

구상 성단 M30의 측광학적 연구¹

임 흥 서 · 천 문 석 · 이 영 육

연세대학교 천문대기과학과

CCD PHOTOMETRY OF THE GLOBULAR CLUSTER M30

Hong-Suh Yim, Mun-Suk Chun and Young-Wook Lee

Astronomy Program, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

e-mail: yimhs@galaxy.yonsei.ac.kr, mschun@galaxy.yonsei.ac.kr, ywlee@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received June 5, 1996; Accepted June 18, 1996)

요 약

우리 은하에 속한 구상 성단들 중 하나인 M30에 대하여 호주 MSSSO (Mountain Stromlo and Siding Spring Observatory)의 40인치 망원경을 사용하여 CCD 판측자료를 얻어 측광학적인 분석을 하였다. M30의 색-등급도로부터 M30의 금속함량은 $[Fe/H] = -2.05$ 로 우리 은하내에서 가장 금속함량이 적은 구상 성단들 중 하나임을 확인하였으며, 거리지수 $m-M = 14.64$ 로부터 M30은 태양에서 약 8.47kpc 떨어진 곳에 있음을 알았다. 한편, R방법 (R-method)을 이용하여 M30의 중심부에서의 헬륨량 (Y)을 0.28로 결정하였다. M30의 색-등급도에서 얻은 금속함량, 거리, 헬륨량을 초기값으로 하여 Revised Yale Isochone들과 비교하여 M30의 나이를 16 Gyrs 정도로 추정할 수 있었고, M30의 $[O/Fe]$ 의 값을 고려할 경우, 보다 정확한 M30의 나이는 약 14.2 Gyrs 정도로 추정하였다. 우리 은하내에서 가장 금속함량이 적고 나이가 오래된 구상 성단들 중 하나로 알려진 M30에 대한 나이의 추정으로부터 우리 은하는 적어도 이보다 오래되었다는 가정을 세울 수 있었다.

ABSTRACT

We present *UBV* CCD photometry of the metal-poor globular cluster M30. The data were obtained using the 40 inch telescope at Mt. Stromlo and Siding Spring Observatory (MSSSO). We used DAOPHOT CCD reduction package in order to obtain Color-Magnitude Diagram (CMD). We have derived some fundamental parameters of the globular cluster such as metal abundance ($[Fe/H]$), helium abundance (Y), and distance modulus ($m-M$) from the CMD. The derived parameters were $[Fe/H]=-2.05$, $Y=0.28$, and $(m-M)=14.64$. From the latter, the distance of 8.3kpc is obtained. Despite the photometric uncertainty near the main-sequence turnoff, we estimate the age of M30

¹이 연구는 1995년도 교육부 기초과학 육성 연구비 (BSRI-95-5413) 지원에 의한 것임

to be 1.6 ± 3 Gyrs from the Revised Yale Isochrones. If [O/Fe]=+0.4, this age will be reduced to 14.2 ± 3 Gyrs.

1. 서론

M30은 7.32등급의 밝기를 갖고 염소자리에 위치한 우리 은하에 속한 구상 성단중 하나이다. Dickens (1972)와 Alcaino (1978)는 M30에 대한 측광 관측을 통해 수평 계열성 (horizontal branch star)보다 1등성 더 어두운 별들까지 관측하여 색-등급도를 만들었다. 이때 색-등급도에 나타난 수평 계열의 형태는 푸른색 쪽으로 발달된 형태를 보였으며, 적색거성의 색지수로부터 M30은 매우 금속함량이 작은 성단임을 알아냈다. Alcaino & Liller (1980)는 더 정확한 측광 관측을 통해 turn-off 지점보다 더 어두운 별들까지 관측하여 M30의 색-등급도를 만들었으며, Piotto *et al.* (1987)은 CCD를 이용하여 M30의 광도함수 (luminosity function)을 얻어냈다. Bolte (1987)와 Richer *et al.* (1988)은 역시 CCD를 이용하여 어두운 주계열성 (main sequence star)에 대한 색-등급도를 얻어 동주기 항성 진화 모형 (Isochrone)들과의 비교로부터 M30의 거리와 나이를 결정하였다.

M30은 우리 은하내에서 가장 금속함량이 적고 또한 나이가 많은 구상 성단으로 알려져 있다. 이는 M30이 우리 은하, 나아가 우리 우주 나이의 최소 한계를 결정할 수 있는 좋은 표본이 될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구는 M30에 대한 관측 자료를 통해 M30의 여러가지 물리량들을 결정하고, 항성 진화 모델에 근거한 동주기 항성 진화 모형들과 관측치를 비교함으로써 M30의 나이를 결정하고, 이 값으로 우리 은하 나이의 최소한계를 추정하려 한다.

2. 관측과 데이터 처리

본 연구에서 사용한 M30의 관측 자료는 1991년 8월 18일에 호주에 있는 Mountain Stromlo and Siding Spring Observatory에서 40 inch 망원경을 이용하여 CCD로 관측된 자료이다. 관측 자료에 대한 내용은 표 1에 나타내었다. M30에 대한 관측은 U, B, V 세가지 필터를 가지고 수행하였다. 여기서는 색-등급도를 다루기 위해 B, V 두 필터에 대한 자료만을 사용하였다. 관측은 성단 중심부에 대해 행해졌으며 모든 필터에 대해 약 100''에 이르는 영역을 담고 있다. 영상에서의 한개의 화소 (1 pixel)는 하늘의 0.''56에 해당한다. 영상의 full-width at half-maximum (FWHM)으로 알 수 있는 시상 (seeing)은 2.''28 – 3.''05에 이른다.

관측 자료의 처리를 위해서 CCD 자료 처리용으로 개발된 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)와 DAOPHOT package를 이용하였다. 또한, M30과 함께 관측한 표준성들에 대해서도 같은 자료 처리 방법을 사용하여 표준화 작업을 하였다. 표준성에 대한 측광시 사용된 구경은 25 화소이며, 표준화 작업을 통해 다음과 같은 표준화 계수를 결정하였다:

표 1. M30의 CCD 판측 자료.

Image #	Filter	Airmass	노출시간(초)	내용
1	<i>V</i>	1.011	100	Sky
2	<i>V</i>	1.011	150	M30
3	<i>V</i>	1.011	100	Sky
4	<i>B</i>	1.012	200	Sky
5	<i>B</i>	1.016	400	M30
6	<i>B</i>	1.020	200	Sky

$$V = v_o - 0.009(B - V) + 22.017, \quad (1)$$

$$(B - V) = 1.147(b - v)_o - 0.721. \quad (2)$$

3. 색-등급도

IRAF와 DAOPHOT package를 사용하여 총 880개의 별에 대한 B와 V필터에서의 등급을 얻을 수 있었다. 이 결과를 통해 M30의 색-등급도를 그림 1과 같이 얻었다. 그림 1에 나타난 M30의 색-등급도에서 알 수 있는 특징은 다음과 같다. 첫째로 푸른 수평 계열이 많이 발달되어 있으며, 붉은 수평 계열과 불안정 영역 (instability strip)은 잘 나타나지 않는다. 둘째로 거성 계열 (giant branch)이 가능하고 그 기울기가 상당히 큰 점이다. 이 두가지 특징은 M30이 금속함량이 매우 작다는 것을 보여주고 있다.

M30의 물리량을 유추하기 위해 3가지 요소, V^{RR} (수평 계열의 등급), V^{RGT} (색지수가 +1.4일 때의 적색 거성 꼭지점 (red giant tip)의 등급), 그리고, $(B - V)_{g,o}$ (수평계열의 등급에 해당하는 적색 거성 계열의 색지수) 등을 위의 색-등급도로부터 결정하였다 (그림 2). 수평 계열의 등급 (V^{RR})은 불안정 영역에 존재하는 RR Lyrae의 등급으로 정의하는데, 그림 1의 색-등급도에서 나타나듯이 M30의 수평 계열은 대부분 푸른 쪽에 존재하고, 뚜렷한 붉은 수평 계열이나 RR Lyrae를 찾아낼 수 없기 때문에 푸른 수평 계열의 가장 붉은 쪽을 수평 계열의 등급으로 결정하였다. 결정된 수평 계열의 등급 (V^{RR})은 $+15.20 \pm 0.10$ 이다. 적색 거성 꼭지점 (red giant tip)의 등급 (V^{RGT})은 적색 거성 계열에 대한 2차 최소 자승 방법 (least square method)을 사용하여 결정하였다. 얻어진 V^{RGT} 는 +11.99이다. 또한, 적색 거성 계열에 대한 2차 최소 자승 방법을 이용하여 수평 계열의 등급에 해당하는 적색 거성 계열의 색지수 ($(B - V)_{g,o}$)를 결정하였다. $(B - V)_{g,o}$ 는 적색화 값을 보정한 값이며, 적색화에 대한 내용은 다음 장에 논의 하겠다. 적색화 보정전의 적색 거성 계열의 색지수 $(B - V)_g$ 는 +0.68이다.

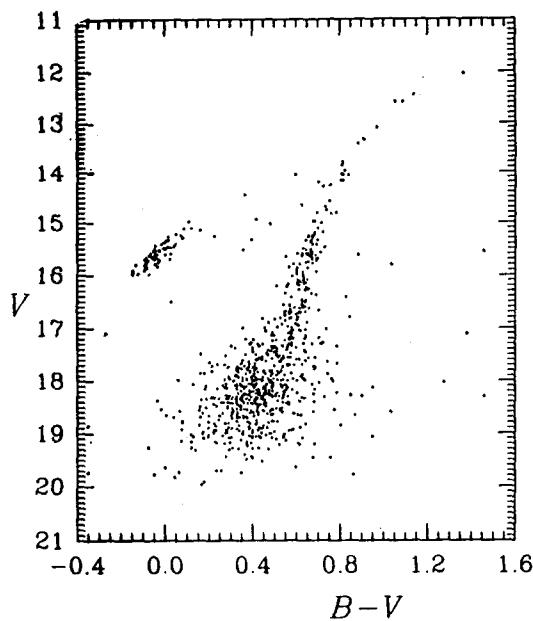
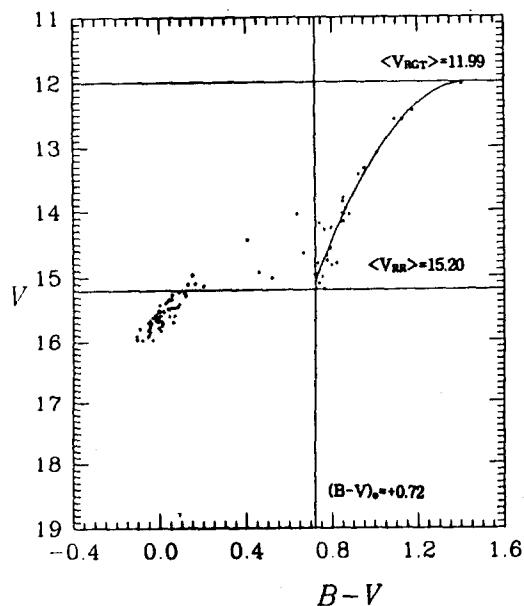


그림 1. M30의 색-등급도.

그림 2. V^{RR} , V^{RGT} , $(B - V)_g$ 의 결정. 적색거성에 대해 2차 최소 자승법을 사용한 결과를 선으로 표시하였다.

4. 물리량

4.1 적색화 (Reddening)

성간 물질이 관측에 미치는 영향중의 하나는 적색화 현상이다. 적색화 현상으로 우리는 색-등급도에서 정확한 별들의 위치를 알 수 없게 되며, 그 결과 그 성단까지의 거리와 나이를 결정하는데 문제를 갖게 된다. 하지만, M30은 은하 평면과 비교적 많이 떨어져 있으므로 은하 평면쪽에 위치하는 성단들에 비해서는 상대적으로 적색화의 영향이 중요하지 않다. M30의 적색화 정도는 Dickens (1972)가 0.06으로 발표한 이래 계속 연구되어왔다. 여기서는 그 동안 발표된 M30의 적색화 값들의 평균인 0.04를 사용하였다. 앞에서 구한 $(B - V)_{g,o} = 0.68$ 은 적색화를 보정한 값이다.

4.2 금속함량 (Metal Abundance)

성단의 금속함량을 결정하는 데는 많은 방법들이 있다. 여기서는 ΔV 와 $(B - V)_{g,o}$ 를 이용하는 방법을 사용하였다. ΔV 는 수평 계열의 등급 (V^{RR})과 색지수가 1.4일 때 적색거성의 등급 (V^{RGT})와의 차이를 말한다. 금속함량이 적은 성단은 ΔV 가 크고 $(B - V)_{g,o}$ 가 작다. 즉, 거성 계열의 기울기가 크고, 거성 계열의 색지수 역시 푸른 쪽인 색-등급도를 갖는 성단이 금속함량이 적다. 반대로 금속함량이 많은 성단은 ΔV 가 작고 $(B - V)_{g,o}$ 가 크다. 거성 계열의 기울기가 작고, 거성 계열의 색지수가 붉은 성단이 금속 함량이 큰 성단이다. 이 연구에서는 Zinn & West (1984)에 의한 방법을 사용하여 M30의 금속함량을 결정하였다.

Zinn & West (1984)는 성단의 금속함량과 $(B - V)_{g,o}$ 와의 관계를 연구하여 다음의 관계식을 얻었다:

$$[m/H] = 4.94 + 4.23(B - V)_{g,o}. \quad (3)$$

여기서 우리가 얻은 $(B - V)_{g,o}$ 인 0.68을 대입하면 M30에 대한 금속함량은 $[Fe/H] = -2.05 \pm 0.28$ 로 결정된다.

4.3 거리 지수 (Distance Modulus)

성단까지의 거리를 결정하기 위하여 금속함량과 수평 계열의 절대등급과의 관계식을 이용하였다. 수평 계열의 별, 정확하게는 RR Lyrae 별들의 절대 등급과 금속함량과의 관계는 Sandage (1982), Stother (1983) 그리고 Iben & Renzini (1984) 등에 의해 계속 연구되어 왔다. 본 연구에서는 Lee (1990)에 의한 방법을 사용하였다. 그 관계식은 다음과 같다:

$$M_v = 0.19[Fe/H] + 0.97. \quad (4)$$

이 식은 수평 계열성에 대한 모델을 바탕으로 얻어진 식이며, Baade-Wesselink 방법에 의해 구해진 관측적 관계식과도 좋은 일치를 보여주고 있다. $[Fe/H]$ 값으로 -2.16을 얻었으므로 수평 계열의 절대등급 (M_v)은 0.56을 얻을 수 있다. 수평계열의 겉보기 등급 (V^{RR})으로 15.2를 얻었으므로, M30의 거리

지수 ($m-M$) = 14.64 ± 0.10 으로 결정된다. 이 값으로부터 M30은 우리 태양으로부터 약 8.47 ± 0.4 kpc 떨어진 곳에 존재하고 있음을 알 수 있다.

4.4 헬륨량(Helium Abundance)

구상 성단의 헬륨량을 계산하는데 가장 널리 쓰이는 방법은 R방법이 있다. 이는 적색 거성의 숫자와 수평 계열의 숫자의 비 (R)를 이용하는 방법이다. 진화된 별들의 모델이 계속 개발되면서 현재는 Buzzoni *et al.* (1983)에 의한 방법을 주로 사용하고 있다. Buzzoni *et al.* (1983)에 의한 R 방법의 관계식은 다음과 같다:

$$Y = 0.176 + 0.38 \log R. \quad (5)$$

여기서 R 은 수평계열의 수를 적색 거성의 수로 나눈 값이다. 본 연구에서는 수평 계열, 적색 거성의 수가 각각 37, 20개로 나타났다. 따라서, 위 관계식으로부터 결정된 M30의 헬륨량은 0.28이다.

4.5 나이 (Age)

M30의 색-등급도로부터 M30의 금속함량, 거리, 헬륨량 등을 결정하였다. 그 값을 가지고 M30의 나이를 결정하기 위해 Revised Yale Isochrone (Green *et al.* 1987)을 이용하였다. 먼저, M30의 색-등급도를 적색화 보정한 후, 거리 지수에 따라 절대 등급대 색지수의 새로운 색-등급도로 바꾸었다. Revised Yale Isochrone으로부터 헬륨량 ($Y=0.28$)과 금속함량 ($[Fe/H]=-2.05$)을 초기값으로하여 나이가 10, 12, 14, 16, 18 Gyrs인 동주기 항성 진화 모형들을 얻었다. 그리고, 동주기 항성 진화 모형들과 색-등급도를 함께 비교하였다 (그림 3). 그 결과 16 Gyrs의 동주기 항성 진화 모형이 가장 잘 일치되는 것으로 나타났으며, 따라서 M30의 나이를 16 ± 3 Gyrs로 추정할 수 있었다.

나이를 결정할 때 나타나는 가장 큰 오차는 거리 결정 시 나타나는 오차이며, 본 연구에서는 0.1등급의 수평 계열의 등급 오차가 나이에서 약 2 Gyrs의 오차를 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수평 계열성에 대한 2 Gyrs의 오차와 함께 어두운 주계열성에서의 측광오차를 합해 약 3 Gyrs의 오차를 갖는 것으로 추정된다.

5. 결과 및 토의

이 연구에서는 CCD 관측자료를 이용하여 M30의 색-등급도를 얻은 다음, M30의 금속함량, 거리, 헬륨량 등을 결정하고, 동주기 항성 진화 모형들과의 비교를 통해 M30의 나이를 추정해 보았다. M30의 금속함량 ($[Fe/H]$)은 -2.05, 거리지수 ($m-M$)는 14.64, 그리고 헬륨량 (Y)은 0.28로 결정하였다. 또한, 나이는 약 16 ± 3 Gyrs인 것으로 추정하였다. 금속 함량의 구성비에 대하여 여기서는 $[Fe/H]$ 가 금속함량을 대표한다고 생각했다. 그러나, 현재 동주기 항성 진화 모형들과의 비교를 통한 성단의 나이를 결정하는데 있어서 $[O/Fe]$ 의 영향은 크게 주목되고 있다. 주변별의 $[O/Fe]$ 에 대한 최근의 연구 (Bond & Luck 1987)에서 구상 성단의 금속함량이 $-2.3 \leq [Fe/H] \leq -0.7$ 인 경우 $[O/Fe]$ 는 +0.4의 값을

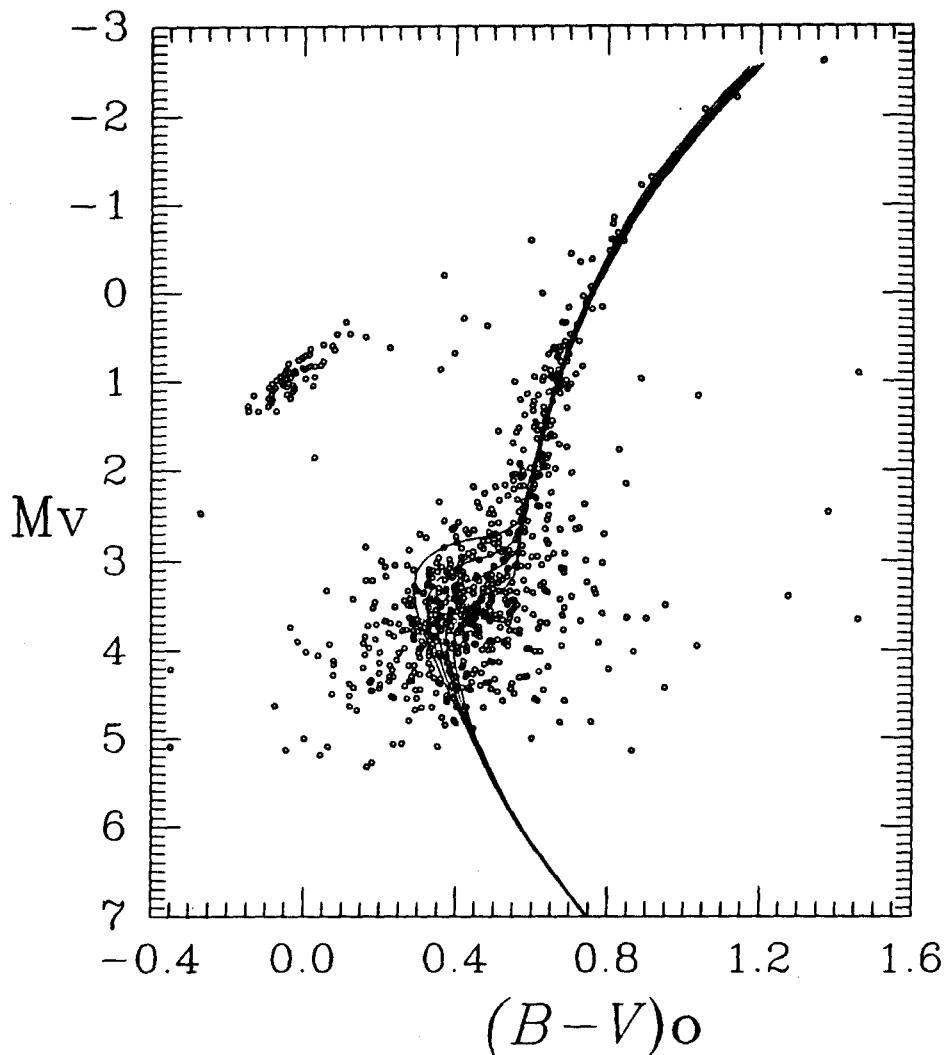


그림 3. M30의 색-등급도와 10, 12, 14, 16, 18 Gyrs인 동주기 항성 진화 모형들. 나이에 따라 전향점 (turn-off point)과 부거성 계열 (sub-giant branch)의 차이가 잘 나타나고 있다. 전향점의 등급이 가장 밝은 것이 10 Gyrs이며, 가장 어두운 것이 18 Gyrs이다.

갖는 것으로 알려졌다. 구상 성단에서 [O/Fe]가 +0.4인 경우 VandenBerg (1985)의 결과에 의하면 나이가 약 1.8 Gyrs 정도 감소된다. M30의 [Fe/H]가 -2.05이므로 [O/Fe]의 효과를 M30의 경우에도 적용하면, M30의 나이도 역시 1.8 Gyrs 정도 감소되어 14 ± 3 Gyrs에 이를 것으로 예측된다.

참고문헌

- Alcaino, G. 1978, A&AS, 33, 185
 Alcaino, G. & Liller, W. 1980, AJ, 85, 1330
 Bond, H. E. & Luck, R. E. 1987, in IAU symposium 132, The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics, ed. G. C. de Strobel and M. Spite (Dordrecht: Kluwer), p.477
 Bolte, M. 1987, ApJ, 319, 760
 Buzzoni, A., Fusi Pecci, F., Buonanno, R. & Corsi, C. E. 1983, A&A, 128, 94
 Dickens, R. M. 1972, MNRAS, 157, 299
 Green, E. M., Demarque, P. & King, C. R. 1987, The Revised Yale Isochrones and Luminosity Functions (Yale Univ. Obs.: New Heaven)
 Iben, I., Jr. & Renzini, A. 1984, Phys. Rep., 105, 329
 Lee, Y.-W. 1990, ApJ, 363, 159
 Piotto, G., Capaccioli, M., Ortolani, S., Rosino, L., Alcaino, G. & Liller, W. 1987, AJ, 94, 360
 Richer, H. B., & Fahlman, G. G. 1987, ApJ, 316, 189
 Sandage, A. 1982, ApJ, 252, 553
 Stoother, R. B. 1983, ApJ, 274, 20
 VandenBerg, D. A. & Bell, R. A. 1985, ApJS, 58, 561
 Zinn, R. & West, M. J. 1984, ApJS, 55, 45