

## 우리는하 구상성단들의 역학적 세부구조 I. M5

이종환<sup>1</sup>, 손영종<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>연세대학교 자외선우주망원경연구단

## DYNAMICAL SUBSTRUCTURES OF GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS I. M5

Jongwhan Rhee<sup>1</sup> and Young-Jong Sohn<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Center for Space Astrophysics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: jhrhee@galaxy.yonsei.ac.kr, sohnyj@csa.yonsei.ac.kr

(Received July 30, 2004; Accepted August 23, 2004)

### 요 약

구상성단 M5의 역학적 세부구조를  $BV$  영상에 대한 점광원 측광과 타원 맞추기 표면 측광에 의한 타원률과 위치각의 변화로부터 알아보았다. 전체적으로 M5는 성단의 중심부로부터 거리에 대한 타원률과 위치각이 일정하지 않고 지속적으로 변화하고 있음을 알 수 있었다. 즉, M5의 중심으로부터 반 광도 밝기( $r_h$ )의 약 3배에 이르기 까지, 타원률은 0.05 ~ 0.25의 변화를 보이며, 위치각은  $75^\circ \sim -75^\circ$ 의 변화를 나타낸다. 항성 종족 차이에 의한 역학적 세부구조의 변화에 있어서 M5의  $\sim r_h$  바깥 영역은 거성들의 종족 차이에 의한 효과는 거의 없음을 알 수 있었다. 그러나  $\sim 0.5r_h$  안쪽 영역에서는 매우 밝은 적색거성 또는 붉은 수평계열성들에 의한 역학적 세부구조의 변화가 나타나는데, 특히 매우 밝은 적색거성들에 의한  $\sim 0.5r_h$  안쪽 영역에서 구상성단 M5의 역학적 세부구조의 변화는, 전체 종족을 포함하는 M5의 역학적 구조에 비하여, 타원률의 경우 최대 약 0.1, 그리고 위치각의 경우 최대 약  $100^\circ$ 에 이르는 비교적 큰 변화를 보임을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

We use  $BV$  CCD images to study the dynamical substructure of the globular cluster M5. We investigate the radial variation of ellipticities and position angles using the stellar photometry and the IRAF ellipse task. We find that out to three times the half light radius ( $r_h$ ), the changes in ellipticities and position angles range in  $0.05 \sim 0.25$  and  $75^\circ \sim -75^\circ$ , respectively. There are no significant discrepancy in the dynamical substructure beyond  $r_h$  among the different giant populations. However, compared to the global dynamical substructure of M5, the inner ( $<0.5r_h$ ) substructure of the bright red giant and the horizontal branch populations show slightly different patterns. Especially, the discrepancy of the bright red giant population with respect to the global substructure, ranges up to 0.1 for the ellipticity and  $100^\circ$  for the position angle.

*Keywords:* globular cluster, M5, dynamical substructure

---

<sup>†</sup>corresponding author

## 1. 서 론

구상성단들은 역학적으로 수백만개의 극히 오래되고 작은 질량의 별들이 자체 중력으로 유지되고 있는 구형의 단순한 형태를 가지고 있다. 또한 대부분의 구상성단 중심부의 이완 시간은 평균 수 억년에 불과해 Hubble 시간 척도에 비해 아주 적으므로(Webbink 1985, Trager et al. 1993) 충분한 역학적 진화를 경험한 잘 이완된 항성계로 간주된다. 따라서 구상성단은 자체 중력 항성계의 역학적 진화 모형에 대한 검증 대상으로 큰 의미를 가진다.

대부분의 구상성단들은 투영 형태의 장반경에 대한 단반경의 비 ( $b/a$ )가 0.8 이상의 큰 값을 가지며(Fall & Frenk 1985), White & Shawl(1987)의 99개 구상성단에 대한 형태학적 연구에 의하면 전체 구상성단들의 평균  $b/a$  값은 약 0.93에 이른다. 그러나 구상성단 M19의 경우  $b/a$  값이 0.73에 이르는 등, 약 5% 정도의 성단들은  $b/a$  값이 0.8에 미치지 못하는 매우 찌그러진 타원의 모습을 보인다. 일반적으로 이러한 구상성단들의 찌그러진 형태는 매우 느리기는 하지만 있을 수 있는 항성계의 회전으로 해석하는 경향이 많다. 그러나 구상성단의 경우 찌그러짐이 매우 적은 것으로 보아 회전량이 구형 항성계에서 가장 적을 것이라고 추정할 수 있다. 즉, 타원률 0.1 이하를 보이는 구상성단들에 대해 회전 운동의 속도  $v$ 와 무질서 운동의 속도 분산  $\sigma$ 의 비는 이론적으로  $v/\sigma < 0.3$ 에 한정된다(Binney & Tremaine 1987).

이러한 구상성단계의 역학적 구조에 대한 관측적 접근으로 성단 내에 분포하는 항성들의 공간 분포를 조사해 보면 소위 질량 분리 현상이 관측된다. 성단 내 별들에 대해 성단 중심부로부터의 반경에 대한 광도함수, 즉, 밝기에 대한 개수 비를 조사해 보면, 성단의 중심부로부터 멀어질수록 밝은 별들의 비율이 어두운 별들에 비해 적어진다. 구상성단의 경우 별들의 밝기는 곧 별들의 질량과 비례함이 알려져 있으며, 별들의 내부 공간 운동에 의한 두별이 충돌에 의해 에너지를 교환하는 경우, 질량이 큰 별들이 속도를 잃어버리면서 성단 중심부로 쏠리는 현상이 나타난다. 따라서 구상성단과 같은 단순한 항성계에 있어서 역학적 구조는 성단을 구성하는 별들의 밝기, 즉, 질량에 따라 달라질 수 있다. 또한 구상성단의 진화와 내부 별들의 운동의 효과가 맞물리는 경우, 관측되는 성단의 역학적 세부구조는 성단 내 별들의 종류에 따라 다를 수 있을 것이다.

이 연구에서는 우선 구상성단에 대해 얻어진 측광 영상자료를 이용하여 성단을 구성하는 각 별들에 대한 측광을 실시한다. 측광이 성공적으로 실시되어 분해 되는 별들에 대해 밝기에 따라 종족을 구분한다. 이러한 각 종족이 성단의 역학적 구조에 어떠한 영향을 미치는가를 보는 것이 이 연구의 목적이다. 각각의 분리된 별들에 대한 성단의 세부 역학계의 구조적 차이는 성단의 반경에 대한 타원 맞추기(ellipse fitting)를 실시하여 타원률(즉,  $1-b/a$ ) 및 위치각의 변화 형태를 분석함으로써 유추할 수 있다.

이러한 연구의 첫 시도로서, 이 논문에서는 먼저 질량이 매우 큰 헤일로 구상성단 M5에 대한 BV 측광 영상자료를 이용하여 M5를 구성하는 밝은 별들의 종족이 성단의 역학계에 어떠한 영향을 미치는가를 분석한다. M5의 전체 평균 타원률은 0.14로서 비교적 많이 찌그러져 있으며, 평균 위치각은 정북 방향으로부터 시계방향으로  $56^\circ$  기울어져 있다(White & Shawl 1987). 또한 M5는  $b = 46^\circ.8$ 의 높은 은위에 위치하고 있으므로 같은 시선 방향에 존재하는 M5 이외의 별들이 적고 성간 적색화의 영향을 심각하게 받지 않는다. 성간 적색화량은  $E(B-V) = 0.02$ , V 파장에서의 거리지수는  $(m - M) = 14.31$ (Harris 1996), 그리고 질량은  $\log(M/M_\odot) = 5.6$ , 중심부 밀도는  $\log[\rho_0/(M_\odot/\text{pc}^3)]$

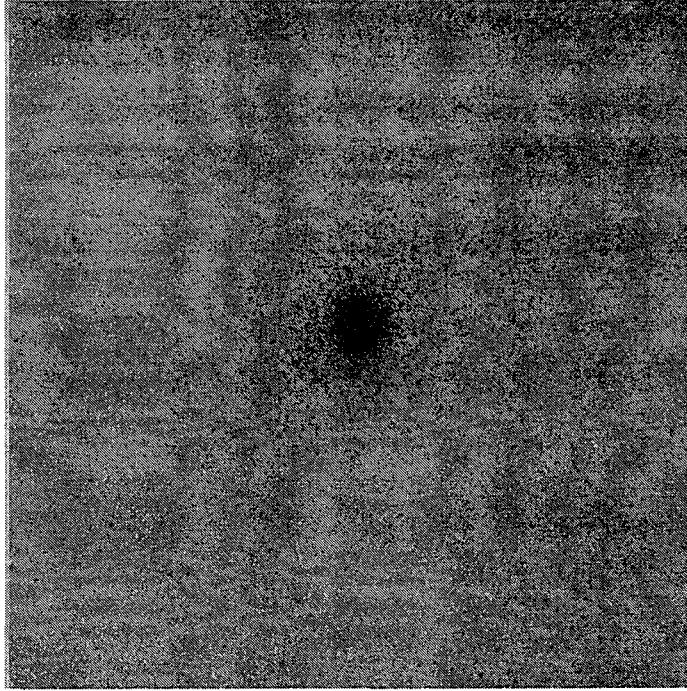


그림 1. 전처리 과정이 끝난 M5의 V 영상. 전체 영상은  $23.5 \times 23.5 \text{ arcmin}^2$ 의 하늘 영역을 포함한다.

= 4.0(Meylan & Pryor 1993)로 알려져 있다. 한편 M5의 중원소 함량은  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.4$ (Zinn & West 1984),  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.1$ (Carretta & Gratton 1997),  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$ (Ramirez & Cohen 2003)와 같은 중간값을 가지는 것으로 알려져 있다.

## 2. 관측과 자료처리

M5에 대한 BV 영상은 UT 1998년 9월 1일 미국 KPNO 0.9m 망원경을 이용하여 얻었다. 사용된 검출기는 T2KA CCD 로서  $2048 \times 2048 \text{ pixel}^2$  크기이다.  $f/7.5$  초점면에서의 영상은 1 pixel당 0.68 arcsec의 척도를 가지며, 따라서 얻어진 전체 영상은  $23.5 \times 23.5 \text{ arcmin}^2$ 의 하늘 영역을 포함한다. 노출시간은 B와 V 과장영역에서 동일하게 각각 5초씩인데, 이와 같은 짧은 노출에도 불구하고 이후 3장에서 보는 바와 같이 적색거성 이상의 밝은 별들에 의한 성단의 역학적 구조를 측광학적으로 분석하는데 있어서 큰 문제는 없다. 자료의 전처리 기본분석은 bias 빼주기, 돔 flat 나누기, 하늘 flat 나누기의 차례로 CCD 영상 표준분석법을 따랐다. 이 결과 영상의 바닥 편평도 기울기는 0.5% 이하로 나타났다. 그림 1에 전처리 과정이 끝난 M5의 V 영상을 나타내었다. M5에 대한 관측된 BV 영상의 시상은 V의 경우 1.3 arcsec, B의 경우 1.5 arcsec 였다. 이 관측 기간 중 측광 표준화에 대한 결과는 Sohn et al.(1999)에 정리되어있다. 그러나 이 연구에서는 성단의 표면 측광에 의한 역학적 세부구조 분석이 목적이므로 측광 결과의 표준화는 시도하지 않았다.

M5의 BV 영상에서 성단 중심부로부터 반경에 대한 타원률 및 위치각의 변화를 알아내기 위한 분

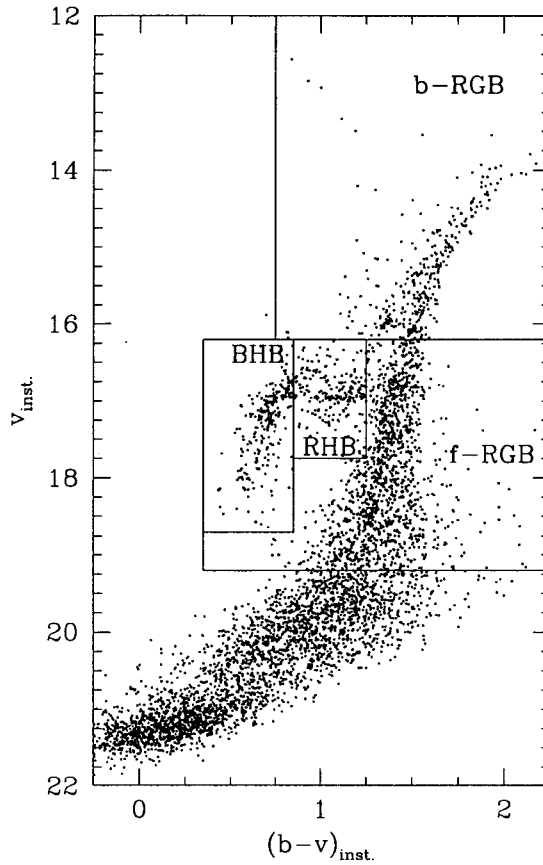


그림 2. M5의 기계등급에 대한 색등급도와 거성들의 종족 분류. b-RGB, RHB, BHB, f-RGB와 같이 4개의 종족을 임의로 분류하였다.

석과정은 다음과 같다. 먼저 M5 영상에서 DAOPHOT II(Stetson 1987, 1995)를 적용하여 성단내 밝은 별들의 점광원 함수(point spread function) 측광을 실시하고 별들의 기계 등급과 색지수를 결정하며, 측광된 구성 별들에 대한 색등급도를 완성한다. 색등급도에서 별들의 밝기와 진화상태를 기준으로 bright-RGB(가장 밝은 적색거성), RHB(붉은 수평계열성), BHB(푸른 수평계열성), faint-RGB(어두운 적색거성) 등으로 항성 종족 집단을 분류하며, M5의 관측된 원래 영상자료에서 각 종족 집단을 선택적으로 제거되 점광원 함수를 감안하여 실시한다. 각 종족 집단이 선택적으로 제거된 영상 자료에 대해 중치 여과(median filtering)과정을 거친 후, 성단 중심부로부터 반경에 대한 IRAF ellipse 맞추기를 실시하여 성단의 반경에 대한 타원률과 위치각을 얻는다. 이 결과로부터 ellipse 형태의 반경에 대한 변화를 추정하고, 모든 항성 종족을 포함하는 경우와 각각의 항성종족이 제거된 경우의 ellipse 맞추기 결과를 비교해 본다. 이 과정을 통하여 M5 항성계의 역학적 세부 형태에 대한 항성종족의 역할을 분석한다.

### 3. M5의 거성 종족 분류와 역학적 세부구조

구상성단 M5의 거성 종족 분류를 위하여, 2장에서 기술한 바와 같은 전처리 과정을 거쳐 얻은 측광 자료에 노출시간과 대기소광을 보정한 색등급도를 그림 2에 나타내었다. 성단 내 거성들의 밝기와 색분포에 대해 그림 2에서 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB와 같이 4개의 종족을 등급과 색지수에 따라 임의로 분류하였다. b-RGB와 f-RGB의 경계와 BHB와 RHB의 경계를 구분하는데 있어 특별한 조건은 주지 않았으며, 이 연구의 목적이 성단내 종족들의 밝기에 대한 역학적 구조의 영향을 분석하는데 있으므로 두 종족의 분류에 대한 특별한 측광학적 조건이 필수적인 것은 아니다.

먼저, 전체 종족을 포함한 M5의 역학적 구조를 알아보기 위해 전처리된  $V$  영상에 대해 IRAF ellipse 맞추기를 실시하였다. 이 ellipse 맞추기에 대한 상세한 설명은 Jedrzejewski(1987)를 참조한다. Ellipse 맞추기에서 밝은 별들에 의한 과대한 영향을 없애기 위해 전처리된 원래 영상에 대해  $31 \times 31$  pixel<sup>2</sup> 중치 여과한 영상을 만들었다. 이때 중치 여과를 위한 영역이 너무 큰 경우 성단의 원래 형태 정보가 바뀔 수 있으며, 너무 작은 경우 ellipse 맞추기가 불가능한 경우가 생길 수 있다. 따라서 중치 여과를 위한 영역의 크기는 여러 번의 ellipse 맞추기의 실행을 통한 경험적 방법으로 결정하였다. 중치 여과된 M5의  $V$  영상에 대해 IRAF ellipse 맞추기 기법을 적용하여 타원률과 위치각의 변화를 측정하였으며, 이때 장축의 증가폭은 10 pixel로 지정하였다. M5의 구성 별이 아닌 주변 밝은 별의 마스크 기법에 의한 제거는 실행하지 않았는데 이는 M5 영역의 경우 주변 별의 영향을 거의 받지 않을 뿐만 아니라, 이후 밝은 별의 제거를 통한 ellipse 맞추기를 실행하므로 이 성단의 역학적 세부구조를 살피는데 있어 큰 영향을 주지 않는다고 가정하였기 때문이다. 한편, ellipse 맞추기의 최대 반경은 M5의 반 광도 반경(half light radius;  $r_h = 1.75$ arcmin, Harris 1996)의 3배 되는 지점을 경험적으로 결정하였다.

그림 3에 M5의 전체 구성 별들을 포함한 영상의 ellipse 맞추기에 대한 결과, 즉, 반경의 증가에 대한 타원률과 위치각의 변화를 나타내었다. 이때 가로축의  $r_{eff}$ 는 arcsec 단위로 나타낸 유효 반경으로서  $\sqrt{ab}$ ( $a$ =장축,  $b$ =단축)으로 정의되는 값이다. 점선으로 표시된 것은 White & Shawl(1987)에 의해 주어진 M5의 평균 타원률과 평균 위치각이며, 화살표로 표시된 지점이 반 광도 반경( $r_h$ )이다. 타원률은 M5의 반경이 증가함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이는데 세부적으로 살펴보면,  $r_h$ 보다 더 안쪽 영역에서는 평균 타원률에 비해 작은 경향을 보이다가, 약  $r_h < r_{eff} < 2r_h$  영역에서는 평균 타원률과 비슷하며, 이후  $2r_h < r_{eff}$  영역에서는 평균 타원률에 비해 큰 값을 갖는 경향성을 보이고 있다. 전체적으로 타원률은 성단의 중심부로부터  $\sim 3r_h$ 에 이르기 까지 0.05 ~ 0.25의 변화를 보인다. 이러한 타원률의 단순 증가 경향으로부터 M5의 역학적 형태는 성단의 중심에서 바깥으로 갈수록 찌그러짐이 점점 커진다는 해석을 내릴 수 있다. 위치각 또한 M5의 중심부로부터 반경이 증가함에 따라 지속적으로 단순 감소하는 경향을 보이며, 성단의 중심부를 제외한 다른 영역에서는 급격한 변화를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 평균 위치각 값은 약  $\sim 2r_h$  지점에서 일치하는 모습을 보인다. 전체적으로 위치각은  $\sim 3r_h$ 에 이르기 까지  $75^\circ \sim -75^\circ$ 의 변화를 나타낸다. 따라서 M5의 경우 성단의 중심부로부터 거리에 대한 타원률과 위치각이 일정하지 않고 지속적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이 그림 3의 결과는 이후 실행될 각 종족이 제거된 영상에서의 ellipse 맞추기의 결과와 비교하게 될 것이다.

구상성단 M5의 밝은 거성들의 영향을 제거한 역학적 세부구조를 알아보기 위해 그림 2에서 구분

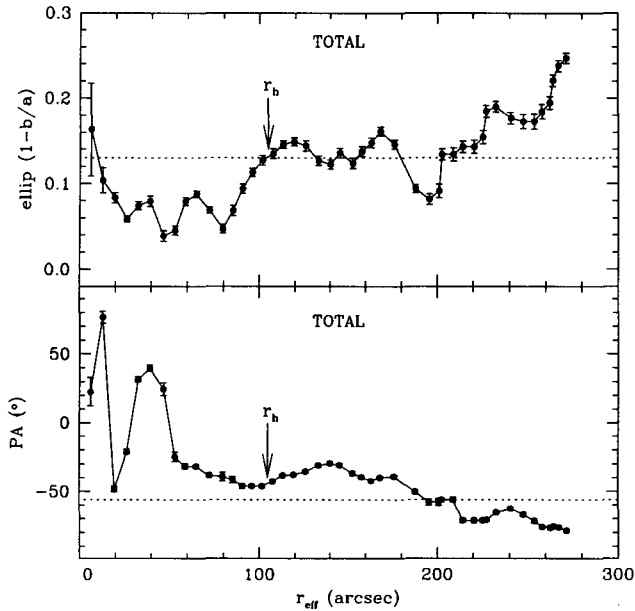


그림 3. M5의 전체 구성별들을 포함한 V 영상의 ellipse 맞추기로부터 결정된 반경에 대한 타원률과 위치각의 변화(자세한 설명은 본문 참조).

한 4개의 종족을 원래 영상으로부터 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하여 타원률과 위치각의 변화를 살펴보았다. 이를 위해 먼저, 4개 종족들을 평균 밝기에 따라 M5의 원래 V 영상에서 차례대로 제거하였는데, (a) b-RGB들을 제거한 경우, (b) b-RGB와 RHB를 제거한 경우, (c) b-RGB, RHB, 그리고 BHB를 제거한 경우, 그리고 마지막으로 (d) b-RGB, RHB, BHB, 그리고 f-RGB를 제거한 경우의 영상을 각각 만들었다. 이때 각 종족에 해당하는 별들의 제거는 DAOPHOT II에서 주어지는 점광원 함수를 응용한 substar 기법을 사용하였다. 각 종족의 별들이 제거된 4개의 V 영상들은 앞에서 실행된 M5 전체 V 영상의 ellipse 맞추기와 같은 조건으로  $31 \times 31 \text{ pixel}^2$  중치 여과를 실시하였고, 이 결과 얻어지는 영상들에 대해 독립적인 ellipse 맞추기를 실시하였다. 그림 4a-d는 이와 같은 4가지 경우들에 대한 ellipse 맞추기의 결과로부터 얻어진 타원률과 위치각의 변화이다. 각 종족들의 제거로부터 얻어지는 성단 중심부로부터의 반경에 대한 타원률과 위치각의 변화 경향은 전체적으로 그림 3에서의 모든 종족을 포함하고 있는 경우와 큰 차이가 없이 유사한 것으로 나타난다.

그러나 그림 4a에서 보이는 바와 같이 가장 밝은 거성으로 분류된 b-RGB를 제거한 경우,  $\sim 0.5r_h$  안쪽 영역에서 타원률과 위치각 모두 그림 3의 모든 종족을 포함하는 경우와 비교하여볼 때 타원률과 위치각의 변화가 심하게 나타남을 볼 수 있다. 이와 같은 각각의 개별 종족 구성의 차이에 의한 타원률과 위치각의 세부 변화의 경향을 알아보기 위해, (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우의 반경에 따른 타원률과 위치각 차이, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 RHB 종족을 제거한 경우의 차이, (c) b-RGB, RHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우의 차이, (d) b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB 종족

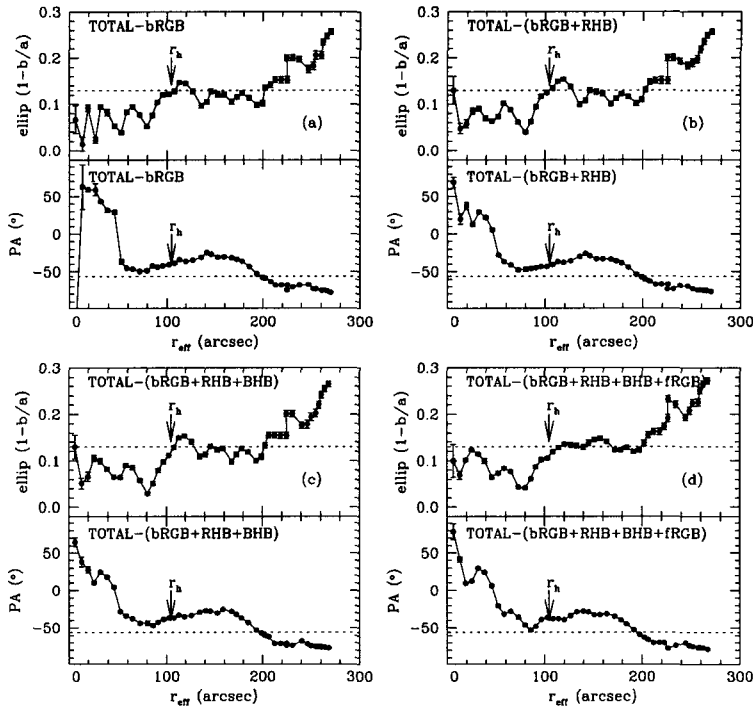


그림 4. M5 거성 종족들의 제거를 통한 타원률과 위치각 변화의 세부구조. 원래 영상으로부터 그림 2에서 보이는 4개의 종족들을 차례대로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하여 얻은 타원률과 위치각의 변화이다. (a) b-RGB 들을 제거한 경우, (b) b-RGB와 RHB를 제거한 경우, (c) b-RGB, RHB, 그리고 BHB를 제거한 경우, 그리고 마지막으로 (d) b-RGB, RHB, BHB, 그리고 f-RGB를 제거한 경우.

을 제거한 경우의 차이를 계산하였다. 이러한 (a)-(d)에 해당하는 분석의 경우, b-RGB, RHB, BHB, 그리고 f-RGB의 독립적인 세부구조를 살펴볼 수 있는 장점이 있다. 그림 5와 그림 6에 각 경우에 해당하는 타원률과 위치각의 차이를 나타내었다. 그림 5와 그림 6에서 보듯이  $\sim 0.5r_h$  바깥쪽 영역에서는 M5의 타원률과 위치각은 종족 구성의 차이에 의한 영향이 거의 나타나지 않는다. 그러나 그림 5a 및 그림 6a에서 보는 바와 같이,  $0.5r_h$  안쪽영역에서 b-RGB에 의한 구상성단 M5의 역학적 세부구조의 변화는 타원률의 경우 최대 약 0.1, 그리고 위치각의 경우 최대 약  $100^\circ$ 에 이르는 비교적 큰 변화를 보인다. 이는 M5의 중심부 세부역학 구조가 매우 밝은 적색거성의 분포에 의한 영향을 받는 것으로 여겨진다. 또한 그림 5b 및 그림 6b에서와 같이, RHB 종족에 의한 역학적 세부구조의 변화에 있어서도  $0.5r_h$  안쪽영역에서 타원률의 경우 약 0.05, 위치각의 경우 약  $30^\circ$  정도의 변화를 보인다. 그러나 그림 5c와 그림 5d, 그림 6c와 그림 6d에서와 같이 BHB 및 f-RGB에 의한 구상성단 M5의 역학적 세부구조 변화는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 한편, 그림 5a의 경우에서  $r_h < r_{\text{eff}} < 2r_h$  영역에서 b-RGB 종족 분포에 의한 타원률의 변화가 나타나는 것처럼 보이나 그 변화량이  $\sim 0.03$  정도로 매우 적으며, 이러한 현상은 매우 밝은 적색거성의 특별한 위치에 의해 나타날 수 있는 현상이다. 그리고 그림 5d의 경우 f-RGB에 의한 타원률 변화의 차이값이 다른 3개 종족의 경우에서보다 약간 큰

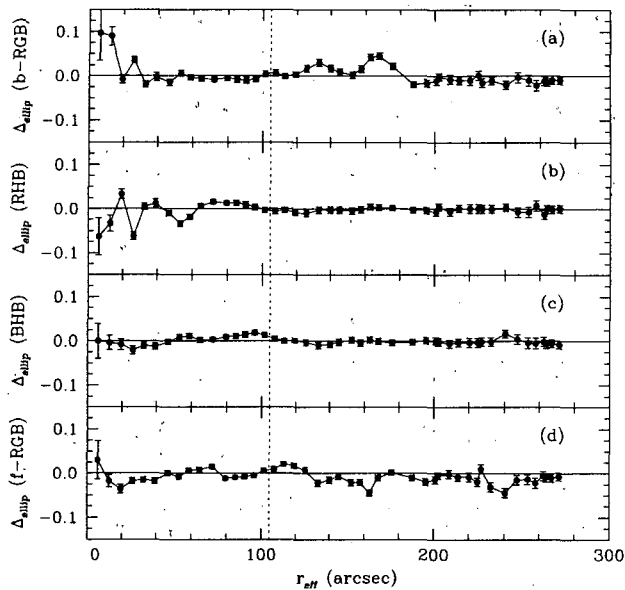


그림 5. 구상성단 M5의 세부 종족에 대한 타원률 변화의 차이. (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우의 반경에 따른 타원률의 차이, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 RHB 종족을 제거한 경우의 차이, (c) b-RGB, RHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우의 차이, (d) b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB 종족을 제거한 경우의 차이. 수직 점선은 M5의  $r_h$ 를 나타낸다. 가로축은 유효반경, 세로축은 타원률의 차이를 나타낸다.

0.02 이하의 변화를 보이고 있는데 이는 비교적 짧은 노출 시간으로 얻어진 영상의 분석에서 오는 준거성들의 측광 오차에 의해 나타나는 현상으로 여겨진다. 결론적으로 구상성단 M5의 경우 밝은 거성 종족들 즉, b-RGB 또는 RHB에 의해 성단의 중심부 영역의 역학적 세부구조가 변화될 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결과 요약 및 논의

구상성단 M5의 BV 영상에 대한 점광원 함수 측광을 실시하여 색등급도를 얻고 이로부터 밝은 거성들에 대한 4종류의 종족 분류를 실시하였다. 관측으로 얻어진 M5의 원래 V CCD 영상에서 각 종족에 해당되는 별들을 제거하여 특정 종족들(즉, 가장 밝은 적색거성, 붉은 수평계열성, 푸른 수평계열성, 어두운 적색거성)의 영향을 뺀 영상을 얻었다. 이러한 자료로부터 전체 항성종족이 포함된 M5의 역학적 구조와 각 항성 종족이 제거된 M5의 역학적 세부구조를 IRAF ellipse 맞추기에서 얻어지는 타원률과 위치각의 변화로부터 살펴보았다. 먼저, 구상성단 M5는 성단의 중심부로부터 거리에 대한 타원률과 위치각이 일정하지 않고 지속적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 성단의 중심부로부터  $\sim 3r_h$ 에 이르기까지, 타원률은 0.05  $\sim$  0.25의 변화를 보이며, 위치각은  $75^\circ \sim -75^\circ$ 의 변화를 나타낸다. White & Shawl(1987)에 의해 주어진 M5의 평균 타원률과 평균 위치각은 약  $\sim 2r_h$



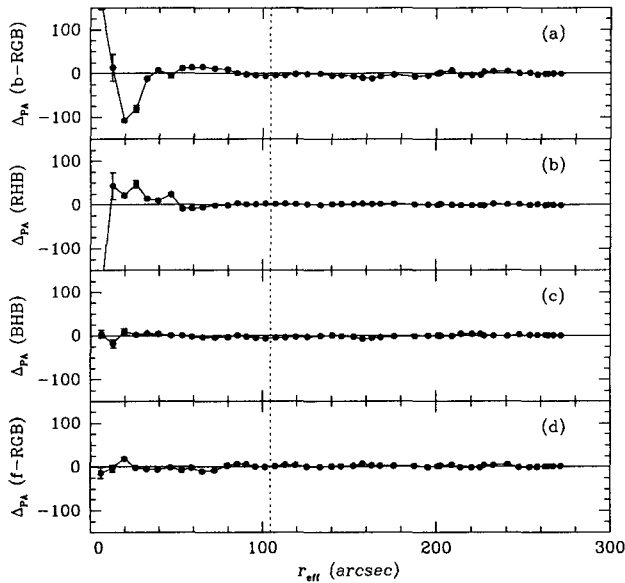


그림 6. 구상성단 M5의 세부 종족에 대한 위치각 변화의 차이. (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우의 반경에 따른 위치각의 차이, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 RHB 종족을 제거한 경우의 차이, (c) b-RGB, RHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우의 차이, (d) b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB 종족을 제거한 경우의 차이. 수직 점선은 M5의  $r_h$ 를 나타낸다. 가로축은 유효반경, 세로축은 위치각의 차이를 나타낸다.

지점에서 일치한다. 전체 종족이 포함된 경우와 각 세부종족들이 제거된 상태에서의 타원률과 위치각의 변화를 비교하여 M5의 역학적 세부구조를 살펴보았다. 이때 M5의  $\sim r_h$  바깥 영역은 거성들의 항성 종족 차이에 의한 역학적 세부구조의 변화는 거의 없음을 알 수 있었다. 그러나  $0.5r_h$  안쪽 영역에서는 매우 밝은 적색거성 또는 붉은 수평계열성들에 의한 역학적 세부구조의 변화가 나타나는데, 특히 매우 밝은 적색거성들에 의한  $0.5r_h$  안쪽영역에서 구상성단 M5의 역학적 세부구조의 변화는 타원률의 경우 최대 약 0.1, 그리고 위치각의 변화는 최대 약  $100^\circ$ 에 이르는 비교적 큰 변화를 보임을 알 수 있었다.

구상성단의 역학적 형태는 은하의 조석력, 성단 형성의 초기 조건, 그리고 성단의 회전등에 의해 영향을 받을 수 있다(Meylan & Pryor 1993과 이 논문에 인용된 논문들). 일반적으로 은하의 조석력에 의한 성단 형태의 변화는 King(1966) 모델에서 주어지는 성단의 중심반경( $r_c$ ) 바깥쪽 영역에서 조석 꼬리(tidal tail) 등의 형태로 나타나며, 성단 회전의 찌그러짐에 대한 효과 역시 많은 성단들에 대해 관측적으로 검증되고 있다(Meylan & Mayor 1986). 또한 Fall & Frenk(1985)는 중력 수축을 통한 성단 형성 초기의 각운동량에 의한 비등방 압력과 성단의 찌그러짐을 연관하여 설명하였다. 이러한 역학적 외부 영향들은 성단을 구성하는 각각의 별들의 질량에 따라 서로 다르게 나타날 수 있으며, 이러한 사실은 성단내 별들의 질량 분리 효과 그리고 다중 질량 역학 모형(Gunn & Griffin 1979)에 직접적인 관련이 있을 수 있다. 따라서 구상성단을 구성하는 항성 종족의 역학적 세부구조를 관측적

으로 확인하는 것은 자체 중력 항성계의 역학을 이해하는데 필수적이라 할 수 있다. 이 논문에서 분석한 헤일로 구상성단 M5의 경우, 성단의 반경에 따른 타원률과 위치각이 변화는 다른 구상성단들의 경우에서도 자주 나타나는 현상이며(Fall & Frenk 1985), 은하의 조석력, 항성계의 회전등이 성단의 역학계에 영향을 미치고 있음을 유추할 수 있는 것이다. M5에 영향을 미치는 은하의 조석력에 대한 직접적인 증거로 조석 꼬리가 이미 인지된 바 있다(Grillmair et al. 1995). 또한 M5의 역학적 세부구조 분석에서 밝은 적색 거성이 성단 중심영역의 역학적 세부구조에 영향을 미친다는 사실은 질량이 크고 밝은 적색 거성들의 질량 분리 현상에 대한 직접적 근거가 되며, 구상성단내 종족 분포에 의한 색 분포에도 직접적인 영향을 줄 수 있을 것이다. 따라서 이후 계속 진행될 다른 구상성단들의 역학적 세부구조에 대한 종합적 연구로부터 자체 중력 항성계의 세부구조 및 역학적 진화 특성에 대한 관측적 근거들을 제공할 수 있을 것이다.

**감사의 글:** 이 연구는 연세대학교 지원 연구비(2004-1-0200)로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Binney, J., & Tremaine, S. 1987, *Galactic Dynamics* (New Jersey: Princeton University Press), pp.211-221
- Carretta, E., & Gratton, R. G. 1997, *A&AS*, 121, 95
- Fall, S. M., & Frenk, C. S. 1985, in *IAU Symp. 113, Dynamics of Star Clusters*, eds. J. Goodman & P. Hut (Dordrecht: Reidel), p.285
- Grillmair, C. J., Freeman, K. C., Irwin, M., & Quinn, P. J. 1995, *AJ*, 109, 2553
- Gunn, J. E., & Griffin, R. F. 1979, *AJ*, 84, 752
- Harris, W. E. 1996, *AJ*, 112, 1487
- Jedrzejewski, R. I. 1987, *MNRAS*, 226, 747
- King, I. R. 1966, *AJ*, 71, 64
- Meylan, G., & Mayor, M. 1986, *A&A*, 166, 122
- Meylan, G., & Pryor, C. 1993, in *ASPCS vol.50, Structure and Dynamics of Globular Clusters*, eds. S. Djorgovski & G. Meylan (San Fransisco: ASP), p.31
- Ramirez, S. V., & Cohen, J. G. 2003, *A&A*, 398, 705
- Sohn, Y. J., Chun, M. S., Lee, J. W., & Oh, J. 1999, *JA&SS*, 16, 91
- Stetson, P. B. 1987, *PASP*, 99, 191
- Stetson, P. B. 1995, *DAOPHOT II User' Manual* (Victoria: Dominion Astrophysical Observatory)
- Trager, S. C., Djorgovski, S., & King, I. R. 1993, in *ASPCS vol.50, Structure and Dynamics of Globular Clusters*, eds. S. Djorgovski & G. Meylan (San Fransisco: ASP), p.347
- Webbink, R. F. 1985, in *IAU Symp. 113, Dynamics of Star Clusters*, eds. J. Goodman & P. Hut (Dordrecht: Reidel), p.541
- White, R. E., & Shawl, S. J. 1987, *ApJ*, 317, 246
- Zinn, R., & West, M. 1984, *ApJS*, 55, 45