

구상성단 M30의 UBVI CCD 측광연구

이 호^{1,*} · 전영범²

¹한국교원대학교 제3대학 지구과학교육과, 363-791 충북 청원군 강내면 다라리 산7

²한국천문연구원, 305-348 대전광역시 유성구 화암동 61-1

UBVI CCD Photometry of the Globular Cluster M30

Ho Lee^{1,*} and Young-Beom Jeon²

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education,
Choongbuk 363-791, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

Abstract: We present CCD UBVI photometry for more than 10,000 stars in 20'.5 × 20'.5 field of the halo globular cluster M30. From a color-magnitude diagram, main sequence turnoff was obtained when V_{TO} , $(B-V)_{TO}$, and $(V-I)_{TO}$ are 8.63 ± 0.05 , 0.44 ± 0.05 and 0.63 ± 0.05 , respectively. From a $(U-B)-(B-V)$ diagram, reddening parameter, $E(B-V)$ equals 0.05 ± 0.01 and a UV color excess $\delta(U-B)$ is 0.27 ± 0.01 . The abundance is derived, where $[Fe/H]$ equals -2.05 ± 0.09 according to the photometric method and spectroscopic data. The abundance is derived, where $[Fe/H]$ equals -2.05 ± 0.09 according to the photometric method and spectroscopic data. The observed luminosity function of M30 shows an excess in the number of red giants relative to the number of turnoff stars, when comparing with the predictions of canonical models. Using the Hipparcos parallaxes for subdwarfs, we estimate distance modulus, $(m-M)_0$ as 14.75 ± 0.12 . Using the R and R' method, we find helium abundances, $Y(R)$ as 0.23 ± 0.02 , $Y(R')$ as 0.29 ± 0.02 , respectively. Finally, the cluster's age dispersion was deduced from 10.71 Gyr to 17 Gyr.

Keywords: M30, Globular Cluster, Photometry

요약: 구상성단 M30의 20'.5 × 20'.5 영역에 대한 CCD UBVI 측광 관측을 수행하여 색-등급도로부터 주계열 전향점과 색지수 $V_{TO} = 8.63 \pm 0.05$, $(B-V)_{TO} = 0.44 \pm 0.05$, $(V-I)_{TO} = 0.63 \pm 0.05$ 를 얻었으며, 색-색도로부터 $E(B-V) = 0.05 \pm 0.01$ 과 중원소 함량의 지표인 UV 색 초과량 $\delta(U-B) = 0.27 \pm 0.01$ 을 얻었다. 측광학적인 방법과 분광 관측 자료를 이용하여 중원소 함량 $[Fe/H] = -2.05 \pm 0.09$ 를 구하였다. 관측된 M30의 광도 함수는 이론적 모델에 비하여 전향점 부근에 비하여 적색 거성열의 초과 현상을 보였다. Hipparcos 위성에서 측정된 삼각 시차로부터 거리가 알려진 준왜성을 이용하여 주계열 맞추기를 하여 거리 지수 $(m-M)_0 = 14.75 \pm 0.12$ 를 구하였다. 헬륨 함량을 구하기 위하여 R과 R' 방법을 사용하여 $Y(R) = 0.23 \pm 0.02$, $Y(R') = 0.29 \pm 0.02$ 를 얻었다. 성단의 나이는 적용하는 방법과 모델에 따라서 10.7 Gyr에서 17 Gyr까지 분산을 보인다.

주요어: M30, 구상성단, 측광

서론

구상성단 M30는 은위 -46° 에 위치하고 있으며 중원소 함량이 극히 적은 구상성단중의 하나이다. M30에 대한 연구는 Dickens(1972)는 M30에 대해 수평계열 보다 밝은 별에 대한 UBVI 광전 측광 관측으

로부터 첫 색-등급도를 얻고, $E(B-V) = 0.06$, $\delta(U-B) = 0.03$ 를 얻었다. 이 후 Alcaino and Liller(1980)는 사진 측광으로부터 $E(B-V) = 0.02 \pm 0.02$, $(m-M)_V = 14.54 \pm 0.15$ 를 구하였고, 성단 내 별들의 종족별 분포를 조사하여 성단의 안쪽과 외각의 헬륨 함량이 다름을 보였다. Zinn and West(1984)는 Q_{39} 인자를 이용하여 $[Fe/H] = -2.13$ 을 얻었고, 강한 수소선을 확인하였다. Webbink(1985)는 $V_{HB} = 15.09$, $E(B-V) = 0.06$ 을 구하였다. Gratton(1985)은 $V_{HB} = 15.20$ 을 구하였다. Bolte(1986)는 CCD 측광관측으로부터 $E(B-$

*Corresponding author: leeoh119@blue.knu.ac.kr
Tel: 82-43-230-3794
Fax: 82-43-233-2960

$V)=0.05$, $(m-M)_V=14.65$ 를 구하였다. Piotta et al. (1987)은 사진 측광 관측으로부터 $V_{HB}=15.11 \pm 0.10$, $E(B-V)=0.03 \pm 0.03$, $(m-M)_0=14.5 \pm 0.5$ 를 구하였다. Rose et al.(1987)은 사진 측광으로부터 R 값의 중심거리에 대한 변화를 조사하여 질량이 작은 수평열이 중심부에 더 많음을 발견했다. Buonanno et al.(1988)은 CCD 측광 관측으로 $V_{TO}=18.65 \pm 0.1$, $(B-V)_{TO}=0.40 \pm 0.02$ 를 구하였고, Richer et al.(1988)은 UBV CCD 측광 관측으로 $E(B-V)=0.068 \pm 0.35$, $(m-M)_0=14.85 \pm 0.15$ 를 구하였고 질량분리 현상을 확인하였다. Piotta et al.(1988)은 색 경사가 $(B-V)$ 와 $(V-R)$ 에 대하여 0.18 ± 0.015 mag/dex와 0.09 ± 0.01 mag/dex로 성단의 중심부로 갈수록 푸른 색 분포를 보임을 알아내고 원인이 푸른 수평열이 중심에 집중되어있기 때문이라고 추정하였다. Buonanno et al. (1988)은 헬륨함량의 지표인 R 값이 성단의 반경에 따라 달라진다는 사실을 확인하였고, $V_{HB}=15.20 \pm 0.10$, $E(B-V)=0.04$ 를 구하였다, Claria et al.(1988)은 DDO 측광 관측으로 $[Fe/H] \leq -2.4$ 를 추정하였다. Bolte(1989)는 광도함수의 연구에서 M30이 역학적으로 이완된 항성계라고 해석하였다. Piotta et al.(1990)은 중심에서 $r=2'.9$ 와 $4'.4$ 두 영역에 대한 CCD 측광으로 $(m-M)_V=14.65$, $E(B-V)=0.05$ 와 16 Gyr의 나이를 구하였다. Bergbusch(1993)는 BV CCD 측광 관측으로부터 $E(B-V)=0.06$, $(m-M)_V=14.85$ 를 Minniti et al.(1993)은 금속함량이 적은 구상성단의 거성들에 대한 고분산 분광관측으로 M30의 $[Fe/H] = -2.10 \pm 0.08$ 를 구하였다. Yanny et al.(1994)는 허블 우주망원경(HST)을 이용한 성단의 중심부에 대한 측광 관측으로 30개의 청색낙오성을 보고하면서 다른 성단에 비하여 청색낙오성의 중심 집중도가 크다는 것을 발견하였다. Gregg(1994)는 밀집도가 높은 13개의 구상성단에 대한 적분 분광 관측으로 $[Fe/H] = -2.13$ 을 구하고, Burgarella and Buat(1996)은 중심부에 대한 CCD 측광으로 42개의 청색낙오성을 발견하였고, $0.20 \sim 0.24$ mag/dex의 색 경사를 발견하였다. Gebhardt et al.(1995)은 132개의 별에 대한 Fabry-Perot 분광관측 자료에서 $V_{rot} = 1.5 \pm 0.6$ (km/s)를 얻었다. Davidge(1995)는 근적외선 관측으로 J-K의 중심 거리에 따른 색경사를 확인하였다. Bergbusch(1996)는 BV CCD 측광 관측에서 $(m-M)_V=14.83$, $E(B-V)=0.06$ 을 구하고 $[Fe/H] = -2.03$, $[O/Fe] = +0.7$ 인 모델에 등연령곡선 맞추기를 하여 14 Gyr를 얻었다.

Piotta et al.(1997)은 HST를 이용하여 $M=0.13M_{\odot}$ 에 해당하는 $V=27^m$ 까지 색-등급도를 얻었다. VandenBerg et al.(1998)은 광도함수에서 거성열의 별 초과 현상을 중심 핵의 자전에 의한 진화의 지연 때문이라고 추정하였다. Sandquist et al.(1999)는 VI CCD 측광 관측에서 $E(V-I)=0.06$ 과 0.02 에 대하여 $(m-M)_V=14.87 \pm 0.12$ 와 14.65 ± 0.12 를 구하고 $M_V^{HB}=0.11$ 과 0.37 로 구하였다. 본 연구에서는 $V=11^m \sim 21^m$ 에 이르는 UBVI CCD 측광 결과를 얻었으며, 전향점(TO) 아래로 3등급 이상 내려가는 주계열(MS)부터 적색거성열(RGB)의 끝부분까지 이어지고, 수평열(HB)을 포함하는 완전한 색-등급도를 얻었다. 측광된 별의 수는 10,000여개이고, 이 자료는 성단의 여러 가지 물리량을 추정하는데 이용될 것이다. 제2절에서는 관측과 관측 자료의 분석과정, 제3절에서는 색-등급도와 색-색도의 특성을 논의한다. 제 4절에서는 성단의 여러 가지 물리량을 구하고, 제5절에서는 광도함수에 대하여 논의하고, 마지막으로 결과를 요약 하였다.

관측 및 자료 처리

관측 및 자료 분석

구상성단 M30의 측광 관측은 호주의 Siding Spring 천문대(SSO)의 1m 망원경(F/8)과 SITe 2K CCD를 이용하여 1997년 7월 2일에 이루어졌다. 사용한 SITe 2KCCD의 읽기 잡음은 $8.26e^{-1}$ 이고, 소자당 $0''.602$ 로 전체 관측시야는 $20'.5 \times 20'.5$ 이다. 필터는 Johnson UBV와 Cousins I를 사용하였다. 관측 영상의 수, 대기투과량, 기상 등은 Table 1에 정리하

Table 1. Observation Log for M30

Filter	Exposure Time(s)	Number of Frams	Airmass	FWHM(")
U	600	3	1.05-1.09	2.5
B	40	2	1.010	2.3
B	300	2	1,010, 1,013	2.3
V	20	2	1,013, 1,014	1.8
V	200	2	1,010, 1,102	2.5
V	900	1	1.120	3.0
I	5	1	1.026	1.7
I	9	1	1.022	1.7
I	100	2	1.016, 1.019	1.8
I	400	2	1.164, 1.192	2.5
Total		18		

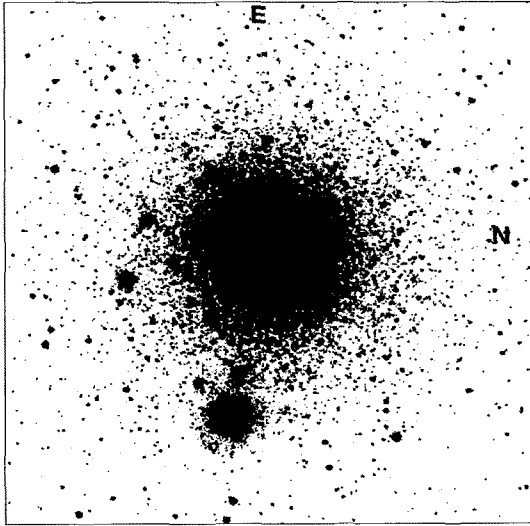


Fig. 1. M30 V CCD image (20'.5 × 20'.5).

였다. Fig. 1은 V 필터로 200초 노출한 M30의 모습이다. 그림에서 위쪽이 동쪽이며, 오른쪽이 북쪽이다. CCD 측광 관측 자료는 미국 국립 광학천문대(NOAO)의 IRAF(Image Reduction and Analysis Facility) 2.11을 이용하여 처리하였다. CCD 측광 자료의 처리는 일반적인 측광 순서에 따라서 관측한 자료에서 기기 요소에 의한 성분을 제거하는 전처리단계(Preprocessing), 구경측광(APPHOT)과 점퍼짐함수(PSF)측광의 순서로 10,000여 개 별의 등급을 구하였다.

표준화

표준화를 위하여 Menzies et al.(1989)의 E5, E7 영역의 표준성을 사용하였다. 표준화는 대기 소광계수를 먼저 구하고 색계수와 영점을 구하였다. I 등급의 경우 (V-I)와 (V-R)값이 큰 표준성은 관측이 가능한 가장 짧은 노출 시간인 5초에서 쉽게 포화되어 표준화에 어려움이 있을 것으로 예상되었다. 따라서 아주 큰 색지수를 가지면서 비교적 어두운 별인 GL 747.4를 별도로 추가 관측하였다. 표준화에 사용된 표준성의 V 등급과 각각의 색지수는 Menzies et al.(1989), Kilkenny et al.(1998)에 수록되어 있다.

표준성으로부터 구한 표준화식은 다음과 같다.

$$U = u - 1.781 + 0.134(U - B) - 0.529X \quad (U - B) \leq 0.25$$

$$U = u - 1.747 + 0.006(U - B) - 0.529X \quad (U - B) > 0.25$$

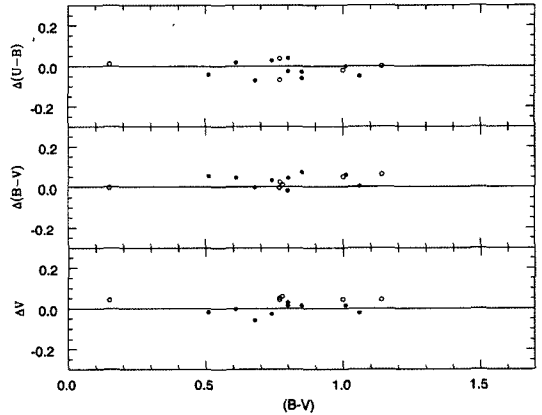


Fig. 2. The differences of results between this paper and Dickens (1972: filled circles) and Alcaino (1982: open circle).

$$B = b + 0.697 - 0.144(B - V) - \{0.297 - 0.030(B - V)\}X \quad (B - V) > 0.39$$

$$B = b + 0.633 - 0.019(B - V) - \{0.297 - 0.030(B - V)\}X \quad (B - V) \leq 0.39$$

$$V = v + 0.809 - 0.000(V - I) - 0.143X \quad (V - I) > 1.5$$

$$V = v + 0.734 + 0.050(V - I) - 0.143X \quad (V - I) \leq 1.5$$

$$I = i + 0.241 - 0.056(V - I) - 0.045X \quad (V - I) \leq 0.7$$

$$I = i + 0.153 - 0.070(V - I) - 0.045X \quad 0.7 < (V - I) \leq 1.4$$

$$I = i + 0.251 - 0.000(V - I) - 0.045X \quad (V - I) > 1.4$$

여기서 X는 투과대기량이고, 1차 소광계수와 영점은 각각의 밤에 대하여 별도로 구한 값을 사용하였다. 2차 소광계수와 색계수(color coefficient)는 I 등급을 제외한 나머지에 대하여 5일간 독립적으로 관측한 계수를 평균하여 사용하였다. I 등급의 색계수는 (V-I)값이 큰 표준성들이 대부분 포화되어 정확하게 구하기가 어려워 마지막 날 관측한 GL 747.4와 우리와 비슷한 날 관측하여 구한 Sung(1997)의 값을 평균하여 사용하였으며, U 등급의 색계수는 (U-B)=0.25에 B 등급은 (B-V)=0.39에서, V 등급은 (V-I)=1.5에서 그리고 등급은 (V-I)=0.7과 (V-I)=1.4에서 각각 변화를 보이고 있어 구간별로 나누어 색계수를 구하였다. 표준화가 끝난 자료를 이전의 광전측광 자료와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 검은 점은 Dickens(1972)의 자료이고, 원은 Alcaino and Wamsteker (1982)의 것으로 색에 따른 특이한 변화가 보이지 않고 잘 일치함을 볼 수 있다.

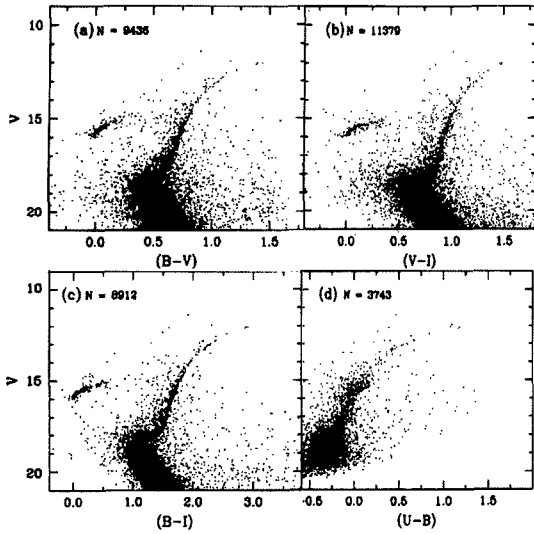


Fig. 3. M30 CMDs for all objects in the total UBVI data. (a) V vs. (B-V), (b) V vs. (V-I), (c) V vs. (B-I), and (d) V vs. (U-B).

색-등급도와 색-색도

색-등급도

표준화된 등급으로부터 각각 $V-(B-V)$, $V-(V-I)$, $V-(B-I)$, $V-(U-B)$ 의 색-등급도를 Fig. 3에 나타내었다. M30의 색-등급도의 형태학적인 특징은 적색 수평열(RHB), 점근거성열(AGB), 그리고 RR Lyrae 변광성 영역에 별이 거의 없으며 RR Lyrae의 경우 GCVS에 3개, Sandquist(1999)에는 9개가 알려져 있다. 성단의 중심부를 HST로 관측한 Yanny(1994)는 1개의 RR Lyrae 변광성을 찾았다. 이에 반하여 청색 수평열(BHB)와 RGB는 잘 보이고 있다. BHB가 RHB에 비하여 잘 보이는 것은 구상성단의 경우 수평열의 형태는 성단의 나이가 증가할수록, 주어진 나이에서 헬륨함량이 많을수록 항성핵의 자전이 무시할 정도가 아닐 정도로 크다면 푸른 쪽으로 치우치나 중원소 함량과 CNO함량에 따른 효과는 일반성을 보이지는 않는다(Lee, 1978). 색-등급도에서 성단의 앞에 놓인 날벌들은 $V=17.5$ 부근을 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 가로지르는 형태로 나타나고 있음을 볼 수가 있다. $V-(B-V)$ 의 특징은 적색거성열(RGB)과 BHB가 잘 보이고 RGB의 13.6등급 부근에 뚜렷한 틈새가 보이며, 그 밑으로 여러 개의 틈새가 보인다. BHB에는 15.6등급 부근에 틈새가 보인다. M30에는 RR Lyrae 변광성이 거의 없기 때문에 VHB를 구하기

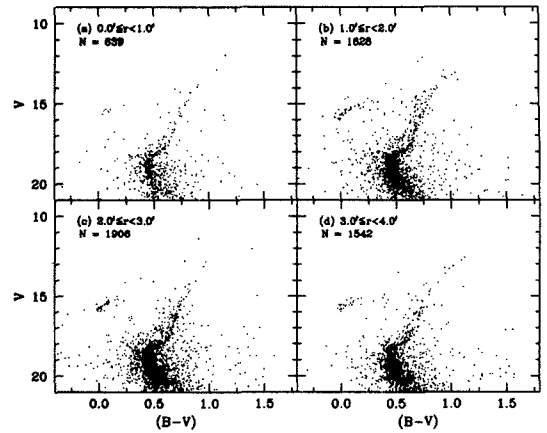


Fig. 4. M30 CMDs binned radial direction from cluster center for all objects V-(B-V) data.

가 매우 어렵다. 그래서 Ferraro et al.(1999)의 $V_{ZAHB} = \langle V_{HB} \rangle + 0.106[M/H]^2 + 0.234[M/H] + 0.193$ 의 관계식으로부터 $V_{ZAHB} = 15.30 \pm 0.1$ 일 때 $V_{HB} = 15.10 \pm 0.1$ 을 얻었다. 여기서 $[M/H]$ 의 값은 $[M/H] = [Fe/H] + \log(0.638f\alpha + 0.365)$ ($[Fe/H] < -0.8: f\alpha = 10^{0.28}$, $[Fe/H] > -0.8: f\alpha = 10^{-0.35}$)를 이용하여 얻었다. 위의 결과와 $V-(B-V)$ 색-등급도로부터 $V_{HB} = 15.10 \pm 0.1$, $V_{TO} = 18.63 \pm 0.05$, $(B-V)_{TO} = 0.44 \pm 0.05$ 를 구하고 이전의 연구 결과와 비교하여 Table 2에 정리하였다. RGB와 BHB이 잘 보이고 $V=15.6^m$ 근처에 무더기와 $V=16.0^m$, $V=13.7^m$ 부근의 틈새가 보인다. $V-(V-I)$ 의 특징은 $V-(B-V)$ 에서 보이던 틈새가 더욱 뚜렷하게 보이며, 전향점 부근의 틈새가 두드러지게 보인다. 전향점의 색지수는 $(V-I)_{TO} = 0.63 \pm 0.05$ 이다. 이 값은 이전의 연구 결과와 비교하여 Alcaino(1998)의 것과는 일치하고 있으나 Sandquist et al.(1999)의 것과는 다소 차이를 보인다. $V-(B-I)$ 의 특징은 HB와 RGB가 다른 색에 비하여 더 잘 분리되어 보이며, 전향점의 색지수는 $(B-I)_{TO} = 1.07 \pm 0.05$ 이다. 이 값은 이전의 연구 결과와 잘 일치한다. 중심거리 $0.0 \leq r < 1.0$, $1.0 \leq r < 2.0$, $2.0 \leq r < 3.0$, $3.0 \leq r < 4.0$ 과 $V-(B-V)$ 에 대하여 색-등급도를 Fig. 4에 나타내었다. 성단의 중심 거리에 따른 색의 변화 형태가 뚜렷한 특징을 보이지 않는다.

색-색도

Fig. 5는 $(U-B)-(B-V)$ 색-색도이다. Fig. 5a는 성단의 중심에서 $2.0 < r < 10.0$ 영역의 모든 별들을

Table. 2. Comparison of photometric parameters with previous studies

V_{HB}	V_{TO}	$(B-V)_{TO}$	$(V-I)_{TO}$	Author
15.10 ± 0.1	18.63 ± 0.05	0.44 ± 0.05	0.63 ± 0.05	This Study
15.08 ± 0.06	18.63 ± 0.05	-	0.575 ± 0.05	Sandquist (1999)
-	18.6	0.41	-	Bolte (1987)
-	18.65 ± 0.05	0.46 ± 0.03	0.62 ± 0.05	Alcanio (1998)
15.20 ± 0.10	18.65 ± 0.1	0.4 ± 0.02	-	Buonanno (1988)
15.09	-	-	-	Webbink (1985)
15.20	-	-	-	Gratton (1985)
15.11 ± 0.10	-	-	-	Piotto et al. (1987)
15.10	-	-	-	Peterson (1987)

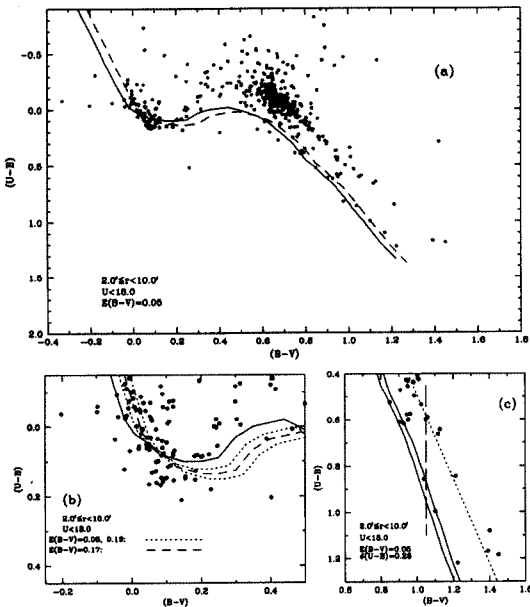


Fig. 5. (U-B)-(B-V) diagrams (a) The whole measured field with brighter than $U = 18.0$ and radius $2' < r < 10'$. (b) and (c) are diagrams for getting an interstellar reddening value and an UV excess, respectively. Solid and dot lines are represented as unreddened and reddened ZAMS lines, respectively.

나타낸 것이며, 실선은 ZAMS 선이고, 긴 점선은 $E(B - V) = 0.05 \pm 0.01$ 의 선이다. Fig. 5b는 BHB의 별들을 나타낸 것이다. BHB의 별들은 중원소 함량에 따른 덮개효과를 거의 받지 않기 때문에 성간 소광량을 구하는 지표로 사용된다(Lee, 1985). BHB을 이용하여 구한 성간 적색화량은 0.05 ± 0.01 이다. Fig. 5c는 적색거성열의 별들을 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 ZAMS를 나타낸 선이고, 긴 점선은 $E(B - V) = 0.05$ 로 보정된 선이다. 점선은 적색거성열의 별에 맞춘 UV 색초과 선이며 수직의 긴 점선은 $(B - V)_0$

= 1.0에서의 중원소 함량의 지표로 이용되는 $\delta(U - B)$ 값을 나타낸다. 여기서 구한 UV초과량은 $\delta(U - B) = 0.27 \pm 0.01$ 이다.

성단의 기본 물리량

측광 관측으로부터 얻을 수 있는 성단의 여러 가지 물리량인 중원소 함량, 거리지수, 헬륨함량, 나이, 광도함수를 색-등급도, 색-색도 그리고 이론적인 모형에 맞추어서 구하였다.

중원소 함량

중원소 함량은 UV 색초과량, HB의 광도와 RGB의 등급과 색지수를 이용하는 방법으로 구하여 $[Fe/H] = -1.99 \pm 0.12$ 를 얻었다. 이 자료를 분광관측으로 얻은 자료와 평균하여 최종적으로 $[Fe/H] = -2.05 \pm 0.09$ 가 되었다.

1) UV 색초과량 $\delta(U - B)$

색-색도에서 RGB의 중원소 함량에 의한 덮개효과로 나타나는 UV 색초과량을 이용하여 중원소 함량을 결정하는 방법이다(Lee, 1985).

$$[Fe/H] = -0.159 - 2.971\delta(U - B) - 0.277[\delta(U - B)]^2 - 61.007[\delta(U - B)]^3$$

$$\delta(U - B) = 0.27 \pm 0.01 \Rightarrow [Fe/H] = -2.18 \pm 0.1$$

2) HB와 $\Delta V_{1.4}$ 의 RGB 등급과의 차이(Zinn and West, 1984)

색-등급도의 RGB의 기울기는 중원소 함량에 따라 영향을 받는다. 중원소 함량이 적을 경우 경사가 급하고 중원소 함량이 많을 경우 완만한 기울기를 갖는다. 따라서 RGB의 기울기를 구하면 중원소 함량을 추정할 수가 있다(Zinn and West, 1984). 여기서

$\Delta V_{1.4}$ 는 $(B - V)_0 = 1.4$ 에서 HB의 밝기와 RGB 사이의 등급차이이다.

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.924\Delta V_{1.4} + 0.913 \quad (\Delta V_{1.4} = 15.13 - 12.0 = 3.13) \\ = -1.98 \pm 0.23$$

3) HB와 $\Delta V_{1.2}$, $\Delta V_{1.15}$, $\Delta V_{1.10}$ 의 RGB 등급과의 차이(Sarajedini and Alejandra, 1995)

중원소 함량의 영향에 따라 RGB의 광도가 영향을 받기 때문에 HB와 RGB의 광도 차이를 이용하면 중원소 함량을 구할 수 있다.

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.9367\Delta V_{1.2} + 0.2606 \text{ rms} = 0.05 \text{ dex} \\ (\Delta V_{1.2} = 2.34 \pm 0.05) \\ = -1.93 \pm 0.08$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.9439\Delta V_{1.15} + 0.0270 \text{ rms} = 0.04 \text{ dex} \\ (\Delta V_{1.15} = 2.09 \pm 0.05) \\ = -1.95 \pm 0.1$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.9609\Delta V_{1.10} - 0.2400 \text{ rms} = 0.04 \text{ dex} \\ (\Delta V_{1.10} = 1.79 \pm 0.05) \\ = -1.96 \pm 0.11$$

4) $\Delta V_{\text{Bump}}^{\text{HB}}$ 를 이용(Sarajedini and Alejandra, 1995) RGB 무더기의 위치는 중원소 함량과 밀접한 관계가 있다 따라서 중원소 함량의 영향을 거의 받지 않는 HB의 별과 RGB별의 무더기 등급차이를 이용하여 중원소 함량을 구할 수 있다.

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -1.33 + 1.43\Delta V_{\text{Bump}}^{\text{HB}} \\ (V_{\text{HB}} = 15.10 \pm 0.05, V_{\text{Bump}} = 15.67 \pm 0.05) \\ = -2.13 \pm 0.14$$

5) $(B - V)_{0.6}$ 를 이용(Sarajedini and Alejandra, 1995) 수평열의 등급과 같은 등급의 적색거성열의 성간 소광량이 보정된 색지수를 구하여 중원소 함량을 구할 수 있다. $(B - V)_{0.6}$ 는 HB 등급에 해당하는 RGB의 고유 색지수이다.

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -5.84 + 5.37(B - V)_{0.6} \\ (V_{\text{HB}} = 15.13 \pm 0.05, (B - V)_{0.6} = 0.72 \pm 0.01) \\ = -1.91 \pm 0.11$$

6) Zinn and West(1984)은 독립적인 적색화인자 Q_{39} (3820-4010Å의 CaII의 H & K와 CN band를 포함하는 영역)를 정의하여 이 Q_{39} 를 이용하여 중원소 함량을 측정하여 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.13 \pm 0.13$ 을 얻었고 Gregg(1994)는 총합분광을 이용하여 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.13 \pm 0.05$ 를 얻었다.

거리

성단의 나이를 구하기 위해서는 첫 번째로 성단의 거리를 측정해야 한다. 성단까지 거리를 측정하는 방법은 이미 삼각시차로 거리가 알려진 준왜성을 이용하여 주계열 맞추기를 통하여 거리를 알아내는 방법, 중원소 함량의 영향을 거의 받지 않는 수평열의 광도와 주계열 전향점의 광도차이를 이용하는 방법 ($\Delta V_{(\text{TO}-\text{HB})}$), 이론적 등연령곡선에 맞추어 거리를 측정하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Hipparcos 위성을 이용하여 삼각 시차가 측정된 준왜성들을 이용한 주계열 맞추기 방법과 이론적 등연령곡선에 맞추는 방법을 사용하였다.

1) 주계열 맞추기

삼각 시차로 거리가 알려진 준왜성은 지상관측으로 얻어진 자료(Carney and Aaronson, 1979; Stetson and Harris, 1988)와 Hipparcos 위성을 이용한 자료(Reid and Gizis, 1998; Pont et al., 1998)가 있다. Hipparcos 위성으로 시차가 측정된 별은 약 118,000여 개가 된다. 이 중에서 Reid and Gizis(1998)는 중원소 함량이 적은 99개의 준왜성을 선정하여 Lutz-Kelker 보정(Lutz and Kelker, 1973)을 하여 중원소 함량, 절대등급, 색지수를 포함하는 목록을 작성하였다. 이 중에서 중원소 함량이 적은 10개의 준왜성을 선정하였다. 지상 관측 자료를 이용하기에는 측광자료가 지상에서 삼각 시차가 측정된 준왜성에 적용하기에는 무리가 있었기 때문이다. Fig. 6a는 Reid and Gizis(1998)의 자료에 주계열 맞추기를 한 경우 $E(B - V) = 0.05$ 일 때 거리지수 $(m - M)_0 = 14.85$ 를 얻었고, Fig. 6b는 Pont et al.(1998)의 자료를 이용하여 $E(B - V) = 0.05$ 일 때 거리지수 $(m - M)_0 = 14.65$ 를 얻었다. 이 값을 평균하여 $(m - M)_0 = 14.75$ 를 얻었다. 이 값은 Sandquist et al.(1999)가 얻은 $(m - M)_0 = 14.7$ 의 값과 잘 일치하고 있다. 그에 반하여 Gratton(1997)이 구한 $(m - M)_0 = 14.96 \pm 0.08$ 값과는 차이를 보인다. 이것은 Gratton (1997)은 Bolte(1987)와 Richer et al. (1988)의 기준선을 이용하였는데 이때 사용한 성간 소광량은 $E(B - V) = 0.039$ 로 우리와 다르기 때문이다. Gratton et al.(1997)의 경우 Pont et al.(1998) 보다 중원소 함량이 적게 추정되어있고, 성간 소광량과 중원소 함량에 따라 거리 지수가 달라지기 때문에 Gratton et al.(1997)과의 차이는 적용한 성간 소광량과 중원소 함량의 차이에 의한 것으로 여겨진다.

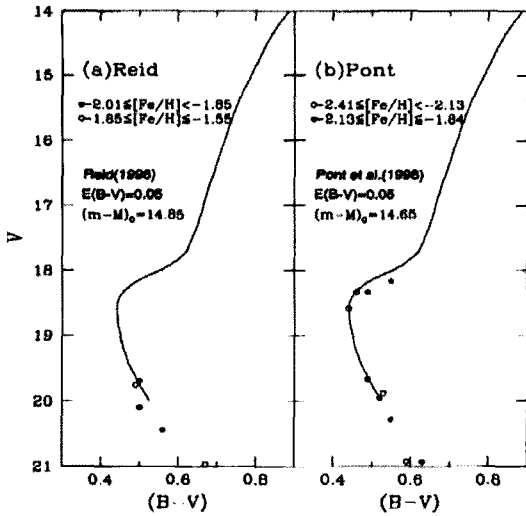


Fig. 6. MS fitting using by metal poor subdwarfs. (a) Reid and Gizis (1998), (b) Pont (1998).

2) 이론적 모형 맞추기

Dorman(1992, 이하 DM92과 Mazzitelli et al., 1995, 이하 MDC95)의 이론적인 수평열 모델에 맞추어서 거리를 구하였다. DM92에서 $[Fe/H] = -2.03$ 에 적용된 인자는 $Y_{MS} = 0.2350$, $Y_{HB} = 0.247$, $[O/Fe] = 0.7$ 이다. Fig. 7에서 DM92의 모형에 $V_{ZAHB} = 15.30 \pm 0.1$ 맞춘 경우 $E(B-V) = 0.05$ 에 대하여 $(m-M)_0 = 14.66$ 이며, MDC95의 모형에 맞춘 경우 $(m-M)_0 = 14.75$ 이다. MDC95의 모형은 DM92의 모형에 비하여 같은 중원소 함량에 대하여 더 밝기 때문에 상대적으로 더 큰 거리지수를 보이게 된다.

헬륨 함량

헬륨 함량을 측정하기 위하여 Buzzoni et al.(1983)의 R-method와 R'-method를 이용하였다. 여기서 $R = N_{HB}/N_{RGB}$, $R' = N_{HB}/(N_{RGB} + N_{AGB})$ 이며, N_{AGB} 는 HB보다 밝은 RGB별의 개수를 뜻한다. R-method는 헬륨연소를 에너지원으로 사용하는 HB와 수소 연소를 에너지원으로 사용하는 RGB의 개수 비를 헬륨함량의 지표로 사용한 것이다. R과 R' 방법을 사용하여 $Y(R) = 0.23 \pm 0.02$, $Y(R') = 0.29 \pm 0.02$ 를 얻었다. 이 값은 이전의 연구에서 얻은 $Y = 0.23-0.27$ (Dickens, 1972; Alcaino and Wamsteker, 1982; Buzzoni et al., 1983; Richer, 1988)의 값들과 잘 일치하고 있다. HB와 RGB의 차등복사보정 값은 Sandquist et al.(1999)가 Dorman(1992)과 Bergbush and Vandenberg(1992)의 항성진화 모델로부터 구한 $\Delta V_{BC} = 0.27$ 을 사용하였다. 구상성단 M30의 R 값은 비슷한 중원소 함량을 보이는 다른 성단들에 비하여 높게 나타난다. 이러한 현상의 설명은 항성의 자전에 의한 심층혼합과 C, N, O, Na, Al의 양의 변화로 설명되고 있다(Sweigart, 1997). 성단의 밀집도에 따른 환경적인 요인에 의한 가능성도 있지만 Yanny(1994)의 HST자료를 함께 사용한 Sandquist et al.(1999)의 중심 거리에 따른 HB와 RGB 분포의 분석으로부터 환경적인 요인에 의한 영향은 적은 것으로 나타나고 있다. Alcaino and Wamsteker(1982)와 Sandquist et al.(1999)는 R 값이 성단의 중심거리에 따라 변화하여 가는 현상을 보고하였고, 본 연구에서도 이러한 현상이 발견되었다. 이것은 수평열의 별들이 성단의 중심 부근에 집중되어 있음을 알 수 있게 한다.

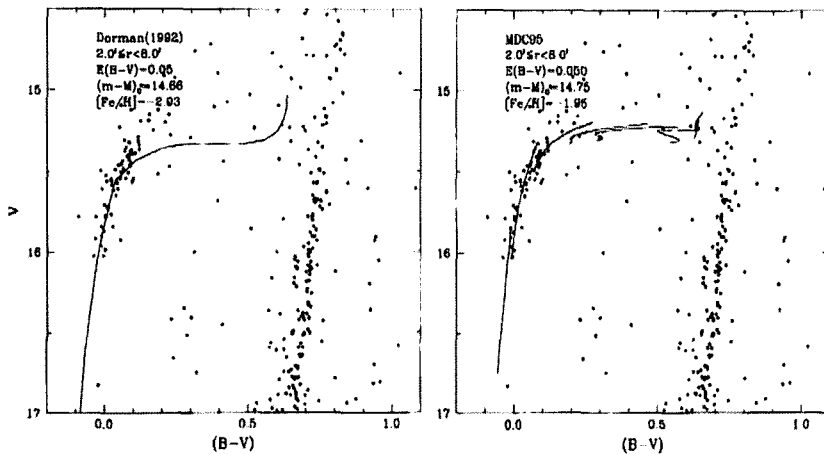


Fig. 7. Fitting on the Dorman's ZAHB model (1992) (Left) and MDC95's (Right).

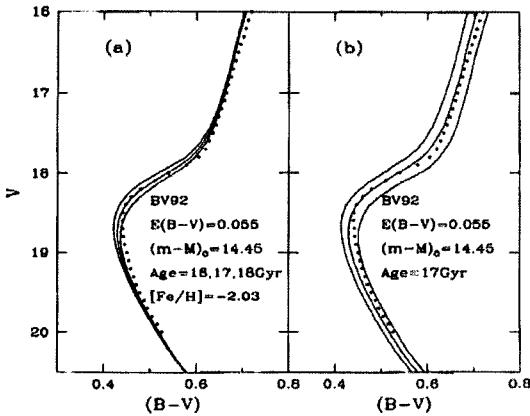


Fig. 8. BV92, O-enhanced isochrone fit to the fiducial line of M30.

나이

구상성단의 연구의 계속되는 주된 이유는 구상성단의 나이와 중원소 함량이 우주의 나이, 우리 은하의 형성 및 화학적 진화에 직접적인 관련을 가지고 있기 때문에 구상성단의 나이를 정확하게 결정하려는 수많은 노력들이 있어왔다. 구상성단의 나이를 구하는 방법에는 이론적인 등연령곡선에 관측된 색-등급도를 맞추어서 구하는 방법 전향점의 절대 광도로부터 구하는 방법($M_{V,TO}$) 그리고 잘 연구된 성단의 색-등급도와 비교하여 상대적인 나이를 알아내는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 이론적 등연령곡선에 맞추어서 나이를 구하는 방법과 전향점의 절대등급을 이용하는 방법을 사용하였다. Vandenberg et al.(1990)는 중원소 함량이 비슷한 구상성단의 색-등급도를 비교하여 중원소 함량이 비슷한 구상성단(M68, M92, NGC6397)의 나이가 0.5 Gyr 내에서 일치함을 보였다.

1) 등연령곡선(Isochrone) 맞추기

Fig. 8은 Burgbusch and Vandenberg(1992)의 산소 함량을 고려한 BV92 모형에 색-등급도의 기준선을 맞춘 것이다. Fig. 8에서 적용한 $E(B-V)=0.055$, $(m-M)_0=14.45$ 에 맞추었을 경우 가장 잘 맞는 나이는 17 ± 1 Gyr이다. Fig. 9는 C, N, O 함량을 고려한 V98 모형에 맞추었을 경우 17 Gyr에 대하여 $[Fe/H] = -2.03$ 에 잘 맞고 있다.

2) ΔV_{HB}^{TO} 과 $M_{V,TO}$ 을 이용한 나이 계산

색-등급도로 부터 구한 $V_{HB}=15.10$, $V_{TO}=18.63$ 을 이용하여 $\Delta V_{HB}^{TO} = 3.53$ 을 구하였다. Peterson(1987)의

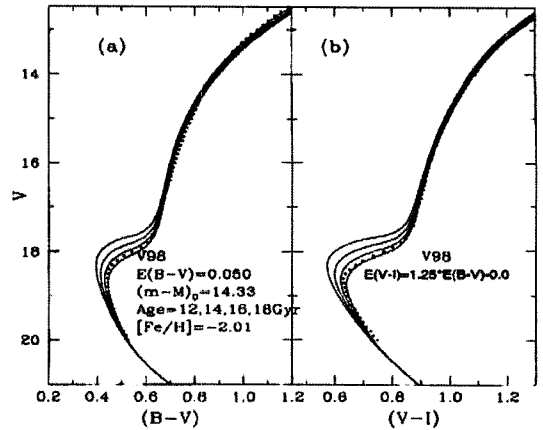


Fig. 9. V98, α -element enhanced isochrone fit to the fiducial line of M30.

$\log \tau = 0.440 \Delta V_{HB}^{TO} - 0.055 [Fe/H] + 8.586$ 관계식으로부터 $\log \tau = 10.22 \pm 0.01$ 을 얻었다. 이 값은 Peterson (1987)의 10.28 보다 다소 작으며, 이는 Peterson(1987)이 적용한 중원소 함량 $[Fe/H] = -2.32$ 의 차이에 기인한다. 이로부터 구한 나이는 16 Gyr이다. Hipparcos의 삼각 시차에로 얻은 거리지수로부터 $M_{HBV} = 0.25 \pm 0.05$ 로부터 $M_{V,TO} = 3.78 \pm 0.05$ 를 얻고, Ferraro(1999)의 $M_{HBV} = 0.23[M/H] + 0.94$ 관계식으로부터 $M_{HBV} = 0.52 \pm 0.03$ 을 이용하여 구한 $M_{V,TO} = 4.04 \pm 0.02$ 를 이용하여 Sandquist et al.(1996)의 경험적 관계식 $\log \tau = -0.874 - 0.118[Fe/H] - 0.08[\alpha/Fe] + 0.446M_{V,TO}$ 으로부터 각각 10.71 Gyr, 14.13 Gyr를 얻었다.

광도 함수

성단의 광도함수는 그 성단에 속한 별의 진화하는 모습을 나타낸다. 따라서 날별들의 영향이 크면 구상성단의 색-등급도의 특성을 명확하게 드러내지 않을 가능성이 있다. M30는 은위 -46에 위치하고 있기 때문에 날별들에 의한 영향이 적지만 MS와 RGB의 광도함수를 구하기 위하여 기준선을 따라 기준선에서 멀리 벗어나는 별들을 제거하고 광도함수를 구하였다. 광도함수의 완전도를 고려하여 $2'.0 < r < 8'.0$ 영역을 선정하여 0.2등급 간격으로 별을 세어서 구하였다. HB와 AGB의 광도함수는 별들의 구분이 잘되지 않아서 $0'.0 < r < 8'.0$ 의 별들을 직접 세어서 구하였다.

HB와 AGB의 광도 함수

Fig. 10은 HB와 AGB의 광도 함수를 나타낸 것이

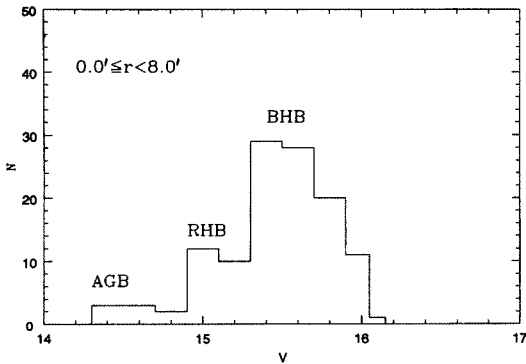


Fig. 10. An LF for BHB, RHB, and AGB of M30.

다. M30의 HB의 광도함수는 BHB가 잘 보이며, M15 (Stetson, 1994), NGC 288(Buonanno et al., 1984) 등에서 보이는 극청색수평열(EHB)는 보이지 않는다. RHB 별은 Sandquist et al.(1999)가 12개를 보고하였으며, AGB는 잘 보이지 않는다. HB의 형태와 위치는 RGB의 끝에서 헬륨 발화 후 HB로 떨어질 때 질량의 손실과 수소껍질의 질량 그리고 금속함량에 따라 달라진다. 금속함량이 많으면 RGB에 가까운 RHB에 떨어지며, 금속함량이 적으면 더 넓은 지역에 분포하게 된다(Chiosi et al., 1992). 또한 나이와 중원소 함량이 비슷한 경우 헬륨함량이 증가할수록 헬륨 핵의 수축에 의한 온도 상승으로 수소껍질의 연소를 가속시키기 때문에 HB에서 더 푸른 쪽으로 치우치게 된다(Chiosi et al., 1992). HB는 RGB의 끝에서 약 20%의 질량 손실을 가정하고 있다. 그러나 똑

같은 질량 손실로는 수평열의 넓은 분포를 설명하기가 어렵기 때문에 RGB의 끝에서 질량의 손실에 차이를 주는 다른 변수를 도입하여야할 필요성이 있다. 그 중의 하나가 항성의 자전이다. 항성의 자전이 무시할 정도가 아니라면 중력 수축을 방해하게 되고 따라서 헬륨 발화가 지연되게 된다. 이 동안에 헬륨 핵의 질량이 더 증가하게 되고 따라서 질량의 손실도 더 증가하게 되어 결국 HB에서 푸른 쪽으로 치우치게 된다(Lee, 1978).

MS와 RGB의 광도 함수

Fig. 11의 왼쪽은 MS와 RGB의 광도함수와 이론적인 광도함수(BV92)와 비교한 것이고 Fig. 11의 오른쪽은 이전의 연구된 광도함수와의 비교를 나타낸 것이다. $V = 15.8^m$ 을 정점으로 하는 무더기와 $V = 16.8^m$ 을 정점으로 두 개의 무더기가 보이며, 무더기 사이로 G1, G2, G3의 뚜렷한 틈새가 보인다. 이러한 틈새와 무더기는 성단마다 약간씩 위치의 차이는 있으나 많은 성단에서 발견되고 있다. 이러한 사실은 틈새의 존재가 실재함을 나타내는 것이다. 이러한 틈새와 무더기를 이론적인 광도함수에서는 아직까지 완벽하게 재현해 내고 있지 못함을 볼 수 있으며, RGB 별의 초과 현상이 보이고 있다. RGB의 광도함수에서 틈새와 무더기의 존재는 RGB에 따르는 진화 시간이 일정하지 않음을 나타낸다. RGB의 틈새와 무더기에 대한 이론적인 설명은 Chiosi et al.(1992)과 Demarque et al.(1972)에 따르면 MS 수소 연소 결과

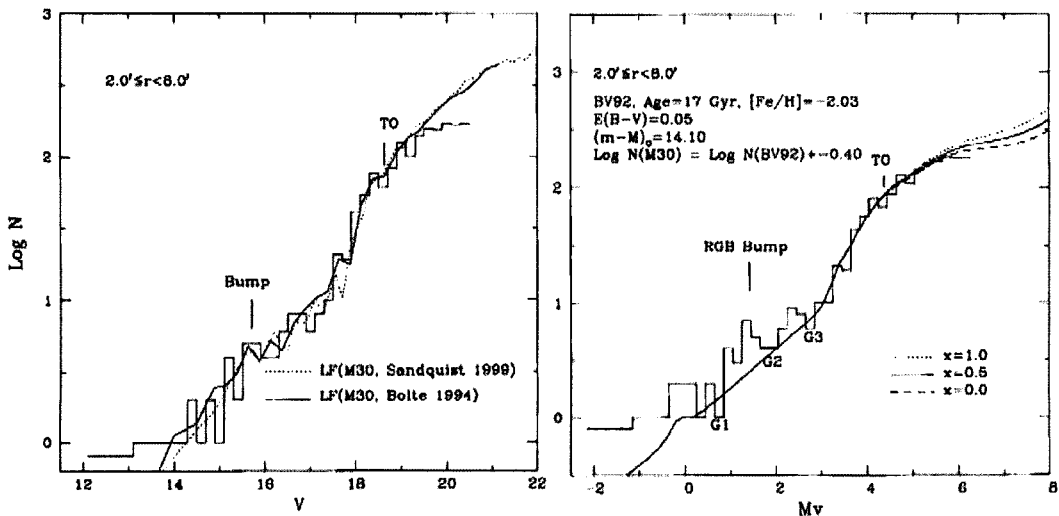


Fig. 11. Left: V-band LF for M30, Right: Comparison of our LF, Sandquist (1999) and Bolte (1994).

헬륨핵의 질량이 별 전체 질량의 10%인 Schonberg-Chandrasekhar 한계에 도달하게 되면 중력 수축으로 중심부의 온도가 올라가면서 바깥부분을 급격하게 팽창시켜 색-등급도 상에서 오른쪽으로 진화하게 된다. 항성의 내부가 안정되면서 중심부의 수소 껍질에서부터 시작된 연소가 천천히 외각으로 상승한다. 그러나 수소껍질의 연소가 천천히 외각으로 상승하는데 반하여, 별 외각의 대류 표피는 점점 더 깊어져서 이전에 만들어진 내부층과 화학적 불연속면을 형성하게 된다. 이때 내부로부터 상승하던 수소 껍질이 이 불연속면과 만나게 되면 광도의 증가가 느려지게 되어 무더기를 형성하게 된다. 틸새의 생성은 고속 회전핵 이론이 있다(Demarque et al., 1972). 이 이론에 따르면 고속의 회전핵과 외각의 대류층 사이의 전이 영역에서 온도와 압력의 경사가 생기고 내부의 수소껍질이 외각으로 상승하여 대류층에 들어가면 온도가 갑자기 증가하게 되어 별의 광도가 급격하게 상승하게 된다. 따라서 틸새의 바로 위에 무더기가 있어야 한다. M30에서 나타나는 틸새와 무더기는 이 이론을 뒷받침한다고 볼 수 있다.

연구 요약 및 토의

구상성단 M30에 대한 CCD UBVI 측광 관측으로부터 다음의 연구 결과들을 얻었다.

① V 등급에 대한 $(B-V)$, $(V-I)$, $(U-B)$, $(B-I)$ 의 색-등급도로부터 주계열 전향점 $V_{T0} = 18.63 \pm 0.05$, $(B-V)_{T0} = 0.44 \pm 0.05$, $(V-I)_{T0} = 0.63 \pm 0.05$ 를 얻었다. 이 값들은 이전의 연구 결과와 비교하여 0.02등급 정도 붉은 것이나 오차의 범위에서 일치하며, 이러한 차이의 원인은 Landolt 표준성과 Menzies의 남반구 표준성의 차이에 기인하는 것으로 여겨진다. 이러한 표준성의 차이에 따른 연구 결과들이 속속 보고되고 있으나 표준성간의 표준계 변환 차이에 대한 연구가 좀더 필요하다고 생각된다.

② 색-색도로부터 청색수평열의 별을 이용하여 성간 소광량 $E(B-V) = 0.05 \pm 0.01$ 을 구하였다고 중원소 함량의 지표로 사용할 색차와 양 $\delta(U-B) = 0.27 \pm 0.01$ 을 구하였다.

③ 측광학적으로 중원소 함량을 구하여 분광으로 구한 값과 평균을 취하여 $[Fe/H] = -2.05 \pm 0.09$ 를 얻었다.

④ 헬륨함량은 R 및 R'-method를 사용하여 $Y(R) =$

0.23 ± 0.02 , $Y(R') = 0.29 \pm 0.02$ 를 얻었다. 헬륨 함량의 지표인 R 및 R'의 값은 중심거리에 따른 변화가 보인다. 이러한 현상의 설명은 성단의 환경적인 영향과 항성핵의 자전에 의한 혼합 효과 중 후자가 더 타당한 이론으로 여겨진다.

⑤ Hipparcos 시차를 이용하여 거리지수 $(m-M)_0 = 14.75$ 를 얻었다. 이 값은 기존의 지상관측 자료와 비교하여 훨씬 큰 값이며 이론적 모형 맞추기에 의한 거리지수 보다 더 큰 값이다. 지상관측으로부터 얻은 시차의 자료는 색-등급도가 지상관측 준왜성에 맞추기에는 충분하지 않다고 여겨져 사용하지 않았다.

⑥ M30의 나이는 적용하는 방법에 따라 10.7 Gyr에서 17 Gyr까지 다양한 분포를 보였으며 이것은 성단까지의 거리의 문제와 이론적인 모형의 불완전에 기인한다.

⑦ M30의 주계열과 광도함수로부터 적색거성열의 별이 이론적 예측보다 초과되는 현상과 틸새들의 존재를 재현하지 못하는 현상을 발견하였다. 이러한 틸새들은 다른 구상성단에서도 뚜렷하게 나타나고 있어 실재하는 것으로 여겨진다.

참고문헌

- Alcaino, G. and Wamsteker, W. 1982, Photometry in the central region of the globular cluster NGC 7099. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 50, 141-146.
- Alcaino, G., Liller, W., Alvarado, F., Kravtsov, V., Ipatov, A., Samus, N., and Smirnov, O., 1998, Multicolor NTT CCD Photometry of the Post-Core-Collapse Globular Cluster M30. *The Astronomical Journal*, 115, 1492-1499.
- Bergbusch, P.A., 1993, Luminosity functions for post-turnoff stars in globular clusters. I-NGC 288. *The Astronomical Journal*, 106, 1024-1048.
- Bergbusch, P.A., 1996, Luminosity Functions for Post-Turnoff Stars in Globular Clusters. II. NGC 7099. *Astronomical Journal*, 112, 1061-1072.
- Bergbusch, P.A., VandenBerg, D.A., 1992, Oxygen-enhanced models for globular cluster stars. II-Isocrones and luminosity functions. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 81, 163-220.
- Bolte, M., 1986, Deep CCD Photometry of the Globular Clusters NGC 362 and NGC 7099. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 18, 1037.
- Bolte, M., 1987, Deep CCD photometry of the globular cluster NGC 7099. *Astrophysical Journal*, 319, 760-771.
- Bolte, M., 1989, Mass segregation in the globular cluster

- M30. *Astrophysical Journal*, 341, 168-174.
- Buonanno, R., Corsi, C.E., Pecci, F.F., Liller, W., Alcaino, G., 1984, On the suggested peculiarity of the galactic globular cluster NGC 288. *Astrophysical Journal*, 277, 220-226.
- Buonanno, R., Caloi, V., Castellani, V., Corsi, C.E., Ferraro, I., and Piccolo, F., 1988, CCD photometry of stars in the metal-poor globular cluster NGC 7099 (M30). *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 74, 353-365.
- Buonanno, R., Corsi, C.E., and Fusi Pecci, F., 1989, The ages of globular clusters and the Sandage period-shift effect. *Astronomy and Astrophysics*, 216, 80-108.
- Burgarella, D. and Buat, V., 1996, Stellar population and color gradients in the post-core-collapse globular cluster M 30 (NGC 7099). *Astronomy and Astrophysics*, 313, 129-139.
- Buzzoni, A., Fusi F.F., Buonanno, R., and Corsi, C.E., 1983, Helium abundance in globular clusters - The R-method. *Astronomy and Astrophysics*, 128, 94-101.
- Carney, B.W., Aaronson, M., 1979, Subdwarf bolometric corrections. *Astronomical Journal*, 84, 867-871.
- Chiosi, C., Wood, P., Bertelli, G., Bressan, A., 1992, On the instability strip of the Cepheid stars, *Astrophysical Journal*, 387, 320-328.
- Claria, J.J., Minniti, D., and Gomez, M.N., 1988, The extremely metal-poor globular cluster M30 (NGC 7099). *Astronomy and Astrophysics*, 199, 1-4.
- Davidge, T.J., 1995, Near-Infrared Photometry of the Core-Collapsed Metal-Poor Globular Cluster NGC 5946 and NGC 7099. *Astronomical Journal*, 110, 1177-1452.
- Demarque, P., Mengel, J.G., and Sweigart, A.V., 1972, A Possible Explanation of the Gaps on the Giant Branch of M15. *Astrophysical Journal*, 173, 27-32.
- Dickens, R.J., 1972, UBV photometry of the metal rich globular cluster NGC 6171. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 157, 299-307.
- Dorman, B., 1992, Oxygen-enhanced models for globular cluster stars. III-Horizontal-branch sequences. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 81, 221-250.
- Ferraro, F.R., Messineo, M., Fusi, P.F., de Palo, M.A., Straniero, O., Chieffi, A., and Limongi, M., 1999, The Giant, Horizontal, and Asymptotic Branches of Galactic Globular Clusters. I. The Catalog, Photometric Observables, and Features. *Astronomical Journal*, 118, 1738-1758.
- Gebhardt, K., Pryor, C., Willams, T.B., and Hesser, J.E., 1995, Fabry-Perot observations of globular clusters. II. 47 Tuc, NGC 6397, and M30. *Astronomical Journal*, 110, 1699-1711.
- Gratton, R.G., Fusi P.F., Carretta, E., Clementini, G., Corsi, C.E., and Lattanzi, M., 1997, Ages of Globular Clusters from HIPPARCOS Parallaxes of Local Subdwarfs. *Astrophysical Journal*, 491, 749-771.
- Gratton, R.G., 1985, Deep photometry of globular clusters. V-Age derivations and their implications for galactic evolution. *Astronomy and Astrophysics*, 147, 169-177.
- Gregg, M.D., 1994, Spectrophotometry of early type systems I. A metallicity sequence of globular clusters. *Astronomical Journal*, 108, 2164-2182.
- Kilkenny, D., van W.F., Roberts, G., Marang, F., and Cooper, D., 1998, Supplementary southern standards for UBVR(I)c photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 294, 93-104.
- Lee, S.W., 1978, A Study on the Evolution of Globular Clusters, *Journal of the Korean Astronomical Society*, 11, 1-30.
- Lee, S.W., 1985, *Astronomical Observation and Analysis*, Minum-sa. Seoul, 244 p.
- Lutz, T.E. and Kelker, D.H., 1973, On the Use of Trigonometric Parallaxes for the Calibration of Luminosity Systems: Theory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 85, 573-578.
- Mazzitelli, I., D'Antona, F., and Caloi, V., 1995, Globular cluster ages with updated input physics. *Astronomy and Astrophysics*, 302, 382-400.
- Menzies, J.W., Cousins, A.W.J., Bandfield, R.M., and Laing, J.D., 1989, UBVR(I)c standard stars in the E- and F-regions and in the Magellanic Clouds - a revised catalogue. *South African Astronomical Observatory Circulars*, 13, 1-13.
- Minniti, D., Geisler, D., Peterson, R.C., and Claria, J.J., 1993, High-dispersion spectroscopy of giants in metal-poor globular clusters. I - Iron abundances: *Astrophysical Journal*, 413, 548-561.
- Peterson, C.J., 1987, Ages of globular clusters. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, 1153-1160.
- Piotto, G., Capaccioli, M., Ortolani, S., Rosino, L., Alcaino, G., and Liller, W., 1987, C-M diagram and luminosity function of the Galactic globular cluster NGC 7099. I - Photographic photometry: *Astronomical Journal*, 94, 360.
- Piotto, G., King, I.R., and Djorgovski, S., 1988, Color and population gradients in the core of the postcollapse globular cluster M30. *Astronomical Journal*, 96, 1918-1924.
- Piotto, G., King, I.R., Capaccioli, M., Ortolani, S., and Djorgovski, S., 1990, The deep luminosity function of the globular cluster M30. *Astrophysical Journal*, 350, 662-671.
- Piotto, G., Cool, A.M., and King, I.R., 1997, A Comparison of Deep HST Luminosity Functions of Four Globular Clusters. *Astronomical Journal*, 113, 1345-1352.
- Pont, F., Mayor, M., Turon, C., and Vandenberg, D.A., 1998, HIPPARCOS subdwarfs and globular cluster

- ages: the distance and age of M 92. *Astronomy and Astrophysics*, 329, 87-100.
- Reid, I.N. and Gizis, J.E., 1998, The Distance to NGC 6397 by M-Subdwarf Main-Sequence Fitting. *Astronomical Journal*, 116, 2929-2935.
- Richer, H.B., Fahlman, G.G., and Vandenberg, D.A., 1988, Deep CCD photometry in globular clusters. VII - M30. *Astrophysical Journal*, 329, 187-207.
- Rose, J.A., Stetson, P.B., and Tripicco, M.J., 1987, Stellar content of the cores of metal-poor globular clusters. *Astronomical Journal*, 94, 1202-1221.
- Sandquist, E.L., Bolte, M., Langer, G.E., Hesser, J.E., and De Oliveira, C.M., 1999, Wide-Field CCD Photometry of the Globular Cluster M30. *Astrophysical Journal*, 518, 262-383.
- Sarajedini, A., Alejandra, A.E., 1995, BVI CCD photometry of NGC 5053: The most metal-poor galactic globular cluster. *Astronomical Journal*, 109, 269-279.
- Stetson, P.B. and Harris, W. E., 1988, CCD photometry of the globular cluster M92. *Astronomical Journal*, 96, 909-975.
- Stetson, P.B., 1994, The center of the core-cusp globular cluster M15: CFHT and HST Observations, ALL-FRAME reductions. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106, 250-280.
- Sung, Hwankyung. 1997, private communication.
- Sweigart, A.V., 1997, Effects of Helium Mixing on the Evolution of Globular Cluster Stars. *Astrophysical Journal*, 474, 23-26.
- Vandenberg, D.A., Bolte, M., and Stetson, P.B., 1990, Measuring age differences among globular clusters having similar metallicities - A new method and first results. *Astronomical Journal*, 100, 445-468.
- Vandenberg, D.A., Larson, A.M., and DePropis, R., 1998, The Luminosity Function of M30: Evidence for Rapidly Rotating Cores in the Cluster Giants. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 110, 98-104.
- Webbink, R.F., 1985, Structure parameters of galactic globular clusters. *Dynamics of star clusters. Proceedings of the Symposium, Princeton*, 113, 451-577.
- Yanny, B., Guhathakurta, P., Bahcall, J.N., and Schneider, D. P., 1994, Globular cluster photometry with the Hubble Space Telescope. 2: U, V, and I measurements of M15. *Astronomical Journal*, 107, 1745-1763.
- Zinn, R. and West, M.J., 1984, The globular cluster system of the galaxy. III - Measurements of radial velocity and metallicity for 60 clusters and a compilation of metallicities for 121 clusters. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 55, 45-66.

2006년 8월 29일 접수
2006년 9월 18일 수정원고 접수
2006년 9월 29일 채택