

## 접촉쌍성 W UMa의 광전관측과 광도곡선 분석

김천희<sup>1†</sup>, 이충욱<sup>1</sup>, 강영운<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>세종대학교 지구정보과학과

### PHOTOELECTRIC OBSERVATIONS AND ANALYSIS OF THE CONTACT BINARY W UMA

Kim, Chun-Hwey<sup>1†</sup>, Lee, ChungUk<sup>1</sup>, and Kang, Young Woon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University  
Cheongju, 361-763, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Earth Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea  
E-mail: kimch@ast.chungbuk.ac.kr

(Received April 2, 2001; Accepted May 8, 2001)

#### 요 약

1984년 4월부터 1985년 5월에 걸쳐 4일간 자외선, 청색, 황색 영역으로 광전 관측되었으나 아직 발표되지 않은 접촉쌍성 W UMa의 광전관측 자료를 제시하였다. 우리의 관측으로부터 11개의 새로운 극심시각을 결정하였다. 1993년에 개선된 WD 쌍성 모델을 이용하여 광도곡선을 분석하여 W UMa의 측광학적 해를 구하였다.

#### ABSTRACT

The unpublished photoelectric observations of the contact binary W UMa in ultraviolet, blue, and yellow bandpasses made on four nights during the observing seasons from April, 1984 to May, 1985 were presented. From our observations new eleven times of minimum light were determined. By using the 1993 WD binary model our light curves were analyzed and new photometric solutions of W UMa were obtained.

*Key words:* stars, contact binary, light curves

#### 1. 서 론

식쌍성의 분류에 있어 한 그룹을 형성하고 있는 W UMa형 쌍성들은 공전주기가 1일 이내로 짧고, 분광형이 A ~ K이며, 성분별의 질량비 ( $q$ )가 0 ~ 1사이에 넓게 분포되어 있고, 그 별들의 로쉬(Roche) 기하는 두 성분 별들이 공통의 대기로 둘러싸여 있는 접촉 또는 과접촉 쌍성이다. 이 형의 별들은 제1식 (primary eclipse)에서 어떤 별이 가려지는지에 따라 W형과 A형의 두가지로 나뉜다. 제1식에서 두 성분별 중 질량이 크고 따라서 반경이 큰 별이 그렇지 않은 별에 의하여 가려질 때를

<sup>†</sup>corresponding author

A형 별이라 하고, 그 반대인 경우를 W형이라 한다 (Binnendijk 1970, 1977). A형의 별들은 거의 조기형 (A ~ F)에 속하나, W형들은 만기형 (G ~ K)에 속한다.

W UMa형 별의 광도곡선에서 제1극심과 제2극심의 식의 깊이는 거의 같다. 따라서, 두 성분별의 표면온도가 거의 같음을 유추할 수 있으나, 이는 W UMa형 별을 이루는 성분별들의 질량비가 0과 1사이의 넓은 영역에 고루 분포되어 있다는 관측과는 모순이다. 즉, 성분별의 질량이 매우 다르기 때문에 표면온도도 매우 다를 것이기 때문이다. 더욱이 “영년령의 두별이 쌍성을 이를 경우 이 두 별의 질량이 다르면 두 성분별은 접촉 상태에 있을 수 없다”는 Kuiper (1941)의 연구 이후, 한동안 W UMa형 별의 구조에 대한 연구는 답보상태에 있었다.

Kuiper의 역설 이후, W UMa형 별의 구조에 대한 실질적인 진전은 Lucy (1968a,b)에 의하여 이루어졌다. 그는 질량이 다른, 따라서 서로 다른 내부 구조를 갖는 영년령의 두 성분별이 물리적으로 접촉된 상태에 있고, 단열 계수가 같은 공통 대류 대기 (common convective envelope)가 두 별을 둘러싸고 있다면, W UMa형 별과 같이 표면 온도가 같은 접촉 상태로 만들 수 있음을 제안하였다. 공통 대류 대기의 높은 대류 효율이 온도를 갖게 만든다. 즉, 대류에 의한 방대한 양의 에너지가  $L_1$  점을 통한 공통 대기의 순환에 의하여 상호 전달되어 결과적으로 온도가 갖게 된다. Lucy의 모형은 A형의 광도곡선은 잘 설명할 수 있었으나, W형의 광도곡선은 설명할 수 없는 단점이 있다. 즉, 질량이 작고 반경도 작은 별 (이하 주성이라 약함)이 질량도 크고 반경도 큰 별 (이하 반성이라 약함)에 의하여 가리워 질 때, 더 깊은 식을 만들기 위해서는 첫째, 주성의 온도가 반성보다 더 크거나 (Rucinski 1973, 1974), 둘째, 보통 주계열 별보다 중력감광계수가 크거나 (Lucy 1967, Sarna 1989, Alencar & Vaz 1997, Pantazis & Niarchos 1998), 셋째, 반성의 온도를 줄여야 한다 (Mullan 1975, Eaton 1986). 이 세가지 효과 중 어느 하나가 특별히 우월하게 작용한다기 보다 이 세가지 효과를 동시에 고려하여 관측된 W형 광도곡선을 맞추는 연구가 지배적이다. 즉, 식의 깊이는 첫째와 둘째 효과로 조정하고, 광도곡선의 비대칭은 세 번째 방식으로 설명하려 한다. 특히, 반성의 온도를 줄이는 방법으로 많이 사용되는 것은 반성 표면 위에 표면보다 온도가 낮은 항성 흑점을 가정한다. 대부분의 W UMa형 별의 광도곡선은 제1극심 다음에 오는 최대 밝기 (Max I)가 제2극심 다음의 최대 밝기 (Max II) 보다 밝거나 (이를 O'Connell 효과라 함), 그 반대 (역 O'Connell 효과)하거나, 또는, 이 효과가 시간에 따라 변한다. 이를 항성 흑점의 시간적 변화로 해석하는 것이 최근 연구의 추세이다 (Liu et al. 1993). W UMa형 별의 채층 활동에 관한 자외선 또는 X-선 관측 연구는 항성 흑점 모델을 뒷받침한다 (Cruddace & Dupree 1984, Vilhu & Heise 1986).

W UMa형 접촉쌍성의 원형별인 W UMa (HD83950, BD+56°1400)는 1903년 Muller & Kempf (1903)에 의하여 변광성으로 발견된 이후 수많은 학자들에 의하여 거의 전 파장 영역에서 관측, 연구되어온 별이다. W UMa ( $V=7.75$ ,  $sp=F8V+F8V$ ,  $P=0.43336$ )는 안시쌍성 ADS 7494의 구성원 중 밝은 별 (A)이다 (Binnendijk 1966). ADS 7494B는 W UMa에서 약 7" 정도 떨어져 있다. W UMa는 온도가 높고 질량이 작은 주성 ( $T_P=6100K$ ,  $M_P=0.55M_{\odot}$ )과 온도가 낮고 질량이 큰 반성 ( $T_S=5875K$ ,  $M_S=1.22M_{\odot}$ )으로 이루어져 있으며 (Linnell 1991a), 제1식에서 주성이 가리어지는 W형의 그룹에 속한다. 이 별의 관측 역사는 Woodward (1942), Breinhorst (1971), Linnell (1985, 1991a), 그리고 Depasquale et al. (1999)의 논문들에 잘 기술되어 있다.

이 별의 광도곡선 분석에 관한 가장 최근의 연구는 Linnell (1985, 1987, 1991a,b,c)에 의하여 수

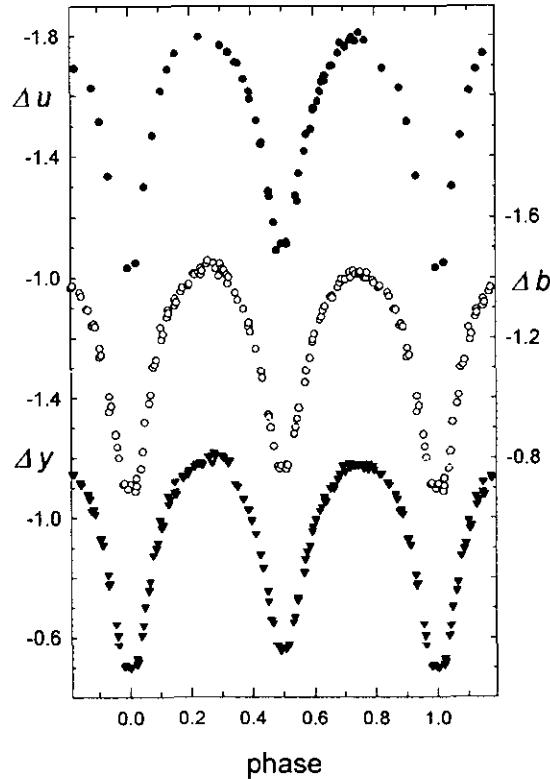


그림 1. W UMa의 자외선(ultraviolet), 청색(blue), 황색(yellow) 광도곡선.

행되었다. 그는 그가 관측하여 얻은 W UMa의 광도곡선이 위에서 논의한 반성 표면 위의 항성 혹점을 가정하였을 때보다 주성의 뜨거운 온도에 의한 것이라고 할 때 더 잘 맞는다고 주장한다. 이 때 그는 중력감광계수를  $\beta=0.08$ 을 사용하였다. 이 연구는 W UMa을 광전관측하여 얻은 새로운 광도곡선을 분석하여, 위에서 제시한 세 가지 방식의 혼용이 관측된 광도곡선을 잘 맞출 수 있음을 보이려고 한다.

## 2. 관 측

W UMa를 소백산천문대의 61cm 반사망원경과 부착된 광전측광기를 사용하여 1984년 4월 23일부터 1985년 5월 10일까지 총 4일 밤 동안 관측하였다. 관측에 사용한 필터는 Johnson의 UBV 필터와 근사한 유효파장을 보이는 필터이다. 또한 광전증배관은 Hamamatsu 1P21으로 관측시 드라이 아이스로 냉각시켰다. 광전증배관에서 나온 별의 신호는 DC Amp에서 증폭되어 chart recorder에 기록된다. 기록된 출력 신호는 약 1분간 적분된 것이다. 서론에서도 설명하였듯이, W UMa는 안시쌍성의 밝은 성분별 (ADS 7494A)이고 반성인 ADS 7494B (W UMa보다 약 4.8등급 어두움)가 약 7'' 정도 떨어져 있기 때문에 관측의 다이아프램 (약 2mm, 25.5''에 해당)에 이 두 별이 항상 들어온다.

표 1. W UMa의 관측점.

HJD (2440000+)	phase	$\Delta m$	HJD (2440000+)	phase	$\Delta m$	HJD (2440000+)	phase	$\Delta m$
<b>자외선 관측</b>								
6094.1562	0.3579	-1.709	6121.1872	0.3771	-1.657	6121.3081	0.7395	-1.781
6094.1683	0.3941	-1.590	6121.1928	0.3939	-1.614	6121.3118	0.7506	-1.811
6094.1806	0.4310	-1.441	6121.2003	0.4164	-1.518	6195.9935	0.5918	-1.490
6094.1895	0.4577	-1.268	6121.2056	0.4323	-1.447	6196.0009	0.6140	-1.583
6094.1970	0.4802	-1.090	6121.2134	0.4556	-1.285	6196.0098	0.6407	-1.650
6094.2078	0.5125	-1.117	6121.2190	0.4724	-1.183	6196.0721	0.8274	-1.692
6094.2178	0.5425	-1.271	6121.2268	0.4958	-1.112	6196.0904	0.8823	-1.627
6094.2277	0.5722	-1.418	6121.2328	0.5138	-1.111	6196.0978	0.9044	-1.516
6094.2371	0.6004	-1.561	6121.2445	0.5488	-1.252	6196.1076	0.9338	-1.336
6094.2467	0.6291	-1.646	6121.2459	0.5530	-1.344	6196.1282	0.9956	-1.033
6094.2567	0.6591	-1.699	6121.2536	0.5761	-1.473	6196.1373	0.0228	-1.049
6094.2669	0.6897	-1.776	6121.2614	0.5995	-1.554	6196.1463	0.0498	-1.301
6094.2797	0.7280	-1.794	6121.2695	0.6238	-1.615	6196.1554	0.0771	-1.470
6094.2937	0.7700	-1.785	6121.2752	0.6409	-1.668	6196.1654	0.1071	-1.617
6121.1382	0.2302	-1.796	6121.2834	0.6654	-1.700	6196.1728	0.1292	-1.689
6121.1618	0.3010	-1.768	6121.2896	0.6840	-1.743	6196.1806	0.1526	-1.741
6121.1702	0.3261	-1.745	6121.2972	0.7068	-1.763			
6121.1778	0.3489	-1.712	6121.3028	0.7236	-1.785			
<b>청색 관측</b>								
5814.0314	0.7480	-1.413	5814.1734	0.1736	-1.367	6094.2806	0.7307	-1.423
5814.0330	0.7528	-1.420	5814.1797	0.1925	-1.373	6094.2924	0.7661	-1.401
5814.0390	0.7708	-1.404	5814.1810	0.1964	-1.379	6094.2946	0.7727	-1.399
5814.0402	0.7744	-1.417	5814.1856	0.2102	-1.413	6121.1374	0.2278	-1.416
5814.0463	0.7927	-1.392	5814.1872	0.2150	-1.410	6121.1396	0.2344	-1.410
5814.0477	0.7969	-1.382	5814.1935	0.2339	-1.430	6121.1592	0.2932	-1.405
5814.0526	0.8116	-1.368	5814.1950	0.2384	-1.423	6121.1689	0.3223	-1.380
5814.0542	0.8164	-1.373	5814.2001	0.2537	-1.446	6121.1772	0.3471	-1.350
5814.0625	0.8413	-1.351	5814.2014	0.2576	-1.456	6121.1862	0.3741	-1.296
5814.0640	0.8457	-1.339	5814.2079	0.2771	-1.447	6121.1920	0.3915	-1.250
5814.0695	0.8622	-1.297	5814.2103	0.2842	-1.430	6121.1996	0.4143	-1.163
5814.0713	0.8676	-1.294	5814.2148	0.2977	-1.445	6121.2049	0.4302	-1.089
5814.0773	0.8856	-1.248	5814.2165	0.3028	-1.428	6121.2123	0.4523	-0.945
5814.0790	0.8907	-1.237	5814.2186	0.3091	-1.425	6121.2182	0.4700	-0.838
5814.0840	0.9057	-1.167	5814.2223	0.3202	-1.409	6121.2261	0.4937	-0.773
5814.0858	0.9111	-1.144	5814.2240	0.3253	-1.401	6121.2319	0.5111	-0.778
5814.0935	0.9342	-1.005	6094.1551	0.3546	-1.325	6121.2400	0.5354	-0.880
5814.0957	0.9408	-0.973	6094.1669	0.3900	-1.238	6121.2451	0.5506	-0.967
5814.1005	0.9551	-0.878	6094.1688	0.3956	-1.220	6121.2525	0.5728	-1.090
5814.1023	0.9605	-0.836	6094.1798	0.4286	-1.088	6121.2605	0.5968	-1.187
5814.1040	0.9656	-0.801	6094.1814	0.4334	-1.067	6121.2687	0.6214	-1.259
5814.1086	0.9794	-0.712	6094.1887	0.4553	-0.937	6121.2743	0.6382	-1.304
5814.1100	0.9836	-0.716	6094.1903	0.4601	-0.900	6121.2826	0.6630	-1.333
5814.1157	0.0007	-0.711	6094.1980	0.4832	-0.772	6121.2887	0.6813	-1.368
5814.1170	0.0046	-0.713	6094.1997	0.4883	-0.764	6121.2963	0.7041	-1.393
5814.1220	0.0196	-0.688	6094.2071	0.5104	-0.762	6121.3020	0.7212	-1.400
5814.1234	0.0238	-0.707	6094.2089	0.5158	-0.776	6121.3076	0.7380	-1.412
5814.1280	0.0376	-0.764	6094.2170	0.5401	-0.902	6121.3113	0.7491	-1.417
5814.1298	0.0430	-0.821	6094.2186	0.5449	-0.931	6195.9924	0.5885	-1.133
5814.1370	0.0645	-0.982	6094.2269	0.5698	-1.053	6196.0896	0.8799	-1.241

표 1. (계속)

HJD (2440000+)	phase	$\Delta m$	HJD (2440000+)	phase	$\Delta m$	HJD (2440000+)	phase	$\Delta m$
5814.1385	0.0690	-1.011	6094.2286	0.5749	-1.090	6196.0978	0.9044	-1.137
5814.1440	0.0855	-1.112	6094.2363	0.5980	-1.196	6196.1076	0.9338	-0.955
5814.1454	0.0897	-1.128	6094.2380	0.6031	-1.213	6196.1282	0.9956	-0.696
5814.1513	0.1074	-1.195	6094.2460	0.6270	-1.270	6196.1373	0.0228	-0.733
5814.1527	0.1116	-1.214	6094.2476	0.6318	-1.291	6196.1463	0.0498	-0.919
5814.1572	0.1251	-1.270	6094.2558	0.6564	-1.337	6196.1554	0.0771	-1.102
5814.1587	0.1296	-1.284	6094.2575	0.6615	-1.340	6196.1642	0.1035	-1.235
5814.1652	0.1491	-1.307	6094.2660	0.6870	-1.383	6196.1723	0.1277	-1.294
5814.1670	0.1545	-1.317	6094.2677	0.6921	-1.395	6196.1796	0.1496	-1.330
5814.1720	0.1695	-1.353	6094.2764	0.7182	-1.418			
<b>황색 관측</b>								
5814.0307	0.7459	-1.177	5814.1790	0.1904	-1.149	6094.2957	0.7760	-1.163
5814.0323	0.7507	-1.180	5814.1803	0.1943	-1.160	6121.1368	0.2260	-1.182
5814.0396	0.7726	-1.175	5814.1865	0.2129	-1.173	6121.1409	0.2383	-1.178
5814.0410	0.7768	-1.181	5814.1880	0.2174	-1.181	6121.1514	0.2698	-1.184
5814.0457	0.7909	-1.173	5814.1927	0.2315	-1.187	6121.1763	0.3444	-1.114
5814.0470	0.7948	-1.161	5814.1943	0.2363	-1.180	6121.1855	0.3720	-1.064
5814.0534	0.8140	-1.148	5814.2007	0.2555	-1.208	6121.1912	0.3891	-1.026
5814.0551	0.8191	-1.148	5814.2022	0.2600	-1.206	6121.1990	0.4125	-0.947
5814.0616	0.8386	-1.121	5814.2072	0.2750	-1.219	6121.2042	0.4281	-0.879
5814.0633	0.8436	-1.111	5814.2085	0.2789	-1.209	6121.2120	0.4514	-0.757
5814.0705	0.8652	-1.078	5814.2159	0.3010	-1.209	6121.2175	0.4679	-0.649
5814.0721	0.8700	-1.064	5814.2178	0.3067	-1.204	6121.2253	0.4913	-0.567
5814.0766	0.8835	-1.029	5814.2229	0.3220	-1.184	6121.2312	0.5090	-0.567
5814.0780	0.8877	-1.013	5814.2246	0.3271	-1.193	6121.2391	0.5327	-0.652
5814.0849	0.9084	-0.932	6094.1543	0.3522	-1.105	6121.2443	0.5482	-0.735
5814.0867	0.9138	-0.909	6094.1661	0.3876	-1.027	6121.2520	0.5713	-0.863
5814.0926	0.9315	-0.810	6094.1697	0.3983	-0.992	6121.2596	0.5941	-0.956
5814.0947	0.9378	-0.783	6094.1790	0.4262	-0.878	6121.2679	0.6190	-1.023
5814.1013	0.9575	-0.646	6094.1821	0.4355	-0.833	6121.2736	0.6361	-1.058
5814.1032	0.9632	-0.607	6094.1880	0.4532	-0.722	6121.2837	0.6663	-1.100
5814.1093	0.9815	-0.503	6094.1910	0.4622	-0.661	6121.2879	0.6789	-1.132
5814.1106	0.9854	-0.508	6094.1971	0.4805	-0.574	6121.2955	0.7017	-1.157
5814.1150	0.9986	-0.502	6094.2005	0.4907	-0.555	6121.3014	0.7194	-1.169
5814.1163	0.0025	-0.499	6094.2061	0.5074	-0.563	6121.3071	0.7365	-1.178
5814.1227	0.0217	-0.511	6094.2098	0.5185	-0.579	6121.3107	0.7473	-1.179
5814.1240	0.0256	-0.519	6094.2163	0.5380	-0.671	6195.9916	0.5861	-0.908
5814.1289	0.0403	-0.607	6094.2194	0.5473	-0.727	6196.0098	0.6407	-1.055
5814.1306	0.0454	-0.641	6094.2262	0.5677	-0.819	6196.0888	0.8775	-1.023
5814.1363	0.0625	-0.759	6094.2294	0.5773	-0.889	6196.0978	0.9044	-0.929
5814.1377	0.0666	-0.787	6094.2355	0.5956	-0.973	6196.1076	0.9338	-0.776
5814.1447	0.0876	-0.899	6094.2388	0.6055	-0.994	6196.1174	0.9632	-0.576
5814.1462	0.0921	-0.917	6094.2452	0.6246	-1.035	6196.1282	0.9956	-0.503
5814.1506	0.1053	-0.967	6094.2484	0.6342	-1.069	6196.1373	0.0228	-0.529
5814.1523	0.1104	-0.978	6094.2549	0.6537	-1.100	6196.1463	0.0498	-0.704
5814.1580	0.1275	-1.046	6094.2583	0.6639	-1.111	6196.1554	0.0771	-0.875
5814.1595	0.1320	-1.063	6094.2652	0.6846	-1.147	6196.1632	0.1005	-0.993
5814.1645	0.1470	-1.087	6094.2685	0.6945	-1.175	6196.1714	0.1250	-1.074
5814.1661	0.1518	-1.079	6094.2756	0.7158	-1.183	6196.1789	0.1475	-1.122
5814.1728	0.1719	-1.139	6094.2815	0.7334	-1.175			
5814.1741	0.1757	-1.136	6094.2914	0.7631	-1.166			

W UMa의 밝기와 비교하기 위하여 선택한 비교성 (comparison star)과 비교성의 밝기를 점검하기 위한 점검성 (check star)은 각각 BD+59°1399 ( $m_v=8.7$ , sp=K0)와 BD+56°1398 ( $m_v=9.3$ , sp=K2)으로 여러 사람 (Blitzstein & Chou 1964, Blitzstein 1966, Binnendijk 1966)들이 사용하여 변광이 없는 것으로 알려진 별들이다. 관측기간 동안 총 289점 (황색: 118점, 청색: 119점, 자외선: 52점)을 얻었다. 표 1에 이 관측점들을 수록하였다. 이 표의 두 번째 열에 수록된 각 관측점의 위상은 Kreiner et al. (2001)의 database에서 1980년과 1990년 사이의 극심시각을 이용하여 새로 정한 광도요소 ( $\text{Min. I} = \text{HJD } 2435918.4459 + 0.33363687 E$ )로 계산한 것이다. 그림 1은 우리가 얻은 광도곡선을 나타낸다. 그림 1에서 보듯이 광도곡선에 비대칭이 있음이 뚜렷하고, Max I이 Max II보다 황색에서 약 0.02등급, 청색에서 약 0.03등급 더 밝다.

우리의 관측으로부터 총 11개의 극심시각을 Kwee & van Woerden (1956) 방법을 사용하여 표 2에 수록한 바와 같이 결정하였다.

### 3. 광도곡선 분석

그림 1에 보인 광도곡선 중 청색과 황색 광도곡선을 WD (Wilson & Devinney 1971, Wilson 1993) 쌍성 모델을 이용하여 분석하였다. 자외선 광도곡선을 분석에서 제외한 것은 이 파장 영역의 관측점이 청색과 황색에 비해 반배 정도 작기 때문이다. 분석은 두 단계를 거쳤다. 첫 번째 단계에서 두 성분별 표면에 항성 혹점을 고려하지 않고, 관측에 가장 잘 맞는 기하학적, 물리적 인자 (시스템 인자라 약함)를 구한 다음, 둘째 단계에서 항성 혹점을 가정한 후 시스템 인자와 항성 혹점을 묘사하는 인자를 구하였다. 혹점을 고려한 이유는 우리의 광도곡선이 Max I과 Max II에서 일치하지 않고 Max II의 밝기가 Max I보다 작기 때문이다. 따라서, Max II의 밝기를 작게 하려면, 0.75위상에 있을 때 보이는 주성이나 반성 표면 위에 표면 온도보다 온도가 작은 혹점을 놓으면 되겠다. Mullan (1975)은 W형 광도곡선을 보이는 별은 반성에 혹점이 있을 가능성이 더 높다는 것을 보였다. 이 논문에서는 반성에만 혹점을 있을 경우와 반대로 주성에만 있을 경우를 분리하여 혹점인자를 구하였다. 그 결과에 대해서는 후에 논의할 것이다.

WD 모델은 근접쌍성의 로슈 기하의 형태에 따라 모두 8가지 mode를 제공한다. 이 논문에서는 W UMa의 로슈 기하 형태가 과접촉형이므로 WD 모델의 mode 3을 사용하였다. 시스템 인자로서 주연 감광계수는 van Hamme (1993)가 제시한 비선형 상용대수 법칙 (logarithmic law)에 의거한 이론적인 값을 사용하여 고정시켰고, 중력감광계수와 반사계수는 Lucy (1967)의 모델에 따라 두 성분별 모두 각각 0.32와 0.5로 고정시켰다. 또한, 반성의 온도는 Linnell (1991a)이 구한 5875K로 고정시켰다. 따라서, Mode 3에서 조종할 수 있는 인자는 총 6개로, 궤도경사각  $i$ , 질량비  $q$  ( $= m_2/m_1$ ), 주성의 온도  $T_1$ , 무차원 포텐셜  $\Omega$  ( $\Omega_1 = \Omega_2$ ), 주성의 상대 밝기  $l_1$ , 그리고 제3광도 (third light)  $l_3$ 이다. 여기서, 각 인자의 첨자 1과 2는 각각 주성과 반성을 나타낸다. 또한,  $l_3$ 를 포함시킨 것은 우리의 관측에서 ADS 7494B의 광도가 포함되었기 때문에 이를 고려한 것이다.

조정인자들 중  $i$  와  $q$ 는 상호 매우 연관되어 있어 해의 수렴에 영향을 끼치기 때문에 이러한 효과를 피하기 위하여 서로 연관이 없는 부그룹 (subset) 인자들을 모아 부그룹 인자들을 순차적으로 조정하는 방법을 택하였다 (Wilson & Biermann 1976). 즉, A ( $i, T_1, \Omega$ )와 B ( $l_1, q, l_3$ )으로 A와 B의 두 부그룹으로 나눈 뒤 이 두 그룹을 A-B-A-B 등으로 조정하는 방식을 취하였다. 이 과정을 인자들의

표 2. W UMa의 관측된 극심시각.

극심시각 (JD Hel 2440000+)	필터	형태	중량 평균치 (JD Hel 2440000+)
5814.1161	y	I	5814.1161
±1			±1
.1161	b	I	
±2			
6094.2033	u	II	6094.2036
±6			±3
.2035	y	II	
±2			
.2037	b	II	
±2			
6121.2281	b	II	6121.2283
±2			±2
.2282	u	II	
±3			
.2285	y	II	
±2			
6196.1283	b	I	6196.1286
±5			±6
.1286	u	I	
±10			
.1287	y	I	
±4			

확률오차가 그 수정량보다 커질 때까지 반복하였다. 첫 번째 단계에서 시스템 인자가 구해지면, 앞에서 언급한 두 번째 단계에서 항성 흑점 인자를 구하였다. 항성 흑점 인자의 조정을 위하여 처음에는 A와 B의 두 그룹에 항성 흑점 인자인 흑점의 경도 ( $\lambda$ ), 위도 ( $\phi$ ), 반경 ( $S_r$ ), 항성 흑점과 항성 표면 온도의 비 ( $S_T$ )를 적절히 첨가하여 흑점인자와 시스템 인자를 구하려 하였으나, 인자들이 상호 강하게 연관되어 있어 반복 계산할 때마다 발산하였다. 따라서, 먼저 시스템 인자를 고정시킨 후, 흑점 인자들을 개별적으로 구하는 방식을 취하였다. 그렇게 하여 일관성 있는 흑점인자가 산출되면, 이번에는 흑점인자를 고정시킨 후 A와 B의 시스템 인자를 개선하는 방식을 취하였다. 앞에서와 마찬가지로 이 과정을 인자들의 확률오차가 그 수정량보다 커질 때까지 반복하였다.

WD 프로그램은 DC (differential correction)와 LC (light curve) 프로그램으로 나뉘어 있다. LC는 식쌍성계의 제 인자들이 주어졌을 때 이론적인 광도곡선을 생성하는 프로그램이며, DC는 그 역 과정으로 관측으로부터 제 조정인자들을 구하는 프로그램이다. 우리는 LC와 DC 두 프로그램을 통합하였고, DC로부터 조정인자들을 구할 때, 조정인자의 수정량이 그 인자의 확률오차보다 커질 때 까지 반복 계산을 하도록 WD code를 수정함과 동시에, 매 번 반복 계산한 후 그 계산 결과와 LC를 이용하여 관측과 이론치가 컴퓨터 화면에 그림으로 나타나도록 하여 분석자가 해가 수렴, 진동, 또는 발산하는지를 볼 수 있도록 하였다. 이와 같이 수정한 WD code로 위에 언급한 절차에 따라 W UMa의 해를 구하였고, 그 결과를 표 3에 수록하였다. 또한, 이 해를 이용하여 산출한 이론적인 광도곡선을 관측점과 함께 그림 2에 그렸다. 그림 2에서 실선과 파선은 흑점을 고려하였을 경우와 그렇지 않을 경우의 이론적인 광도곡선을 나타낸다. 그림 3은 표 3의 인자들을 이용하여 그린 W UMa의

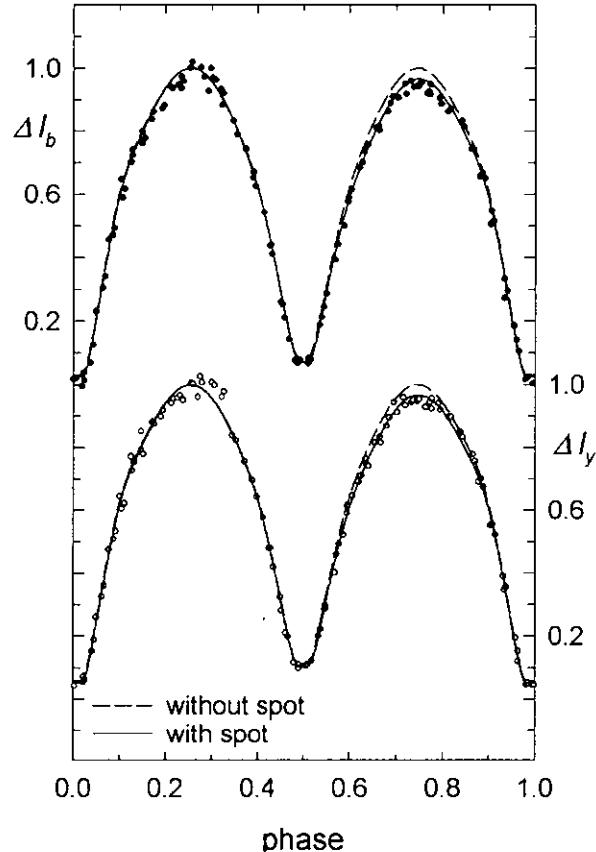


그림 2. W UMa의 청, 황색 광도곡선. 실선과 파선은 항성흑점을 고려하였을 경우와 그렇지 않을 경우의 이론적인 광도곡선을 각각 나타낸다.

로 쉬모형이다.

#### 4. 논 의

표 3에 수록하였듯이 우리가 얻은 질량비 2.12는 이전의 학자들이 구한 측광학적 질량비가 약 2.2 ~ 2.5에 분포되어 있는 것에 비해 작은 편이나, 분광관측으로 구한 Rucinski et al. (1993)의 2.02에 근접하고 있다. 또한, 궤도경사각  $i = 87^\circ.6$ 도 이전의 학자들이 구한 값들에 비해 약  $3^\circ \sim 5^\circ$  높은 값으로 산출되었으나, 가장 최근의 Linnell (1991a)이 구한  $86^\circ.0$ 와 근접하다. 우리의 값이 다소 큰 것은 Linnell도 지적하였듯이 이전의 학자들이 고려하지 않은 제3광도를 고려하였기 때문으로 판단된다. fill-out 인자  $f$ 는  $(\Omega_{in} - \Omega)/(\Omega_{in} - \Omega_{out})$ 으로 정의된다. 여기서,  $\Omega_{in}$ ,  $\Omega_{out}$ , 그리고  $\Omega$ 는 각각 내부, 외부, 그리고 별표면의 로쉬 등포텐셜 값이다. 이 값은 학자들간에 상당한 차이가 있는데, 우리의 값은 약 24%의 높은 과접촉을 나타내지만 Linnell (1991a)과 Eaton (1986)은 약 10%로 다소 낮게 산

표 3. W UMa의 측광학적 해.

변수	흑점 미고려		흑점 고려	
$q (= m_2/m_1)$	2.089 (6)		2.121 (5)	
$i (^{\circ})$	87.3 (5)		87.6 (5)	
$\Omega_1 = \Omega_2$	5.249 (6)		5.276 (5)	
fill-out factor	0.214		0.243	
	주성	반성	주성	반성
$T (K)$	6175 (2)	5875 <sup>a</sup>	6194 (6)	5875 <sup>a</sup>
$A$	0.5 <sup>a</sup>	0.5 <sup>a</sup>	0.5 <sup>a</sup>	0.5 <sup>a</sup>
$g$	0.32 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>
$X$	0.646 <sup>a</sup>	0.648 <sup>a</sup>	0.646 <sup>a</sup>	0.648 <sup>a</sup>
$Y$	0.225 <sup>a</sup>	0.214 <sup>a</sup>	0.225 <sup>a</sup>	0.214 <sup>a</sup>
$x_b$	0.798 <sup>a</sup>	0.795 <sup>a</sup>	0.798 <sup>a</sup>	0.795 <sup>a</sup>
$x_y$	0.760 <sup>a</sup>	0.776 <sup>a</sup>	0.760 <sup>a</sup>	0.776 <sup>a</sup>
$y_b$	0.088 <sup>a</sup>	0.062 <sup>a</sup>	0.088 <sup>a</sup>	0.062 <sup>a</sup>
$y_y$	0.257 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>	0.257 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>
$l/(l_1 + l_2 + l_3)_b$	0.380(6)	0.572	0.382 (6)	0.571
$l/(l_1 + l_2 + l_3)_y$	0.372(6)	0.574	0.372 (22)	0.575
$l_3/(l_1 + l_2 + l_3)_b$	0.048 (3)		0.048 (2)	
$l_3/(l_1 + l_2 + l_3)_y$	0.053 (3)		0.053 (4)	
$r$ (pole)	0.3075 (6)	0.4286 (5)	0.3078 (1)	0.4313 (1)
$r$ (side)	0.3226 (7)	0.4581 (7)	0.3231 (1)	0.4615 (1)
$r$ (back)	0.3631 (12)	0.4903 (10)	0.3650 (1)	0.4942 (1)
$\bar{r}$	0.3310 (8)	0.4590 (7)	0.3324 (1)	0.4627 (1)
spot				
longitude ( $^{\circ}$ )	-	-	116 (4)	289 (3)
latitude ( $^{\circ}$ )	-	-	144 (6)	147 (1)
radius ( $^{\circ}$ )	-	-	22.9 (0.2)	24.0 (7)
$T_{spot}/T_{local}$	-	-	0.756 (30)	0.870(9)
$\sum W(O - C)^2$	0.0048		0.0039	0.0039

<sup>a</sup> : 고정 인자

출하였다.

흑점을 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우의 시스템 인자들은 거의 비슷하게 산출되었다. 이는 흑점이 0.75위상 부근에서 이론적인 광도곡선을 낮추는 구실만을 하였음을 의미한다 (그림 2 참조). 또한, 반성에 흑점이 있을 경우와 반대로 주성에 있을 경우 각각에 대한  $\sum W(O - C)^2$  값이 같고, 각각의 경우 모두 광도곡선을 잘 맞추고 있다. 이는 청색과 황색 광도곡선의 해만으로는 흑점이 어느 성분별에 있는지를 가려 낼 수가 없음을 의미한다. 그럼에도 불구하고 이 논문에서 반성의 흑점을 더 선호하는 이유는 반성은 질량이  $1.22 M_{\odot}$ 이고 주성은  $0.55 M_{\odot}$ 로 반성의 대류층이 더 깊이 발달되어 있을 것이기 때문이다 (Mullan 1975). 또한, W형 광도곡선을 생성하기 위해서는 서론에서 언급하였듯이, 주성의 온도가 반성의 온도보다 높아야 하며 (W UMa인 경우  $\Delta T \sim 300K$ ), 큰 중력 감광 계수 ( $g = 0.32$ )를 보완적으로 사용하는 것이 타당한 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고, 중력 감광 계수 값에 대한 여러 논의가 일반적인 일치까지 아직 도달하지 않았다는 것을 지적하고 싶다. 즉, W UMa형 별의 대류대기에 대한 이론적인 계산 값을 Lucy (1967), Sarna (1989), 그리고 Alencar & Vaz (1997)는 0.32로 준 반면, Anderson & Shu (1977)은 0.0으로 계산하였다. 관측적으로, 그 값은 0.12에서 1.36까지 다양하다 (Pantazis & Niarchos 1998).

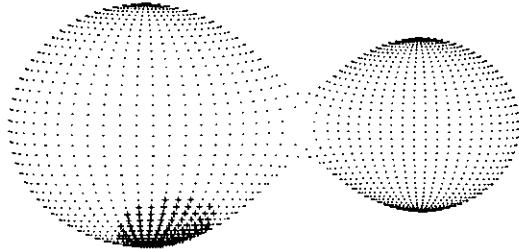


그림 3. 0.75 위상에서 W UMa의 로쉬모형. 약 24%의 높은 과접촉을 보인다. + 기호로 표시된 부분은 반성 표면위의 항성 혹점을 나타낸다.

표 4. 안시쌍성 ADS7494A, B와  $l_3$ 의 광도비.

필터	ADS 7494A*	ADS 7494B*	$l_B/l_A$	$l_3/l_A$	$l_3/l_B$
blue	$8^m.54$	$14^m.05$	0.006	0.050	8.3
yellow	$7^m.96$	$12^m.35$	0.018	0.056	3.1

\*: SIMBAD 자료.

우리가 구한 해에서 특기할 만한 인자는 전체광도의 약 5%에 해당하는 제3광도  $l_3$ 이다.  $l_3$ 를 고려한 이유는, 우리의 광도곡선에 안시쌍성 ADS 7494의 밝은 성분 (A)인 W UMa의 전체 광도 ( $l_A$ )뿐 아니라 어두운 성분 B의 광도 ( $l_B$ )도 포함되었기 때문이다. SIMBAD 자료에서 추출한 이 두 천체의 측광자료와 표 3에 제시한 W UMa의  $l_3$  광도를 이용하여, 우리가 구한  $l_3$ 와  $l_B$ 의 비를 표 4와 같이 구하였다. 이 표에서 보듯이, B와 V과장영역에서  $l_3$ 는  $l_B$ 보다 각각 약 8배 및 3배정도 더 크다. 제3광도가 우리가 구한 그 양만큼 W UMa 계에 존재하는 것이 맞는다면, 이는 이제에 또 다른 제3천체가 있는 것을 암시한다. 그런데, 많은 학자들이 공전주기 변화와 시선속도의 요동으로부터 W UMa계에 보이지 않는 제3천체가 있음을 주장하였다 (Woodward 1942, Kwee 1956, Brown & Pinnington 1969, Cester 1969, Rigterink 1972, Woerden & Whelan 1973, Whelan et al. 1974). 이를 감안하면, 우리가 구한 제3광도는 제3천체의 광도일 수 있다.

결론적으로 W UMa는 수많은 관측과 연구가 있어 왔음에도 불구하고 시스템 인자들에 대한 일관적인 일치가 아직 도달하지 못하였음을 본다. 이것은 W UMa가 매우 복잡한 계임을 시사한다. 질량비, 궤도경사각, 혹점, 제3광도 등에 대한 정보가 특히 그렇다. 더 정밀한 관측과 세심한 분석이 요구된다.

**감사의 글:** 이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 완성되었습니다(KRF-00-DP0443). 아울러 이 연구는 프랑스의 Strasbourg의 CDS에서 운용하는 SIMBAD database를 이용하였음을 밝힙니다. 1984년과 1985년에 관측에 도움을 준 소백산 천문대 관계자들께도 감사 드립니다.

### 참고문헌

- Alencar, S. H. P., & Vaz, L. P. R. 1997, A&A, 326, 257  
 Anderson, L., & Shu, F. H. 1977, ApJ, 214, 798  
 Binnendijk, L. 1966, AJ, 71, 340  
 Binnendijk, L. 1970, Vistas Astr., 12, 217  
 Binnendijk, L. 1977, Vistas Astr., 21, 359  
 Blitzstein, W. 1966, AJ, 71, 340  
 Blitzstein, W., & Chou, K. C. 1964, AJ, 69, 365  
 Brown, B. M. K., & Pinnington, E. H. 1969, AJ, 74, 538  
 Breinhorst, R. A. 1971, A & ASS, 10, 411  
 Cester, B. 1969, Oss. Astr. Trieste, No.404  
 Cruddace, R. G., & Dupree, A. K. 1984, ApJ, 277, 263  
 Depasquale, J. M., Bochanski, J. J., & Guinan, E. F. 1999, IBVS 4752  
 Eaton, J. A. 1986, AcA, 36, 79  
 Kreiner, J. M., Kim, C.-H., & Nha, I.-S. 2001, An Atlas of (O-C) Diagrams of Eclipsing Binary Stars (Krakow: Press of Pedagogical Univ.)  
 Kuiper, G. P. 1941, ApJ, 93, 133  
 Kwee, K. K. 1956, BAN, 12, 330  
 Kwee, K. K., & van Woerden, H. 1956, BAN, 12, 327  
 Linnell, A. P. 1985, ApJS, 57, 611  
 Linnell, A. P. 1987, ApJ, 316, 389  
 Linnell, A. P. 1991a, ApJ, 374, 307  
 Linnell, A. P. 1991b, ApJ, 379, 338  
 Linnell, A. P. 1991c, ApJ, 383, 330  
 Liu, Q., Yang, Y., Gu, C., & Wang, B. 1993, A&AS, 101, 53  
 Lucy, L. B. 1967, Zeit. f. Astrophys. 65, 89  
 Lucy, L. B. 1968a, ApJ, 151, 1123  
 Lucy, L. B. 1968b, ApJ, 153, 877  
 Mullan, B. J. 1975, ApJ, 198, 563  
 Muller, G., & Kempf, P. 1903, ApJ, 17, 201  
 Pantazis, G., & Niarchos, P. G. 1998, A&A, 335, 199  
 Rigterink, P. V. 1972, AJ, 77, 230  
 Rucinski, S. M. 1973, AcA, 23, 74  
 Rucinski, S. M. 1974, AcA, 24, 119  
 Rucinski, S. M., Lu, W.-X., & Shi, J. 1993, AJ, 106, 1174  
 Sarna, M. J. 1989, A&A, 224, 98  
 Van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 2096

- Vilhu, O. & Heise, J. 1986, ApJ, 311, 937  
Whelan, J., Mochnacki, S. W., & Woerden, S. P. 1974, MNRAS, 168, 31  
Wilson, R. E. 1993, private communication  
Wilson, R. E., & Biermann, P. 1976, A&A, 48, 349  
Wilson, R. E., & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605  
Woerden, S. P., & Whelan, J. 1973, MNRAS, 163, 391  
Woodward, E. J. 1942, Harv. Circ., No.46