

소마젤란 은하에 있는 식쌍성의 광도곡선 분석

강영운

세종대학교 천문우주학과
세종대학교 우주구조와 진화연구센터

Light Curve Analyses of the Eclipsing Binaries in the Small Magellan Cloud

Young-Woon Kang

Dept. of Astronomy and Space Science, and Astrophysical Research Center
for the Structure and Evolution of the Cosmos (ARCSEC), Sejong University, Seoul 143-747, Korea
E-mail: kangyw@sejong.ac.kr

(Received May 25, 2008; Accepted May 29, 2008)

요 약

EROS, MACHO, OGLE 등 대규모 탐사관측으로 외부은하에서 식쌍성의 발견은 물론 식쌍성의 광도곡선이 대량으로 발표되고 있다. 식쌍성의 광도곡선은 별의 물리양에 대한 정보를 제공하므로 대량으로 발표된 식쌍성의 광도곡선은 항성천문학 연구에 매우 유용한 자료가 될 것이다. 그러나 식쌍성의 광도곡선을 분석하는 작업은 많은 시간을 요한다. 이에 시간을 단축하여 광도곡선을 분석하는 방법을 제시하고, 소마젤란 은하에 있는 식쌍성중에서 측광학적으로 질량비를 유일하게 결정할 수 있는 20개의 식쌍성을 표본으로 선정하여 측광학적인 해를 구하였다.

Abstract

Large survey observations such as the EROS, the MACHO and the OGLE projects have discovered a large number of eclipsing binaries in the extra galaxies and published their light curves. The light curves of the eclipsing binaries provide fundamental stellar parameters so that accumulation of the light curves will be very useful for the research of the stellar astronomy. However it requires a lot of time to analyze the light curves. Therefore we developed new method to analyze the large number of light curves in the relatively short time period and found the photometric solution by analyzing the light curves of 20 eclipsing binaries, whose mass ratio can be determined by photometric method, in the Small Magellan Cloud.

Keywords: eclipsing binaries, SMC, data analysis

1. 서 론

식쌍성의 발견은 1990년까지만 하여도 우리은하에서 약 4000여개가 발견되었고, 외부은하에서는 마젤란 은하와 안드로메다 은하에서 약 200여개가 발견되었을 뿐이었다(Guinan 1993). 그러나 1990년 중반부터 중력렌즈를 이용한 대규모 암흑물질 탐사관측(EROS project: Grison et al. 1995,

표 1. 선택된 SMC 식쌍성의 등급, 색지수 그리고 온도.

Star ID	주기 (day)	JD2450000+	<i>I</i>	<i>V</i>	<i>B</i>	<i>V - I</i>	<i>B - V</i>	$(B - V)_0$	T(K)	log (T)
SC6 152981	2.00334	465.33395	15.77	15.67	15.44	-0.10	-0.23	-0.37	73073	4.8638
SC6 061502	1.82176	464.70016	16.81	16.72	16.61	-0.09	-0.11	-0.25	22695	4.3559
SC6 162962	5.95354	460.9626	15.82	15.83	15.75	0.01	-0.08	-0.22	18853	4.2754
SC6 291695	4.72711	462.97964	16.26	16.27	16.25	0.01	-0.02	-0.16	14202	4.1524
SC5 316901	1.53039	465.4603	17.39	17.38	17.27	-0.01	-0.11	-0.25	22695	4.3559
SC6 291756	2.96274	465.12135	16.76	16.79	16.74	0.03	-0.05	-0.19	16512	4.2082
SC5 311526	1.19109	465.61627	16.42	16.38	16.25	-0.04	-0.13	-0.27	26194	4.4182
SC6 296901	1.22998	464.66016	16.86	16.82	16.82	-0.04	0.00	-0.14	13196	4.1205
SC6 142123	1.08819	466.78273	18.15	18.16	18.12	0.01	-0.04	-0.18	15433	4.1885
SC6 081662	2.69876	466.00656	15.86	15.86	15.82	0.00	-0.04	-0.18	15433	4.1885
SC6 061653	0.83629	466.2294	16.77	16.7	16.57	-0.07	-0.13	-0.27	26194	4.4182
SC6 306607	1.17552	467.09753	17.19	17.17	17.07	-0.02	-0.10	-0.24	21255	4.3275
SC5 300549	1.33167	465.21402	15.86	15.76	15.61	-0.10	-0.15	-0.29	30776	4.4882
SC5 305884	2.17648	465.10621	14.15	14.01	13.78	-0.14	-0.23	-0.37	73073	4.8638
SC5 300777	0.90584	465.79753	17.37	17.46	17.45	0.09	-0.01	-0.15	13674	4.1359
SC6 158118	2.57831	464.81118	15.07	14.97	14.87	-0.10	-0.10	-0.24	21255	4.3275
SC6 296738	3.03013	463.17556	16.39	16.45	16.37	0.06	-0.08	-0.22	18854	4.2754
SC6 141994	2.30328	464.13989	17.48	17.59	17.45	0.11	-0.14	-0.28	28326	4.4522
SC6 221708	1.31194	465.09359	16.72	16.67	16.47	-0.05	-0.20	-0.34	50456	4.7029
SC6 232282	2.55615	466.44299	16.22	16.16	16.07	-0.06	-0.09	-0.23	19982	4.3007

MACHO project: Alcock et al. 1997, and the OGLE project: Wyrzykowski et al. 2003)이 수행되면서 외부은하에서 약 9000여개 이상의 식쌍성이 발견되었다.

탐사 초기에 발견된 식쌍성들의 광도곡선은 관측오차가 약 0.1등급까지에 이르는 스캐터가 많은 광도곡선이 발표되었다. 그러나 최근에 발표되는 광도곡선은 관측 오차가 현저하게 감소되어 광도곡선을 분석하여 측광학적인 해를 구하는데 충분하다고 판단된다. 탐사관측에서 발표되는 광도곡선은 많은 수의 광도곡선이 발표되므로 기존의 방법으로 광도곡선을 분석할 경우 너무 많은 시간을 요하기 때문에 새로운 기법의 분석방법이 요구되고 있다.

이 논문에서는 OGLE 프로젝트 팀이 관측을 수행한 소마젤란 은하의 식쌍성을 연구 대상으로 정하고 그 중에서 측광학적으로 질량비를 유일하게 결정할 수 있는 20개의 광도곡선을 표본으로 선정하여 새로 개발한 분석 방법을 이용하여 측광학적인 해를 구하였다.

2. 광도곡선의 선정

OGLE 팀은 1997년부터 2000년까지 소마젤란 은하 지역을 11개 영역으로 나누어 측광관측을 수행하였다. 측광에 사용된 필터는 *I*, *B*, *V*를 사용하였으나 광도곡선을 완성하는데는 *I* 필터를 사용하고 *B*와 *V* 필터는 최대 밝기로 추정되는 시점에서만 관측을 수행하여 쌍성계의 색지수를 산출하는데 사용하였다. 관측 기간동안에 *I* 필터로 관측한 관측점 수는 각 쌍성계마다 약 270점이 된다. 이와 같은 방법으로 관측이 수행된 식쌍성의 수는 약 1300여개이다. 이 논문에서는 SC5와 SC6 지역에서 표본으로 20개의 별을 선정하였고 표본으로 선정된 쌍성에 대한 정보로 표 1에 별의 번호, 공전궤도 주

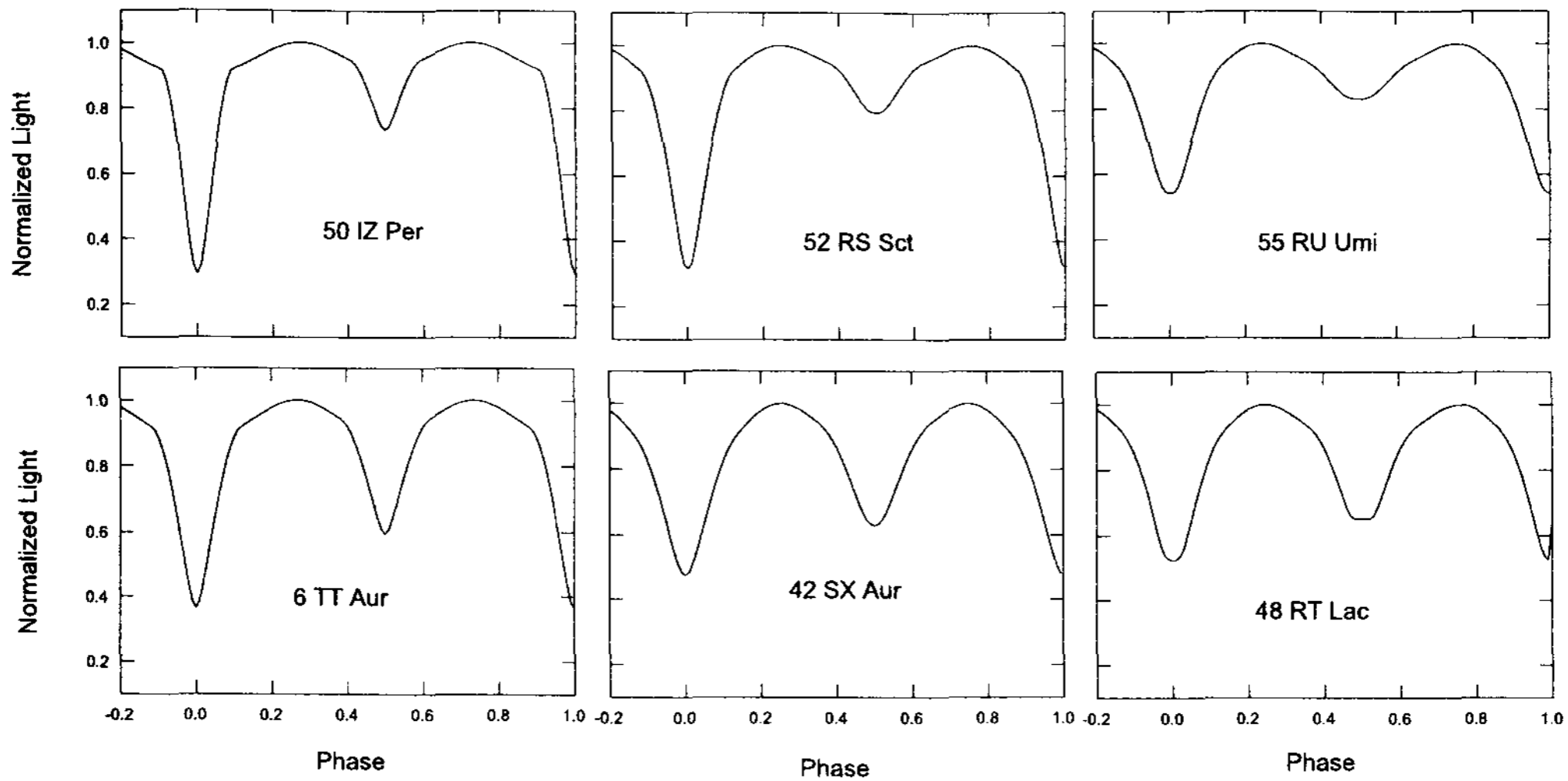


그림 1. 표준식쌍성으로 선정된 6개의 식쌍성의 이론적인 광도곡선. 표준식쌍성은 두 성분별의 시선속도곡선과 다파장 광도곡선으로 측광 및 분광학적인 해를 구한 식쌍성들이다. 이 연구에서 다루는 식쌍성이 분리형 쌍성은 제외되므로 W UMa형을 제외하면 모두가 β Lyr형이므로 광도곡선을 식의 깊이와 두 식간의 깊이 비로 구분하여 표준 식쌍성을 분류하였다.

기, 쌍성 주기의 기산점, 식바깥 부분에서의 I, V, B 등급, 이에 따른 색지수, 온도, 등을 수록하였다.

표본 별의 선정 기준은 질량비를 측광학적으로 구할 수 있는 별을 선택하였다. 준분리형 쌍성과 접촉형 쌍성에 대해서는 측광학적으로도 유일한 질량비가 결정될 수 있다고 알려져있다. 위의 두 종류의 쌍성계에 대하여 측광학적으로 질량비를 유일하게 결정할 수 있는 이유는 준분리형인 경우 반성이 로쉬주머니를 채우고 있어 반성의 포텐셜은 주성의 포텐셜과 질량비에 의해서 결정되므로 자유 인자가 줄어들고, 접촉형은 주성과 반성 모두가 로쉬주머니를 채우고 있으므로 하나의 포텐셜로 두 별의 형태를 결정하므로 이 또한 자유 인자가 줄어들기 때문이고, 또한 광도곡선의 형태가 지속적으로 변화하기 때문에 측광학적인 질량비를 유일하게 결정할 수 있다.

그러나 광도곡선의 형태만 가지고는 접촉형 쌍성은 구분할 수 있으나 준분리형 쌍성은 구분이 어렵다. 예를 들어 알골은 대표적인 준분리형 쌍성이지만, 광도곡선의 형태는 분리형 쌍성과 구분이 어렵다. 이러한 문제점을 피하기 위하여, 이 연구에서는 광도곡선이 지속적으로 변화하는 광도곡선을 선정하였다. 즉 분리형 형태를 확실히 보이는 광도곡선을 제외하고, 관측오차가 비교적 작은 식쌍성을 선택하였다.

3. 표준 식쌍성을 이용한 광도곡선의 분석

식쌍성의 광도곡선을 분석하는 방법은 각 모델에 기초한 이론적인 광도곡선과 관측된 광도곡선을 비교하여 최적의 쌍성계의 인자를 구하는 것으로 발전되어 왔다. 식쌍성의 모델은 Russell & Mer-

표 2. 선택된 SMC 식쌍성의 측광학적인 해.

Star ID	incl	T1	T2	P1	P2	q	L1/(L1+L2)
SC6 152981	81.29 ±.31	50000	37830 ±0272	3.5233 ±.0448	3.1786	0.542 ±.008	0.6697 ±.0132
SC6 061502	77.02 ±.22	22695	14125 ±0124	3.7670 ±.0629	2.9027	0.514 ±.018	0.6989 ±.0134
SC6 162962	79.86 ±.15	19000	09796 ±0059	6.3384 ±.1303	2.7387	0.430 ±.009	0.4949 ±.0120
SC6 291695	78.69 ±.29	14202	07804 ±0093	6.1244 ±.2922	2.7687	0.444 ±.021	0.5224 ±.0276
SC5 316901	77.40 ±.34	22695	13255 ±0173	5.3590 ±.2353	2.9520	0.540 ±.034	0.5381 ±.0270
SC5 291756	78.64 ±.18	16512	09688 ±0076	5.9149 ±.1590	2.7388	0.430 ±.016	0.4835 ±.0160
SC5 311526	83.18 ±.29	24800	18320 ±012	3.9425 ±.113	3.1150	0.628 ±.044	0.5588 ±.0207
SC6 296901	73.10 ±.27	13196	09882 ±0090	3.3312 ±.064	3.1794	0.664 ±.033	0.6900 ±.0139
SC6 142123	83.51 ±.70	15433	11259 ±0145	3.3079 ±.0651	3.0234	0.542 ±.011	0.7132 ±.0189
SC6 081662	73.49 ±.11	15433	11187 ±0062	3.6959 ±.0270	3.1790	0.664 ±.0112	0.6289 ±.0065
SC6 061653	79.56 ±.14	26194	20991 ±0119	3.1850 ±.0199	2.9580	0.542 ±.002	0.6618 ±.0058
SC6 306607	72.73 ±.25	21255	15081 ±1903	4.0455 ±.9489	3.1790	0.664 ±.342	0.5648 ±.0190
SC5 300549	70.48 ±.49	30776	18859 ±0302	2.8920 ±.0371	2.8420	0.428 ±.017	0.8425 ±.0086
SC5 305884	67.08 ±.68	73073	56769 ±1155	2.6270 ±.0464	2.5420	0.256 ±.011	0.8391 ±.0189
SC5 300777	67.58 ±.79	13674	12119 ±0195	2.8020 ±.0558	2.8020	0.369 ±.025	0.7893 ±.0189
SC6 158118	68.48 ±.26	21255	14159 ±0136	3.7220 ±.0491	3.7220	0.806 ±.024	0.7356 ±.0090
SC6 296738	60.15 ±.79	18854	10888 ±0331	2.9230 ±.0479	2.2923	0.483 ±.023	0.8727 ±.0134
SC6 141994	70.48 ±.18	28326	12479 ±0889	2.6920 ±.0710	2.5420	0.256 ±.015	0.9450 ±.0190
SC6 221708	66.25 ±.30	50456	31069 ±0430	3.5680 ±.0430	3.5680	0.790 ±.017	0.7116 ±.0069
SC6 232282	61.48 1.28	19982	18889 ±0710	3.1120 ±.0816	3.1120	0.555 ±.040	0.6652 ±.0272

rill(1952)이 제시한 고전적인 모델이후, 로쉬 기하학을 기초로 종합적인 모델을 Kopal(1958, 1978), Wilson & Devinney(1971), Wood(1971) 등이 제시하였고, 지난 30여년간 가장 많이 사용된 모델은 Wilson and Devinney의 모델이다. 이 모델은 지속적으로 개선이 되어 최근에는 2005년도 판이 발표되었다.

일반적으로 식쌍성의 모델을 사용하여 최적의 인자를 구할 때, 관측으로 얻을 수 있는 인자는 고정하고, 관측으로 얻을 수 없는 인자들을 자유 인자로 하여 최소 자승법으로 구한다. 여기서 관측으로 얻을 수 있는 인자는 쌍성계의 온도와 두 성분 별의 질량비이다. 나머지 인자들은 궤도 기울기, 각 별의 포텐셜 등이 주요 자유 인자가 되고, 그 밖에 주연감광효과, 중력감광효과, 반사도 등의 부수인자도 자유 인자가 되어 관측과 이론적인 곡선을 비교하여 최소자승법으로 자유 인자의 값을 수렴하여 최종 해를 얻는다. 이 과정을 반복하여 경험적 기법과 함께 최종 해를 얻는 데는 상당한 시간과 주

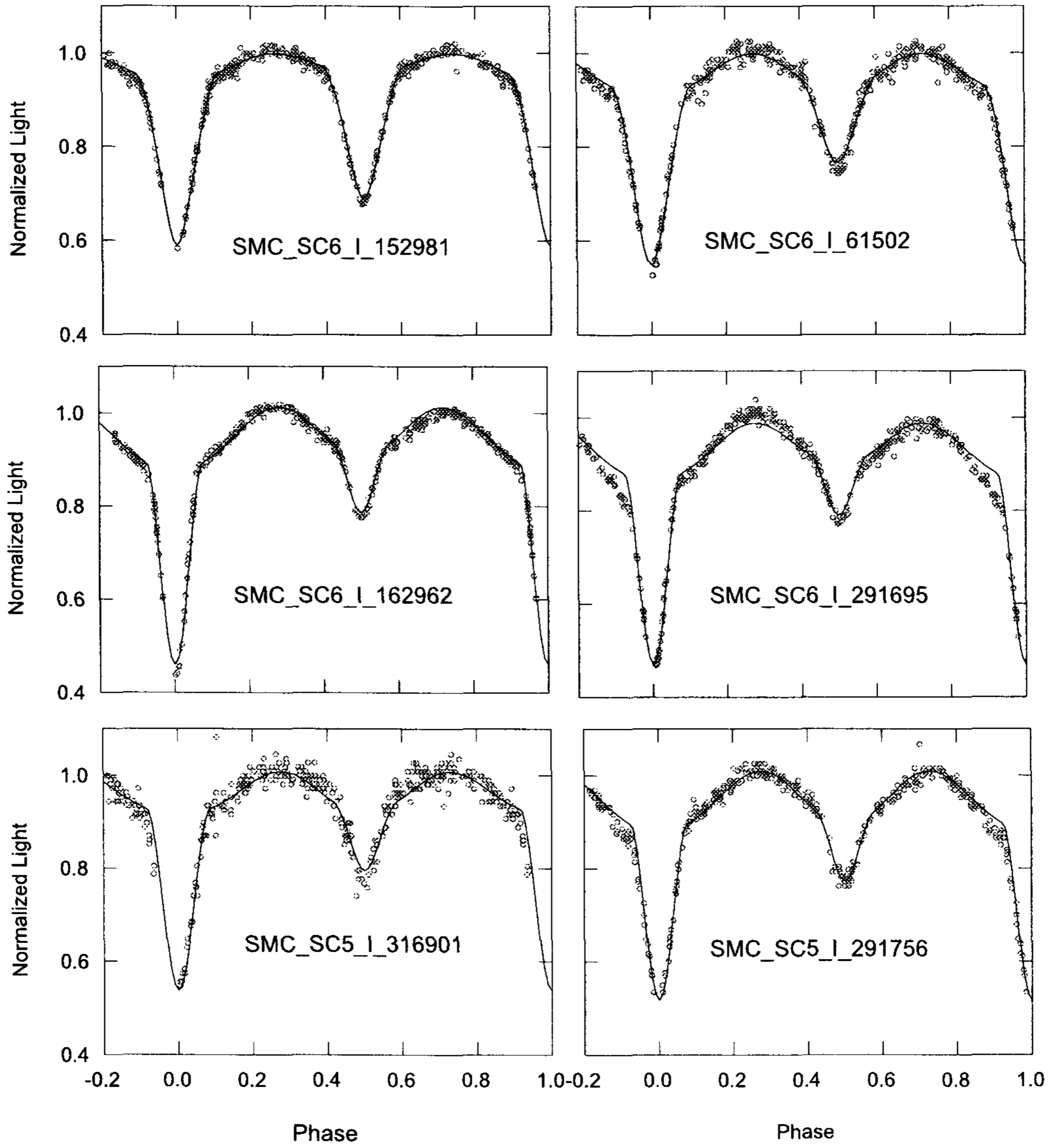


그림 2. 20개의 SMC 식쌍성중에서 식부분과 식바깥부분이 어느 정도 구별되는 6개의 식쌍성의 광도곡선. 이러한 광도곡선들은 식부분과 식 바깥부분이 구별되어도 광도곡선이 어느 정도 완만하게 변화하기 때문에 측광학적인 질량비 결정이 가능하다. 열린 원들은 관측점 4개를 평균한 대표점들이고, 직선은 이론적인 광도곡선이다.

의를 요하여 왔다. 그러나 최근 천문학 연구의 추세는 대규모 탐사 관측이 수행되면서 많은 양의 관측 자료가 지속적으로 발표되고 있다.

변광성인 경우에는 우리은하에서 발견된 변광성의 수보다 국부은하에서 발견된 변광성의 수가

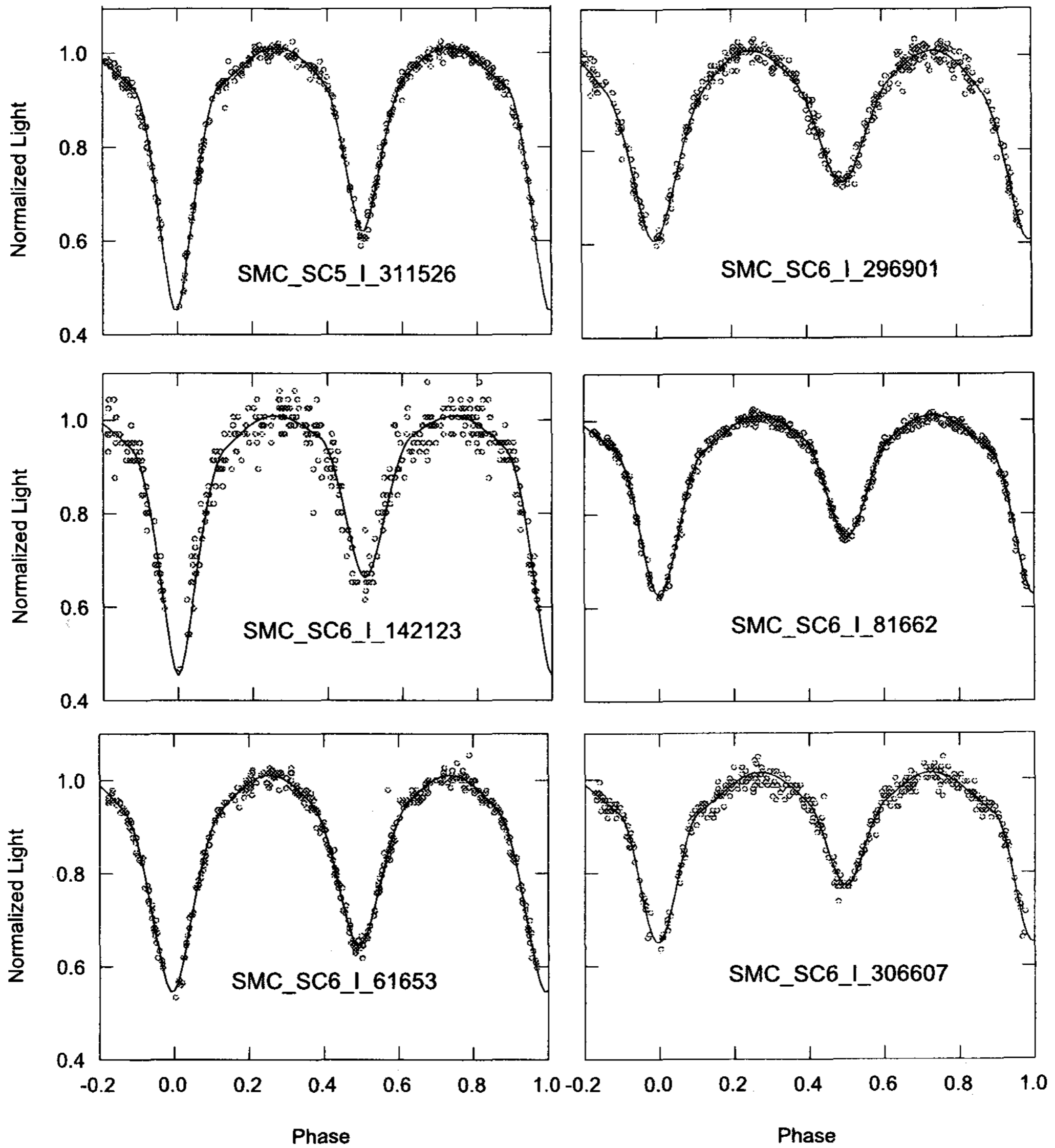


그림 3. 20개의 SMC 식쌍성중에서 식부분과 식바깥부분이 구별없이 연속적인 곡선으로 연결되는 6개의 식쌍성의 광도곡선. 이러한 광도곡선들은 광도곡선이 지속적으로 완만하게 변화하기 때문에 측광학적인 질량비 결정이 가능하다. 열린 원들은 관측점 4개를 평균한 대표점들이고, 직선은 이론적인 광도곡선이다. 이러한 형태의 광도곡선들은 대부분 로쉬주머니를 거의 채운 상태의 쌍성, 즉 near contact binaries이다.

더 많을 정도로 외부 은하의 변광성 자료가 많이 발표되고 있다. 그러므로 관측된 변광성의 광도곡선 분석 방법도 기존과는 달리 신속하게 처리될 수 있는 방법의 개발이 요구되고 있다. 현재 일반적

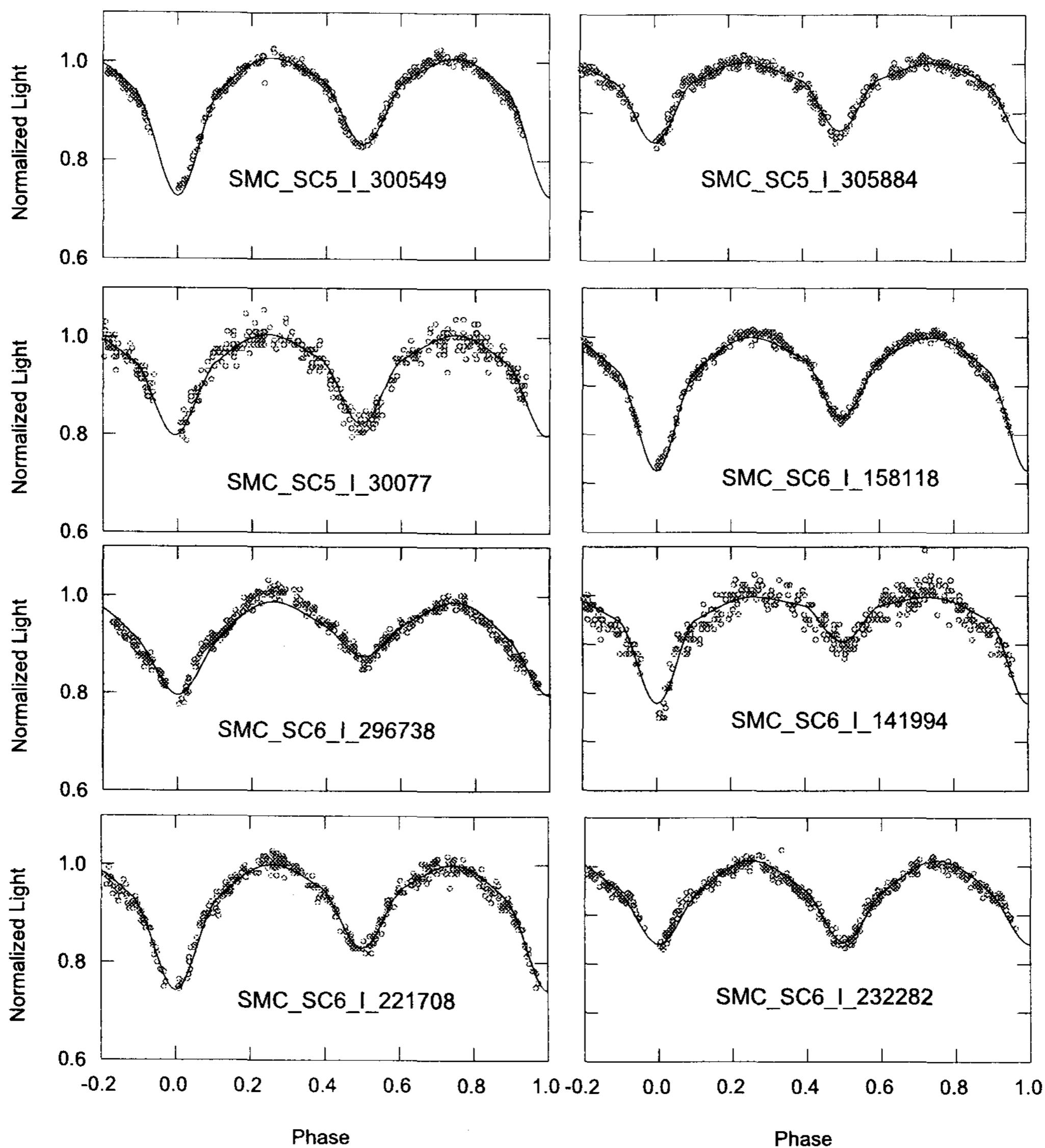


그림 4. 20개의 SMC 식쌍성 중에서 식부분과 식바깥부분이 구별이 안되고 거의 W UMa형에 가까운 6개의 식쌍성의 광도곡선. 이러한 광도곡선들은 식의 깊이가 상대적으로 얕다. 이러한 광도곡선들도 광도곡선이 지속적으로 완만하게 변화하기 때문에 측광학적인 질량비 결정이 가능하다. 열린 원들은 관측점 4개를 평균한 대표점들이고, 직선은 이론적인 광도곡선이다.

으로 사용하고 있는 이론 광도곡선과 관측 광도곡선의 비교 방법은 초기 인자 값에 따라서 분석 시간과 분석 결과의 정확성이 결정된다. 특히 최소자승법에 기초하여, 반복적으로 인자 값을 수렴시키

는 방법은 국부 최소값에 수렴할 위험이 항상 대두되기 때문에 초기 값은 더욱 중요하다. 그러나 외부 은하에서 발견된 식쌍성들에 대한 기본 자료는 매우 한정적이므로 광도곡선 분석에 더욱 어려움이 있다.

이에 이 연구에서는 초기 인자 값을 적절하게 결정하기 위하여 우리은하에 존재하는 식쌍성 중에서 분광관측으로 두 성분 별의 시선속도와 측광관측으로 다 과장 광도곡선이 완성되어 분광 및 측광학적인 해가 잘 알려진 식쌍성을 이용하여 표준식쌍성 6개를 만들었다. 2장에서 언급한대로 SMC 식쌍성 중에서 광도곡선의 형태가 연속적으로 변화하는 형태의 식쌍성만 연구의 대상으로 선정하였다. 즉, 광도곡선의 형태가 분리형 쌍성으로 판단되는 것은 제외하였다. 그러므로 6개의 표준식쌍성도 연구 대상으로 선정된 쌍성의 광도곡선과 유사한 것들 중에서 선택하여 그림 1에 제시하였다.

이 논문에서 선정한 20개의 SMC 식쌍성은 표준식쌍성과 비교하여 광도곡선의 형태가 가장 근접한 표준식쌍성 하나를 선정하여 그 쌍성의 해, 즉 궤도기울기, 질량비, 각 성분별의 포텐셜 등을 Wilson and Devinney Differential Correction 2005 code의 초기 인자 값으로 사용하였다. 이와 같이 초기 인자 값으로 광도곡선이 비슷한 표준식쌍성(이미 해가 잘 알려진 쌍성)의 인자를 사용하여도 되는 이유는 측광학적인 해가 광도곡선의 형태만으로 결정되기 때문이다. 각 성분별의 온도는 측광관측에서 얻은 쌍성계의 색지수를 이용하여 쌍성계의 온도를 결정하고 표 1에 수록하였다. 이 쌍성계의 온도를 주성의 초기 온도로 사용하였다. 그 후 모든 인자가 수렴되었다고 판단될 때 Kang et al.(2004) 이 제시한 방법을 이용하여, 즉 주성과 반성의 온도비를 이용하여 쌍성계의 온도를 각 성분별의 온도로 분해하여 온도를 최종 결정하고, 새로운 온도를 이용하여 최종적으로 모든 인자를 다시 조정하는 방법을 사용하였다.

Wilson and Devinney의 2005년 code를 이용하여 각 인자를 수렴하는 방법은 아래와 같은 방법으로 측광학적인 해를 구하였다.

첫째 선정된 쌍성계의 온도를 B , V , I 관측에서 얻은 색지수, $B-V$, $V-I$ 등을 이용하여 구하였다. 대부분 온도가 매우 높은 조기형 별들이므로 주로 $B-V$ 색지수와 Flower(1996)가 제시한 온도 - 색지수 상관관계를 이용하여 구하였고, 표 1에 관측에서 얻은 값과 함께 수록하였다. 둘째, 선정된 쌍성의 광도곡선을 그림 1에 제시한 표준식쌍성의 광도곡선을 식의 깊이, 너비 등을 고려하여 가장 근접한 표준식쌍성을 선정하여 그 표준식쌍성의 해를 초기값으로 결정하였다. 셋째, Wilson and Devinney 2005년도 code를 개선하여 주요인자(기울기, 포텐셜, 온도비)를 차등보정법으로 2-3 반복 보정하고, 넷째, 부수인자(중력감광효과, 반사효과, 및 주연감광효과)를 2-3회 반복 보정 한다. 위와 같은 방법으로 최종적으로 얻은 측광학적인 해는 표 2에는 수록하였다. 표 2에는 별의 번호, 궤도기울기(incl), 주성과 반성의 온도(T_1 , T_2), 주성과 반성의 규격화된 포텐셜(P_1 , P_2), 질량비(q), 쌍성계에 대한 주성의 광도 비율($L_1/(L_1+L_2)$) 등 주요인자만 수록하였다. 대부분의 부수인자는 초기값으로 사용한 이론적인 값과 큰 차이를 보이지 않기 때문에 표에서 생략하였다.

4. 검토와 토의

최종적으로 얻은 측광학적인 해를 이용하여 산출한 이론적인 광도곡선과 관측을 그림 2, 3, 4에 비교하였다. 각 그림에서 모든 관측은 I 필터를 이용하여 완성한 광도곡선이다. 그림 2에는 식부분과 식바깥 부분의 경계가 확실히 나타나는 광도곡선 6개를 관측과 함께 그렸다. SC6 291695를 제외

하면 모든 이론적인 곡선이 관측과 잘 일치한다. SC6 291695는 위상이 0.25와 0.75 지점에서 최대 밝기가 다른 비대칭 광도곡선이므로 비대칭을 설명할 수 있는 모델을 적용할 필요가 있다. 그림 3에 제시한 광도곡선들은 전형적인 β Lyr 광도곡선으로 모든 이론적인 값이 관측과 잘 일치하며, 대부분이 near contact binaries이다. 그림 4에는 식의 깊이가 얇은 W UMa형 광도곡선을 모아서 그렸으나 분석 후 결과는 대부분 near contact binary로 판명되었으며, 식의 깊이가 얇은 것은 기울기 때문인 것으로 나타났다.

이 논문에서 새로 제시하는 광도곡선분석에 대한 방법은 가능한 시간을 단축하여 대규모로 방출되는 식쌍성의 광도곡선을 분석하는 것이 목적이다. 그러므로 식쌍성계의 광도곡선을 하나씩 자세하게 분석하는 기존의 방법을 탈피하고 좀 거칠긴 하지만 많은 수의 광도곡선을 분석하기 위하여 표준식쌍성을 선정한다. 이는 백화점에서 각자 몸에 맞는 기성복을 즉시 골라 구입하는 것과 같은 원리라고 할 수 있다.

우리 은하에 있는 다양한 종류의 식쌍성에 대하여 광도곡선 및 시선속도곡선을 분석한 해를 확보하여 소위 표준식쌍성 인자에 대한 데이터베이스가 충분히 구축되면 많은 수의 광도곡선을 단시간안에 분석 가능하다. 이 논문에서 수행한 20개의 광도곡선 분석도, 광도곡선의 자료 정리와 표준식쌍성의 선정 등에 많은 시간이 소비되었고, 정작 광도곡선 분석은 상대적으로 상당히 짧은 시간에 수행되었다. 현재 표준 식쌍성에 대한 데이터베이스 구축을 위하여 시선속도곡선과 다 파장 광도곡선이 발표된 식쌍성의 자료를 수집하여 분광 및 측광학적인 해를 동일한 방법으로 다시 구하는 작업을 진행하고 있다.

감사의 글: 관측 자료를 수집하고, 그림을 그려준 이정주 선생님과 Farung Surina양에게 감사드립니다. 이 논문은 교육과학기술부, 한국과학재단이 지원하는 우주구조와 진화연구센터의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

- Alcock, C., Allsman, R. A., Alves, D., Axelrod, T. S., Becker, A. C., Bennett, D. P., Cook, K. H., Freeman, K. C., Griest, K., Guern, J., Lehner, M. J., Marshall, S. L., Peterson, B. A., Pratt, M. R., Quinn, P. J., Rodgers, A. W., Stubbs, C. W., Sutherland, W., Welch, D. L., & The MACHO Collaboration, 1997, *ApJ*, 486, 697
- Flower, P. J. 1996, *ApJ*, 469, 355
- Grisson, P., Beaulieu, J.-P., Pritchard, J. D., Tobin, W., Ferlet, R., Vidal-Madjar, A., Guibert, J., Alard, C., Moreau, O., Tajahmady, F., Maurice, E., Prevot, L., Gry, C., Aubourg, E., Bareyre, P., Brehin, S., Gros, M., Lachieze-Rey, M., Laurent, B., Lesquoy, E., Magneville, C., Milsztajn, A., Moscoso, L., Queinnec, F., Renault, C., Rich, J., Spiro, M., Vigroux, L., Zylberajch, S., Ansari, R., Cavalier, F., & Moniez, M. 1995, *A&AS* 109, 447
- Guinan, E. F. 1993, *New Frontiers in Binary Star Research*, ASP Conf. Ser. 38, eds. K.-C. Leung, & I. S. Nha (San Francisco: ASP), p.1
- Kang, Y. W., Hong, K. S., & Kim, H. I. 2004, *New Astronomy Review*, 48, 711
- Kopal, Z. 1958, *Close Binary Systems* (London: Chapman & Hall)

Kopal, Z. 1978, *Dynamics of Close Binary Stars* (Dordrecht: Reidel)

Russell, H. N. & Merrill, J. E. 1952, *Contr. Princeton Univ. Obs.*, No.24.

Wilson, R. E. & Devinney, E. J. 1971, *ApJ*, 166, 605

Wood, D. B. 1971, *AJ*, 76, 701

Wyrzykowski, L., Udalski, A., Kubiak, M., Szymanski, M., Zebrun, K., Soszynski, I., Wozniak, P.,
Pietrzynski, G., & Szewczyk, O. 2003, *AcA*, 53, 1