

삼중성 λ TAURI의 광도곡선 분석과 시선속도의 분석¹

이용삼 · 권수진
충북대학교 천문우주학과

PHOTOMETRIC AND RADIAL VELOCITY CURVES ANALYSES OF THE TRIPLE SYSTEM λ TAURI

Yong-Sam Lee and Su-Jin Kwon

Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University
e-mail: leeys@astro.chungbuk.ac.kr, kwonsj@astro.chungbuk.ac.kr

(Received April 30, 1995; Accepted May 9, 1995)

요 약

충북대학교 천체관측소에서 1990년 12월부터 1994년 1월까지 총 31일 밤 동안 삼중성 λ Tau의 *UBVRI* 광전측광 관측을 수행하여 각 필터별로 586점씩 총 2930점의 관측점으로 광도곡선을 완성하였다. 제 1식심의 광도곡선으로부터 1개의 제 1식심시각을 구하고 새로운 광도요소를 얻었다. 분산이 심한 *U* 광도곡선을 제외한 우리의 *BVRI* 광도곡선과 Grant(1959)의 *BV* 광도곡선을 혼합하여 Wilson-Devinney 계산법으로 λ Tau의 측광학적 해를 구한 후, 이 광도곡선과 Fekel and Tomkin (1982)이 수집한 시선속도 곡선을 동시에 만족하는 λ Tau의 시선속도 곡선의 해를 구하고, 이 값으로부터 이 쌍성계의 절대량을 산출하였다. 주성의 반경과 질량은 각각 $8.3R_{\odot}$ 과 $8.1m_{\odot}$ 이고 반성의 반경과 질량은 각각 $6.5R_{\odot}$ 과 $2.1m_{\odot}$ 이다.

ABSTRACT

New *UBVRI* observations of triple star λ Tau were made at Chungbuk National University Observatory for 31 nights from Dec. 1990 to Jan. 1994. A total of 2930 photometric observations were obtained with 586 points for each filters, and *BVRI* light curves were constructed. From the primary light curves, the one time of primary minimum light was determined with a new light element. The photometric solutions of light curves for λ Tau were calculated by using Wilson-Devinney method with our *BVRI* light curves and the *BV* light curves

¹이 논문은 1993년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

obtained by Grant (1959). We determined spectroscopic solutions that were satisfied with these two light curves and the radial velocity curves had been collected by Fekel and Tomkin (1982). From these values, absolute dimensions for this system were estimated. The radius and mass for the primary star are turned out to be $8.3R_{\odot}$ and $8.1m_{\odot}$, and $6.5R_{\odot}$ and $2.1m_{\odot}$ for the secondary star, respectively.

1. 서 론

근접쌍성 λ Tau ($V; 3^m7, Sp.; B3, P; 3^d953$)는 이미 1848년에 세번째의 식변광성(식쌍성)으로 발견되어 잘 알려진 밝은 별이었음에도 오늘날까지 전 위상의 광도곡선은 완성되지 못하였다. 이에 반해 분광 관측은 현재 많은 연구가 진행되고 있는 중이다.

Schlesinger (1914)는 λ Tau 쌍성계의 시선속도 곡선 상에서 관측점과의 편차가 주기적으로 변하는 것을 보고 광학적으로는 분리해 볼 수 없는 제 3체가 존재함을 알게 되었다. 그는 처음으로 주성의 분광학적 궤도를 결정했고, 또 4일의 주기 (P_1)를 갖는 속도곡선이 제 3체와의 질량 중심을 34.6일의 주기 (P_2)로 공전함을 밝혔다. 그 후 McLaughlin (1937)과 Struve (1946)와 Ebbighausen and Struve (1956)는 3체에 대한 궤도 주기를 계속 수정 결정하였다. 3체를 구성하고 있는 이 쌍성계는 정상적인 Algol형의 반분리형(semi-detached system) 쌍성으로 주기가 3.95일이고 제 3체의 궤도 주기는 33일로 알려져 있다 (Bailyn and Eggleton 1983).

λ Tau의 측광에 관한 연구는 Grant (1959)의 광전관측 자료를 이용해서 계속되었다. 그의 광도곡선은 유일한 UBV 광전관측이지만 전 위상이 완성되지 못하였고 식 외 부분(out of eclipse)의 광도 변화가 불규칙적인 상태이다. λ Tau의 쌍성계는 공전 주기(3^d953)가 약 4일의 정수배가 되므로 한 계절에 광도곡선을 완성하기가 어렵기 때문에 과거의 관측 자료가 적고 이 쌍성계를 연구하기 위해서는 많은 광전측광 관측이 요구되고 있다. 지금까지 이 쌍성계의 측광학적 해를 구한 것은 Grant (1959)의 광전측광 자료를 이용하여 Hutchings and Hill (1971b)와 Cester *et al.* (1978)이 계산한 것이 있다.

그 후 Fekel and Tomkin (1982)은 이 쌍성계의 주성과 반성에 대한 새로운 결과를 얻었다. 이론상으로 H-R도 상에서의 별의 위치와 그들의 진화 상태에 대해서는 Hutchings and Hill (1971a)에서 다루었으며, Hutchings and Hill (1971b)의 광도곡선의 분석은 컴퓨터로 λ Tau의 이론적인 광도 곡선을 그린 후 물리적인 요소를 얻은 것이다. 우리는 λ Tau의 $UBVRI$ 측광관측을 수행하여 광도곡선을 완성하면 이 별의 측광학적 분석과 식심시각을 결정하여 주기 변화의 여부를 살펴본 후, Grant의 측광관측 자료를 포함하여 새로운 광도곡선의 해를 구하고자 한다. 아울러 Ebbighausen and Struve (1956)가 수집한 시선속도 곡선의 분광 자료와 측광 자료를 동시에 만족시키는 계산법으로 쌍성계의 절대량을 구하려 한다.

2. 광전관측과 광도곡선

λ Tau의 광도곡선을 얻기위해 광전측광을 수행하였다. 관측에 사용한 기기들은 충북대학교 천문우주학과 의 20cm와 35cm 망원경과 미국의 Optec사가 개발한 SSP-3A 광전측광기이다. 관측 기간은 1990년 12월부터 1991년 2월까지 총 26일 밤과, 1994년 1월부터 2월까지 5일 밤이며, 관측한 관측점 수는 UBVR I 각각 586점으로 총 2930점이다. 측광 관측에 사용한 λ Tau의 비교성(comparison star)과 검토행(check star)은 Grant (1959)가 사용한 것으로서 비교성은 HR 1194 ($V; 6^m30, sp.; B9II - III B3$)이고 검토행은 HR 1284 ($V; 5^m99, Sp.; B9.5V$)이다. 이 별들의 등급(V)과 분광형(sp.)은 Bright Star Catalogue (Hoffleit 1964)에 제시된 값이다.

표 1. 비교성, 검토행, λ Tau의 표준화된 등급과 색지수.

별	V	$B-V$	$U-B$	$V-R$	$V-I$	sp.*
비교성 (HR 1194)	+5.61	-0.06	-0.72	+0.12	+0.08	B3V
검토행 (HR 1284)	+5.20	-0.03	+0.17	+0.17	+0.23	B9II-III
λ Tau (HR 1239)	ΔV	$\Delta(B-V)$	$\Delta(U-B)$	$\Delta(V-R)$	$\Delta(V-I)$	sp.*
Max.	-2.92	-0.03	-0.15	-0.08	-0.10	B9.5V
Min. I	-2.39	-0.03	-0.03	-0.05	-0.06	
Min. II	-2.78	-0.05	-0.10	-0.05	-0.09	

* Bright Star Catalogue (Hoffleit 1964).

모든 관측점은 오차를 최소화하기 위해 매일의 밝기-시간 곡선을 그려서 관측 자료를 검토한 후, 대기감광 계수를 결정하여 비교성과 검토행을 대기권 밖의 등급으로 보정하였다. 우리가 관측한 기계 등급의 오차($p.e.$)는 각 필터에 따라 비교성은 각각 $\pm 0.2(U)$, $\pm 0.03(B)$, $\pm 0.04(V)$, $\pm 0.04(R)$, $\pm 0.03(I)$ 등급이고, 검토행은 각각 $\pm 0.01(U)$, $\pm 0.02(B)$, $\pm 0.01(V)$, $\pm 0.02(R)$, $\pm 0.02(I)$ 등급이다. 이 값을 보면 비교성의 U 관측값의 오차가 다른 파장보다 크고 비교성의 오차가 검토행보다 크다. 우리가 사용한 비교성에 미세한 변광이 있는지도 모른다. 수 년간의 관측 기간동안 교체되거나 변경된 망원경, 필터, 측정 기기 등의 복합적인 특성과 그 날의 대기 상태 때문에 우리의 기계등급은 표준화 작업을 거쳐 표준 측광계 (standard system)로 변환하여 표준화된 관측 자료들의 등급과 색지수를 구하였다. 그림 1은 우리가 관측한 λ Tau의 등급차 (변광성-비교성)인 ΔB , ΔV , ΔR , ΔI 의 광도곡선과 $\Delta(B-V)$, $\Delta(V-R)$, $\Delta(V-I)$ 의 색지수도이다. 여기서 ΔU 는 다른 필터로 관측한 광도곡선보다 심한 분산을 보였으므로 제외하였다. 우리의 λ Tau 광도곡선은 제 1식심이 시작과 식의 끝부분, 그리고 제 2식심 부분의 관측이 부족한 상태이며, 위상 0^m05 부근에서는 관측 오차로 보이는 심한 분산이 있다. 우리가 관측한 λ Tau와 비교성, 검토행의 표준화 등급과 색지수는 표 1과 같다.

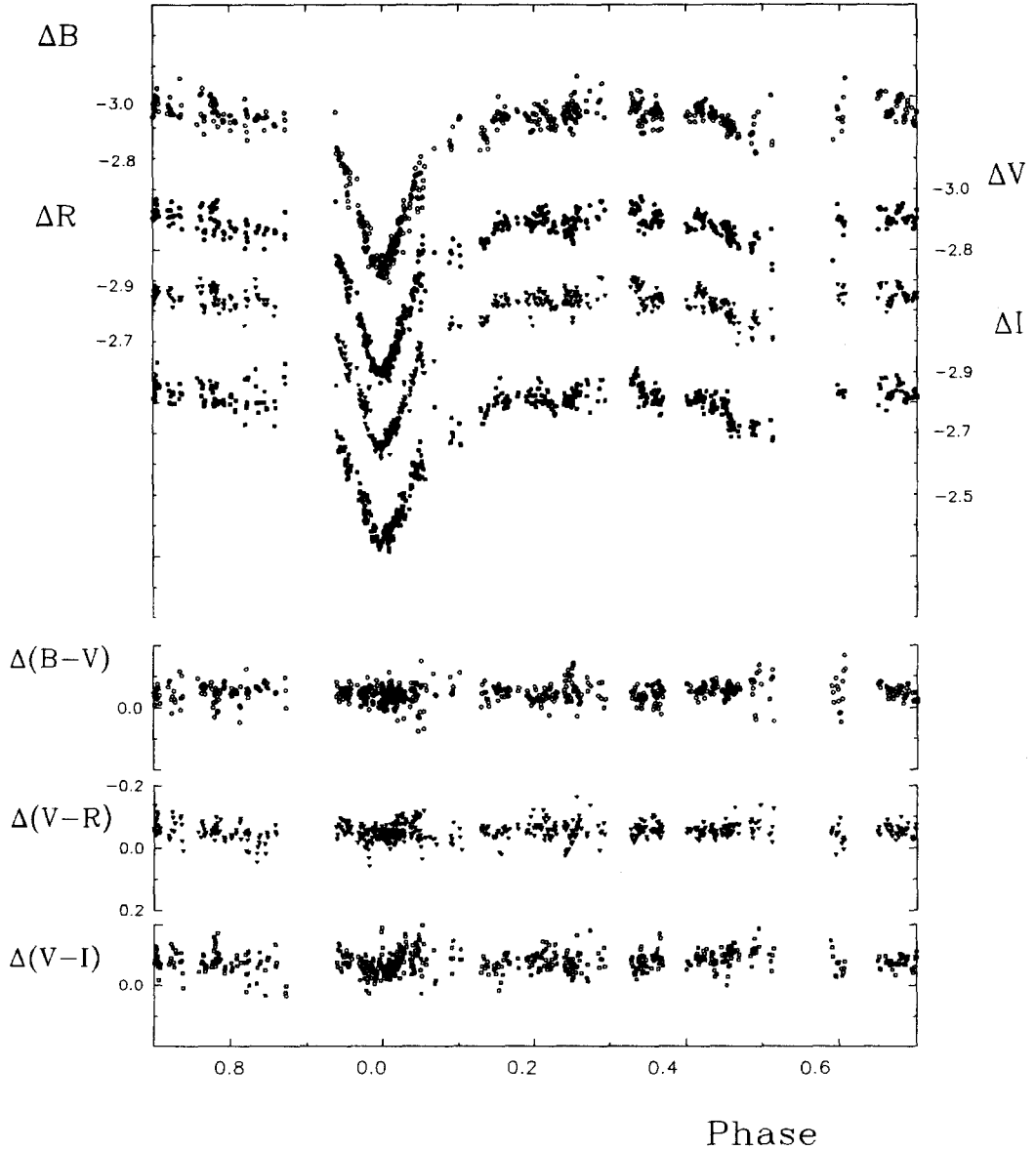


그림 1. λ Tau의 $\Delta B, \Delta V, \Delta R, \Delta I$ 의 광도곡선과 $\Delta(B - V), \Delta(V - R), \Delta(V - I)$ 의 색지수도.

3. 식심시각 결정과 새로운 광도요소 결정

λ Tau의 광도요소는 Stebbins (1920)가 처음 발표한 이래 Ebbighausen and Struve (1956), Grant (1959), Casini *et al.* (1968), Soderhjelm (1975), Mallama *et al.* (1977), Fekel and Tomkin (1982)이 발표하였다. 식심시각은 1930년대 안시 관측으로 얻은 것과 그 후 몇 개의 광전 관측으로 얻은 것이 있다. 현재까지 알려진 식심시각은 대체로 안시 관측과 사진 관측으로 얻은 것이고 정밀한 광전측광 자료는 단기간의 것이고 또 그 수도 작아서 주기 변화를 확인할 수 없는 상태이다. 공전 주기의 변화가 있다면, 그 변화의 원인은 이 쌍성계가 반분리 쌍성계(semi-detached system)로 알려져 있기 때문에 진화 과정에서 물질의 이동에 기인한 것으로 보고, 이 쌍성계의 진화 단계를 확인할 수 있을 것이다. Baily and Eggleton (1983)은 3체내에서 이 쌍성계의 진화 과정에서 발생하는 질량 이동 현상으로 인하여 질량비의 변화 때문에 약 50% 정도의 각운동량의 손실이 생긴다고 하였다.

표 2. 우리가 얻은 각 filter별 식심시각.

filter	식심시각
<i>U</i>	JD _⊙ 2448295.9976
<i>B</i>	JD _⊙ 2448296.0043
<i>V</i>	JD _⊙ 2448295.9989
<i>R</i>	JD _⊙ 2448296.0004
<i>I</i>	JD _⊙ 2448296.0027

우리 연구에서 주기(P_1)를 결정하기 위한 제 1식심 전후의 관측은 두 번 있었다. 그 중, 한 번은 식 부분의 자료가 적어 식심시각을 결정하기 어려웠다. 우리가 얻은 1회의 식심시각은 각 필터로 관측한 제 1식심 전후의 광도곡선을 가지고 얻은 값이며, 그 값을 표 2에 작성하였다. 위의 값을 평균하고, 오차(*p.e.*)를 구한 결과 JD_⊙ 2448296.0008 ± 0.0018 의 값을 얻었다. 문헌에서 수집한 λ Tau의 광도요소는 표 3에 정리하였다. 새로운 광도요소의 결정과 공전 주기 변화의 여부 등을 살펴보기 위해서 과거의 광전측광 관측으로 얻은 식심시각 자료를 수집하여 제 1식심시각의 관측값(Observed Min. I)과 계산값 (Calculated Min. I)과의 차인 *O-C*를 계산하여 식심시각의 *O-C*도를 만들고 새로운 광도요소

$$\begin{aligned} \text{MinI} = & \text{JD}_{\odot} 2428100^d 376540 + 3^d 952950659E \\ & \pm 0.000073 \pm 0.000000025 \end{aligned}$$

를 얻었다. 우리의 광도요소를 가지고 식심시각의 *O-C*도를 그림 2와 같이 그렸다. 그림에서 횡축은 공전 횡수이고, 종축의 단위는 day이다. 원으로 표시한 것은 광전측광 관측자료이며 작은 점으로 표시된 것은 육안관측이고, 네모(\square)로 표시된 점은 우리가 관측한 자료이다.

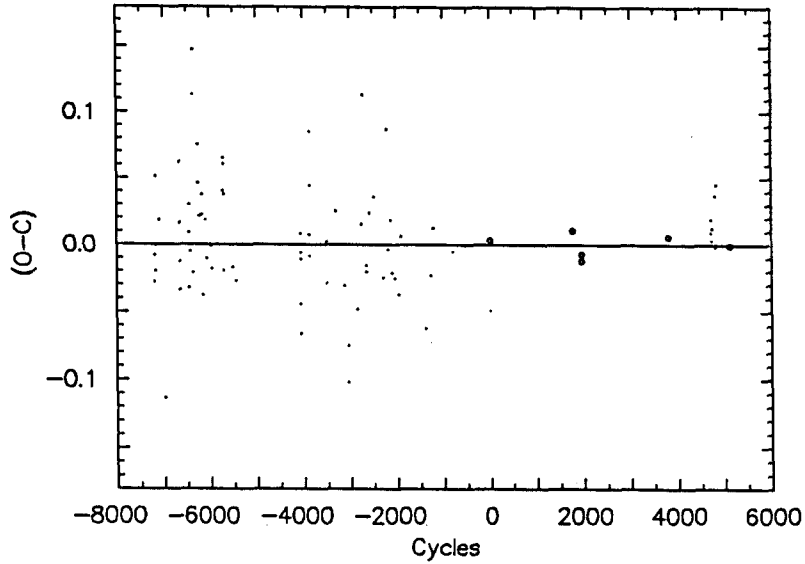


그림 2. λ Tau의 O-C도. 그림에서 작은 점은 육안 관측점이고, 큰 점은 광전 관측점이며, \diamond 은 우리의 관측점이다.

표 3. λ Tau의 광도요소.

발표자	기산점 (Min. I)	주기 (day)
Stebbins (1920)	JD $_{\odot}$ 2421506.8500	
Ebbighausen and Struve (1956)	JD $_{\odot}$ 2421506.8500	3.9529520
Grant (1959)	JD $_{\odot}$ 2435089.2040	3.9529520
Casini <i>et al.</i> (1968)	JD $_{\odot}$ 2439137.6230	3.9540000
Soderhjelm (1975)	JD $_{\odot}$ 2399607.5080	3.9529510
Mallama <i>et al.</i> (1977)	V: JD $_{\odot}$ 2443113.6874 B: JD $_{\odot}$ 2443113.6909	
Tomkin and Fekel (1982)	JD $_{\odot}$ 2435089.2040	3.9529552

그림에서 정밀도가 높은 광전측광 자료가 너무 적기 때문에 현재까지의 자료를 가지고는 공전 주기 변화 양상을 확인할 수가 없으므로, 앞으로 더 많은 광전측광에 의한 제 1식심 관측값이 요구된다.

4. 광도곡선과 시선속도곡선의 분석

λ Tau 광도곡선의 측광학적 해를 구하기 위하여 우리의 ΔB , ΔV , ΔR , ΔI 관측값과 Grant (1959)의 ΔB , ΔV 관측값을 가지고 광도곡선 (그림3)을 만들고 종래의 λ Tau의 광도곡선의 분석 방법과는 다른 방법인 미분보정법의 Wilson and Devinney의 1991 프로그램을 사용하여 분석하였다. 계산에 사용하기 위하여 ΔB , ΔV , ΔR , ΔI 의 관측점들을 가지고 각각 55개의 대표점을 만들었고 이를 표 4에 제시하였다. 표 4의 $L(B)$, $L(V)$, $L(R)$, $L(I)$ 는 각 파장의 intensity이고, n 은 각각의 대표점을 만든 파장별 관측점 수로서 이 수를 weight로 사용하였다.

WD 분석 과정에서 광도곡선의 해를 발표한 Grant (1959)와 Hutching and Hill (1971b), Cester *et al.* (1978), Levato (1974)와 같이 반분리형 쌍성계(semidetached binary system)를 적용하여 광도곡선의 측광학적 해를 구하였다. 초기 입력 자료는 Hutchings and Hill (1971a, b), Cester *et al.* (1978), Fekel and Tomkin (1982), Baily and Eggleton (1983)의 자료를 검토하여 사용하였다. 최종 계산에 앞서 초기에는 ΔV 의 광도곡선을 가지고 LC(Light Curve) 프로그램으로 계산하여 관측값과 잘맞는 인자들을 결정하면서 이 인자들을 가지고 ΔB , ΔV , ΔR , ΔI 광도곡선을 동시에 사용하여 DC(Differential correction) 프로그램으로 계산하였다. 우선, 고정인자로 사용한 중력감광계수와 복사반사계수는 $g_1 = g_2 = 1.0$, $A_1 = A_2 = 1.0$ 을 적용하였고, 주변감광계수는 $X_1(I)=0.77$, $X_2(I)=0.65$, $X_1(R)=0.89$, $X_2(R)=0.78$, $X_1(V)=0.77$, $X_2(V)=0.65$, $X_1(B)=0.89$, $X_2(B)=0.78$ 이며 $\Omega_2=2.45$ 이다. i , T_1 인자들을 고정하여 가능한 4개의 광도곡선을 동시에 가장 잘 만족하도록 하였다. 계산 결과를 표 5에 우리의 해와 수집한 해를 비교하여 수록하였다. 우리의 광도곡선의 해를 가지고 계산한 이론적인 광도곡선을 그림 3에 관측점과 비교하여 실선으로 표시하였다. 그림에서 보면, 관측한 제 1식의 형태가 비대칭적이므로 제 1식만이 시작되는 곳의 관측값이 이 부분의 계산값과 잘 일치하지 못한 상태이며 아울러 제 2식심 부근도 다소 일치하지 못함을 볼 수 있다. 이 그림은 $BVRI$ 4개의 광도곡선을 동시에 가장 잘 만족하도록 궤도요소를 조정하였을 때 얻은 최종 결과이다.

λ Tau의 절대량을 산출하기 위해서 우리의 $BVRI$ 광도곡선과 시선속도 곡선을 동시에 사용하는 WD 분석방법으로 분석하였다. 시선속도 곡선은 이미 발표된 자료들을 수집하여 사용하였다. 그동안 발표된 자료는 Schlesinger(1914)의 최초의 분광 궤도 발표와 1935년에서 1939년에 걸쳐 DAO(Dominion Astrophysical Observatory)에서 관측한 것, 그리고 1952년에서 1955년까지 Wilson 천문대에서 관측한 350여 개 분광 사진의 분석 자료가 있다. Fekel and Tomkin (1982)이 이 자료를 수집하여 시선속도 곡선상에서 제 3체 운동으로 인해 주기적인 오차를 보정하여 만든 시선속도 값을 이 연구에 사용하였다. 이 값으로 그린 시선속도 곡선은 그림 4에 점으로 표시하였다. 이 시선속도와 우리의 광도곡선의 자료를 혼합한 입력 자료를 가지고 DC 프로그램을 실행하여 이 쌍성계의 절대량을 구하였다. 이 과정은 우리가 얻은 측광 분석의 결과 등의 인자를 고정한 후, 수집한 분광 궤도 요소의 자료를 초기값으로 하였다. 동시 궤도 계산을 할 경우 수정되는 인자들의 수는 앞서 광도곡선만 계산한 경우보다 장반경 a 와 질량 중심의 시선속도 V_r 이 포함된다. 그러므로, 수정인자들은 a , e , V_0 , q 이다. 이 결과도 표 5에 수록하였다.

표 4. λ Tau의 l_B, l_V, l_R, l_I 의 대표 관측점.

No.	Phase	n	l_B	l_V	l_R	l_I	No.	Phase	n	l_B	l_V	l_R	l_I
1	0.0038	21	0.6182	0.5719	0.6343	0.5939	31	0.4578	18	0.9389	0.8453	0.9223	0.9034
2	0.0107	27	0.6443	0.5846	0.6481	0.6512	32	0.4670	4	0.9139	0.8219	0.8793	0.8817
3	0.0173	24	0.6600	0.6107	0.6660	0.6744	33	0.4866	7	0.9202	0.8279	0.8995	0.8833
4	0.0241	15	0.6933	0.6362	0.6911	0.6917	34	0.4923	3	0.9598	0.8538	0.9189	0.9028
5	0.0295	6	0.7331	0.6732	0.7274	0.7017	35	0.5117	3	0.8968	0.7758	0.8585	0.8548
6	0.0383	12	0.7561	0.6891	0.7482	0.7618	36	0.5953	3	0.9822	0.9077	0.9877	0.9949
7	0.0454	14	0.7872	0.7495	0.8042	0.7821	37	0.6037	6	0.9962	0.8755	0.9863	0.9813
8	0.0518	10	0.8008	0.7635	0.8151	0.7283	38	0.6528	6	1.0271	0.9117	0.9994	1.0033
9	0.0594	2	0.7439	0.6352	0.7093	0.6906	39	0.6751	28	0.9919	0.9001	0.9817	0.9886
10	0.0687	1	0.8815	0.8069	0.9036	0.9471	40	0.7028	27	0.9954	0.9097	0.9888	0.9996
11	0.0895	2	0.8946	0.7959	0.8941	0.8511	41	0.7290	13	0.9902	0.9019	0.9794	0.9853
12	0.0919	3	0.9018	0.8163	0.9067	0.8855	42	0.7697	22	0.9452	0.8902	0.9776	0.9797
13	0.1023	3	0.9650	0.7985	0.8945	0.8631	43	0.7922	39	0.9690	0.8796	0.9673	0.9392
14	0.1304	3	0.9121	0.8351	0.9073	0.9266	44	0.8265	24	0.9633	0.8658	0.9779	0.9898
15	0.1364	7	0.9066	0.8327	0.9106	0.9259	45	0.8503	10	0.9544	0.8520	0.9555	0.9539
16	0.1465	2	0.9563	0.8562	0.9550	0.5121	46	0.8723	3	0.9575	0.8697	0.7322	1.0452
17	0.1508	6	0.9735	0.8804	0.9820	0.8251	47	0.9411	6	0.8697	0.7911	0.8590	0.8463
18	0.1637	14	0.9715	0.8817	0.9690	0.9699	48	0.9473	7	0.8453	0.7677	0.8322	0.8430
19	0.1993	19	0.9639	0.8914	0.8729	0.9783	49	0.9542	13	0.7971	0.7254	0.7837	0.7904
20	0.2214	22	0.9663	0.8853	0.9621	0.9598	50	0.9588	1	0.8046	0.7145	0.7900	0.7791
21	0.2512	40	0.9848	0.9228	0.9742	0.9519	51	0.9698	8	0.7162	0.6585	0.7229	0.6574
22	0.2843	8	1.0061	0.9132	0.9966	0.9925	52	0.9760	14	0.6822	0.6268	0.6985	0.6522
23	0.3285	4	1.0147	0.9265	1.0283	1.0181	53	0.9822	11	0.6604	0.5979	0.6802	0.6811
24	0.3448	34	0.9796	0.9007	0.9799	0.9934	54	0.9893	12	0.6281	0.5725	0.6284	0.6472
25	0.3644	15	0.9777	0.8913	0.9738	0.9626	55	0.9976	14	0.6128	0.5649	0.6217	0.5436
26	0.4112	15	0.9829	0.8904	0.9794	0.9721							
27	0.4226	10	0.9923	0.8898	0.9716	0.9616							
28	0.4337	9	0.9734	0.8734	0.9515	0.9476							
29	0.4385	5	0.9678	0.8579	0.9540	0.9646							
30	0.4505	12	0.9500	0.8650	0.9469	0.9445							

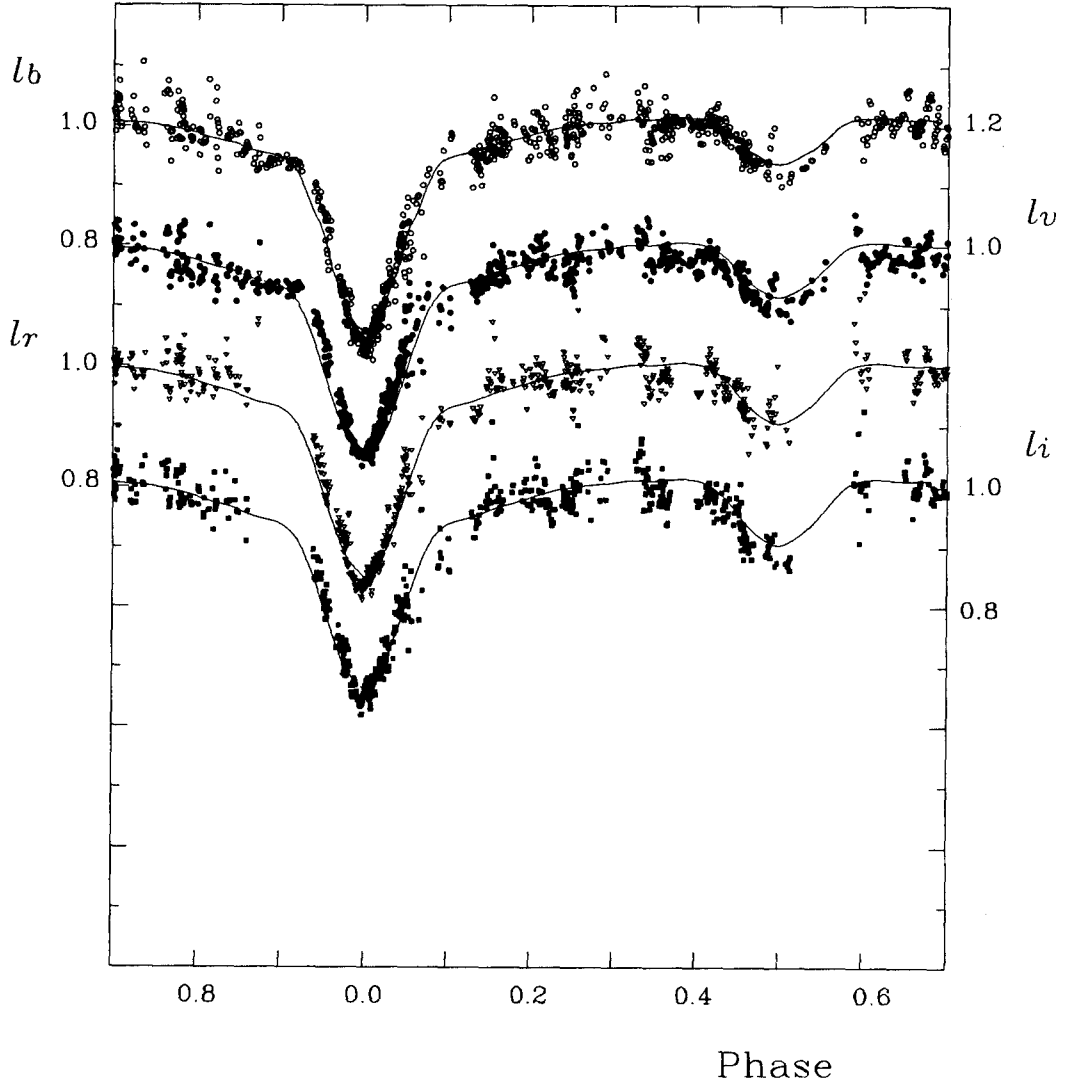


그림 3. λ Tau의 광도곡선과 이론 광도곡선.

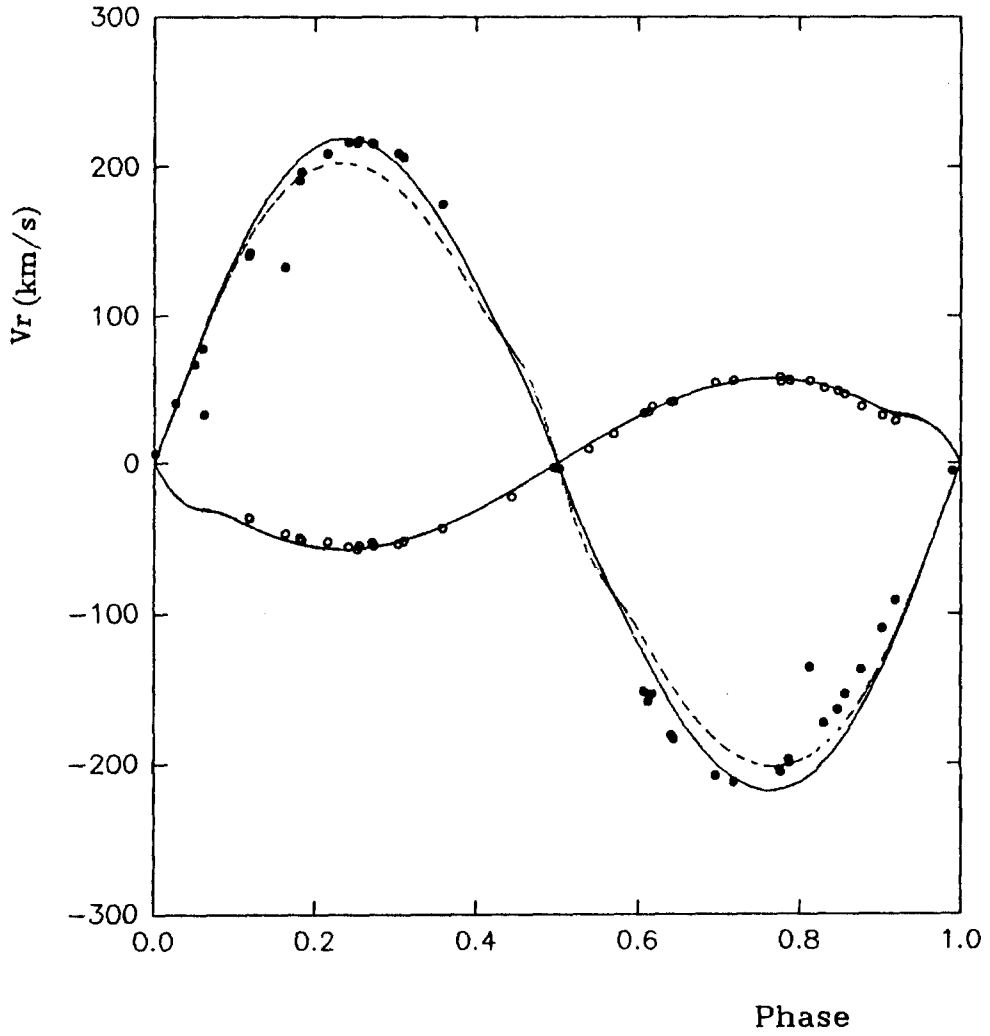


그림 4. λ Tau의 시선속도 곡선. 점으로 표시한 것은 Fekel and Tomkin (1982)의 시선속도이고, 실선은 우리의 이론적인 시선속도이다.

표 5. λ Tau 광도곡선과 시선속도곡선의 해.

변수	Grant (1959)	Hutching & Hill (1971)	Levato (1974)	Cester <i>et</i> <i>al.</i> (1978)	Fekel & Tomkin (1982)	이 논문 (1995)
q	0.267	0.278		0.27	0.264	0.260 ± 0.004
$T_1(^{\circ}K)$				18320		18420 ± 300
$T_2(^{\circ}K)$				8110		7800 ± 280
Ω_1						3.373 ± 0.074
i	86	81.3 ± 0.3		76 ± 0.5		73.70 ± 0.10
$L_1(\lambda 3600)$	0.945					
$L_1(\lambda 4250)$	0.900			0.968		0.9371 ± 0.0080
$L_1(\lambda 5300)$	0.880			0.979		0.9060 ± 0.0086
$L_1(\lambda 6600)$						0.8776 ± 0.0074
$L_1(\lambda 8400)$						0.8485 ± 0.0076
$L_2(\lambda 3600)$	0.055					
$L_2(\lambda 4250)$	0.100			0.032		0.0629 ± 0.0080
$L_2(\lambda 5300)$	0.120			0.021		0.0094 ± 0.0086
$L_2(\lambda 6600)$						0.1224 ± 0.0074
$L_2(\lambda 8400)$						0.1515 ± 0.0076
r_1 (pole)		0.336				0.349 ± 0.001
r_1 (point)		0.345				0.370 ± 0.001
r_1 (side)		0.354				0.359 ± 0.001
r_1 (back)		0.350				0.365 ± 0.001
r_2 (pole)						0.243 ± 0.001
r_2 (point)						0.354 ± 0.001
r_2 (side)						0.252 ± 0.001
r_2 (back)						0.284 ± 0.001
e					0.15 ± 0.08	0.04 ± 0.01
$m_1(m_{\odot})$	6.06		6.1	6.8	7.18 ± 0.009	8.13
$m_2(m_{\odot})$	1.62		1.6	1.8	1.89 ± 0.04	2.11
m_3					0.7 ± 0.2	
$a (R_{\odot})$						22.84 ± 0.28
V_0						0.0003 ± 0.002
R_1	6		6.6	6.4	6.4	8.34 ± 0.01
R_2	4		4.5	5.4	5.3	6.49 ± 0.01

일단 WD분석 과정의 DC 프로그램의 계산 결과에서 얻은 값으로 이론적인 시선속도 곡선을 그렸더니 반성의 경우 그림 4의 점선과 같이 관측값과 일치하지 못하였다. 특히 장반경(a), 이심률(e), 근성점이각(ω) 등의 궤도요소를 다양하게 변화시켜도 큰 변화가 없었다. 특히 제2식심 전후의 위상에서 반성의 시선속도 관측값과 계산값의 불일치는 공전 운동만의 현상이 아니라고 볼 수 있었다. 만일, 두 별이 접촉형 쌍성이라면 공동 표면의 흐름으로 인한 시선속도의 변화량이 있겠지만, 반분리형이기 때문에 자전 운동으로 추정해 보았다. 반성이 제 2식심 전후에서 주성에 의해 일부 가려졌을 경우, 빠른 자전 운동이 있다면 반성의 한 쪽 측면의 시선운동만 관측되므로 관측된 시선속도는 더 크게 나타나게 된다. 따라서 반성의 자전 운동의 분광 요소를 추가 입력하여 분석한 시선속도의 결과를 실선으로 그림 4에 함께 나타내었고, 대체로 관측값과 일치함을 볼 수 있었다. 이 때, 자전 운동의 인자를 $F_2 = 10$ 으로 입력하였다. 이상의 계산 결과를 가지고 이 쌍성계의 구조와 형태, 절대량을 구하였다. 주성의 반경과 질량은 각각 $8.3R_{\odot}$ 과 $8.1m_{\odot}$ 이고 반성의 반경과 질량은 각각 $6.5R_{\odot}$ 과 $2.1m_{\odot}$ 이다. 그림 5는 λ Tau의 형태가 위상 0^p25 일때의 모습이다. λ Tau의 시선속도 곡선의 해와 절대량을 표 5에 제시하였고 우리가 수집한 연구결과도 함께 비교하여 수록하였다.

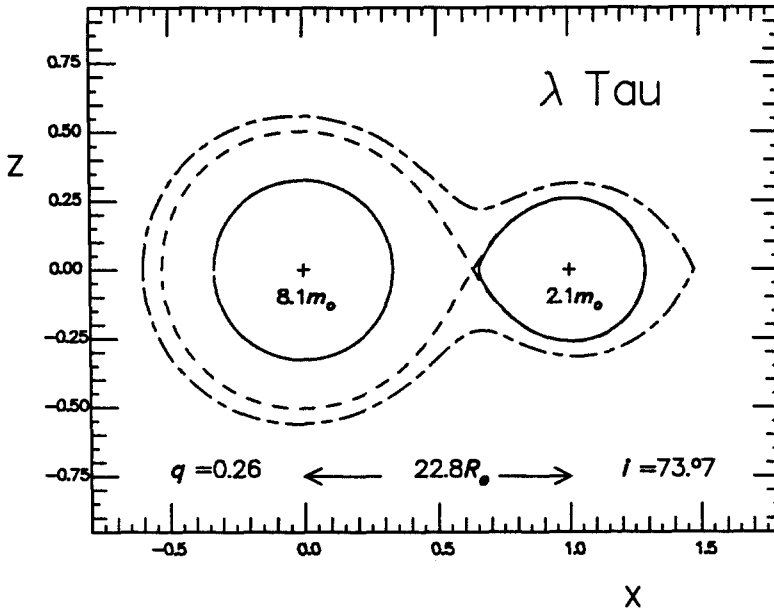


그림 5. 위상이 0^p25 일 때 λ Tau의 절대 크기 모습.

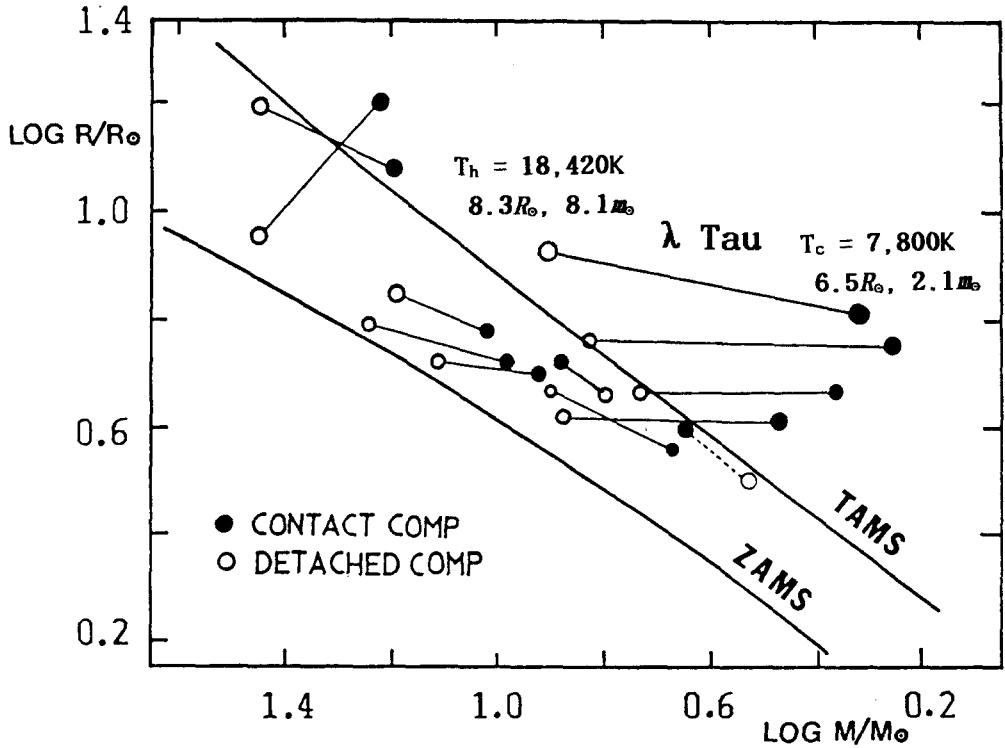


그림 6. 초기형 반분리 쌍성계의 질량-반경도(Leung 1988). 닫힌 원(●)은 Roche lobe를 채운 별이고, 열린 원(o)은 Roche lobe 내에 분리되어 있는 별이다. 그림에서 보면, λ Tau는 계의 두 별이 모두 만기형 주계열을 벗어난 진화 상태에 있음을 알 수 있다.

5. 토의 및 결론

충북대학교 천문우주학과와 소형 망원경에 SSP-3A 광전측광기를 부착하여 근접쌍성 λ Tau를 관측하였다. 관측한 모든 관측값을 표준화하여 전 위상에 걸쳐 λ Tau의 완전한 ΔB , ΔV , ΔR , ΔI 광도곡선을 얻고자 하였으나 일부 위상은 미완성 되었고, U 필터로 관측한 광도곡선은 주로 측광기의 광소자의 특성으로 심한 분산을 보여 제외하였으나, R과 I 필터의 광도곡선은 새로운 것이다. 우리의 광도곡선으로부터 1개의 새로운 광도요소를 결정하였고 측광학적 해를 구하였다. 우리의 광도곡선과 Fekel and Tomkin (1982)의 시선속도곡선을 동시에 만족하는 시선속도곡선의 해를 구하였으며, 이로부터 계의 절대크기를 계산 하였다.

그림 6은 λ Tau와 절대크기가 알려진 초기형 반분리 쌍성계의 $\log(R/R_{\odot}) - \log(m/m_{\odot})$ 그림이다. 그림에서 Stothers (1972)의 영년주계열성(ZAMS)과 만기주계열성(TAMS)은 곡선으로

표시되었다. 닫힌 원(●)은 Roche lobe를 채운 별이고 열린 원(○)은 Roche lobe 내에 분리되어 있는 별이다. 그림에서 주성과 반성의 진화단계는 모두 주계열을 벗어난 상태에 있다. 특히 주성의 진화 단계는 조기형 반분리형 쌍성에서 흔히 볼 수 없는 Roche lobe를 채우지 못한 별이면서 단일별(single star)의 진화와 같이 주계열을 벗어난 상태임을 알 수 있다.

감사의 글: 이 연구를 위해 λ Tau 형태의 컴퓨터 그래픽을 해 주신 충북대 정장해 교수와 주기 변화에 대한 조언을 해 주신 충북대 김천휘 교수께 감사드립니다. 아울러 이 연구를 수행하기 위해 관측에 참여한 심재송군과 대학원생에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

- Bailyn, C. D. & Eggleton, P. P. 1983, ApJ, 274, 763
 Casini, C., Galeotti, P. & Guerrero, G. 1968, Contr. Oss. Astr. ilano-Merate, No.288
 Cester, B., Fedel, B., Giuricin, G., Mardirossian, F. & Mezzetti, M. 1978, A&Ap, 62, 291
 Ebbighausen, E. G. & Struve, O. 1956, ApJ, 124, 507
 Fekel, F. C. & Tomkin, J. 1982, ApJ, 263, 289
 Grant, G. 1959, ApJ, 129, 78
 Hoffleit, D. 1964, The Bright Star Catalogue, 3th ed (New Haven. Connecticut)
 Hutchings, J. B. & Hill, G. 1971a, ApJ, 166, 373
 Hutchings, J. B. & Hill, G. 1971b, ApJ, 167, 137
 Leung, K. C. 1988, In Critical Observations versus Physical Models for Close Binary System, ed. by K. C. Leung (New York: Gordon and Breach)
 Levato, H. 1974, A&Ap, 35, 259
 Levato, H. 1975, A&ApSS, 19, 91
 Mallama, A. D., Skillman, D. R., Pinto, P. A. & Krobusek, B. A. 1977, IBVS, 1249
 McLaughlin, D. B. 1937, Pub. Univ. Michigan, 6, 3
 Schlesinger, F. 1914, Pub. Allegheny Obs., 3, 167
 Soderhjelm, S. 1975, A&Ap, 42, 229
 Stebbins, J. 1920, ApJ, 51, 193
 Stothers, R. 1972, ApJ, 175, 431
 Struve, O. 1946, ApJ, 104, 253