

TX UMa의 측광학적 궤도 요소

오 규 동

전남대학교 지구과학교육과
(1986년 5월 20일 접수; 1986년 6월 26일 수리)

Photometric Orbit of TX UMa

Kyu-Dong Oh

Department of Earth Science, Chonnam National University
(Received May 20, 1986; Accepted June 26, 1986)

요 약

식쌍성 TX UMa의 2색 (V 와 B)의 광전측광에 의한 광도곡선(Oh and Chen 1984)을 Wilson and Devinney(1971) 모델에 의한 differential corrections 방법으로 분석하였다. 그 결과 TX UMa의 온도가 낮고 질량이 작은 반성은 Roche lobe를 채우고 있는 준접촉 식쌍성으로 해석된다. 한편, 이번에 얻은 TX UMa의 측광학적 궤도요소와 Hiltner(1945)의 분광궤도요소로부터 이 별의 절대량을 구하였다. 이에 따르면, 분광형이 B8V인 주성은 core hydrogen burning의 zero age main sequence stage에 있으며 반성은 shell hydrogen burning stage 이후 contraction stage의 진화 상태에 놓여 있는 것으로 추정된다.

Abstract

Two-color photometric light curves (Oh and Chen 1984) of the eclipsing binary TX UMa have been analyzed by the method of differential corrections of the model of Wilson and Devinney (1971). The system found to be semi-detached with the cooler and less massive component filling its Roche lobe. The absolute dimensions have been derived from the results of the photometric solutions with the spectroscopic elements of Hiltner(1945). It is assumed that the B8V primary component is on the zero age main sequence stage of the core hydrogen burning and the secondary is at the core contraction stage after the shell hydrogen burning stage according to the Iben's (1967) evolutionary tracks for $3.0m_{\odot}$ and $1.0m_{\odot}$.

I. 서 론

식변광성 TX UMa의 밝기가 변한다는 사실이 Rügemer(1931)와 Schneller(1931)에 의하여 각각 독자적으로 밝혀진 이래, 지금까지 이 별에 대한 광전측광에 의한 완전한 광도곡선이 발표된 것은 단지 Wood(1946), Koch(1961) 그리고 최근 본인(Oh and Chen 1984, 이후 OC라고 함)의 광도곡선 뿐이며 또한 이들은 모두 고전적인 Russell(1952, 이후 RM이라고 함) 모델을 사용하여 이 별의 궤도요소를 얻었다. 한편, Hill and Hutchings(1973)와 Guinan(1957)도 TX UMa의 궤도요소를 발표하였는데, 이들은 모두 Koch의 광도곡선을 이용하였으며, 전자는 그들이 개발한 방법을 사용하고 후자는 또한 RM 모델을 사용하였다. 이렇듯, 지금까지 발표된 TX UMa의 궤도요소들은 대부분 고전적이며 관습적인 방법 중의 하나인 RM 모델을 사용하여 얻은 것들이다. 그런데, 최근 식쌍성의 광도곡선을 분석하는 새로운 모델들이 개발되고 있으며, 따라서 고전적인 RM 모델을 사용하여 얻은 식쌍성의 궤도요소들이 이 식쌍성을 보다 더 정확하게 정의 하기에는 다소 미흡하다는 결론에 따라 RM 모델을 사용하여 얻은 궤도요소들을 differential correction에 의한 통합적 방법으로 새롭게 재분석하고 있다(Leung and Wilson 1977; Lapasset 1980; Wilson and Rafert 1980; Russo and Sollazzo 1982). 이에 따라 RM 모델에 의하여 얻은 궤도요소들을 differential correction에 의한 새로운 모델에 적용하기 위한 일차적 근사치로 이용하고 있다.

이번 연구에서는, 이미 본인(OC)에 의하여 발표된 2색(V 와 B)의 광전측광에 의한 광도곡선을 새로운 모델인 Wilson and Devinney(1971, 1979, 이후 WD라고 함) 모델의 differential correction program을 사용하여 TX UMa를 재분석하여 새로운 궤도요소를 구하였다. 한편 이러한 결과로부터 TX UMa의 진화상태를 조사하였다.

II. 측광학적 궤도요소

TX UMa의 2색(V 와 B)의 광전관측치를 WD의 differential correction program을 이용하여 동시에 분석하였다. 이들 분석을 위하여 전남대학교 전자계산소의 IBM 4361을 사용하였다. 먼저 OC의 광도곡선의 관측점(V : 493점 그리고 B : 489점)을 사용된 컴퓨터의 용량과 사용시간을 고려하여 V 와 B 에서 각각 66개와 64개의 대표점으로 만들었다. 새로운 대표점들은 대표점을 만든 초기의 관측점의 갯수에 따라 가중치(weight)를 주었다. 한편, 식심근처에서의 대표점은 이 위상에서의 측광학적 특수성과 중요성을 고려하여 2개 혹은 3개의 관측점을 하나의 대표점으로 하여 가중치를 낮게 잡았다.

WD 프로그램에 적용되는 기본적인 인자들은 궤도요소(i), 표면 포텐셜(Ω_1 와 Ω_2), 질량비($q =$

m_2/m_1), 중력감광계수(g_1 와 g_2), bolometric albedo(A_1 와 A_2), 주변감광계수(X_1 와 X_2), 유효온도(T_1 와 T_2), 규격화되지 않은 밝기(L_1 와 L_2) 등이다. 여기서 여러 인자들의 밑에 표시한 1과 2는 각각 TX UMa의 주성과 반성을 나타낸 것이다.

WD 프로그램에 적용하기 위한 초기의 입력치로 RM 모델에 의해 얻어진 OC의 궤도요소를 채택하였다. 한편, 초기의 입력치로서 고정(fix)시킨 인자는 다음과 같다: Pearce(1940), Hiltner(1945), 그리고 Grewing and Herczeg(1966)의 분광관측에 의하여 제시된 두 별의 분광형, B8V + F2III과 Morton and Adams(1968)의 온도보정으로 주성과 반성의 온도를 각각 12000°K와 7240°K를 얻고 주성의 온도, $T_1=12000$ °K는 고정하였다. 또한, 주성과 반성의 주변감광계수는 X_1 과 X_2 에 대하여 각각 $X_1=0.35$ 와 0.43 그리고 $X_2=0.64$ 와 0.75 를 적용하였는데, 이러한 주성과 반성의 주변감광계수는 Carbon and Gingerich(1969)의 grid model 대기에 의한 $T_1=12000$ °K와 $\log g=5$ 그리고 $T_2=7240$ °K와 $\log g=4$ 로부터 채택하였다. 그런데 초기에는 두 별의 주변감광계수도 고정하였다. 중력감광계수는 두 별이 모두 복사대기로 가정하여 $g_1=g_2=1$ 로 고정하였다. 한편, third light(ℓ_3)는 이 별을 관측상에 영향을 주지 않은 것으로 간주하여 고려하지 않았다.

궤도요소를 얻기 위해 고정시킬 인자들이 결정된 후 다음의 인자들을 수정(adjust)하였다: 궤도기울기(i), 주성의 표면 포텐셜(Ω_1), 반성의 유효온도(T_2), 질량비($q=m_2/m_1$) 그리고 주성의 밝기($L_1(V)$, $L_2(B)$). 한편, WD 프로그램은 7가지의 형(mode)으로 분류(Leung and Wilson 1977)되어 있으며, 이들 mode 가운데 TX UMa에 대해서는 준접촉 식쌍성으로서 반성이 Roche lobe를 채우고 있는 식쌍성계에 적용되는 mode 5를 채택하였다. 이러한 이유는, OC에 의하면 TX UMa가 주성에 비하여 상대적으로 크기가 큰 반성이 Roche lobe를 채우고 있는 것으로 나타났기 때문이다.

결과적으로, differential correction에 의하여 수차에 걸쳐 반복 수정하였다. 그러나 불행히도 수정하려는 인자들의 수정치가 수정치에 대한 probable error보다 적게 혹은 수정치와 거의 같은 값으로 수렴되지 못하였다. 따라서, 초기에 수정하고자 하는 인자들이 대체적으로 수정된 후, 반성을 convective envelope로 가정하여 중력감광계수, $g_2=0.32$ (Lucy 1967)를 고정한 후 2차적으로 A_2 , X_1 과 X_2 를 함께 수정하였다. 최종적으로 수차의 수정을 한 결과, 수정하고자 하는 모든 인자의 수정치가 probable error와 거의 같은 값으로 대부분 수렴하였다. 이때 가중치에 따른 관측된 광도곡선(O) 과 이론적인 광도곡선(C)과의 평균 오차는 $\sum w(O-C)^2 = 0.0012$ 로 나타났다.

WD 모델을 사용하여 얻은 TX UMa의 최종적인 궤도요소를 표 I에 종합하였다. 또한 그림 1에 표 I의 궤도요소에 의한 TX UMa의 이론적인 광도곡선과 관측된 광도곡선과 비교하였다. 그림 1에서 이론적인 광도곡선과 관측된 광도곡선은 만족스럽게 서로 일치하고 있다.

한편, 표 III에 WD프로그램에 적용한 TX UMa의 대표점들에 대한 위상과 규격화된 밝기 또한 대표점의 가중치 그리고 이론적인 광도곡선과의 차이(residual)를 수록하였다.

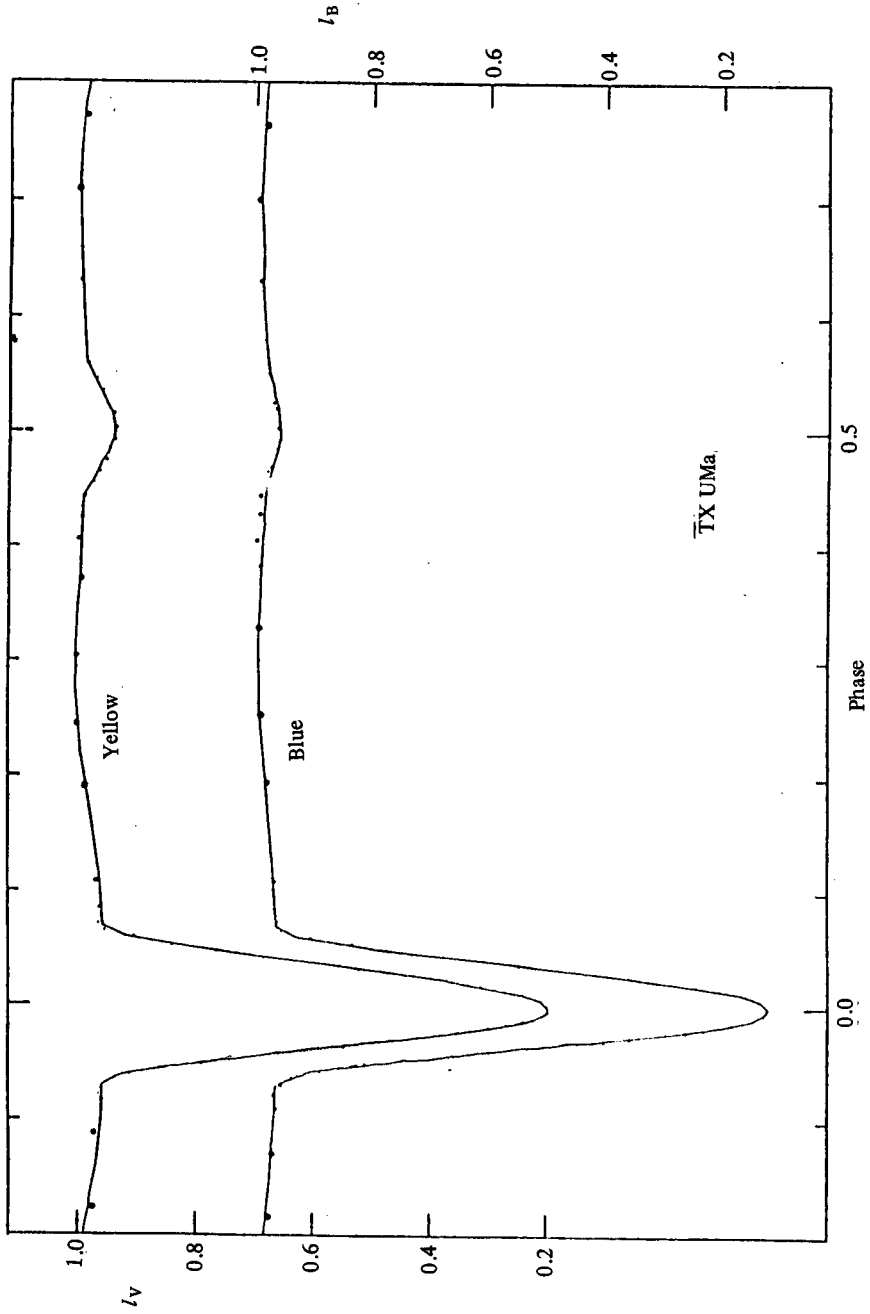


그림 1 TX UMa의 광도곡선. 광도곡선의 가치 중에 따른 대표점 (●)과 Wilson and Devinney 모델의 이론적인 광도곡선(실선).

표]. TX UMa의 광학적 기하학적 요소

Wavelength-dependent Parameters		
Parameter	Yellow	Blue
$L_1/(L_1 + L_2)$	0.8329 ± 0.0032 p. e.	0.9199 ± 0.0010 p. e.
x_1	0.16 ± 0.05	0.25 ± 0.06
x_2	0.27 ± 0.09	0.71 ± 0.16
Non-wavelength-dependent Parameters		
i	$80.22^\circ \pm 0.07$	
Ω_1	7.2602 ± 0.0275	
Ω_2	2.3769^*	
g_1	1.0^*	
g_2	0.32^*	
A_1	1.0^*	
A_2	0.573 ± 0.021	
T_1	12000°K^*	
T_2	$4813 \pm 25^\circ \text{K}$	
$q=(m_2/m_1)$	0.3054 ± 0.0016	
r_1 (pole)	0.1437 ± 0.0006	
r_2 (side)	0.1440 ± 0.0006	
r_1 (back)	0.1442 ± 0.0006	
r_2 (pole)	0.2859 ± 0.0069	
r_2 (side)	0.2859 ± 0.0069	
r_2 (back)	0.3201 ± 0.0108	

* Not adjust

표 II. TX UMa의 대표점들

Yellow							
Phase	Int	n	O-C	Phase	Int	n	O-C
0.0028	0.1992	3	0.0044	0.5225	0.9529	6	-0.0017
0.0068	0.2086	3	-0.0013	0.5336	0.9597	3	-0.0020
0.0117	0.2397	2	0.0023	0.5442	0.9701	3	-0.0023
0.0150	0.2704	1	0.0036	0.5584	0.9836	3	-0.0017
0.0189	0.3106	2	0.0018	0.6323	0.9971	13	0.0004
0.0236	0.3711	2	0.0012	0.7081	1.0011	38	-0.0020
0.0286	0.4388	2	-0.0045	0.7700	0.9937	27	-0.0017
0.0333	0.5195	2	-0.0014	0.8242	0.9738	41	-0.0081
0.0380	0.5997	4	-0.0014	0.8889	0.9668	28	-0.0071
0.0427	0.6810	4	0.0005	0.9166	0.9559	5	0.0003
0.0477	0.7594	4	-0.0001	0.9221	0.9612	3	0.0026
0.0534	0.8363	3	-0.0020	0.9271	0.9579	3	0.0017
0.0594	0.9004	2	-0.0028	0.9322	0.9495	3	-0.0012
0.0646	0.9498	2	0.0007	0.9366	0.9315	2	-0.0023
0.0707	0.9612	2	0.0025	0.9400	0.9083	2	-0.0010
0.0771	0.9568	3	0.0010	0.9430	0.8791	2	-0.0002
0.0855	0.9603	4	0.0020	0.9452	0.8493	2	-0.0012
0.1081	0.9667	16	0.0057	0.9495	0.7862	6	-0.0072
0.1906	0.9840	30	-0.0012	0.9552	0.7140	5	0.0049
0.2430	0.9982	29	0.0001	0.9598	0.6349	4	0.0029
0.3030	1.0003	30	-0.0026	0.9652	0.5436	7	0.0026
0.3705	0.9916	30	-0.0055	0.9699	0.4697	5	0.0070
0.4061	0.9980	13	0.0034	0.9729	0.4198	4	0.0039
0.4249	0.9968	13	0.0035	0.9756	0.3778	3	0.0025
0.4323	0.9927	4	0.0004	0.9777	0.3524	2	0.0051
0.4433	0.9885	7	0.0008	0.9799	0.3185	3	-0.0004
0.4539	0.9749	5	-0.0015	0.9818	0.2939	3	-0.0037
0.4625	0.9616	4	-0.0028	0.9842	0.2669	2	-0.0023
0.4720	0.9520	7	-0.0042	0.9860	0.2486	2	-0.0044
0.4826	0.9463	4	-0.0018	0.9877	0.2370	2	-0.0020
0.4903	0.9389	5	-0.0030	0.9898	0.2220	3	-0.0056
0.5022	0.9371	11	-0.0046	0.9933	0.2064	3	-0.0028
0.5140	0.9403	8	-0.0048	0.9971	0.1963	4	-0.0009

표Ⅱ (계속)

Blue							
Phase	Int	n	<i>O-C</i>	Phase	Int	n	<i>O-C</i>
0.0037	0.1285	2	0.0026	0.5500	0.9767	5	0.0000
0.0069	0.1378	3	-0.0028	0.6306	0.9930	14	0.0032
0.0115	0.1665	2	-0.0022	0.7004	0.9945	30	0.0028
0.0153	0.2044	1	0.0008	0.7643	0.9840	36	-0.0020
0.0187	0.2442	2	-0.0006	0.8172	0.9721	29	-0.0043
0.0221	0.2938	1	0.0015	0.8714	0.9663	28	-0.0010
0.0263	0.3571	2	-0.0020	0.9110	0.9614	13	-0.0007
0.0304	0.4292	2	-0.0003	0.9246	0.9625	6	0.0007
0.0365	0.5440	3	-0.0018	0.9322	0.9506	3	-0.0030
0.0397	0.6049	3	0.0001	0.9374	0.9319	3	-0.0026
0.0435	0.6731	3	-0.0013	0.9424	0.8829	3	-0.0023
0.0464	0.7271	2	-0.0003	0.9460	0.8311	3	-0.0040
0.0489	0.7713	2	-0.0005	0.9495	0.7882	4	-0.0017
0.0535	0.8287	3	-0.0045	0.9530	0.7324	3	0.0000
0.0594	0.9000	2	-0.0039	0.9566	0.6646	4	-0.0018
0.0646	0.9489	2	-0.0017	0.9605	0.5939	3	-0.0005
0.0732	0.9574	4	-0.0012	0.9640	0.5297	2	0.0007
0.0855	0.9626	6	0.0002	0.9664	0.4855	4	0.0022
0.1088	0.9632	15	-0.0010	0.9688	0.4428	2	0.0017
0.1946	0.9749	32	-0.0043	0.9712	0.4003	4	0.0034
0.2537	0.9859	37	-0.0029	0.9733	0.3586	3	-0.0010
0.3289	0.9920	35	0.0007	0.9757	0.3220	3	0.0024
0.3822	0.9911	16	0.0031	0.9777	0.2951	2	0.0051
0.4065	0.9976	12	0.0080	0.9798	0.2620	3	0.0026
0.4288	0.9909	8	0.0045	0.9818	0.1382	2	-0.0043
0.4446	0.9895	8	0.0052	0.9840	0.2045	2	-0.0016
0.4537	0.9780	4	0.0011	0.9860	0.1822	2	-0.0042
0.4680	0.9696	10	0.0012	0.9882	0.1649	3	-0.0029
0.4841	0.9619	4	0.0009	0.9905	0.1488	2	-0.0044
0.5040	0.9601	17	0.0029	0.9928	0.1382	2	-0.0021
0.5204	0.9618	9	-0.0001	0.9953	0.1302	3	-0.0003
0.5335	0.9695	3	0.0004	0.9990	0.1247	3	0.0043

Ⅲ. 질량과 절대량

TX UMa에 관한 분광학적 결과들이 Pearce(1940), Hiltner(1945), Grewing and Herczeg (1966) 그리고 Swensen and McNamara(1968)들에 의하여 발표된 바 있으나 이들의 결과가 서로 일치하지 않고 있으며 이들이 발표한 시선속도곡선도 오차가 매우 큰 것으로 나타났다. 그런데 Payne-Gaposchkin(1942)과 Wood(1946)의 측광학적 결과와 Hiltner(1945)의 분광학적 결과가 서로 일치하고 있다. 따라서, TX UMa의 질량을 계산하기 위하여 Hiltner에 의하여 발표된 주성의 시선속도 값, $K_1 = 51.8 \text{ km/sec}$ 과 표 I의 궤도요소로부터 두 별의 질량, $m_1 = 2.8 m_\odot$ 과 $m_2 = 0.85 m_\odot$ 를 얻었다. 이러한 질량과 표 I의 궤도요소 그리고 OC에 의하여 알려진 공전 주기, 3.0632382(day)를 적용하고 이미 잘 알려진 다음의 관계식을 이용하여 TX UMa의 반경과 밝기를 구하였다. 여기서, r 은 $r(\text{side})$ 를 적용하였다.

$$R_1 / R_\odot = (74.55 (m_1 / m_\odot) (1 + q) P^2)^{r_1}$$

$$R_2 = (r_2 / r_1) R_1$$

$$L / L_\odot = (R / R_\odot)^2 (T / T_\odot)^4$$

표 Ⅲ은 TX UMa의 절대량이다.

표Ⅲ. TX UMa의 절대량

$\log T_1$ (°K)	4.08
$\log T_2$ (°K)	3.68
m_1	$2.8 m_\odot$
m_2	$0.85 m_\odot$
R_1	$1.99 R_\odot$
R_2	$3.90 R_\odot$
$\log L / L_\odot$	1.86
$\log L / L_\odot$	0.86
K_1 (km/sec)*	51.8 ± 0.82

* Hiltner(1945)

IV. 검토와 결론

WD 모델에 의하여 얻은 표 I의 궤도요소에 따르면, TX UMa는 준접촉 식쌍성으로서 반성

이 Roche lobe를 채우고 있다. 한편, 이러한 궤도요소들은 RM 모델에 의하여 발표된 궤도요소들과 차이점을 발견하지 못하였으나 두 별의 상대적 크기의 비, $K = r_1/r_2$ 가 RM 모델에 의하여 얻은 값들은 0.62부터 0.58정도인 데 비하여 우리의 값은 0.51 정도로 적은 값으로 나타났다.

표 III의 절대량으로부터 TX UMa의 진화상태를 조사하였다. 그림 2는 $3.0m_{\odot}$ 와 $1.0m_{\odot}$ 사이의 별에 대한 Iben(1967)의 진화경로상에 TX UMa의 주성과 반성을 표시한 H-R 도이다. 그런데 TX UMa의 진화상태를 조사하기에 앞서 표 III의 절대량에 대하여 검토하여 보면, TX UMa의 주성의 유효온도와 밝기가 각각 $\log T_e = 4.08$ 와 $\log L/L_{\odot} = 1.86$ 일 때 Iben의 진화경로상의 ZAMS의 질량이 $2.7m_{\odot}$ 로 나타나고 있으며, 이러한 질량은 표 III의 주성의 질량 $2.8m_{\odot}$ 와 매우 잘 일치하고 있다. 또한, 주성에 대한 $\log m/m_{\odot} = 0.45$ 와 $\log L/L_{\odot} = 1.86$ 의 값은 Allen(1973)의 주계열성에 대한 mass-luminosity 관계와도 일치하고 있다. 한편, 반성에 대한 $\log T_e = 3.68$ 와 $\log L/L_{\odot} = 0.86$ 일 때 Iben의 진화 경로상에 나타난 질량은 $1.3m_{\odot}$

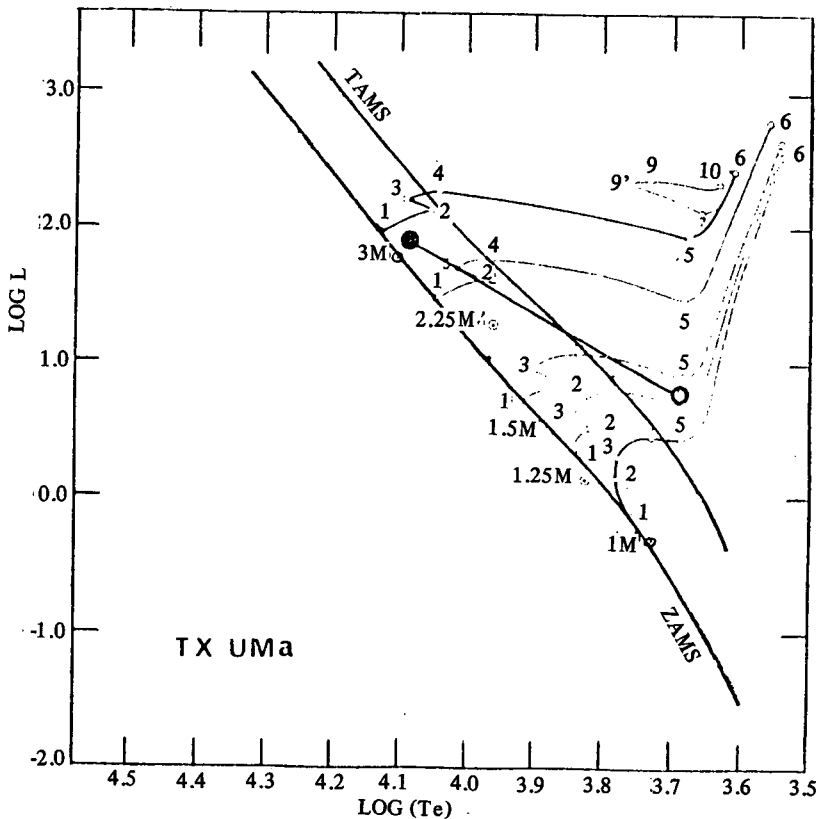


그림2. TX UMa의 H-R도. 채워진 원 (●)은 주성을, 빈 원 (○)은 반성을 표시한다.

로서 이러한 값은 표 III의 반성의 질량 $0.85m$ 와 다소 차이를 보이고 있으나 이러한 차이는 반성의 질량에 대한 오차의 한계 내에 있을 것으로 추정된다.

결론적으로 $3.0m_{\odot}$ 와 $1.0m_{\odot}$ 인 별에 대한 Iben(1967)의 진화경로상의 위치(그림 2)로부터 TX UMa의 주성은 core hydrogen burning의 zero age main sequence stage에 있으며, 반성은 terminal age main sequence stage를 떠나 shell hydrogen burning stage 이후 core contraction stage의 convective envelope를 갖는 진화 상태이다. 실제, 모델로부터 TX UMa의 궤도요소를 얻기 위한 분석에서도 초기의 수정 인자들이 수렴하지 못하여 2차적으로 반성을 convective envelope 상태로 가정하여 궤도요소를 얻었다.

한편, TX UMa에 대한 표 III의 절대치로부터 주성의 유효온도 $T_e = 12,000^{\circ}\text{K}$ 와 밝기 $\log L/L_{\odot} = 1.86$ 은 Morton and Adams(1968)에 의하면 주성의 분광형은 B8V로 추정된다. 그런데, Pearce, Hiltner, Grewing and Herczeg의 분광학적 결과에서도 주성의 분광형을 B8V로 제시하고 있다. 또한, 이번 연구에서도 주성의 분광형을 B8V로 가정하여 적용하였다. 반성의 분광형은 Allen(1973)에 의하면, $\log R/R_{\odot} = 0.59$ 일 때 F5III로 $\log Te = 3.68$ 일 때 G7III로 나타나고 있다. 그러나 그림 2에서 나타났듯이 반성은 normal giant 상태까지 진화한 것으로 나타나지 않았기 때문에 이러한 반성의 분광형은 현재로서는 평가하기에 다소 어려움이 있다. 한편, Guinan(1975)은 반성의 분광형을 F9IV와 G7IV 사이로 추정하고 있으며 이러한 추정은 이번에 제시한 반성의 분광형과 비교할 만한 것이다.

끝으로, 더욱 만족스러운 TX UMa의 궤도요소를 얻기 위하여서는 분광관측에 의한 시선속도 곡선을 동시에 WD 모델에 적용함으로써 종합적인 궤도요소의 분석이 있어야 할 것이다. 또한, 이 별에 대한 분광관측의 결과들이 만족스럽지 못하기 때문에 이에 대한 관측 결과가 선행되어야 할 것이다.

이번 연구는 1985년도 한국과학재단의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사합니다. 끝으로, TX UMa의 관측은 연세대학교 천문대에서 실시되었으며 이에 나일성 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- Allen, C. W., 1976, *Astrophysical Quantities*, corrected 3rd ed. (Athlone press: London).
- Carbon, D. F. and Gingerich, O., 1969, *Theory and Observations of Normal Stellar Atmospheres*, O. Gingerich, ed. (MIT Press: Cambridge).
- Grewing, M. and Herczeg, T., 1966, *Zeit. Astrophys.*, **64**, 256.
- Guinan, E. F., 1975, *Villanova Univ. Obs. Contribution* 1.
- Hill, G. and Hutchings, J. B., 1973, *Astrophys. Space Science*, **20**, 123.
- Hiltner, W. A., 1945, *Astrophys. J.*, **101**, 108.

- Iben, I., 1967, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **5**, 571.
- Koch, R. H., 1961, *Astron. J.*, **66**, 230.
- Lapasset, E., 1980, *Astron. J.*, **85**, 1098.
- Leung, K. -C. and Wilson, R. E., 1977, *Astrophys. J.*, **211**, 853.
- Lucy, L. B., 1967, *Zeit. Astrophys.*, **65**, 89.
- Morton, D. C. and Adams, T. F., 1968, *Astrophys. J.*, **151**, 611.
- Oh, K. -D. and Chen, K. -Y., 1984, *Astron. J.*, **89**, 126.
- Payne-Gaposchkin, C., 1942, *Harvard Bull.*, **916**, 2.
- Pearce, J. A., 1940, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **52**, 287.
- Russell, H. N. and Merrill, J. E., 1952, *Contr. Princeton Univ. Obs.*, **26**.
- Rügemer, H., 1931, *Astron. Nachr.*, **242**, 177.
- Russo, G. and Sollazzo, C., 1982, *Astron. Astrophys.*, **107**, 197.
- Schneller, H., 1931, *Astron. Nachr.*, **242**, 180.
- Swensen, P. R. and McNamara, D. H., 1968, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **80**, 192.
- Wilson, R. E. and Devinney, E. J., 1971, *Astrophys. J.*, **166**, 605.
- Wilson, R. E., 1979, *Astrophys. J.*, **234**, 1054.
- Wilson, R. E., and Rafert, J. B., 1980, *Astron. Astrophys. Supple.*, **42**, 195.
- Wood, F. B., 1946, *Contr. Princeton Univ. Obs.*, **21**, 18.