

NGC 7790의 *UBVI* CCD 측광

최동열^{1,*} · 김희수² · 임범두³ · 성환경⁴

¹대전과학고등학교, 34142, 대전광역시 유성구 과학로 46

²공주대학교 지구과학교육과, 32588, 충남 공주시 공주대학로 56

³한국천문연구원, 34055, 대전광역시 유성구 대덕대로 776

⁴세종대학교 천문우주학과, 05006, 서울특별시 광진구 능동로 209

UBVI CCD Photometry of NGC 7790

Dong Yeol Choi^{1,*}, Hee Soo Kim², Beomdu Lim³, and Hwankyung Sung⁴

¹Daejeon Science High School, 46 Gwahak-ro Yuseong-gu, Daejeon-si 34142, Korea

²Department of Earth Science Education, Kongju National University,
56 Gongjudaehak-ro Gongju-si 32588, Korea

³Korea Astronomy and Space Science Institute,
776 Daedeokdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34055, Korea

⁴Department of Astronomy and Space Science, Sejong University,
209 Newngdong-ro, Kwanjin-gu, Seoul 05006, Korea

Abstract: *UBVI* CCD photometry of the intermediate age open cluster NGC 7790 has been obtained using AZT-22 1.5 m telescope ($f/7.74$) at the Maidanak Astronomical Observatory in Uzbekistan. NGC 7790 contains three δ Cep variable stars including CEa Cas, CEb Cas, and CF Cas. PSF photometry was carried out using IRAF/DAOPHOT for all observations. The total number of stars observed both in V and I filter was 1008 and the limiting magnitude was $V \approx 22$. To determine atmospheric extinction coefficients and photometric zero points, many blue and red standard stars as well as the standard stars in the celestial equator under various airmass were observed. Photometric data were transformed into the standard Johnson-Cousins' *UBVI* standard system. From the analysis of *UBVI* color-magnitude diagram and color-color diagram, the color excess in V and I filter [$E(B-V) = 0.58 \pm 0.02$], the selective extinction ratio in V and I filter [$R_V \equiv A_V/E(B-V) = 3.02 \pm 0.09$] and distance modulus ($V_0 - M_V = 12.65 \pm 0.10$) of the cluster were determined. The age of the cluster was estimated to be $\log \text{age} = 8.05 \pm 0.05$ [yr] based on the position of these three Cepheid variables in the color-magnitude diagram, the isochrone of the Geneva group (Ekström et al., 2012- $Z=0.019$), and the isochrone of the Padova group (Bressan et al., 2012- $Z=0.014$) were used to compare each other. Of them, the Geneva models that considered stellar rotation well described the position of δ Cepheid variables in the blue loop. Although they were well consistent with standard period-luminosity relation of δ Cepheid variables, three Cepheid variables in NGC 7790 were, on average, brighter by about 0.5 mag than the absolute magnitude estimated from the mean period-luminosity relation at a given period.

Keywords: ngc 7790, *UBVI*, the color-magnitude diagram, δ Cepheid variables, the period-luminosity relation

*Corresponding author: cdy2682@naver.com

Tel: +82-42-860-0268

Fax: +82-42-863-5488

요 약: 우즈베키스탄 Maidanak 천문대 AZT-22 1.5 m 망원경($f/7.74$)과 SITe 2000×800 CCD를 사용하여 3개의 δ Cep 변광성 CEa Cas, CEb Cas 및 CF Cas가 있는 중년 산개성단 NGC 7790의 *UBVI* 측광 관측을 수행하였다. 관측자료는 IRAF/DAOPHOT를 이용하여 PSF 측광을 수행하였으며, V 와 I 필터에서 모두 측광된 별의 수는 총 1008개이며, 측광의 한계등급은 $V \approx 22$ 등급이다. 대기소광계수 및 측광영점을 결정하기 위하여 천구적도에 있는 여러 표준별과 청색 및 적색 표준별을 다양한 대기투과량에서 관측하였다. 표준별 측광을 통해 대기소광계수 및 측광영점을 결정하고, 성단의 측광자료는 Johnson-Cousins *UBVI* 표준계로 변환하였다. NGC 7790의 *UBVI* 색-등급도와 색-색도에서 이 성단의 B 와 V 필터에서의 색초과량 [$E(B-V)=0.58 \pm 0.02$], B 와 V 필터에서의 선택적 소광량 [$R_V \equiv A_V/E(B-V)=3.02 \pm 0.09$] 및 거리지수($V_0 - M_V = 12.65 \pm 0.10$)를 얻었다. H-R도에서 세페이드 변광성의 위치를 고려하여 나이를 결정하였다. 이 과정에서 Padova 연구집단(Bressan et al., 2012)의 등연령곡선($Z=0.019$)과 Geneva 연구집단(Ekström et al., 2012)의 등연령곡선($Z=0.014$)을 모두 사용하였고, 그중에서 자전을 고려한 Geneva 연구집단의 진화모형이 관측자료와 잘 일치하여 NGC 7790의 나이로 $\log \text{age} = 8.05 \pm 0.05$ [yr]를 얻었다. 또 NGC 7790내 세페이드 변광성의 절대등급은 세페이드 변광성의 평균 주기-광도 관계에 비해 분산 범위 내에 있기는 하지만 주어진 주기에서 평균적으로 약 0.5등급 정도 밝음을 확인하였다.

주요어: NGC 7790, *UBVI*, 색-등급도, 세페이드 변광성, 주기-광도 관계

서 론

페르세우스 나선팔에 있는 NGC 7790 ($RA=23^h 58^m 24^s$, $Dec=+61^\circ 12' 30''$)은 중년 산개성단이다(Mermilliod, 1981). 성단의 반경은 약 2.5이며 세페이드 변광성 CEa Cas, CEb Cas 및 CF Cas가 있다(Kraft, 1958; Sandage, 1958; Schmidt, 1981; Pedreros et al., 1984). 중년 산개성단들은 중간질량을 갖는 별들의 물리적 특성과 진화연구에 매우 중요하다(Sung and Bessell, 1999). 세페이드 변광성의 주기-광도 관계는 우주론적 거리의 결정에 중요한 역할을 하므로 (Davidge, 2012) 거리와 같은 기본적인 물리량을 얻을 수 있고, 따라서 절대등급을 구할 수 있는 산개성단에 있는 세페이드 변광성의 측광은 매우 중요하다.

Sandage (1958)는 NGC 7790 내 별들에 대해 *UBV* 광전측광과 사진측광을 수행하여, $(m-M)_0 = 12.8 \pm 0.15$, $E(B-V) = 0.52 \pm 0.04$ 을 얻었다. Christian et al. (1985)은 몇 개의 성단 내 VC/CCD 표준성들을 관측하였는데, 이 중에서 NGC 7790 내 10개의 표준성을 관측하여 Landolt 표준계로 변환하였다. Pedreros et al. (1984)는 NGC 7790 내 $V \sim 19$ 등급까지 *UBV* 사진측광을 수행하여, $E(B-V) = 0.64 \pm 0.05$, $(m-M)_0 = 12.3 \pm 0.2$ 을 결정하였다. Alcalá and Ferro (1988)는 NGC 7790 내 $V \sim 13$ 등급까지의 별들에 대해 광전측광을 수행하여, $E(B-V) = 0.59 \pm 0.05$, $(m-M)_0 = 12.3 \pm 0.2$ 을 결정하였다. Romeo et al. (1989)는 NGC 7790의 *BVRI* CCD 측광을 수행하여, $E(B-V) = 0.54 \pm 0.04$ 를 얻고, Pleiades의 주계열선을 사용하여 $(m-M)_0 = 12.65 \pm 0.15$

를 결정하였다. 그리고 나이를 50~100 Myr로 얻었다. Mateo and Madore (1988)는 *UBVR* CCD 관측을 통해 $E(B-V) = 0.56 \pm 0.04$ 을 얻었으며, Pleiades의 주계열선(Turner, 1979)과 이론적인 등연령곡선(van den Bergh and Bridges, 1984)을 사용하여 $(m-M)_0 = 12.3 \pm 0.15$ 을 얻었다. Matthews et al. (1995)은 CF Cas의 측광과 시선속도 변화를 조사하여 이 성단의 거리로 3130 ± 160 pc (거리지수=12.5)을 결정하였다. Lee and Lee (1999)은 *BVRI* 측광과 근적외선 K 밴드 측광을 수행하여 $E(B-V) = 0.54 \pm 0.05$, $(m-M)_0 = 12.45 \pm 0.05$ 을 얻었고, Bertelli et al. (1994)은 등연령곡선을 이용하여 성단의 나이를 $\log(\text{age}) = 8.1 \pm 0.1$ [yr]로 결정하였다. Gupta et al. (2000)은 $V=21$ 이하의 별들에 대한 *BVI* CCD 측광을 수행하여 $E(B-V) = 0.51 \pm 0.03$, 거리를 3.3 ± 0.23 Kpc (거리지수=12.6)으로 구하였고, 주계열 전향점과 세페이드 변광성에 대한 등연령곡선 맞추기를 통해 나이를 120 ± 20 Myr로 구하였다. Davidge et al. (2012)은 캐나다-프랑스-하와이 망원경(Canada-France-Hawaii telescope-CFHT)의 MegaCam 영상으로 측광을 수행하고 $E(B-V) = 0.56 \pm 0.05$, $(m-M)_0 = 12.51 \pm 0.10$ 을 얻었고, Girardi et al. (2004)의 등연령곡선으로 주계열 전향점 근처에 있는 별들의 진화 특성을 고려한 등연령곡선 맞추기를 통해 나이를 60~80 Myr로 결정하였다.

위와 같이 많은 선행연구에도 불구하고 성단의 기본적인 특성, 적색화와 거리지수, 나이 등이 아직 명확하게 정립되지 못하고 있다. 적색화량의 범위는 $E(B-V) = 0.49 \pm 0.024$ (Kraft, 1958)에서 0.64 ± 0.04

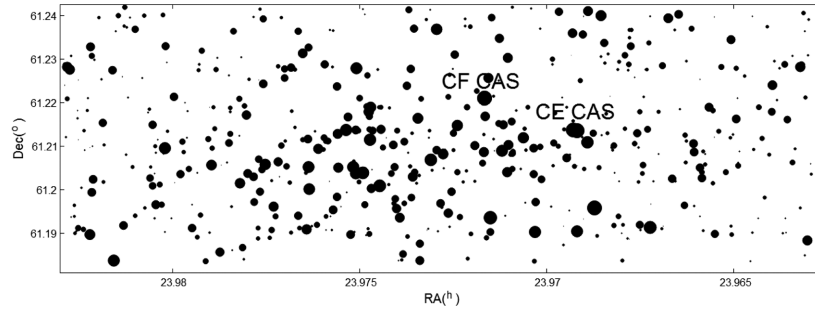


Fig. 1. Finding chart for the stars brighter than $V=22$ mag. Symbol size is proportional to the magnitude of the star, while larger symbols represent brighter stars.

(Pedreros et al., 1984)이며, 거리지수는 $(m-M)_0 = 11.98 \pm 0.13$ (Schmidt, 1981)에서 12.80 ± 0.15 (Sandage, 1958)로, 비교적 큰 분산을 보인다. 나이의 범위는 50 ± 15 Myr (Romeo et al., 1989)에서 120 ± 20 Myr (Gupta et al., 2000)으로 제시되고 있다. 또한, 그 동안 대마젤란은하(Large Magellanic Cloud-LMC)에 있는 세페이드 변광성의 주기-광도 관계를 사용하여 왔으나, 우리 은하내 성단들에 있는 세페이드 변광성의 주기-광도 관계와 차이가 있음이 밝혀졌다(Sandage and Tammann, 2006). 본 연구에서는 세페이드 변광성이 3개나 있는 NGC 7790에 대한 *UBVI* CCD 측광 관측을 통해 성간적색화량, 거리, 나이 그리고 세페이드 변광성의 주기-광도 관계에 대하여 논의한다.

관 측

관측 및 측광

NGC 7790은 세페이드 변광성이 있는 산개성단의 탐사관측의 일환으로 관측을 하였다. 이 성단의 관측은 2005년 8월 4일 우즈베키스탄 Maidanak 천문대 AZT-22 1.5 m 망원경($f 7.74^{-1}$), SITe 2000×800 CCD와 *UBVI* 필터를 사용하였다. 관측에 사용한 CCD의 화소크기는 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ (0.255 pixel^{-1})으로 관측한 영역의 시야는 약 8.85×3.53 이며, 이득(gain)은 $1.16 e^{-} \text{ ADU}^{-1}$ 이며, 읽기잡음(read-out noise)은 $5.3 e^{-}$ 이다. 밝은 별과 어두운 별을 모두 측광하기 위해 각 필터별 2가지 노출시간-*U*: 15초와 600초, *B*: 5초와 300초, *V*: 3초와 180초, *I*: 3초와 60초-을 사용하였다. 대기소광계수 및 측광영점을 결정하기 위하여 천구적도에 있는 여러 표준별(SA 92, SA 109, SA 111, SA 112, SA 114-Menzies et al., 1991)과 청색 표준

Table 1. atmospheric extinction coefficients and photometric zero points

Filter	Primary extinction coefficient	Secondary extinction coefficient	Photometric zero point
<i>U</i>	0.450 ± 0.014	0.023	21.752 ± 0.015
<i>B</i>	0.313 ± 0.019	0.026	23.252 ± 0.012
<i>V</i>	0.186 ± 0.014	-	23.345 ± 0.008
<i>I</i>	0.052 ± 0.008	-	22.921 ± 0.003

별인 HD 149382와 HD 216135 (Kilkenney et al., 1998), (MNRAS, 294, 93)를 다양한 대기투과량에서 관측하였다. *I* 60초 영상과 *V* 180초 영상의 시상은 각각 $0.8''$, $0.95''$ 이었다. 표준별은 10" 구경의 단순구경측광을 수행하였고, 이 자료로 대기소광계수 및 측광영점을 결정하였으며 그 결과를 Table 1에 제시하였다. 이 과정에서 사용한 표준계 변환관계 및 변환계수는 Lim et al. (2009)에 제시되어 있다. 성단을 관측한 영상은 시상과 동일한 구경으로 점원분산함수(Point Spread Function-PSF) 맞추기를 이용한 PSF 측광을 수행하고, 구경의 차이에 의한 등급의 차이인 구경보정을 적용하였다. 각 영상의 구경보정 값은 신호 대 잡음비가 매우 좋은 별의 주변에 있는 어두운 별을 점원분산함수를 사용하여 제거한 후 여러 구경으로 구경측광을 수행하고, PSF 측광등급과 표준별 측광에 사용한 큰 구경의 측광등급으로 결정을 하였다. NGC 7790은 3개의 세페이드 변광성 CEa Cas, CEb Cas 및 CF Cas를 모두 포함하고 있으며, *V*와 *I* 필터에서 모두 측광된 별의 수는 총 1008개이다. Fig. 1은 $V=22$ 등급보다 밝은 별을 표시한 관측영역의 성도이다.

Table 2. Comparison with previous photometry

Ref.	ΔV	n	ΔI	n	$\Delta(B-V)$	n	$\Delta(V-I)$	n	$\Delta(U-B)$	n
Sandage (1958)	+0.010±0.053	18	-	-	+0.02±0.036	18	-	-	+0.012±0.045	14
Christian et al. (1985)	-0.002±0.011	5	-0.013±0.012	5	-0.005±0.014	5	-0.001±0.014	5	-	-
Romeo et al. (1989)	-0.012±0.028	109	-0.043±0.049	114	0.010±0.042	114	0.032±0.034	112	-	-

이전 연구와 비교

Fig. 2와 Fig. 3은 본 연구에서 얻은 관측등급과 색 지수를 다른 연구자들의 관측자료와 비교한 것으로, 본 연구 결과에서 타 연구자의 결과를 뺀 것이다. Sandage (1958)는 Mount Wilson의 60 inch 망원경으로 광전측광을 하여 Johnson and Morgan (1953년)의 자료를 기준으로 표준계로 변환하였다. Christian et al. (1985)는 Kitt Peak의 210 cm와 130 cm 망원경을 이용하여 광전측광을 하였고, Landolt (1983)의 자료를 기준으로 표준계로 변환하였다. Romeo et al. (1989)는 Loiano에 있는 Bologna 대학의 152 cm 망원경을 이용하여 CCD 관측을 하였다. Sandage (1958)는 총 34개 별을 측광하였으나 18개만 CCD의 관측 영역에 존재하고, (U-B)의 경우 측광자료가 없는 4

개를 제외한 14개 별의 측광자료만이 존재한다. 체계적인 차이는 없었으나 Sandage (1958)의 B-I는 오차범위내에서 우리보다 약간 작은 값을 갖고 있다. Christian et al. (1985)이 관측한 별 중에서 7개가 우리의 관측영역에 있다. 이들 중 2개는 매우 큰 차이를 보이는데 NGC 7790-16은 PSF 측광에서 3개 별로 분해가 되었으며, NGC 7790-25는 2개 별로 분해가 되어 측광자료의 비교에서 제외하고 나머지 5개만 비교하였다. 여기서는 체계적인 차이도 없었고 매우 작은 분산을 보였으며, 본 연구의 결과와 매우 잘 일치하였다. Romeo et al. (1989)는 총 118개의 별들을 측광하였는데 관측등급의 차이가 다소 큰 별들이 있어 ΔV , ΔI , $\Delta(B-V)$, $\Delta(V-I)$ 를 구한 후 평균과 표준편차를 얻어 $\pm 2.5\sigma$ 이상 벗어나는 자료를 제외

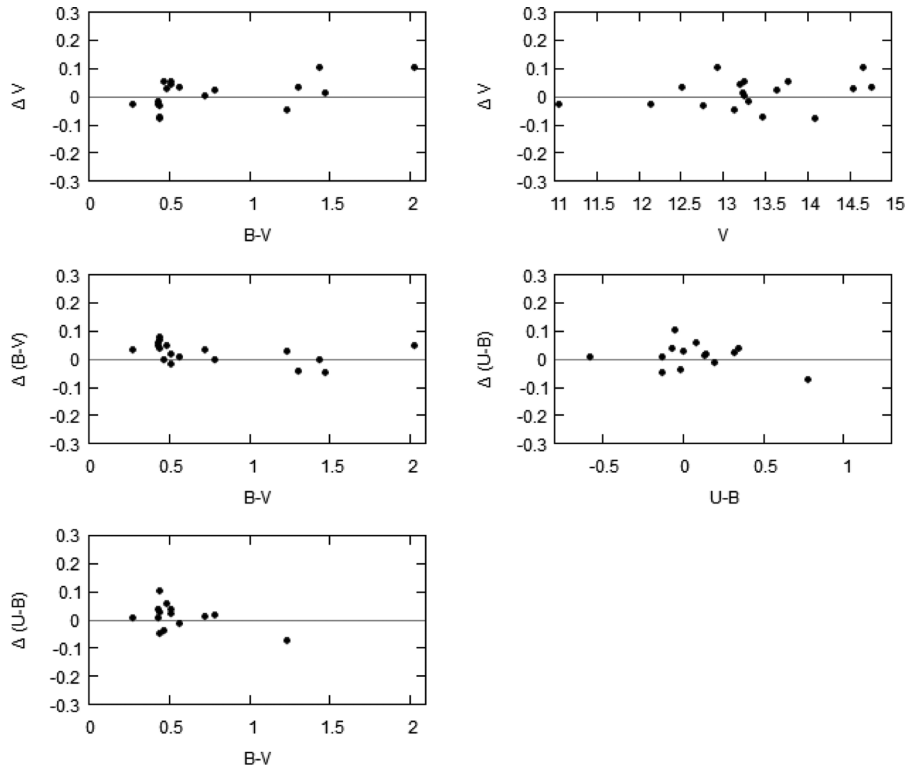


Fig. 2. Differences between our measurements and those of Sandage (1958) (Δ =this study-Sadage).

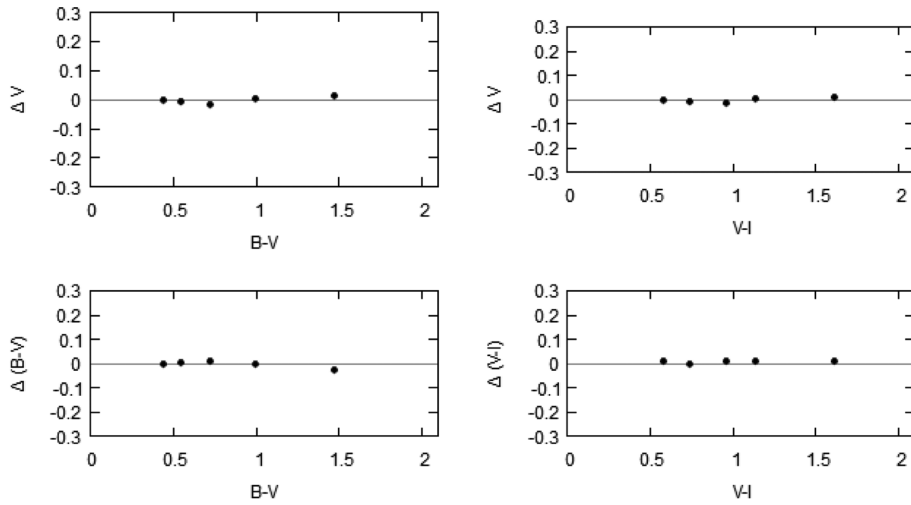


Fig. 3. Differences between our measurements and Christian et al. (1985) (Δ =this study-Christian et al.)

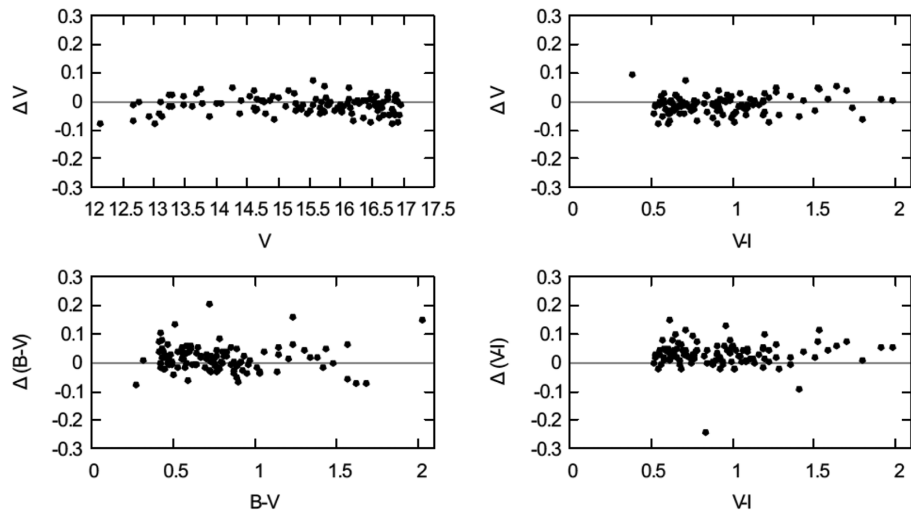


Fig. 4. Differences between our measurements and Romero et al. (1989) (Δ =this study-Romero et al.)

하고 비교하였다. Table 2와 Fig. 4를 보면 ΔV 와 $\Delta(V-I)$ 에서 다소 큰 차이를 보이며 $\Delta(B-V)$ 에서 분산이 크게 나타났다. 이는 그들의 연구에서 표준계 변환, 특히 변환계수의 결정이 잘못되었기 때문일 것으로 추정된다.

거리 및 나이

성간소광

지구 대기에 의해서 별빛이 어두워지는 것과 같이 별빛이 성간물질을 통과하면 붉고 어두워져 색지수와

등급이 증가한다. 이러한 현상을 성간소광이라고 하며, 성간물질에 있는 먼지에 의한 산란과 흡수 때문에 발생한다. 성간소광은 등급과 색지수를 증가시키는 효과를 일으키기 때문에, 천체까지의 정확한 거리를 결정하기 위해서는 성간물질에 의한 성간소광을 반드시 보정해야 한다. 성간소광이 있는 경우, 주어진 파장 λ 에서 안시등급과 절대등급, 거리의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$m_{\lambda} - M_{\lambda} = 5 \log d - 5 + A_{\lambda} \tag{1}$$

별의 안시등급은 거리, 절대등급 및 성간소광에 따

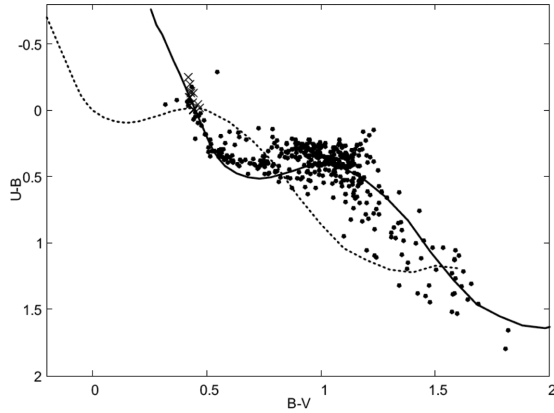


Fig. 5. Color-color diagram for the stars with in NGC 7790. The dashed line represents the unreddened main sequence relation. The solid line is the main sequence relation shifted by the mean interstellar reddening $E(B-V)=0.58$. The crosses represent early type stars selected to obtain $E(B-V)$.

라 달라진다. 따라서 이들 3개 인자를 얻기 위해서는 적어도 3개의 독립된 정보가 필요하며 이 때문에 3개의 필터로 구성된 UBV 측광계가 도입된 것이다. 성간소광의 영향을 받지 않는 파장은 중적외선보다 장파장이지만 지상에서는 중적외선 관측을 할 수가 없다. 따라서 주어진 파장에서 총소광 A_λ 를 결정하는 것이 매우 어렵다. 그러나 색지수는 거리에 무관하며 성간소광의 영향만 받는다. 또 색지수마다 성간소광의 효과가 다르게 나타나므로, 이를 이용하여 성간소광에 의한 색초과를 결정할 수 있으며, 가장 대표적인 방법이 조기형 별에 대한 $U-B$ 와 $B-V$ 의 고유색지수 관계로부터 얻는 것이다(Sung, 1995). 조기형 별의 $U-B$ 와 $B-V$ 색-색도에서의 고유한 위치는 중원소 함량에 영향을 받지 않고 오직 온도에만 의존한다. 그러므로 조기형 별의 색-색도에서 위치는 성간소광에 의해 결정된다. $U-B$ 와 $B-V$ 색-색도에서 성간소광의 방향은 $U-B$ 와 $B-V$ 두 색지수가 붉어

지는 방향인 오른쪽 아래를 향하게 되며, $\frac{E(U-B)}{E(B-V)}$ 가 약 0.72의 기울기를 가진다. 따라서 성간소광을 받은 조기형 별에 대해서 0.72의 기울기로 성간소광의 방향을 역추적하여, 성간소광 $E(B-V)$ 와 $E(U-B)$ 를 결정한다.

그러나 주어진 파장 λ 에서의 총소광 A_λ 는 결정하는 것이 쉽지 않다. 동일한 거리에 존재하는 성단별 중에서 절대등급을 아는 별의 경우 식 (1)과 색-색도

에서 얻은 $E(B-V)$ 로 직선회귀를 하면 총소광 대 선택소광의 비(total-to-selective extinction ratio) $R_V(=A_V/E(B-V))$ 를 결정할 수 있다. 또한 먼지의 소광모형연구를 통해 R_V 와 여러 색지수들의 색초과 비의 관계를 얻고, 이를 실제 관측자료에 적용하여 R_V 를 얻는 방법도 있다.

NGC 7790의 구성원 중에서 $B-V$ 가 0.5 이하인 조기형 별들의 $E(B-V)$ 를 $(B-V)$, $(U-B)$ 색-색도에서 구하였다. 조기형 별들은 총 13개가 선정되었으나, 방출선이 있는 HIP 118163 (B2III-IV, $23^h58^m7.37, +61^\circ11'44''.8$)는 제외하였다. Sung et al. (2013)에 제시된 주계열성의 고유 색지수 관계를 내삽하여, 위에서 선정한 12개 조기형 별의 $E(B-V)$ 를 결정하고, $(B-V)_0$ 와 $(V-I)_0$ 의 관계를 이용하여 $E(V-I)$ 를 결정하였다.

총소광 대 선택소광의 비 R_V 는 Guetter and Vrba (1989)가 제시한 식 (2)를 바탕으로 결정할 수 있다.

$$R_V = \frac{A_V}{E(B-V)} = 2.45 \frac{E(V-I)}{E(B-V)} \quad (2)$$

$(B-V) < 0.5$ 인 12개 조기형 별의 색초과의 평균값은 $E(B-V)=0.58 \pm 0.02$ 과 $E(V-I)=0.72 \pm 0.03$ 이다. 성간소광 $E(B-V)$ 의 평균값은 선행연구자료 중에서 Sandage (1958), Mateo and Madore (1988), Romeo et al. (1989), Lee and Lee (1999), Gupta et al. (2000), Davidge et al. (2012)보다 0.06, 0.02, 0.04, 0.04, 0.07, 0.02등급만큼 크게, Pedreros et al. (1984), Alcalá and Ferro (1988)보다 0.06, 0.01등급만큼 작게 나타났다. Fig. 5는 $B-V$ 와 $U-B$ 색-색도를 나타낸 것이다. 검정색 실선은 성간소광의 영향을 받지 않은 고유색지수 관계를 성간소광 $E(B-V)=0.58$, $E(U-B)=0.42$ 만큼 적용시켰을 때의 관계이다. 조기형 별들에서는 고유색지수 관계와 잘 일치하나 $B-V$ 가 0.5-1.0 사이의 별들에 대해서는 약간 위쪽에 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 NGC 7790에 있는 A, F형 별들이 자외선(UV) 초과를 보임을 나타낸다. 두 색지수의 색초과비의 평균은 $E(V-I)/E(B-V)=1.23 \pm 0.04$ 이며, 위의 식 (2)를 적용하여 $R_V=3.02 \pm 0.09$ 를 얻었다. 이 값은 일반적으로 잘 알려진 R_V 인 3.1±0.2와 잘 일치한다. V 필터에서 NGC 7790의 평균 A_V 는 1.75등급이다. 개개 별의 성간소광 $E(B-V)$ 를 결정할 수 있는 조기형 별은 각각 총소광 $A_V[=R_V \times E(B-V)]$ 을 결정하여 적용하고, $E(B-V)$ 를 결정할

Table 3. Photometric data for selected early type stars

Star	RA (2000)	Dec. (2000)	$(B-V)_0$	$E(B-V)$	$(V-I)_0$	$E(V-I)$	$\frac{E(U-B)}{E(B-V)}$	A_V	V_0
12	23 58 28.06	61 12 3.11	-0.20	0.62	-0.22	0.75	1.21	1.86	10.81
21	23 58 18.03	61 12 31.03	-0.14	0.60	-0.15	0.73	1.22	1.81	12.85
25	23 58 20.57	61 12 53.46	-0.13	0.60	-0.14	0.78	1.30	1.81	11.96
29	23 58 23.15	61 12 25.07	-0.16	0.60	-0.17	0.74	1.23	1.82	10.93
34	23 58 34.92	61 12 19.04	-0.16	0.59	-0.17	0.70	1.18	1.79	11.51
35	23 58 34.86	61 12 0.83	-0.14	0.58	-0.15	0.70	1.22	1.75	11.72
38	23 58 30.63	61 12 18.70	-0.18	0.61	-0.20	0.75	1.24	1.83	11.27
43	23 58 31.27	61 12 49.76	-0.16	0.59	-0.18	0.69	1.17	1.79	11.30
52	23 58 29.01	61 12 41.45	-0.15	0.57	-0.16	0.71	1.24	1.73	11.30
53	23 58 24.38	61 12 59.41	-0.12	0.56	-0.13	0.71	1.25	1.70	12.38
57	23 58 39.08	61 12 20.89	-0.13	0.55	-0.14	0.71	1.29	1.67	12.02
76	23 58 30.36	61 12 13.71	-0.15	0.58	-0.16	0.72	1.25	1.74	11.73
평균	-	-	-	0.58±0.02	-	0.72±0.03	1.23±0.04	1.77±0.06	-

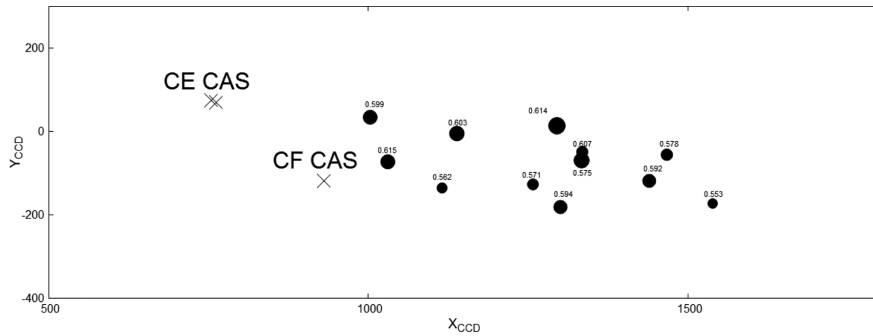


Fig. 6. The actual CCD image rotated by 25 degree in the X axis that shows the spatial variation of the reddening $E(B-V)$. The cross represents the position of Cepheids. The size of the dot is proportional to the amount of the reddening $E(B-V)$.

수 없는 만기형 별의 총소광은 평균값인 1.75등급을 적용한다. Table 3은 성간소광을 결정할 수 있는 조기형 별이다.

나이가 많은 산개성단은 보통 물질의 공간적 분포에서 차이가 거의 없지만, 젊은 산개성단은 성단을 형성한 잔해가 아직 존재하므로 공간적 분포의 차이가 존재할 수 있다. NGC 7790에 있는 조기형 별들을 대상으로 $E(B-V)$ 의 공간적인 차이를 조사하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 12개의 조기형 별의 $E(B-V)$ 는 체계적인 변화는 없었으나, 각 별들의 $E(B-V)$ 는 작은 분산을 보였다. $E(B-V)$ 의 작은 분산은 성단내 물질들의 공간적 분포의 차이 때문인지, 화학조성의 특이성 때문인지 명확하지 않다. 성간소광을 결정할 수 없는 만기형 별의 경우 성단의 평균값 [$E(B-V)=0.58±0.02$]을 적용한다.

NGC 7790의 거리

산개성단의 거리는 영년 주계열 맞추기를 통해 얻는다. 관측 자료가 적고 오차가 컸던 과거에는 주관적인 눈대중(eye fitting)을 사용하였으나, 관측자료의 정밀도가 향상되었고 영상관측을 통해 많은 별의 자료를 얻을 수 있는 현재에는 상대적으로 객관적이며 정량적인 방법을 사용하기도 한다. 개개 별들의 거리 지수는 영년주계열성의 절대등급-색지수 관계를 이용하여 ($V, B-V$)와 ($V, V-I$) 색-등급도로부터 계산할 수 있다(Sung and Bessell, 1999). 동반성의 존재 유·무, 진화효과, 물리적 또는 화학적 특성이 다른 경우 색지수나 등급 또는 모두가 영년주계열선에서 벗어날 수 있다(Lim, 2008). 따라서 거리지수를 구하는 색지수와 등급의 범위를 결정해야 한다. $B-V$ 색지수는 중원소함량에 영향을 받기 때문에 거리를 멀게 추정

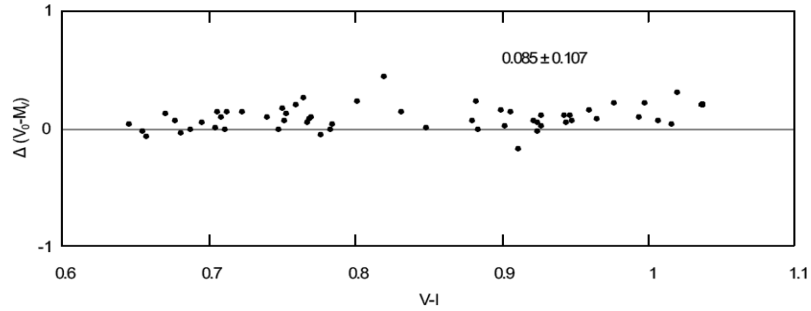


Fig. 7. The difference in distance modulus between that from the $(M_V, B-V)$ relation and that from the $(M_V, V-I)$ relation. $\Delta(V_0-M_V) = (V_0-M_V)_{B-V} - (V_0-M_V)_{V-I}$.

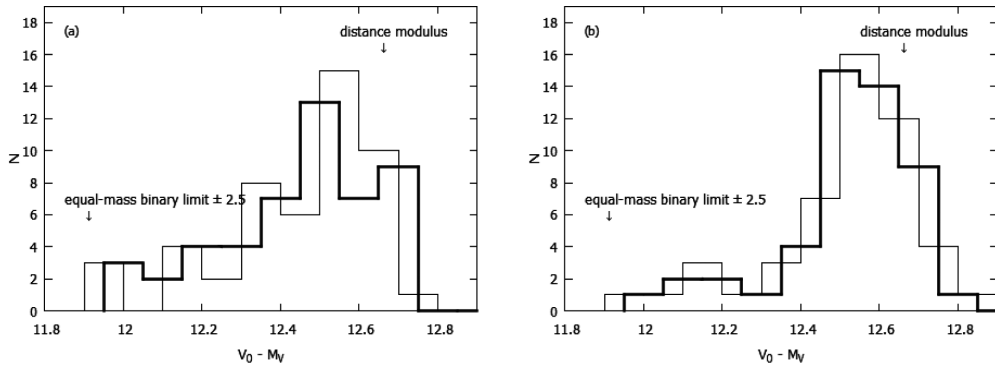


Fig. 8. (a) Distribution of distance moduli from the $(M_V, V-I)$ ZAMS relation. (b) Distribution of distance moduli from the $(M_V, B-V)$ ZAMS relation.

하는 문제가 생길 수 있으며(Sung and Bessell, 1999), 또 별의 활동성이 큰 경우에도 유사한 현상이 발생한다(Sung et al., 2002). 거리지수를 결정할 색지수의 범위를 결정하기 위하여 $V-I$ 로 구한 거리지수를 $V-I$ 에 대해서 그려 보면, $V-I$ 가 증가함에 따라 거리지수가 증가하다가 특정 지점에서 휘어지며 일정해 지는 모습을 보인다. 증가하는 구간은 진화효과가 반영되는 구간으로, 이 구간은 거리지수 결정에서 제외해야 한다. 이 과정을 통해 결정한 색지수와 등급의 범위는 각각 $V-I=0.64-0.97$, $V=15-17$ 등급이다. 비교를 위하여 $B-V$ 로도 거리지수를 구하였는데 이 별들은 $V-I$ 에서 선정된 별들을 그대로 사용하였다. 그리고 주어진 색지수에서 주계열성의 기저부에서 동질량 쌍성의 한계에 해당되는 -0.75 등급을 크게 벗어나지 않는 별들만 거리지수를 구하는데 사용하였다. Fig. 7은 이렇게 선정된 별들을 대상으로 $(V, B-V)$ 와 $(V, V-I)$ 색-등급도를 이용하여 거리를 구한 후 그 차이를 비교한 것인데 $V-I > 0.7$ 인 별의 경우 $B-V$ 로 구한 거리지수가 약 0.15등급 정도 큼을 알 수

있다. 그러므로 중원소 함량 또는 별의 활동성에 의한 영향을 적게 받는 $(V-I, V)$ 색-등급도를 이용하여 성단의 거리를 결정하는 것이 보다 타당하다.

Fig. 8은 $(V, B-V)$ 와 $(V, V-I)$ 색-등급도에서 경험적인 영년주계열 관계를 사용하여 거리지수를 얻고 거리지수분포를 0.1등급 간격의 히스토그램으로 나타낸 것이다. 등급구간 선정에 의한 효과를 줄이기 위하여 등급구간을 0.05등급만큼 이동시켜 동일한 히스토그램을 그렸다. 중년 산개성단 NGC 2516의 거리지수 분포에서는 동질량 쌍성의 존재가 매우 뚜렷하게 보였으나(Sung et al., 2002), NGC 7790에서는 잘 보이지 않는다. 두 히스토그램에서 거리지수의 최대빈도는 12.5 또는 12.55로 나타났다. 이 최대빈도는 쌍성의 효과가 반영된 것이므로 실제 성단의 거리지수는 이보다 약간 큰 값을 갖는다. 즉, 거리지수 결정에 사용한 영년주계열 관계는 진화효과가 없으며, 쌍성이 아닌 주계열성으로, 주계열 띠의 아래쪽 능선에 위치하기 때문이다. 중원소함량도 별의 절대등급에 영향을 주기 때문에 태양과 어느 정도 차이

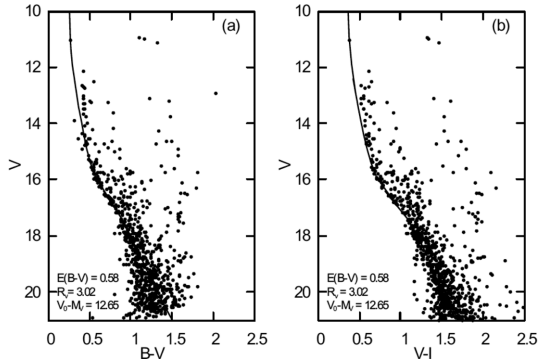


Fig. 9. Color-magnitude diagram. The superposed is the red-dened ZAMS relation from Sung et al. (2013).

가 있는 경우 절대등급 변화에 의한 거리지수의 차이를 보정해 주어야 한다(Sung and Bessell, 1999). 하지만 세페이드 변광성으로부터 조사한 이 성단의 중원소함량이 태양과 거의 비슷(Andrievsky et al., 2013)하므로, 이를 고려할 필요는 없다. Fig. 9는 $(V, B-V)$ 와 $(V, V-I)$ 의 색-등급도에 경험적인 영년주계열 관계(Sung et al., 2013)를 NGC 7790의 평균 성간소광과 거리지수를 반영하여 그렸다. 날별이 해석에 큰 영향을 주지 않기 때문에 구성원 선별 과정은 거치지 않았다. Fig. 8의 거리지수 분포와 Fig. 9의 색-등급도에서 NGC 7790의 거리지수(거리 $d=3.4\pm 0.2$ kpc)로 12.65등급, 그 오차로 ± 0.10 등급을 채택하였다. 이 값은 선행연구자료 중에서 Romeo et al. (1989)와 일치하고, Schmidt (1981), Pedreros et al. (1984), Alcalá and Ferro (1988), Mateo and Madore (1988), Lee and Lee (1999), Gupta et al. (2000), Davidge et al. (2012)와는 각각 $(m-M)_0$ 는 각각 0.85, 0.35, 0.35, 0.32, 0.20, 0.06, 0.14 만큼 크고, 그러나 Sandage (1958) 보다는 0.15등급 작은 값이다.

NGC 7790의 나이

성단의 나이는 항성진화 모형과 관측한 성단의 색-등급도를 비교함으로써 추정할 수 있다. Fig. 10은 본 연구에서 얻은 색-등급도에 다양한 연령의 모형을 겹쳐 그린 것이다. 이 때 각 모형들은 성단의 평균 성간소광을 반영한 후 3.3절에서 구한 거리지수만큼 세로축을 따라 이동하여 겹쳐그렸다. 연구에 사용한 모형은 태양의 중원소함량을 적용한 Geneva 연구집단(Ekstrom et al., 2012)의 등연령곡선($Z=0.014$)과 Padova 연구집단(Bressan et al., 2012)의 등연령곡선

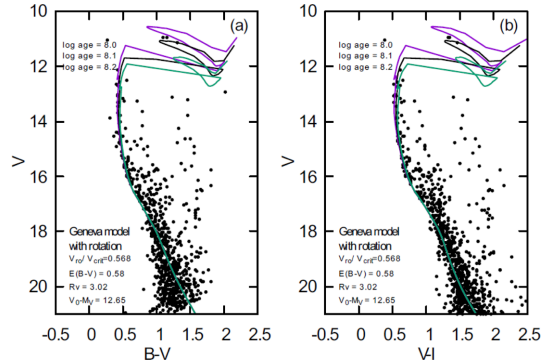


Fig. 10. Age of NGC 7790. (a) the $(V, B-V)$, (b) the $(V, V-I)$ diagram, The superposed isochrones are for the metallicity of $Z=0.014$ from Ekstrom et al. (2012) with rotation.

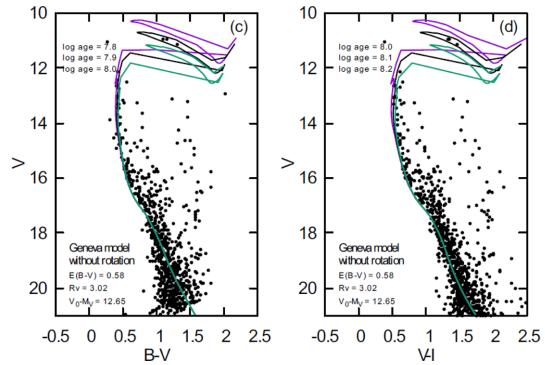


Fig. 10. (Continued) The superposed isochrones are for the metallicity of $Z=0.014$ from Ekstrom et al. (2012) without rotation.

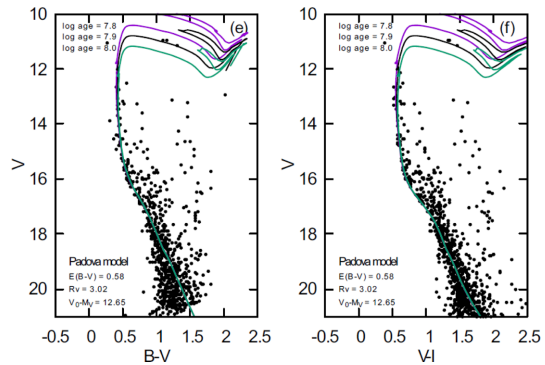


Fig. 10. (Continued) The superposed isochrones are for the metallicity of $Z=0.019$ from Bressan et al. 2012.

($Z=0.019$)을 선택하였다. 두 연구집단의 등연령곡선을 관측에서 얻은 NGC 7790의 색-등급도 $(V, B-V)$ 와 $(V, V-I)$ 에 맞추므로써 나이를 추정하였다. Geneva

Table 4. Photometric data of Cepheids

Star	RA (2000)	Dec. (2000)	V	$V-I$	$B-V$	$U-B$	V_0	M_I
CF Cas	23 58 17.97	61 13 15.93	10.95	1.33	1.11	0.63	9.20	-3.45
CEa Cas	23 58 9.10	61 12 49.20	10.97	1.34	1.17	0.69	9.22	-3.43
CEb Cas	23 58 9.44	61 12 49.46	11.13	1.47	1.32	0.88	9.38	-3.27

연구집단은 자전을 고려(한계자전속도의 56.8%인 모형)한 것과 고려하지 않은 두 가지 모형을 모두 사용하였으며, 주계열 전향점 및 세페이드 변광성들의 위치를 이용하여 성단의 나이를 추정하였다. 항성진화 모형에서 세페이드 변광성은 헬륨연소관계인 밝아지며 단과장쪽으로 진화하는 청색되돌이 부분에서 다시 되돌아 나가는 부분 안쪽에 위치해야 한다. 자전을 고려한 모형에서는 이 부분이 ($V, B-V$)와 ($V, V-I$)에서 모두 $\log \text{age}=8.05$ 일 때 잘 일치한다. 하지만 자전을 고려하지 않은 등연령곡선에서는 세페이드 변광성의 위치에서 청색되돌이가 훨씬 온도가 높은 쪽으로 뻗어 있어 크게 벗어나 있다. Padova 연구집단의 모형에서는 ($V, B-V$)의 경우 Sung et al. (2002)에서 언급한 바와 같이 약 0.3등급 정도 밝게 나오는 경향성(Sung et al., 1999)도 발견되었으며, 청색 되돌이 영역이 너무 짧아 등연령곡선에서 세페이드 변광성의 위치를 제대로 예측하지 못하는 문제점도 발견되었다. 주계열 전향점의 위치만 고려하면 나이는 ($V, B-V$)와 ($V, V-I$)에서 모두 $\log \text{age}=7.9$ 로 추정할 수 있으나 ± 0.1 범위에서 어떤 나이를 갖는 모형이 맞다고 단정하기 어렵다.

종합적으로 판단해 볼 때 가장 잘 맞는 모형은 Fig. 10 (a)와 (b)의 자전이 있는 Geneva연구집단의 모형으로 생각된다. 여기서는 ($V, B-V$)와 ($V, V-I$)에서 모두 $\log \text{age}=0.85 \pm 0.05$ (약 110 Myr)로 나왔다. 즉 NGC 7790의 나이는 약 110 ± 10 Myr이다.

Romeo et al. (1989)은 나이를 50-100 Myr로 추정하였고, Bertelli et al. (1994)은 $\log(\text{age})=8.1 \pm 0.1$ (100-158 Myr)로 구하였다. 또한, Gupta et al. (2000)은 120 ± 20 Myr, Girardi et al. (2004)은 60-80 Myr로 결정하였다. 본 연구 결과는 Gupta et al. (2000)와 가장 유사하다.

세페이드 변광성

NGC 7790이 흥미로운 연구 대상인 이유 중의 하나는 우주론적 거리의 결정에 중요한 세페이드 변광성이 3개나 있기 때문이다. 독립적인 방법으로 거리

를 결정할 수 있으므로 산개성단 내 세페이드 변광성은 주기-광도 관계 및 주기-광도-색지수 관계의 영점을 제공할 수 있다. 대마젤란은하 내 세페이드 변광성으로 주기-광도 관계의 기울기를 얻고, 주계열 맞추기를 통해 산개성단 내 세페이드 변광성의 절대등급을 얻어 주기-광도 관계의 영점을 얻었다(Sandage and Tammann, 1968). 이와 같은 방법으로 얻어진 LMC내 세페이드 변광성을 이용한 주기-광도 관계는 오랫동안 외부 은하의 거리를 구하는데 사용되어 왔다. 한편 우리은하내 세페이드 변광성의 주기-광도 관계는 전통적으로 세페이드를 포함하는 산개성단이나 성협을 사용하여 얻었으며(Feast and Walker, 1987; Feast, 2003; Sandage and Tammann, 2006), 최근의 관측 결과 이 주기-광도 관계의 기울기와 영점이 LMC내 세페이드로부터 구한 것과 확실히 다르다는 것을 보여주고 있다(Sandage and Tammann, 2006). 이러한 차이는 우리은하가 LMC보다 중원소 함량이 높기 때문이지만, 과거에는 측광자료의 정밀도가 낮아 중원소함량의 차이에 의해 주기-광도 관계의 기울기가 바뀔 수 있다는 것을 예측하지 못했기 때문이다. 따라서 우리은하 내 세페이드 변광성을 포함한 천체들까지의 거리는 우리은하내의 세페이드 변광성 관측을 통해 구한 주기-광도 관계를 사용해야 한다.

Fig. 11은 NGC 7790 내 3개의 세페이드 변광성을 관측한 선행 연구자들의 평균 관측등급(V)에 우리가 구한 B 와 V 필터에서의 색초과량[$E(B-V)=0.58$ -공간적으로 체계적인 변화를 보이지 않아 평균값 사용]을 적용하여 V_0 를 구하고 주계열 맞추기로 구한 성단의 거리지수 [$(m-M)_0=12.65$]를 반영한 절대등급을 Tammann et al. (2003)이 얻은 우리은하 내 세페이드 변광성의 주기-광도 도표에 표시(사각형안의 점 3개)한 것이다. NGC 7790에 있는 세페이드 변광성의 주기는 Smak (1966)와 Feast and Walker (1987)에서 얻었다. 그림에 표시한 53개의 세페이드 변광성의 절대등급은 산개성단 또는 OB성협에 있는 세페이드 변광성의 경우 주계열 맞추기를 통해 절대등급

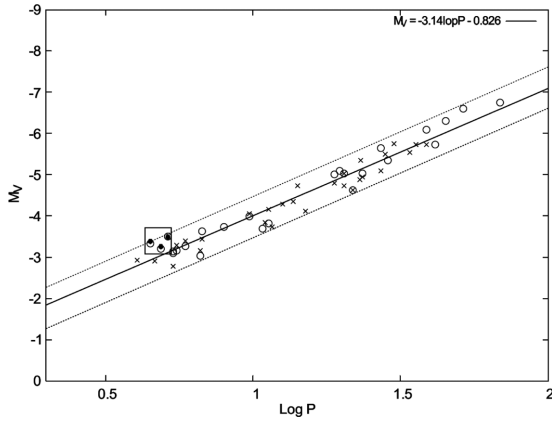


Fig. 11. The solid line represents the mean Galactic P-L relation for 25 Cepheids with cluster distances (open circles) and 28 with BBW moving atmosphere distances (crosses) by Tammann et al. (2003). The dashed lines are shifted as $M_V = \pm 0.5$ from the solid line. Dots in the box represent the M_V of CEb Cas, CF Cas and CEa Cas, from left to right determined using the average values given by Sandage and Tammann(1969) and Gupta(2000) applying our reddening and distance modulus.

을 얻은 것이며, 날별로 존재하는 세페이드 변광성은 시선속도 곡선을 이용하여 세페이드 변광성의 절대 물리량을 얻는 Baade-Becker-Wesselink 방법(BBW method)으로 얻은 것이다. 실선은 Tammann et al. (2003)이 53개의 세페이드를 관측해 얻은 평균 주기-광도 관계를 나타낸다. 이 주기-광도 관계에서 절대 등급의 표준편차는 0.24등급이며, 이 표준편차의 약 2배에 해당하는 ± 0.5 등급 범위를 점선으로 표시하였다. 사각형 안의 원 3개는 Tammann et al. (2003)이 평균 관측 등급에 그들이 구한 성간 적색화값과 거리지수를 반영하여 구한 M_V 값을 나타낸다. 이들은

성간 적색화 값을 각각 0.562 (CEa Cas), 0.548 (CEb Cas), 0.531 (CF Cas)로 다르게 주었고, 거리지수는 12.69로 적용하였다. Table 5는 Sandage and Tammann (1969), Gupta (2000), 그리고 Tammann et al. (2003)의 평균등급(V)에 우리와 Tammann et al. (2003)의 성간 적색화값과 거리지수를 적용하여 구한 절대등급(Obs. M_V)과 주기-광도 관계로 계산한 절대 등급(Cal. M_V)을 비교한 것이다. 주어진 주기에서 우리가 구한 절대등급이 주기-광도 관계로 계산한 값보다 평균 0.42 (CEa Cas), 0.52 (CEb Cas), 0.28 (CF Cas) 등급 작게 나왔다. 또한 Tammann et al. (2003)이 구한 절대등급도 주기-광도 관계로 계산한 값보다 평균 0.40 (CEa Cas), 0.41 (CEb Cas), 0.16 (CF Cas) 등급 작게 나왔다. 우리의 자료보다 차이가 약간은 적지만, 동일한 경향성을 보인다. 우리가 구한 세페이드 변광성의 절대등급이 Tammann et al. (2003)의 주어진 주기에서 주기-광도 관계보다 약간 밝지만 Fig. 11에서 보면 주어진 주기에서 분산은 ± 0.5 등급 정도이므로, 분산 범위내에 든다. 따라서 NGC 7790에 있는 3개의 세페이드 변광성은 주기-광도 관계에 대해 주어진 주기에서 약 0.5등급 정도 밝다. 이처럼 세페이드 변광성의 주기-광도 관계에서 나타나는 분산의 요인은 세페이드 변광성의 절대등급이 체계적으로 잘못되었을 가능성이나 동일질량의 별일지라도 청색쪽에서 청색쪽으로 진화하는 세페이드 변광성과 적색쪽으로 진화하는 세페이드 변광성의 밝기와 주기가 다르기 때문에 나타나는 분산, 또 중원소 함량의 차이에 의한 분산 등의 원인으로 사료된다.

요약 및 결론

본 연구에서 얻었던 결과는 다음과 같다.

Table 5. Comparison of M_V determined from observation and calculated from the Period-luminosity relation

Star	Author	log P	V	$E(B-V)$	V_0	$(m-M)_0$	Obs. M_V	Cal. M_V	Obs.-Cal.
CEa Cas	Sandage and Tammann (1969)		10.92	0.58	9.18	12.65	-3.47	-3.06	-0.41
	Gupta (2000)	0.711	10.90	0.58	9.16	12.65	-3.49	-3.06	-0.43
	Tammann et al. (2003)		10.92	0.56	9.23	12.69	-3.46	-3.06	-0.40
CEb Cas	Sandage and Tammann (1969)		10.99	0.58	9.25	12.65	-3.40	-2.87	-0.53
	Gupta (2000)	0.651	11.02	0.58	9.28	12.65	-3.37	-2.87	-0.50
	Tammann et al. (2003)		11.05	0.55	9.41	12.69	-3.28	-2.87	-0.41
CF Cas	Sandage and Tammann (1969)		11.12	0.58	9.38	12.65	-3.27	-2.99	-0.28
	Gupta (2000)	0.688	11.14	0.58	9.40	12.65	-3.25	-2.99	-0.26
	Tammann et al. (2003)		11.14	0.53	9.55	12.69	-3.14	-2.99	-0.16

1) $B-V$ 와 $U-B$ 색-색도에서 NGC 7790에 있는 조기형 별의 성간소광 $E(B-V)$ 를 결정하였으며, 그 평균값은 0.58 ± 0.02 이다. $B-V$ 와 $V-I$ 의 고유색지수 관계를 이용하여 $(V-I)_0$ 를 얻고, 이로부터 각 조기형 별의 $E(V-I)$ 를 구하였다. $E(V-I)$ 의 평균값은 0.72 ± 0.03 이다. $E(B-V)$ 와 $E(V-I)$ 의 색초과비를 바탕으로 총소광 대 선택소광의 비를 $R_V = 3.02 \pm 0.09$ 로 결정하였고, NGC 7790의 평균 총소광을 $A_V = 1.75 \pm 0.06$ 로 얻었다.

2) 성간소광을 보정한 측광자료와 경험적인 영년주계열 관계를 비교하여 NGC 7790의 거리지수 $V-M_V = 12.65 \pm 0.1$ 로 얻었으며, 이 값은 선행연구의 결과와 잘 일치한다.

3) 태양의 중원소함량을 적용한 Geneva 연구집단 (Ekstrom et al., 2012)의 등연령곡선($Z=0.014$)과 Padova 연구집단(Bressan et al., 2012)의 등연령곡선($Z=0.019$)을 모두 적용하여 이 성단의 나이를 결정하였다. 자전을 고려한 Geneva 연구집단의 등연령곡선이 관측한 색-등급도와 가장 잘 일치하였다. 이를 통해 구한 나이는 $\log \text{age} = 8.05 \pm 0.05 [\text{yr}]$ 이다.

4) NGC 7790 내 3개의 세페이드 변광성을 관측한 Sandage and Tammann (1969)과 Gupta (2000)의 평균 관측등급에 우리가 얻은 성간 적색화값과 거리지수를 적용하여 M_V 를 구하고 Smak (1966)과 Feast and Walker (1987)가 구한 주기를 이용해 Tammann et al. (2003)의 세페이드 변광성의 주기-광도 도표에 표시하였다. NGC 7790에 있는 3개의 세페이드 변광성은 Tammann et al. (2003)의 주기-광도 관계에 대해 주어진 주기에서 약 0.5등급 정도 밝음을 확인하였다.

사 사

투고에 앞서 세페이드 변광성의 특성과 연구방법을 알려주신 한국천문연구원 김승리 박사님과 측광의 전 과정을 도와주시고 건설적인 비평과 제언해 주신 세종대학교 천문우주과학과 허현오 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

References

Alcala, J.M. and Ferro, A.A., 1988, UBVR photometric photometry of the open cluster NGC 7790. *Revista*

- Mexicana Astronomia Astrofisica, 16, 81-86.
- Andrievsky, S.M., Lepine, J.R.D., Korotin, S.A., Luck, R.E., Kovtyukh, V.V., and Maciel, W.J., 2013 Barium abundances in Cepheids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 3252-3261.
- Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., Ragotto, F., and Nasi, E., 1994, Theoretical isochrones from models with new radiative opacities. *Astronomy and Astrophysics*, 106, 275-302.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., Rubele, S., and Nanni, A., 2012, Stellar tracks and isochrones with the Padova and Trieste stellar evolution code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 127-145.
- Christian, C.A., Adams, M., Barnes, J.V., Butcher, H., Hayes, D.S., Mould, J.R., and Siegel, M., 1985, Video camera/CCD standard stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 97, 363-372.
- Davidge, T.J., 2012, The young open clusters KING 12, NGC 7788, and NGC 7790: pre-main-sequence stars and extended stellar halos. *The Astrophysical Journal*, 761-775.
- Ekstrom, S., Georgy, C., Eggenberger, P., Meynet, G., Mowlavi, N., Wyttenbach, A., Granada, A., Decressin, T., Hirschi, R., Frischknecht, U., Charbonnel, C., and Maeder, A., 2012, Grids of stellar models with rotation I. models from 0.8 to 120 M_{\odot} at solar metallicity ($Z=0.014$). *Astronomy and Astrophysics*, 537, 146-164.
- Feast, M., 2003, Current uncertainties in the use of cepheids as distance indicators. *Stellar candles for the extragalactic distance scale*, edited by D. Alloin and W. Gieren, *Lecture Notes in Physics*, 635, 45-70p.
- Feast, M.W. and Walker A.R., 1987, Cepheids as distance indicators. *Astronomy and Astrophysics*, 25, 345-375.
- Girardi, L., Grebel, E.K., and Chiosi, C., 2004, Theoretical isochrones in several photometric systems. *Astronomy and Astrophysics*, 422, 205-215.
- Guetter, H.H. and Vrba, F.J., 1989, Reddening and polarimetric studies toward IC 1805. *The Astronomical Journal*, 98, 611-746.
- Gupta, A.C., Subramaniam, A., Sagar, R., and Griffiths, W.K., 2000, A complete photometric study of the open cluster NGC 7790 containing Cepheid variables. *Astronomy and Astrophysics supplement series*, 145, 365-375.
- Johnson, H.L. and Morgan, W.W., 1953, Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the yerkes spectral atlas. *The Astrophysical Journal*, 117, 313-352.
- Kraft, R.P., 1958, Cepheids in galactic clusters. II. radial velocities and spectral types in NGC 129, NGC 6664, and NGC 7790. *American Astronomical Society*, 128, 161-166.

- Landolt, A.U., 1983, UBVR photometric standard stars around the celestial equator. *The Astronomical Journal*, 88, 439-460.
- Lee, J.D. and Lee, S.G., 1999, Optical and NIR photometry of open cluster NGC 7790. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 32, 91-107.
- Lim, B.D., 2008, The Characteristics of 4k CCD Photometry at Maidanak Astronomical Observatory in Uzbekistan and standard transformations and applications, Unpublished M.S. thesis, Sejong University, Seoul, Korea, 90 p.
- Lim, B.D., Sung H.K., Bessell M.S., Karimov, R., and Ibrahimov, M., 2009, CCD photometry of standard stars at Maidanak astronomical observatory in Uzbekistan: transformations and comparisons. *Journal of The Korean Astronomical Society*, 42, 161-174.
- Mateo, M., Madore, B., 1988, Distances to galactic star clusters containing Cepheids: NGC 7790. *Astronomical Society of the Pacific*, 4, 174-175.
- Matthews, J.M., Gieren, W.P., Mermilliod, J.C., and Welch, D.L., 1995, Independent distance determinations to Milky Way Cepheids in open clusters and associations. II. CF Cas in NGC 7790, *The Astronomical Journal*, 110, 2280-2287.
- Menzies, J.W., Marang, F., Coulson, I.M., and Engelbrecht, C.A., 1991, UBVR photometry of equatorial standard stars. A direct comparison between the northern and southern systems, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 248, 642-652.
- Mermilliod, J.C., 1981, Comparative studies of young open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 97, 235-244.
- Pederos, M., Madore, B.F., and Freedman, W.L., 1984, Photographic photometry of the open cluster NGC 7790. *The Astrophysical Journal*, 286, 563-572.
- Romeo, G., Bonifazi, A., Pecci, F.F., and Tosi, M., 1988, CCD-photometry of open clusters containing Cepheid variables: NGC 7790. *Astronomical Society of the Pacific*, 4, 176-177.
- Romeo, G., Bonifazi, A., Pecci, F.F., and Tosi, M., 1989, CCD photometry of galactic open clusters-I. NGC 7790. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 240, 459-485.
- Sandage, A., 1958, Cepheids in galactic clusters. I. CF Cas in NGC 7790. *The Astrophysical Journal*, 128, 150-160.
- Sandage, A. and Tammann, G.A., 1968, A composite period-luminosity relation for cepheids at mean and maximum light. *The Astrophysical Journal*, 151, 531-545.
- Sandage, A. and Tammann, G.A., 1969, The double Cepheid CE Cassiopeiae in NGC 7790: Tests of the theory of the instability strip and the calibration of the period-luminosity-color relation. *The Astrophysical Journal*, 157, 683-708.
- Sandage, A. and Tammann, G.A., 2006, Absolute magnitude calibrations of population I and II cepheids and other pulsating variables in the instability strip of the Hertzsprung-Russell diagram. *Astronomy and Astrophysics*, 44, 93-140.
- Schmidt, E.G., 1981, Four-color and H β photometry of the galactic cluster NGC 7790. *The Astronomical Journal*, 86, 242-245.
- Smak, J., 1966. CE Cas a, CE Cas b, and CF Cas in NGC 7790. *ACTA Astronomica*, 16, 11-24.
- Sung, H., 1995, UBVR CCD photometry of eight young open cluster. Unpublished Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 379 p.
- Sung, H. and Bessell, M.S., 1999, UBVR CCD photometry of M35 (NGC 2168). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 306, 361-370.
- Sung, H., Bessell, M.S., Lee, H.W., Kang, Y.H., and Lee, S.W., 1999, UBVR CCD photometry of M11-2. New photometry and surface density profiles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 310, 982-1001.
- Sung, H., Bessell, M.S., Lee, B.W., and Lee, S.G., 2002, The open cluster NGC 2516. I. optical photometry. *The Astronomical Journal*, 123, 290-303.
- Sung, H., Lim, B., Bessell, M.S., Kim, J.S., Hur, H., Chun M.Y., Park, B.G., 2013, Sejong open cluster survey (SOS). 0. Target selection and data analysis. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 46, 103-123.
- Tammann, G.A., Sandage, A., and Reindl, B., 2003, New period-luminosity and period-color relations of classical Cepheids: I. Cepheids in the Galaxy. *Astronomy and Astrophysics*, 404, 423-448.
- Turner, D.G., 1979, A reddening-free main sequence for the Pleiades cluster. *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, 91, 642-647.
- Vahdehgerg, D.A. and Bridges, T.J., 1984, Theoretical zero-age main sequences applied to the Pleiades, Praesepe, and Hyades star cluster. *The Astrophysical Journal*, 278, 679-688.

Manuscript received: October 6, 2015

Revised manuscript received: November 9, 2015

Manuscript accepted: November 12, 2015