

## BL ERIDANI의 측광관측과 광도곡선 분석

한원용<sup>1†</sup>, 임홍서<sup>1</sup>, 이충욱<sup>1</sup>, 윤재혁<sup>1</sup>, 윤요나<sup>1</sup>, 김호일<sup>1</sup>, 문홍규<sup>1</sup>, 변용익<sup>2</sup>, 박선엽<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>한국천문연구원, <sup>2</sup>연세대학교 천문우주학과/연세대학교 천문대

### PHOTOMETRIC OBSERVATIONS AND LIGHT CURVE ANALYSIS OF BL ERIDANI

Wonyong Han<sup>1†</sup>, Hong-Suh Yim<sup>1</sup>, Chung-Uk Lee<sup>1</sup>, Jae-Hyuck Youn<sup>1</sup>,  
Joh-Na Yoon<sup>1</sup>, Ho-Il Kim<sup>1</sup>, Hong-Kyu Moon<sup>1</sup>, Yong-Ik Byun<sup>2</sup>, and Sunyoup Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

<sup>2</sup>Department of Astronomy & University Observatory, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: whan@kasi.re.kr

(Received November 3, 2006; Accepted November 16, 2006)

#### 요 약

한국천문연구원의 NEOPAT 팀과 연세대학교 천문대의 YSTAR 팀이 공동으로 호주 Siding Spring 천문대에 설치한 광시야 자동망원경 2호기를 이용하여 W UMa형 식쌍성 BL Eri의 측광관측을 수행하였다. 이 망원경을 이용하여, 호주와 한국에서 각각 자동관측 모드 및 원격관측 모드로 6일 밤을 관측하여, 새로운 VRI CCD 광도곡선과, 5개의 새로운 극심시각을 얻었다. Wilson & Deviney(1971)의 쌍성모델 2005 버전을 이용하여 우리의 광도곡선을 분석하고, 새로운 광도곡선 해를 구하였다. 이 과정에서 우리가 구한 질량비 0.48은 이전의 연구자들이 구한 값과 차이를 보이고 있다. 한편 이 쌍성계의 접촉상태를 Wilson & Deviney 모델을 적용하여 확인한 결과, 현재 BL Eri는 접촉상태에 있는 것으로 보인다.

#### ABSTRACT

We present light curves of a short period binary system BL Eridani. The light curves were observed with VRI filters by a 50cm wide field robotic telescope at Siding Spring Observatory (SSO), equipped with a 2K CCD camera, which was developed by Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI), and Yonsei University Observatory (YUO). The photometric observations were made on 6 nights by automatic operation mode and remote observation mode at SSO and KASI in Korea, respectively. We obtained new VRI CCD light curves and new 5 times of minima, and analyzed the light curves with the Wilson & Deviney (1971) binary 2005 version and derived the new photometric solutions. The mass ratio  $q = 0.48$  in this study shows different value with earlier investigators. According to the model analysis, it is considered that the BL Eri system is currently undergoing contact stage of the two binary components, rather than near-contact stage.

*Keywords:* eclipsing binaries - BL Eridani - photometry - light curve solution - robotic telescope

<sup>†</sup>corresponding author

## 1. 서 론

최근 한국천문연구원의 NEOPAT 팀과 연세대학교 천문대의 YSTAR 팀이 공동으로 호주에 광시야 자동망원경 2호기를 설치를 진행하였고, 2005년 12월에 대부분의 시스템을 설치 완료하였다. 호주에 설치된 50cm 광시야망원경 시스템은 기본적으로 원격으로 제어하고 스스로 관측을 수행할 수 있는 자동망원경 시스템으로서, 이 망원경의 여러 가지 기능과 성능을 시험하고 실제로 주어진 명령에 따라 관측을 수행하는지를 점검하기 위하여 2005년 12월에 호주 현지에서 자동관측 모드로 2일 밤의 시험관측이 이루어졌고, 이후 한국에서 원격관측 모드에 의한 자동관측 스크립트를 작성하여 관측을 수행하였다.

BL Eri(BD  $-12^{\circ}0818$ ,  $P = 0.^d41691389$ )는 공전주기가 10시간 정도인 쌍성계로서 남반구에서 관측하기에 적당하지만, 아직까지 활발하게 관측연구가 이루어지지 않았다고 할 수 있다. Kern & Bookmyer(1986)가 처음으로 광전관측에 의한 광도곡선을 발표하였고, Yamasaki et al.(1988)는 광전관측과 분광관측으로 광도곡선과 시선속도를 분석 연구하여 질량비를  $q = 0.54$ 로 결정하였다. 또한 주극심과 부극심의 등급차가 0.<sup>m</sup>3인 것에 기인하여 두 별이 공통대기를 갖기 어렵다고 가정하여, 아직 접촉이 이루어지지 않은 근접촉 상태에 있으며, 주계열이 지난 진화 단계에 있다고 설명하였다. 그 후 Liu et al.(1996)은 새로운 관측으로 얻어진 광도곡선을 분석하여, 공통 대류대기(common convective envelope)를 가진 접촉쌍성계로서 광도곡선의 변화 요인은 쌍성계의 반경변화에 의한 가능성을 제시하였고, 항성 흑점의 존재 가능성을 제안하였다. Molik(1998)은 그동안의 관측자료를 수집하여 주기변화 형태를 분석하였다. 이 연구에서는 자동망원경과 CCD를 이용한 자동관측을 수행하여 새로 완성된 광도곡선을 얻고, 이 광도곡선을 WD 모델을 적용하여 분석함으로써, 새로운 광도곡선 해를 계산하고자 한다.

## 2. 관측과 자료처리

### 2.1 자동망원경 시스템

이 관측은 호주 Siding Spring 관측소에 설치된 YSTAR-NEOPAT 2호기(YN2)를 이용하여 수행하였다. YN2는 한국천문연구원과 연세대학교 천문대가 2004년 12월에 이전 설치한 시스템으로서, 2002년부터 남아공 Sutherland에 운영중인 YSTAR-NEOPAT 1호기와 동일한 성능을 갖고 있다. YN2는 Hybrid Cassegrain형 F/1.5의 광시야 광학계에 Apogee사의 Ap10 2K CCD를 연결하여 약 3.5평방도의 하늘을 관측할 수 있으며, 초당 10도 이상의 고속 구동이 가능해 전천탐사관측에 용이하도록 설계되어있다. 또한, YN2는 자동관측이 가능하도록 programming된 7개의 컴퓨터 시스템이 유기적으로 연결되어 있으며, 기상정보 수집장치, 구름 Monitoring 카메라, GPS, Web Monitoring, 보안 카메라 등 관측보조장비를 활용하여 24시간 작동하고 있다.

그림 1은 YN2의 시스템 구성 및 데이터 흐름을 블록 다이어그램 형식으로 나타낸 것이다. 망원경 제어부(Observatory Control Unit)를 담당하는 컴퓨터인 “주 컴퓨터(Master Computer)”는 자동관측을 수행하는 모든 컴퓨터들을 관장하며 또한 인터넷과도 연결되어 있다. 한국에서는 “주컴퓨터”를 통해 관측소의 모든 상태를 점검할 수 있으며 필요한 경우 적절한 제어를 할 수 있다. CCD 제어부로부터 얻어진 데이터는 자료처리부(Data Process Unit)에 의해 처리되고 자료저장장치에 저장된

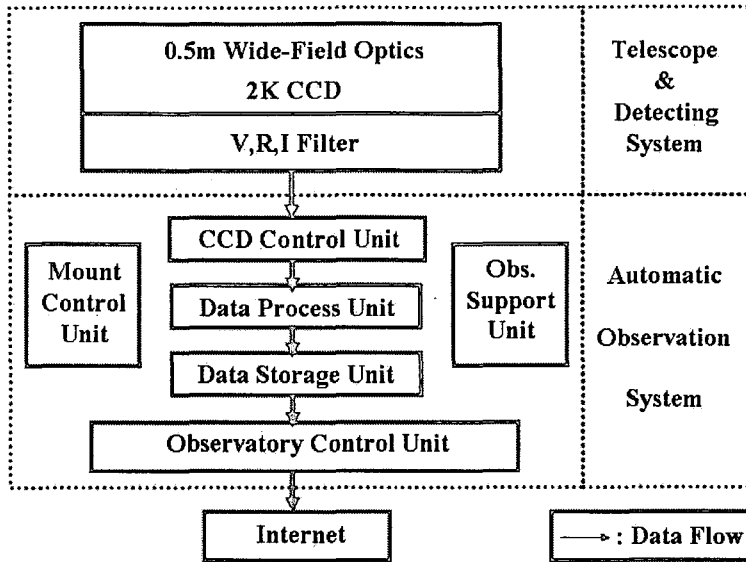


그림 1. YSTAR-NEOPAT 2호기 시스템 구성 및 데이터 흐름도.

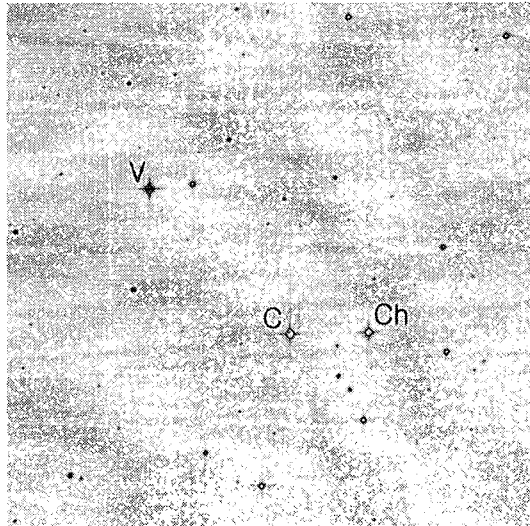


그림 2. BL Eri, 비교성(C), 검토성(Ch)을 표시한 관측 영역(15' × 15').

다. 자료저장장치에 저장된 대부분의 데이터는 현지 관측소 현장 인력의 도움으로 하드 디스크 형태로 한국에 보내지며, 필요한 경우 인터넷을 통해 내려 받을 수 있다.

## 2.2 관측과 광도곡선

2005년 12월부터 2006년 2월 사이에 총 6일 동안 호주 Siding Spring 관측소의 YN2를 사용해서

표 1. BL Eri, 비교성, 검토성의 GSC 번호와 위치 정보.

| Star   | GSC No.     | RA(2000)    | DEC(2000)   | $m_v$ |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------|
| BL Eri | 05315:00027 | 04:11:48.18 | -11:47:26.5 | 11.5  |
| 비교성    | 05315:00263 | 04:11:35.70 | -11:50:40.0 |       |
| 검토성    | 05315:00255 | 04:11:28.70 | -11:50:39.0 |       |

표 2. 필터별 관측 정밀도.

| Filter   | Photometric error |
|----------|-------------------|
| <i>V</i> | $\pm 0.^m015$     |
| <i>R</i> | $\pm 0.^m011$     |
| <i>I</i> | $\pm 0.^m008$     |

표 3. BL Eri의 관측된 필터별 극심시각 및 내부 오차.

| <i>V</i>        | <i>R</i>        | <i>I</i>        | <i>Min.</i> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 2453724.1653(1) | 2453724.1653(2) | 2453724.1651(2) | I           |
| 2453724.9993(2) | 2453724.9993(4) | 2453724.9997(6) | I           |
| 2453773.9867(4) | 2453773.9865(4) | 2453773.9868(3) | II          |
| 2453775.0297(4) | 2453775.0297(3) | 2453775.0292(3) | I           |
| 2453777.9479(3) | 2453777.9476(3) | 2453777.9477(2) | I           |

W UMa형 식쌍성 BL Eri를 *VRI* 필터를 사용해서 측광 관측하였다. 데이터 처리는 일반적으로 사용하는 IRAF 패키지(Massey & Davis 1992; A User's Guide to Stellar CCD photometry)의 구경측광 방법(APHOT)을 사용하였다. 관측영역에 대한 사진과 함께 비교성과 검토성을 그림 2에 보였고, 각각의 좌표와 정보를 표 1에 정리하였다.

총 6일의 관측일 중에서 2일은 자동관측 모드로 관측을 하였고, 4일은 한국에서 원격으로 관측하였다. 자동관측 모드는 관측 대상인 BL Eri에 대해서 관측을 수행하는데, 관측자의 개입이 없이 스크립트로 작성된 자동관측 프로그램에 의해서 네트워크로 연결된 총 7대의 컴퓨터들이 각각의 정보(기상, 돔, 망원경, 시간, 컴퓨터 그리고 하늘 상태)를 공유하여 자동으로 관측을 진행하였다. 그리고 습도, 풍속, 하늘의 구름 유무 등등에 의해서 이미 설정된 수치를 기준으로 관측의 수행여부를 자동적으로 판단하고 돔을 여닫으면서 관측이 진행되었다. 국내에서의 원격관측은 관측자가 자동관측 시스템에 접속하여 시스템 상황을 관측자가 직접 원격으로 점검하면서 수동으로 자동관측수행 명령을 내려서 관측을 수행하였다. 자동관측 모드에서는 데이터 처리(측광)까지 자동으로 처리가 되지만, 이번 관측에서는 전체 시스템 및 관측된 영상의 점검과 테스트를 위해서 전처리와 측광은 따로 처리하였다.

*VRI* 필터로 각각 203, 201 그리고 200점의 관측점을 얻었고, 표 2에 비교성과 검토성 등급차이의 표준편차로 계산한 필터별 관측 정밀도를 정리하였다. 관측된 영상에서 BL Eri와 비교성의 등급차이로  $\Delta mag$ 를 계산하였다. 극심은 모두 5개가 관측되었고, 이중 주극심은 4개, 부극심은 1개가 관측되었다. Kwee & van Woerden(1956) 방법을 사용해서 사용한 각 필터 별로 얻어진 극심시각을 표

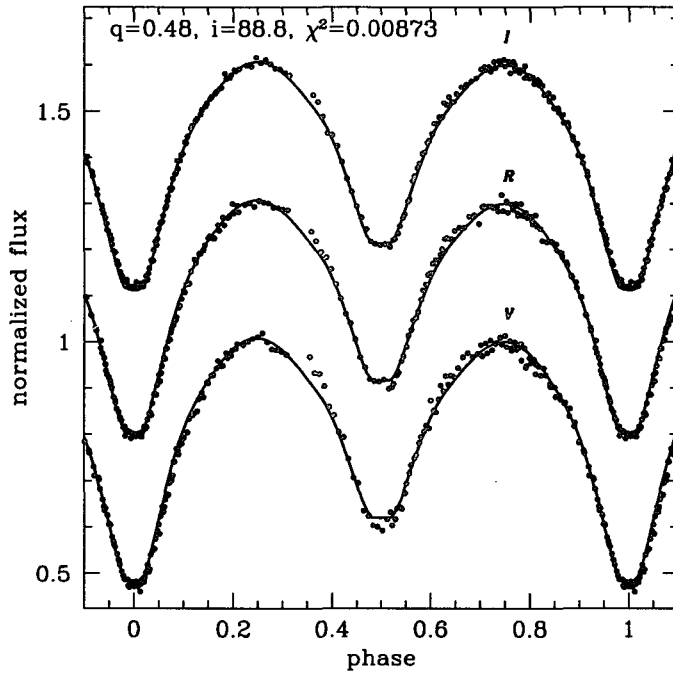


그림 3. BL Eri의 VRI 광도곡선. 실선은 표 4의 인자들을 이용하여 만든 이론적인 광도곡선이다.

3에 보였다. 그리고 이렇게 얻어진 극심시각들을 사용해서 새로운 광도요소

$$\text{Min } I = \text{HJD}2453723.74835(\pm 21) + 0^{\text{d}}.4169139(\pm 32) \cdot E \quad (1)$$

를 결정하였다. 그림 3은 식 (1)의 광도요소를 사용해서 작성한 BL Eri의 광도곡선이다. V 필터에서 주극심과 부극심의 차이는 약  $0^{\text{m}}.25$ 이고, 최대 밝기와 주극심의 차이는 약  $0^{\text{m}}.5$ 이다. 식이 없는 위상이 0.25와 0.75인 지점에서의 밝기는 관측오차 범위 안에서 주목할 만한 차이가 없었기 때문에 Liu et al.(1996)이 지적한 V 필터에서 최대 밝기의 등급 차이가 약  $0^{\text{m}}.038$ 을 보인다고 하는 것에 대해서는 확인할 수 없었다.

### 3. 광도곡선 분석

BL Eri의 측광 해를 산출하기 위하여 우리의 VRI 광도곡선을 사용하였다. 광도곡선의 분석에는 Wilson & Devinney(1971)의 쌍성모델 2005 버전(이후 WD)을 사용하고, Yamasaki et al.(1988)과 Liu et al.(1996) 등에 의하여 각각 제시되었던 근접축 및 접축쌍성의 상태를 확인하기 위하여 WD 모델에서 모드 3과 모드 4 및 모드 5 등을 적용하여, 각각의 경우에 대한 인자들을 구하여 광도곡선을 분석하였다.

이 연구에서는 질량과 반경이 크고 온도가 높은 성분별을 주성, 그렇지 않은 경우를 반성으로 정의하여 사용하고, 각 인자들의 표현을 돕기 위하여 첨자 1과 2를 이용하여 각각 주성과 반성으로 나타내었다. 쌍성모델의 인자 중에서 주성의 온도( $T_1$ )를 Yamasaki et al.(1988)의 분광형과 색지

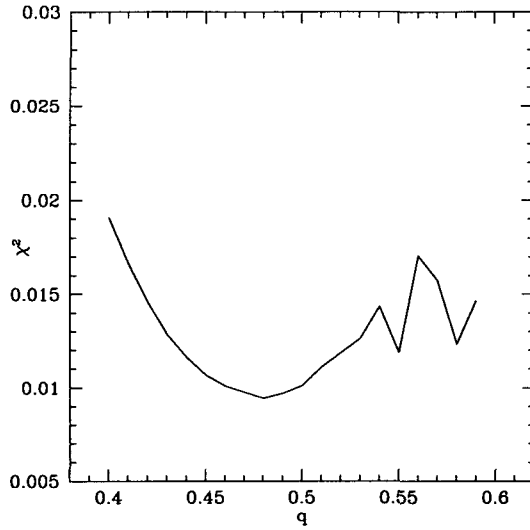


그림 4. 질량비 값 0.4에서 0.6에 이르는 구간에 걸쳐  $q$ -search 방법을 이용하여 0.01씩 증가시키면서 반복 계산하여 질량비를 결정한 그림.

수  $(B - V)_0 = 0.63$ 을 이용하고, Harmanec(1988)과 Flower(1996)의 표로 결정한 온도의 평균값인 6000K로 사용하였다. 반사율( $A_1 = A_2$ )은 0.5(Rucinski 1969), 중력감광지수( $g_1 = g_2$ )는 0.32(Lucy 1967), 주연감광계수( $x_1, x_2, y_1, y_2$ )는 Van Hamme(1993)가 제시한 비선형 로그함수법칙에 의한 이론적인 값을 사용하여 고정시켜 사용하였다.

그 외의 다른 인자들( $i, T_2, L_1$ )은 조정인자로 사용하여 관측한 광도곡선을 가장 잘 대표하는 인자들을 찾고, 각각의 경우에 대한 이론적인 광도곡선과 관측된 광도곡선과의 간차를 나타내는  $\chi^2$ 값이 최소가 될 때를 찾아서 광도곡선 해를 결정하였다. 각각의 모드에서 해를 구한 결과, 접촉쌍성으로 가정된 경우인 모드 3을 사용할 때에만 물리적으로 의미있는 해를 구할 수 있었다. 따라서 현재, 이 쌍성계는 Yamasaki et al.(1988)이 제시한 근접축상태에 있다고 하기보다는, Liu et al.(1996)이 제시한 접촉상태에 있다고 생각하는 것이 적합하다고 판단되었다.

이 쌍성계의 시선속도는 Yamasaki et al.(1988)에 의하여 관측된 바 있으나, 부극심을 전후 하여 전체위상의 40% 밖에 채우지 못한 시선속도 곡선으로는 BL Eri의 질량비를 구하기에 충분하지 못하여, 그림 4와 같이  $q$ -search 방법을 이용하여 질량비의 초기값을 산출하였다. Yamasaki et al.(1988)는 분광관측에 의하여 질량비 0.54를 제시하였으나, 분광관측의 위상 0.25와 0.75에서의 관측자료가 없고, 위상 0.3에서 0.7 사이의 자료만으로 분광궤도요소를 구하였기 때문에, 질량비로 제시한 값을 재검증할 필요가 있다고 판단되었다. 따라서 이 연구에서는 질량비를 0.4에서 0.6까지 0.01씩 증가시키며 주어진 질량비에 대하여  $\chi^2$ 값을 반복적으로 계산하여 가장 적은  $\chi^2$ 값을 가질 때의 질량비로서 그림 4에서 보인 바와 같이 0.48을 결정하였다. 한편, 이 그림에서 보듯이 Liu et al.(1996)과 Yamasaki et al.(1988) 등이 사용한 질량비 0.54는 local minimum에 의한 효과로 여겨진다. 표 4에 우리가 반복 최소사승법을 통하여 최종적으로 구한 BL Eri의 측광학적 해를 정리하였고, 그림 5에

표 4. BL Eri의 측광학적 해.

| Parameter        | Primary          | Secondary |
|------------------|------------------|-----------|
| $T_0$ (HJD)      | 2453723.7483(21) |           |
| $P$ (d)          | 0.4169139(32)    |           |
| $q$              | 0.482(3)         |           |
| $i$              | 88.8(2)          |           |
| $\Omega$         | 2.781(6)         |           |
| $T$              | 6000             | 5550(10)  |
| $X$              | 0.643            | 0.645     |
| $Y$              | 0.222            | 0.194     |
| $x_V$            | 0.742            | 0.776     |
| $x_R$            | 0.650            | 0.685     |
| $x_I$            | 0.587            | 0.622     |
| $y_V$            | 0.255            | 0.204     |
| $y_R$            | 0.269            | 0.233     |
| $y_I$            | 0.265            | 0.235     |
| $L/(L_1 + L_2)V$ | 0.736(2)         | 0.264(2)  |
| $L/(L_1 + L_2)R$ | 0.725(2)         | 0.275(2)  |
| $L/(L_1 + L_2)I$ | 0.716(2)         | 0.284(2)  |
| $r_{pole}$       | 0.428(1)         | 0.308(1)  |
| $r_{side}$       | 0.457(1)         | 0.323(1)  |
| $r_{back}$       | 0.490(2)         | 0.363(3)  |

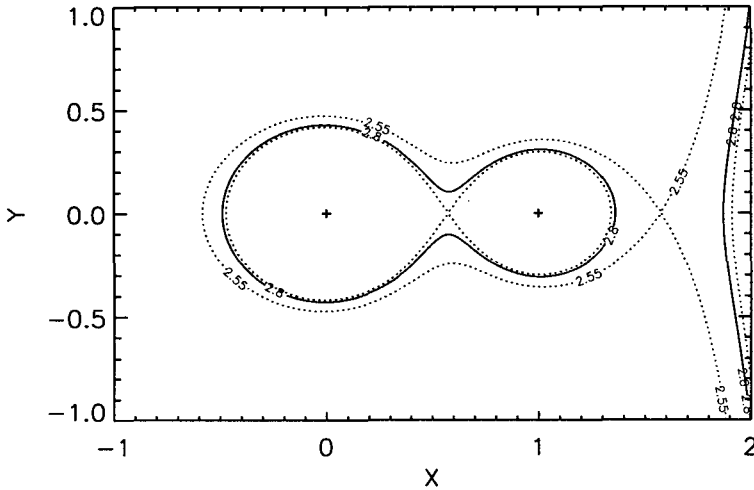


그림 5. BL Eri의 로슈 기하 모형.

이 쌍성계의 로슈 모형을 제시하였다.

한편, 이 연구의  $VRI$  광도곡선은 그림 3에서 보는 바와 같이, 주극심에서는 비교적 이론적인 광도곡선과 잘 일치하고 있는 반면, 위상 0.5 근처의 부극심에서는 양쪽 식의 날개 부분에서 이론적인 곡선과 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 원인으로 이 쌍성계는 Liu et al.(1996)이 제시한 바와 같이 흑점과 같은 광구면에서의 활발한 표면 활동을 생각할 수 있다. 그러나, 우리가 관측한 광도곡선에서

는 위상 0.35 부근이 대기소광에 의한 영향이 크게 작용한 관측의 시작과 끝부분에 얻어진 자료라는 점을 고려하면 정밀한 분석을 하기에는 다소 어려운 점이 있다. 따라서 이 쌍성계의 보다 정확한 물리량을 연구하기 위하여는 측광관측을 보완하고, 새로운 정밀한 분광관측 자료가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

지난 몇 년 동안 한국천문연구원과 연세대학교 천문대가 공동으로 호주에 설치한 광시야망원경을 활용하여 남반구에서 관측하기에 적당한 식쌍성 BL Eridani를 관측하였다. 이 관측은 망원경의 자동관측 모드로 호주 현지에서 2일 밤, 그리고 한국에서 원격자동 모드로 4일 밤을 관측하여 BL Eridani의 새로운 VRI 광도곡선을 얻었다. 관측한 광도곡선을 Wilson & Devinney(1971)의 쌍성모델 2005 버전의 접촉쌍성 모드 3, 모드 4, 모드 5를 모두 사용하여 분석한 결과, 모드 3인 경우에만 물리적인 의미가 있는 해를 구할 수 있었다. 따라서 이 쌍성계는 현재 접촉 상태에 있는 것으로 여겨진다. 이 과정에서 새로운 질량비( $q$ ) 값으로 0.48을 구하였는데, 이 값은 이전의 연구자(Yamasaki et al. 1988, Liu et al. 1996)들이 제시한 것과 차이를 보이고 있으며, 이러한 차이는,  $q$ -search 방법을 이용하여 계산한 결과, local minimum에 의한 효과로 여겨진다. 최종적으로 구한 BL Eri의 광도곡선 해를 표 4에 정리하였다.

이 연구는 50cm 광시야 자동망원경이 호주에 설치된 후, 망원경시스템의 기능과 성능을 검증하기 위한 시험관측으로서, 최초로 자동관측 모드에 의한 변광성 관측을 시도하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 이 연구에서 얻어진 결과로 미루어 보아, 앞으로 남반구의 변광 천체들에 대한 활발한 관측 연구가 이루어 질 수 있을 것이라고 예상할 수 있으며, 이 자동망원경은 특히 국내에서 남반구 천체에 대한 관측연구에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

**감사의 글:** 이 관측연구를 위하여 호주에 자동망원경 시스템 설치에 참여 한 많은 연구원들과 대학원생, 그리고 Siding Spring Observatory 현지 staff들에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Flower, P. J. 1996, ApJ, 469, 355  
 Harmanec, P. 1988, BAICz, 39, 329  
 Kern, J. R. & Bookmyer B. B. 1986, IBVS, No.2850  
 Kwee, K. K. & van Woerden, H. 1956, BAN, 12, 327  
 Liu, Q., Soonthornthum, B., Yang, Y., Gu, S., Niparugs, S., Aniwat Sooksawat, M. L., Wang, B., & Naksata, M. 1996, A&AS, 118, 453  
 Lucy, L. B. 1967, Zeitschrift für Astrophysik, 65, 89  
 Molik, P. 1998, IBVS, No.4577  
 Rucinski, S. M. 1969, A&A, 19, 245  
 Van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 209  
 Wilson, R. E. & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605  
 Yamasaki, A., Jugaku, J., & Seki, M. 1988, AJ, 95, 894