., and Mkrтчian, D.E., 2005, Discovery of a short-period pulsating component in the Algol-type eclipsing binary system IV Cas. *Information Bulletin on Variable Stars*, 5669, 1-4.
- Klingenberg, G., Dvorak, S.W., and Robertson, C.W., 2006, Times of maxima for selected delta Scuti stars. *Information Bulletin on Variable Stars*, 5701, 1-4.
- Kreiner, J.M., 2004, Up-to-date linear elements of eclipsing binaries. *Acta Astronomica*, 54, 207-210.
- Kwee, K.K. and van Woerden, H., 1956, A method for computing accurately the epoch of minimum of an eclipsing variable. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 12, 327-329.
- Piersimoni, A.M., Bono, G., and Ripepi, V., 2002, BVI time-series data of the galactic globular cluster NGC 3201, I: RR Lyrae Stars. *The Astronomical Journal*, 124, 1528-1554.
- Pych, W. and Rucinski, S.M., 2004, TU UMi: A Contact Binary in a Triple System. *Information Bulletin on Variable Stars*, 5524, 1-4.
- Pribulla, T. and Rucinski, S.M., 2006, Contact Binaries with Additional Components, I: The Extant Data. *The Astronomical Journal*, 131, 2986-3007.
- Rodríguez, E., López-González, M.J., and López de Coca, P., 2000, A revised catalogue of delta Sct stars. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 144, 469-474.
- Rodríguez, E. and Breger, M., 2001, delta Scuti and related stars: Analysis of the R00 Catalogue. *Astronomy and Astrophysics*, 366, 178-196.
- Rolland, A., Costa, V., Rodríguez, E., Amado, P.J., Garcia-Pelayo, J.M., Lopez de Coca, P., and Olivares, I., 2002, Is TU UMi a W UMa-type system. *Communications in Asteroseismology*, 142, 57-60.
- Rucinski, S.M., Pych, W., Ogloza, W., DeBond, H., Thomson, J.R., Mochacki, S.W., Capobianco, C.C., Conidis, G., and Rogoziecki, P., 2005, Radial velocity studies of close binary stars, X: *The Astronomical Journal*, 130,

767-775.

Samus, N.N., Durlevich, O.V., Zharova, A.V., Kazarovets, E.V., Kireeva, N.N., Pastukhova, E.N., Williams, D.B., and Hazen, M.L., 2006, Electronic version of the third volume of the general catalogue of variable stars with

improved coordinates. *Stromy Letters*, 32, 263-273.

Udalski, A., Olech, A., Szymanski, M., Kaluzny, J., Kubiak, M., Mateo, M., Krzeminski, W., and Stanek, K.Z., 1997, The optical gravitational lensing experiment. *Acta Astronomica*, 47, 1-167

2006년 11월 24일 접수

2006년 12월 8일 수정원고 접수

2006년 12월 8일 채택