

우리은하 구상성단들의 역학적 세부구조 II. NGC 6934

이종환^{1,2}, 손영종^{1,2†}, 신 민¹, 강아람^{1,2}

¹연세대학교 천문우주학과

²연세대학교 자외선우주망원경연구단

DYNAMICAL SUBSTRUCTURES OF GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS II. NGC 6934

Jongwhan Rhee¹, Young-Jong Sohn^{1,2†}, Min Shin¹, and Aram Kang^{1,2}

¹Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Center for Space Astrophysics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

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

(Received October 25, 2004; Accepted November 15, 2004)

요 약

구상성단 NGC 6934의 밝은 거성 종족에 의한 중심부의 역학적 세부구조의 변화를 알아보기 위해서 NGC 6934의 BV 영상에 점광원 함수 측광과 표면측광을 실시하여, 성단 내 구성별들의 종족에 대한 성단 중심으로부터 타원률과 위치각의 변화를 얻었다. 타원률과 위치각의 전체적인 변화를 살펴보면 $r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역에서, 타원률은 0.02 ~ 0.08 범위의 변화를 보이며, 위치각은 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 범위에서 큰 변화 폭을 가지는 것으로 나타났다. 각 거성 종족의 제거에 따른 타원률과 위치각의 변화로부터, 성단의 $r_{\text{eff}} < r_h$ 영역에서 가장 밝은 거성들(b-RGB)이 성단의 역학적 구조에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 이 영역에서 b-RGB를 제외한 다른 거성 종족에 의한 타원률과 위치각의 변화는 밝은 거성 종족에 의한 변화에 비해 작게 나타났으며, 단, 위치각의 경우 어두운 거성(f-RGB)에 의한 역학적 세부구조 변화를 볼 수 있었다. $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역에서는 수평 계열 종족(RHB, BHB)과, f-RGB에 의한 $r_{\text{eff}} \sim 60$ arcsec 근처의 타원률 및 위치각의 변화를 확인 하였다.

ABSTRACT

The variations of the dynamical substructures of NGC 6934 have been investigated by means of performing point spread function stellar photometry and the surface photometry on BV CCD images of NGC 6934. Our results show that overall variations of ellipticity and position angle range in 0.02 ~ 0.08 and $-90^\circ \sim +90^\circ$, respectively out to three times the half light radius. The inner ($r_{\text{eff}} < r_h$) substructures of NGC 6934 inferred from the variations of ellipticity and position angle are mainly affected by the bright red giant populations, while the effects of the other giant populations are weaker than those of the bright red giant populations. Horizontal branch populations and faint red giant star populations affect the dynamical substructures of NGC 6934 in the region of $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$.

Keywords: globular cluster, NGC 6934, dynamical substructure

[†]corresponding author

1. 서 론

구상성단의 형태학적 타원률, 즉, 찌그러짐의 정도에 영향을 주는 중요한 역학적 요인들에는 성단의 회전, 은하의 조석력, 속도분산의 비등방성 등이 있다(Fall & Frenk 1985, Lupton, Gunn, & Griffin 1985, Mayor et al. 1984, Meylan & Mayor 1985, 1986, Pryor et al. 1986). 구상성단의 타원률은 성단의 형성 및 역학적 진화 조건을 내포하고 있으며, 따라서 성단의 역학적 구조 연구는 결국 성단의 형성과 진화 연구에 직접적인 연관성을 갖게 된다. 한편, 구상성단과 같은 단순한 항성계의 역학적 구조는 성단을 구성하는 별들의 밝기, 즉, 질량에 따라 달라질 수 있다. 구상성단의 역학적 진화 과정을 통해 질량 분리 효과(mass segregation)가 나타나며(Grindlay et al. 1988, Nemeč & Harris 1987), 이러한 경우 관측되는 성단의 역학적 구조는 성단 내 별들의 종류에 따라 세부적으로 다르게 나타날 수 있다. 구상성단의 경우 관측되는 전체 광량의 대부분을 차지하는 별들은 밝은 거성 종족들이며, 관측적으로 유추되는 구상성단들의 역학적 구조는 밝은 거성들에 의한 영향을 절대적으로 반영한다고 볼 수 있다. 따라서 성단 내 별들의 밝기, 또는 질량에 대해 종족을 분류하고, 각 종족들의 역학적 구조를 독립적으로 분석하면 성단의 역학적 세부구조를 직접적으로 알아 볼 수 있다. 이와 같은 개념으로 이종환과 손영종(2004)은 구상성단 M5의 역학적 세부구조를 분석하여, 성단 중심부의 역학적 구조는 밝은 거성 종족들에 의해 뚜렷한 영향을 받는다는 사실을 제시하였다.

한편, 구상성단의 특성들에 대한 구상성단 타원률과의 상관관계를 찾으려는 노력들 중 주목할 만한 것은, 구상성단 광도와 타원률의 상관관계이다. 우리은하에 있는 ω Cen, M31에 있는 Mayall II, 그리고 LMC에 있는 NGC 1835와 같은 구상성단들은 각 은하에서 가장 밝으면서 또한 가장 타원률이 큰 즉, 가장 찌그러진 성단들이라는 것이 알려졌다(van den Bergh 1983, 1984, Pritchet & van den Bergh 1984). 이러한 결과와 반대로 Davout & Prugniel(1990)은 우리은하와 M31의 구상성단 자료로부터 가장 밝은 구상성단들이 오히려 원형에 가깝다는 사실을 보여준바 있으나, ω Cen, M19, Mayall II 등은 예외적인 경우로 취급하였다. 또한 Schmidt(1996)의 구상성단의 역학적 진화 과정에 의한 타원률의 변화와 광도에 대한 연구 결과는, 적당히 밝은 성단이 가장 원형에 가까우며 아주 밝거나 아니면 아주 어두운 경우가 평균보다 더 찌그러져 있다는 사실을 보여주고 있다. 따라서, 구상성단들의 전체 밝기에 대한 역학적 세부구조의 연관성을 찾는 것 또한 성단의 역학적 진화에 중요한 의미를 갖는다.

이 논문은 구상성단의 역학적 세부구조 연구에 대한 두 번째 결과로서(cf. 이종환과 손영종 2004), 밝은 구상성단 NGC 6934에 대한 측광 영상자료를 이용하여 성단을 구성하는 각 별들에 대한 측광을 실시하고, 측광이 성공적으로 실시되어 분해되는 별들에 대해 밝기에 따라 종족을 구분하며, 이러한 각 종족이 성단의 역학적 구조에 어떠한 영향을 미치는 가를 보는 것이 목적이다. 각각의 분리된 별들에 대한 성단 세부 역학계의 구조적 차이는 성단의 반경에 대한 타원 맞추기(ellipse fitting)를 실시하여 타원률(즉, $1-b/a$, a = 장반경, b = 단반경) 및 위치각의 반경에 대한 변화 형태를 분석함으로써 유추한다. NGC 6934의 은위는 $b = -18.9^\circ$ 이며 상대적으로 큰 성간 적색화량을 갖고[E(B-V) = 0.10] 같은 시선 방향에 있는 주변 별들의 영향을 비교적 많이 받는다. 따라서 이 연구에서는 주변 별들의 영향을 고려하여 NGC 6934의 역학적 세부구조를 분석하였다. NGC 6934의 거리 지수는 $(m - M)_v = 16.37 \pm 0.20$, 그리고 구상성단의 주계열 전향점과 수평계열의 등급 차이를 이용한 ΔV 방법으로 얻은 나이는 15 ± 2 Gyr이다(Piotto et al. 1999). 중원소 함량은 $[Fe/H] = -1.54$ 이고 중심부

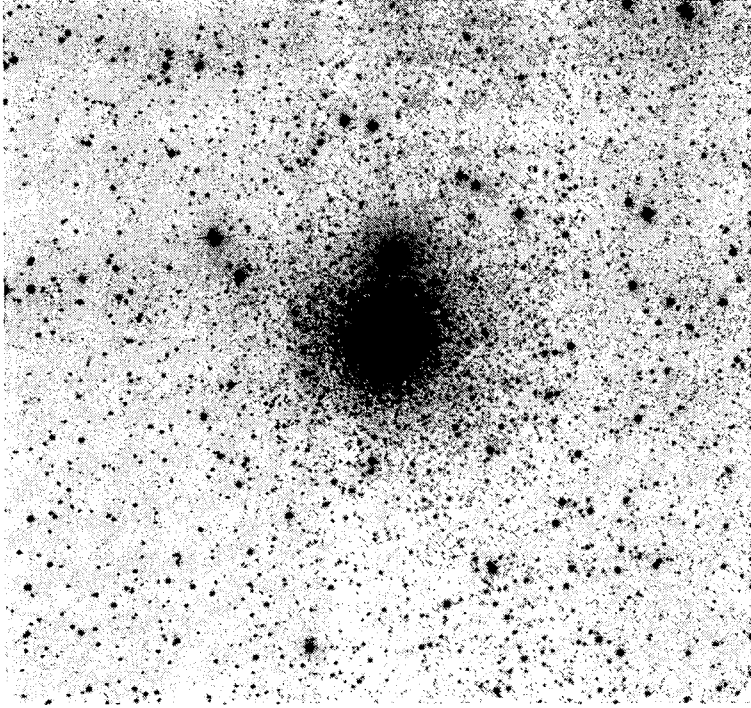


그림 1. 전처리 과정이 끝난 NGC 6934의 V 영상. 전체 영상은 $23.5 \times 23.5 \text{ arcmin}^2$ 의 하늘 영역에 해당하며 노출시간은 180초이다.

의 집중도는 $c(= \log(r_t/r_c)) = 1.53$ 으로 상당히 높은 중심 집중도를 나타내고 있다(Djorgovski 1993). 질량은 $\log(M/M_\odot) = 5.3$, 중심부 밀도는 $\log[\rho_c/(M_\odot/\text{pc}^3)] = 3.6$, 속도 분산 $\sigma = 5.1 \text{ km/s}$ 로 알려져 있다(Pryor & Meylan 1993).

2. 관측과 자료처리

NGC 6934의 BV CCD 영상 관측은 UT 1998년 9월 1일 미국 KPNO 0.9m 망원경을 이용하여 실시하였다. 사용한 검출기는 T2KA CCD로서 $2048 \times 2048 \text{ pixel}^2$ 크기이다. $f/7.5$ 초점면에서의 영상은 1 pixel당 0.68 arcsec의 척도를 가지며, 따라서 전체 영상은 $23.5 \times 23.5 \text{ arcmin}^2$ 의 하늘 영역에 해당한다. 검출기의 이득(gain)은 $3.6e^-/\text{ADU}$ 이며, 출력잡음(readout noise)은 1.111 ADU/pixel 이다. 노출시간은 B 파장에서는 240초, V 파장영역에서는 180초이며, 밝은 별들 중에서 과다 노출된 별들은 표면 측광 과정에서 마스크 기법으로 제거하게 된다. 자료의 전처리 과정은 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 NGC 6934의 V 영상을 나타내었다. NGC 6934에 대한 관측된 BV CCD 영상의 시상은 약 1.9 arcsec였다. 관측 기간 중 측광 표준화에 대한 결과는 Sohn et al.(1999)에 정리되어 있다. 이 연구에서는 성단의 표면 측광에 의한 역학적 세부구조 분석이 목적이므로 측광 결과의 표준화는 시도하지 않았다.

구상성단 NGC 6934의 반경에 따른 타원률과 위치각의 변화를 알아보기 위한 분석 과정은 크게 둘로 나누어진다. 즉, 성단의 거성 종족을 구분하기 위한 점광원 함수 측광(PSF photometry) 과정과 종족에 따른 타원률과 위치각의 변화를 분석하는 ellipse 표면 측광과정으로 나누어서 분석을 수행하게 된다. 먼저, NGC 6934의 BV CCD 영상에 DAOPHOT II / ALLSTAR(Stetson 1987, 1995)를 적용하여 성단 내 밝은 별들의 점광원 함수 측광을 실시하고 별들의 기계 등급과 색지수를 결정하며, 측광된 구성 별들에 대한 색등급도를 완성한다. NGC 6934를 구성하는 별들에 대한 측광으로부터 색등급도를 완성하는 과정에서 한 가지 고려해야 하는 점은 NGC 6934의 은위가 -18.9° 로 낮기 때문에 성단의 영상에는 성단의 구성 별들이 아닌 별들이 상당히 많이 존재하게 된다는 것이다. 따라서 성단의 구성원들을 통계적으로 추출해 내는 과정을 거치게 된다. 이를 위해서 성단의 조석반경(r_t) 바깥쪽의 임의의 영역 안에 있는 측광된 별들과 조석반경 안에 있는 별들의 BV 등급을 비교하여, 그 차이가 B와 V에서 각각 0.2등급 보다 작은 경우는 성단 영역 내 구성원들로부터 분리해 내었다. 이렇게 해서 시선방향에 있는 성단의 구성원이 아닌 별들을 통계적으로 제거했지만 색등급도 상에서 보면 NGC 6934의 거성단계 끝의 별들보다 밝기가 밝은 별들이 존재한다. 이런 별들도 NGC 6934의 구성원이 아닌 것으로 간주하여 종족 구분에 앞서 따로 분류하였다. NGC 6934의 거성단계 끝에 있는 별들의 밝기 값은 Piotto et al.(2002)의 결과를 인용하였다. 이 과정을 거친 후에 색등급도에서 별들의 밝기와 진화 상태를 기준으로 항성 종족 집단을 분류하며, NGC 6934의 관측된 원래 영상자료에서 각 종족 집단을 점광원 함수를 이용하여 선택적으로 제거한다. 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 따른 타원률과 위치각의 변화를 알아본다. 이 결과로부터 ellipse 형태의 반경에 대한 변화를 추정하고, 모든 항성 종족을 포함하는 경우와 각각의 항성 종족이 제거된 경우의 ellipse 맞추기 결과를 비교해 본다. 이 과정을 통하여 구상성단 NGC 6934의 역학적 세부 형태에 대한 항성종족의 역할을 분석한다.

3. 종족 분류와 역학적 세부구조

구상성단 NGC 6934의 종족 분류는 앞서 제 2장에 기술한 바와 같은 전처리 과정을 거쳐 얻은 색등급도(그림 2)를 통해서 이루어지게 된다. 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 않았지만 기존의 다른 연구에서 얻은 색등급도들을 참고해서 종족을 구분하였다(Piotto et al. 2002). 이 연구의 목적이 성단 내 종족들의 밝기에 대한 역학적 구조의 영향을 분석하는데 있으므로 종족의 분류에 대한 특별한 측광학적 조건이 반드시 필요한 것은 아니다.

앞으로의 분석을 위한 기준이 되는 전체 종족을 포함한 NGC 6934의 역학적 구조를 알아보기 위해, 전처리된 V 영상에서 BV 등급 오차를 이용하여 얻은 성단 구성원이 아닌 별들과 색등급도 상에서 우리 시선방향에 있는 별들로 정의한 별들을 먼저 제거한 후, IRAF ellipse 맞추기(Jedrzejewski 1987, Busko 1996)를 실시하였다. 개개의 별들로 분해되는 밝은 별들에 의한 과대한 영향을 없애기 위해 전처리된 원래 영상에 대해 $101 \times 101 \text{ pixel}^2$ 중치 여과(median filtering)를 실시하였다. 이때 중치 여과를 위한 영역이 너무 큰 경우 성단의 원래 형태 정보가 바뀔 수 있으며, 너무 작은 경우

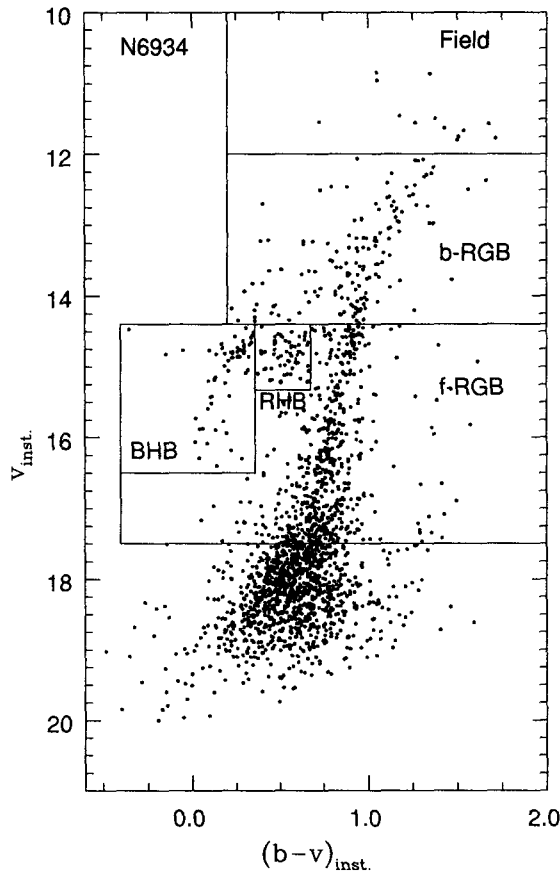


그림 2. NGC 6934의 색등급도와 거성들의 종족 분류. Field 영역과 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB와 같이 4개의 종족을 임의로 분류하였다.

ellipse 맞추기가 불가능한 경우가 생길 수 있다. 따라서 중치 여과를 위한 영역의 크기는 여러 번의 ellipse 맞추기의 실행을 통한 경험적 방법으로 결정하였다. 중치 여과된 NGC 6934의 V 영상에 대해 IRAF ellipse 맞추기 기법을 적용하여 타원률과 위치각의 변화를 측정하였으며, 이때 장축의 증가폭은 5 pixel, ellipse 맞추기의 최대 반경은 NGC 6934의 조석 반경 $r_t = 501.19$ arcsec(Harris 1996)의 1/2되는 지점으로 지정하였다. 한편, 측광 과정에서 제거되지 않는 과다 노출된 별들은 ellipse 맞추기 과정에서 상당한 영향을 주게 되므로 마스크 기법에 의해 제거하였다.

그림 3에 전체 종족을 포함하고 있는 영상에 대한 ellipse 맞추기 결과를 나타내었다. 가로축은 유효반경 r_{eff} 이며 \sqrt{ab} ($a =$ 장반경, $b =$ 단반경)으로 정의되고, 세로축은 각각 타원률($1-b/a$)과 위치각(PA)을 나타낸다. 타원률과 위치각에서 점선으로 표시한 부분은 White & Shawl(1987)에 의해 측정된 평균 타원률(0.01)과 평균 위치각(-37°) 값이다. 두 개의 화살표로 표시한 부분은 각각 반 광도 반경(r_h)과 조석 반경의 1/2지점 ($0.5r_t$)이다. 그림 3에서 타원률의 경우는 중심에서 r_h 에 3배 되는 지

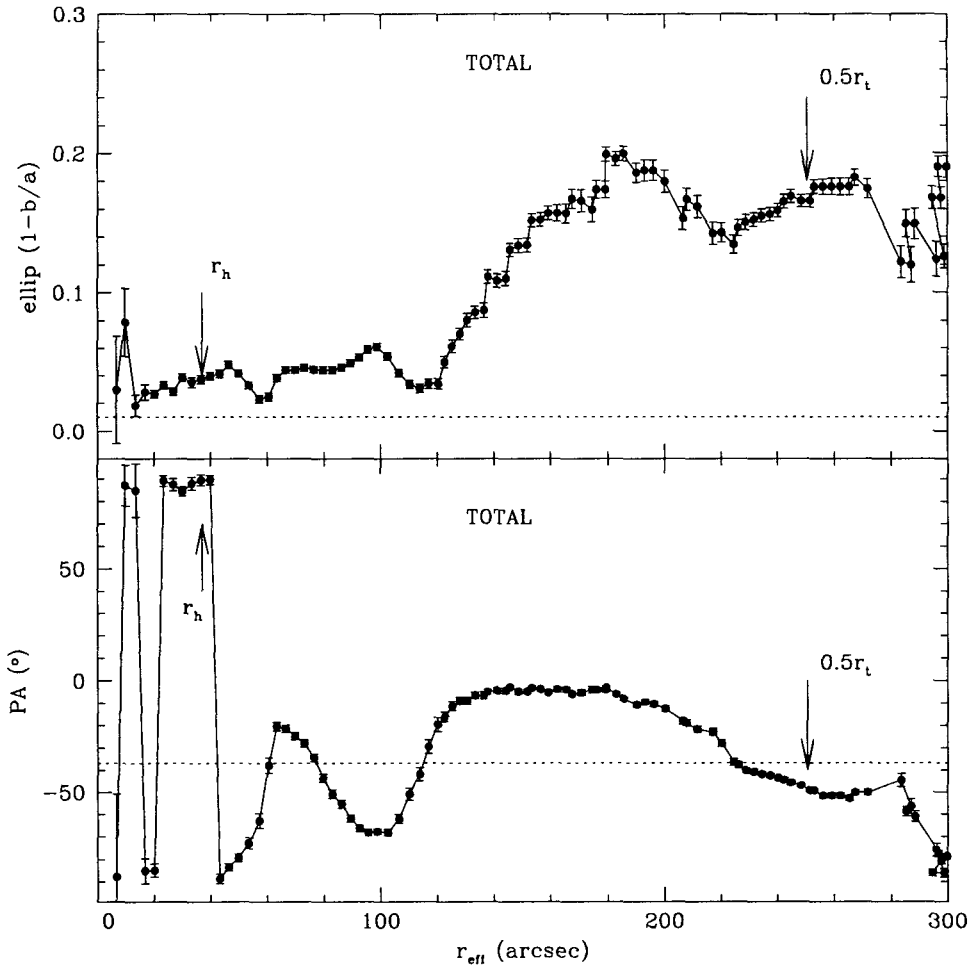


그림 3. NGC 6934의 전체 종족을 포함한 V 영상에 대한 ellipse 맞추기로부터 얻어진 반경에 대한 타원률과 위치각의 변화.

점까지 White & Shawl(1987)에 의해 측정된 평균 타원률 보다 큰 0.02 ~ 0.08까지의 값들을 갖는다. 중심부에서 가장 큰 값인 0.08을 보이다가, $r_{\text{eff}} < r_h$ 지점에서는 0.04 이하의 범위 내에서 반경이 커짐에 따라 약간씩 증가하며, $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 에서는 타원률이 0.05이하 범위에서 비교적 작은 변화를 보인다. 중심부로부터 $0.5r_t$ 지점까지의 전체적인 경향을 보면 타원률은 0.03 ~ 0.18까지 값이 크게 변하게 되는데 특히 r_h 에 3배 정도되는 120 arcsec 지점 이후부터는 타원률 값이 크게 변하여 0.18까지 이르게 됨을 볼 수 있다. 이는 NGC 6934의 북쪽(N) 방향으로 이 지점에 위치하는 매우 밝은 시선 방향 별의 영향이며, 마스크 기법에 의해서 제거를 했지만 워낙 심하게 과다 노출된 아주 밝은 별이 기 때문에 ellipse 맞추기에 상당한 영향을 준 것으로 보인다. 위치각의 경우 성단의 중심에서 r_h 까지 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 로 급격한 변화를 보인다. 반경이 r_h 보다 큰 $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 까지는 중심부처럼 급격한

변화를 보이지 않지만 $-90^\circ \sim -20^\circ$ 의 변화를 보이며, 타원률의 변화와 서로 상관관계가 있음을 볼 수 있다. $3r_h < r_{\text{eff}} < 0.5r_t$ 까지는 전체적으로 $-50^\circ \sim 0^\circ$ 범위 내에서 변화를 보이며 중심부처럼 급격한 변화는 보이지 않지만 위치각도 타원률의 경우처럼 과다 노출된 시선 방향별의 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 과다 노출된 시선 방향의 밝은 별의 영향은 성단 중심부로부터 r_h 에 3배 정도되는 ~ 120 acrsec 지점까지 구상성단 NGC 6934 중심부의 타원률과 위치각의 변화를 확인하는 데에는 크게 문제가 되지는 않는다.

그림 4는 전체 종족을 포함한 NGC 6934의 영상으로부터 앞서 분류한 4개의 종족을 차례대로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시한 결과 나타나는 타원률과 위치각의 변화를 보여준다. 각각의 종족을 순차적으로 제거한 영상으로부터 얻은 타원률과 위치각의 변화는, 시선 방향의 밝은 별의 영향이 없는 ($r_{\text{eff}} < 3r_h$)인 중심부 영역에서 특정 종족에 따르는 타원률과 위치각의 변화가 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, ($r_{\text{eff}} < r_h$)까지의 중심부 영역에 대해 전체 종족을 포함한 경우의 타원률과 위치각의 변화를 나타낸 그림 3과 가장 밝은 종족인 b-RGB를 제거한 경우의 타원률과 위치각의 변화를 나타낸 그림 4(a)를 비교해 보면, 그림 3의 경우 타원률은 $0.02 \sim 0.08$ 까지의 변화를 보이고 위치각은 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 의 큰 변화를 보이던 형태가 그림 4의 b-RGB를 제거했을 경우 타원률은 $0.02 \sim 0.06$ 까지의 변화를 보이며, 위치각의 경우는 크게 변하던 모습이 사라지고 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 까지의 변화를 보이는 것을 볼 수 있었다. 그림 4(b)와 (c)에서는 각각 b-RGB와 RHB를 b-RGB, RHB 그리고 BHB를 제거한 경우인데 여기서는 $r_{\text{eff}} < r_h$ 영역에서 타원률과 위치각의 큰 변화가 나타나지 않고 있다. 또한 마지막 그림 4(d)는 b-RGB, RHB, BHB를 제거한 영상에서 다시 f-RGB를 제거한 경우인데, 이때에는 중심부에서 위치각의 변화가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이런 결과들로 볼 때 NGC 6934의 중심부는 b-RGB에 의해서 타원률과 위치각에 큰 영향이 주어지는 것으로 생각할 수 있으며, 또한 f-RGB의 효과도 있는 것으로 간주할 수 있다. 한편, $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역에서 성단 전체에 대한 RHB, BHB, f-RGB 종족에 의한 타원률과 위치각의 변화가 비교적 작지만 뚜렷이 나타난다.

그림 4(a)와 (d)에서 나타나는 $r_{\text{eff}} < r_h$ 영역과 $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역의 타원률과 위치각의 변화가 각각 완전히 b-RGB 또는 f-RGB에 의한 효과인지, 그리고 RHB, BHB, f-RGB에 의한 효과인지를 한 번 더 확인하기 위해서 앞서 각 종족을 순차적으로 제거한 것과는 달리 전체 종족을 포함하고 있는 영상에서 각 종족을 독립적으로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하였다. 그림 5(a)-(d)는 전체 종족을 포함하고 있는 영상에서 가장 밝은 b-RGB를 제거한 경우, RHB를 제거한 경우, BHB를 제거한 경우, f-RGB를 제거한 경우의 타원률과 위치각의 변화를 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 b-RGB를 제거했을 경우 $r_{\text{eff}} < r_h$ 까지의 중심부에서 전체 종족을 포함했을 때의 타원률과 위치각의 변화(그림 3)에서 보이던 형태들이 사라지는 것을 볼 수 있다. 이런 효과가 b-RGB만의 효과라면 b-RGB를 제거하지 않고 다른 종족들을 제거한 경우에는 b-RGB의 경우에서 사라졌던 전체 종족의 타원률과 위치각의 형태가 다시 나타나야 한다. 그림 5(b),(c) 그리고 (d)에서는 예상한 것처럼 전체 종족을 포함 경우에 나타났던 타원률과 위치각의 변화가 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 구상성단 NGC 6934의 중심부에 타원률과 위치각의 변화는 b-RGB의 효과임을 알 수 있다. 그런데, 그림 4(d)에서 나타났던 f-RGB에 의한 변화가 그림 5(d)에서는 뚜렷이 나타나지 않는데 이는 그림 4(d)의 경우는 각 종족을 순차적으로 제거함으로 인해서 f-RGB보다 밝은 별들에 의한 효과가 제거됨에 따라 f-RGB에 의한 효과가 뚜렷이 나타났던 것이고 그림 5(d)의 경우는 전체 종족을 포함하고 있는 영상에서

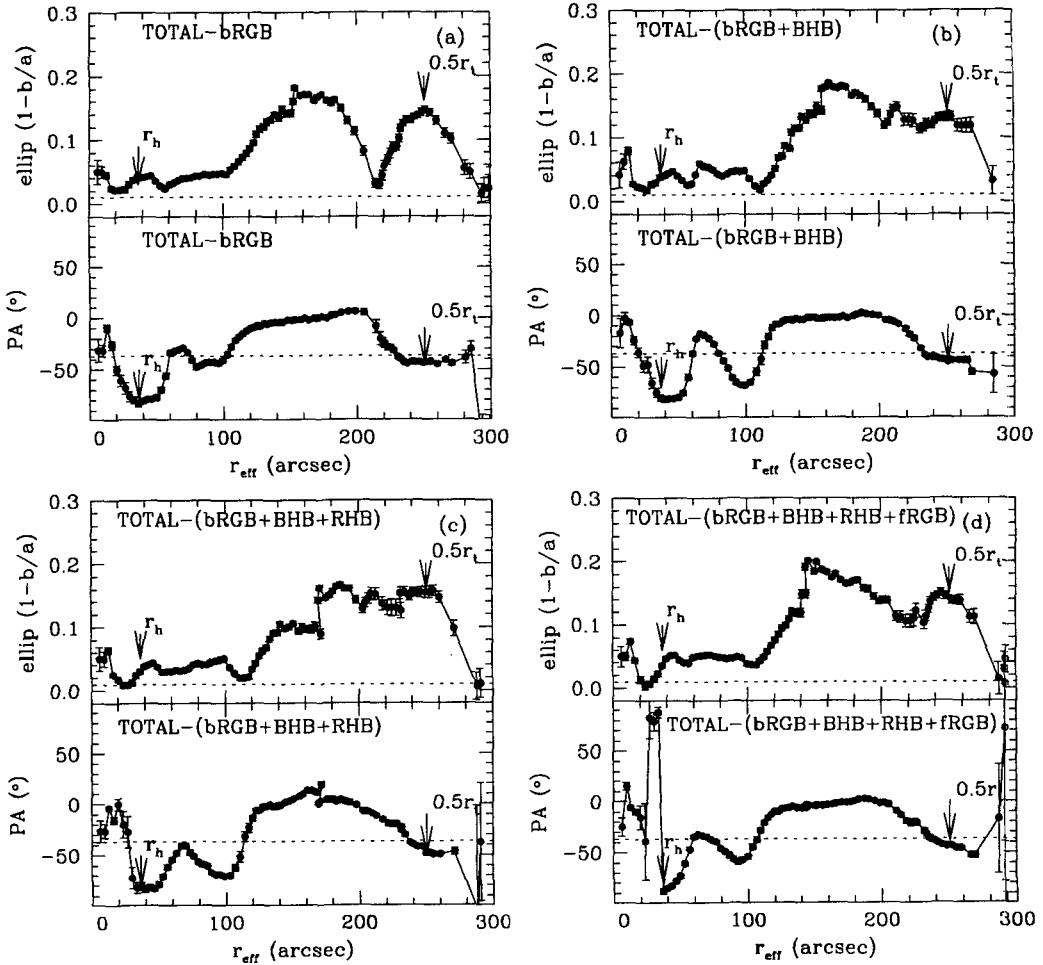


그림 4. NGC 6934 거성 종족들의 순차적인 제거를 통한 타원률과 위치각의 변화. 전체 종족을 포함한 영상으로부터 각 거성종족을 차례대로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하여 얻은 타원률과 위치각의 변화이다. (a) b-RGB를 제거한 경우, (b) b-RGB와 RHB를 제거한 경우, (c) b-RGB, RHB 그리고 BHB를 제거한 경우, (d) b-RGB, RHB, BHB, 그리고 f-RGB를 제거한 경우.

f-RGB만을 제거했기 때문에 f-RGB보다 밝은 종족에 의한 효과에 가려 f-RGB에 의한 효과가 뚜렷이 나타나지 않는 것이다. 한편, $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역에서의 RHB, BHB, f-RGB의 미세한 변화 효과가 나타나지만, 매우 밝은 b-RGB의 영향에 의한 타원률과 위치각의 변화 효과가 뚜렷이 나타나지는 않는다.

이와 같은 각각의 개별 종족 구성의 상대적 차이에 의한 타원률과 위치각의 세부 변화 경향을 알아보기 위해, (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우, (b) b-RGB 종족을 제거한

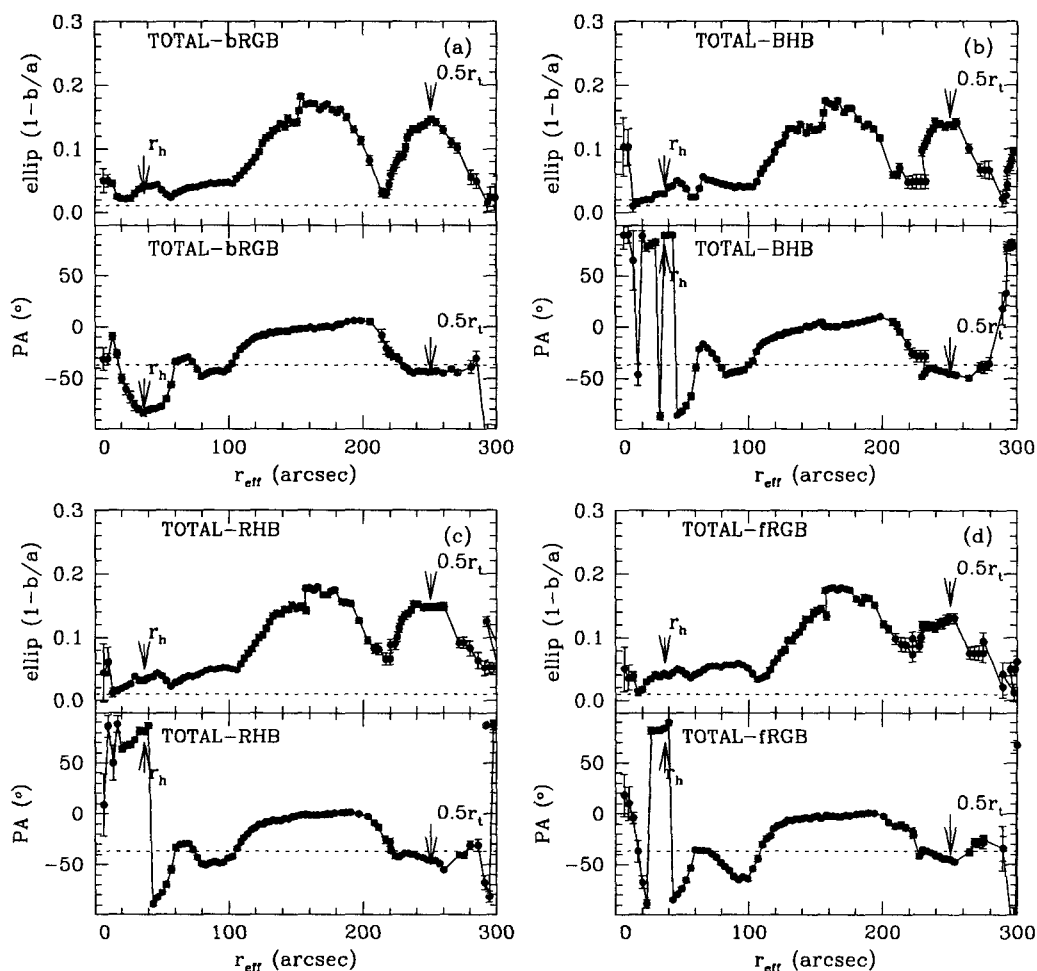


그림 5. NGC 6934 거성 종족들의 독립적인 제거를 통한 타원률과 위치각의 변화. 원래의 영상으로부터 각 거성종족을 독립적으로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하여 얻은 타원률과 위치각의 변화이다. (a) b-RGB를 제거한 경우, (b) RHB를 제거한 경우, (c) BHB를 제거한 경우, 그리고 (d) f-RGB를 제거한 경우.

경우와 b-RGB 및 RHB 종족을 제거한 경우, (c) b-RGB, RHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB종족을 제거한 경우, (d) b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB 종족을 제거한 경우, 각각에 대한 타원률과 위치각의 상대적 차이를 계산하였으며, 그림 6과 그림 7에 각각 타원률과 위치각의 차이를 나타내었다. 이러한 분석은 각 종족이 구상성단 NGC 6934의 중심부 세부구조에 미치는 독립적인 효과를 더욱 명확하게 알아 볼 수 있게 한다. 그림 6에서 $r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역에 대한 타원률의 차이를 보면, b-RGB의 경우 성단 중심부 ($r_{\text{eff}} < r_h$) 타원률의 변화에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, RHB, BHB, f-RGB의 경우 약 $r_{\text{eff}} \sim 60$ arcsec 영역에서 $-0.05 \sim +0.025$ 의 독

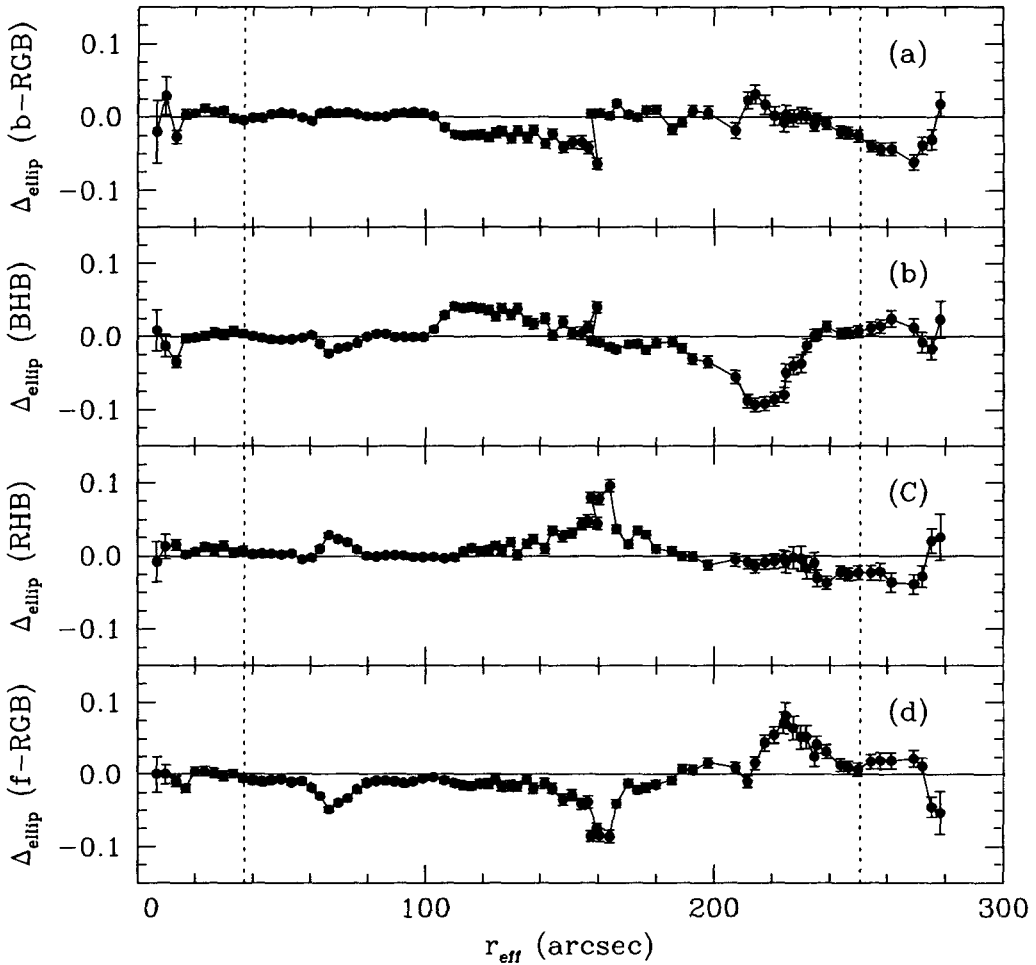


그림 6. NGC 6934의 각 거성 종족에 대한 타원률 변화의 차이. (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 RHB 종족을 제거한 경우, (c) b-RGB, RHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우, (d) b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB 종족을 제거한 경우, 각각에 대한 반경에 따른 타원률의 차이. 왼쪽의 수직 점선은 NGC 6934의 r_h 를, 오른쪽 수직 점선은 $0.5r_t$ 를 나타낸다. 가로축은 유효반경, 세로축은 타원률의 차이를 나타낸다.

립적인 변화를 나타낸다. 위치각 차이의 경우 역시, 그림 7에서 보는 바와 같이 b-RGB 종족에 의한 차이는, $r_{eff} < r_h$ 인 영역에서 b-RGB 종족에 의한 위치각의 차이가 $-100^\circ \sim +200^\circ$ 까지 확연히 나타나며, 또한 그림 4(d)에서는 나타났지만 그림 5(d)에서는 다른 밝은 종족에 의한 영향으로 나타나지 않았던 f-RGB 종족에 의한 성단 중심부의 위치각의 변화도 나타나는 것을 확인할 수 있다. RHB, BHB, f-RGB의 경우 타원률 차이의 변화와 마찬가지로, 약 $r_{eff} \sim 60$ arcsec 영역에서 작은 변화를 보

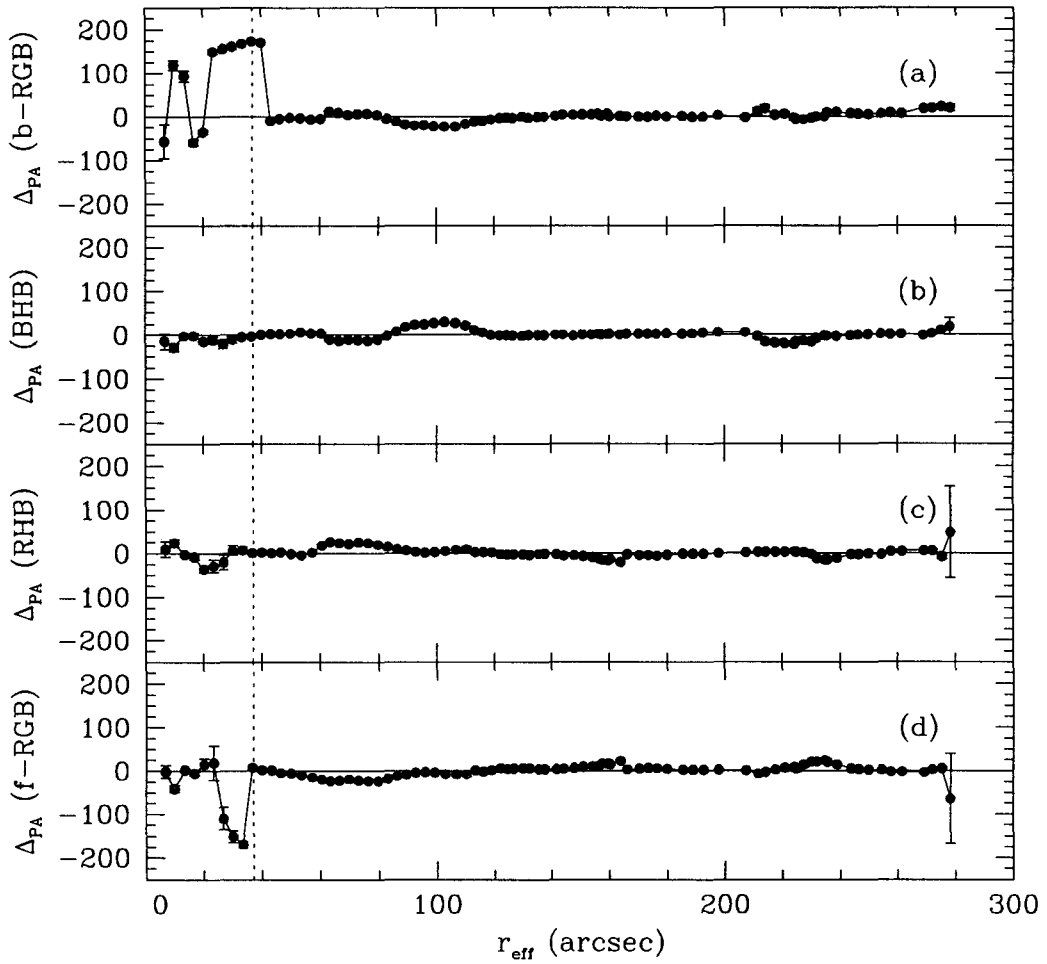


그림 7. NGC 6934의 각 거성 종족에 대한 위치각 변화의 차이. (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 RHB 종족을 제거한 경우, (c) b-RGB, RHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우, (d) b-RGB, RHB, BHB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, RHB, BHB, f-RGB 종족을 제거한 경우, 각각에 대한 반경에 따른 위치각의 차이. 왼쪽의 수직 점선은 NGC 6934의 r_h 를 나타낸다. 가로축은 유효반경, 세로축은 위치각의 차이를 나타낸다.

임을 알 수 있다. 즉, 그림 3의 전체 종족을 포함 경우 $r_{\text{eff}} < 3r_h$ 영역에서의 나타나는 타원들과 위치각의 변화는, 그림 6과 그림 7로부터 중심부에서는 b-RGB 또는 f-RGB, 외곽부에서는 RHB, BHB, f-RGB의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결과 요약 및 논의

구상성단 NGC 6934의 밝은 거성 종족에 의한 성단 중심부의 역학적 세부구조 변화를 알아보기 위해서 NGC 6934의 BV CCD 영상에 대한 점광원 함수 측광을 실시하여 구상성단의 색등급도를 얻은 후, 이를 통해서 가장 밝은 거성 종족(b-RGB), 붉은 수평계열(RHB), 푸른 수평계열(BHB), 어두운 거성 종족(f-RGB) 등의 4개의 거성 종족을 분류하였다. 각 종족에 해당하는 별들을 NGC 6934의 V 영상에서 차례대로 제거한 후, ellipse 맞추기를 실시하여 구상성단 중심으로부터 반경에 따른 타원률과 위치각의 변화를 얻어 각 종족이 중심부의 역학적 세부구조에 미치는 영향을 살펴보았다.

거성 종족을 제거하지 않은 NGC 6934 영상의 타원률과 위치각 변화를 살펴보면, $r_{\text{eff}} < 3r_h$ 인 영역에서 타원률은 0.02 ~ 0.08의 변화를 보이며, 위치각의 경우는 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 범위에서 큰 변화 폭을 가지는 것으로 나타났다. 또한 $r_{\text{eff}} > 3r_h$ 인 영역에서는 과다 노출된 별에 의한 영향으로 NGC 6934 고유의 타원률과 위치각의 변화를 알아보는 힘들었다. $r_{\text{eff}} < r_h$ 인 영역에서 각 거성 종족의 제거에 따른 타원률과 위치각의 변화를 보면, b-RGB를 제거했을 경우 타원률과 위치각의 변화에 큰 차이가 나타나는데, 이는 이 영역에서 가장 밝은 거성들이 성단의 역학적 구조에 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다. 이 영역에서 수평 계열 종족(RHB, BHB)에 의한 타원률의 변화는 밝은 거성 종족에 의한 변화에 비해 비교적 작게 나타났다. 위치각의 경우는 f-RGB에 의한 $0^\circ \sim -200^\circ$ 의 변화를 제외하고는 다른 거성 종족에 의한 변화는 거의 없는 것을 확인 할 수 있었다. $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$ 인 영역에서는 RHB, BHB, f-RGB에 의한 $r_{\text{eff}} \sim 60$ arcsec 근처의 타원률 및 위치각의 변화를 확인할 수 있었다.

구상성단의 형태에 대한 관측적 연구는 성단의 현재 역학적인 상태는 물론, 성단의 생성과 역학적 진화를 연구하는 데 있어서 매우 중요한 도구가 된다. 성단의 찌그러진 형태에 대한 관측적 연구는 성단의 역학적 진화뿐만 아니라, 구상성단 초기의 각 구성별들의 궤도 각운동량, 성단 중심부에서 큰 이탈 속도를 가진 항성에 의한 각운동량 손실, 모 은하의 조석 효과, 가까이 접근하는 큰 질량의 물체에 의한 중력효과들의 연구에 대한 제한조건을 제공한다(Geyer, Hopp, & Nelles 1983). 또한 구상성단의 형태에 영향을 주는 전체 시스템의 회전은 자체 구성원들의 회전과 밀접한 관계가 있으며(Peterson 1983, 1985a,b), 더불어 성단의 각운동량은 거성의 회전에 의한 CN 함량 증가와 성단의 타원률 사이에 상관관계를 갖게 한다는 것이 Norris(1987)에 의해서 연구되기도 하였다. 이와 같이, 성단의 역학적인 구조는 여러 작용에 의해서 복합적인 영향을 받게 되는데, M5의 역학적 세부구조의 연구 결과(이종환과 손영중 2004)에서 성단 중심의 밝은 거성의 분포가 성단의 세부구조에 영향을 준다는 사실이 확인된 것처럼, NGC 6934의 경우도 이번 연구를 통해서 중심부의 밝은 거성 종족들이 역학적 세부구조에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 구상성단 중심부의 타원률 및 위치각의 변화는 일반적인 현상인 것으로 알려져 있으며(Geyer, Hopp, & Nelles 1983), 이 연구를 통하여 항성 종족에 의한 세부구조의 변화를 확인함에 따라 질량 분리 현상과 구상성단의 역학적 구조에 대한 연관성을 확인하였고, 앞으로 계속될 연구를 통해서 이런 현상들이 모든 구상성단내에서의 일반적인 현상인지에 대한 검증도 이루어질 수 있을 것이다.

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

참고문헌

- 이종환, 손영중 2004, 한국우주과학회지, 21, 181
- Busko, I. 1996, in ASPCS vol.101, *Astronomical Data Analysis Software and Systems*, eds. G. H. Jacoby & J. Darnes (San Francisco: ASP), p.139
- Davout, E., & Prugniel, P. 1990, *A&A*, 230, 67
- Djorgovski, S. 1993, in ASPCS vol.50, *Structure and Dynamics of Globular Clusters*, eds. S. Djorgovski & G. Meylan (San Francisco: ASP), p.373
- Fall, S. M., & Frenk, C. S. 1985, in *IAU Symp. 113, Dynamics of Star Clusters*, eds. J. Goodman & P. Hut (Dordrecht: Reidel), p.285
- Geyer, E. H., Hopp, U., & Nelles, B. 1983, *A&A*, 125, 359
- Grindlay, J. E., Bailyn, C., Mathieu, R., & Latham, D. 1988, in *IAU Symp. 126, Globular Cluster Systems in Galaxies*, eds. J. E. Grindlay & A. G. D. Philip (Dordrecht: Kluwer), p.659
- Harris, W. E. 1996, *AJ*, 112, 1487
- Jedrzejewski, R. I. 1987, *MNRAS*, 226, 747
- Lupton, R., Gunn, J. E., & Griffin, R. F. 1985, in *IAU Symp. 113, Dynamics of Star Clusters*, eds. J. Goodman & P. Hut (Dordrecht: Reidel), p.19
- Mayor, M., Benz, W., Imbert, M., Martin, N., Prevot, L., Andersen, J., Nordstrom, B., Ardeberg, A., Lindgren, H., & Maurice, E. 1984, *A&A*, 134, 118
- Meylan, G., & Mayor, M. 1985, in *IAU Symp. 113, Dynamics of Star Clusters*, eds. J. Goodman & P. Hut (Dordrecht: Reidel), p.93
- Meylan, G., & Mayor, M. 1986, *A&A*, 166, 122
- Nemec, J. M., & Harris, H. C. 1987, *ApJ*, 316, 172
- Norris, J. 1987, *ApJ*, 313, 65
- Peterson, R. C. 1983, *ApJ*, 275, 737
- Peterson, R. C. 1985a, *ApJ*, 289, 320
- Peterson, R. C. 1985b, *ApJ*, 294, L35
- Piotto, G., King, I. R., Djorgovski, S., Sosin, C., Zoccali, M., Saviane, I., De Angeli, F., Riello, M., Recio Blanco, A., Rich, R. M., Meylan, G., & Renzini, A. 2002, *A&A*, 391, 945
- Piotto, G., Zoccali, M., King, I. R., Djorgovski, S., Sosin, C., Dorman, B., Rich, R. M., & Meylan, G. 1999, *AJ*, 117, 264
- Pritchett, C., & van den Bergh, S. 1984, *PASP*, 96, 804
- Pryor, C., McClure, R. D., Fletcher, J. M., Hartwick, F. D. A., & Kormendy, J. 1986, *AJ*, 91, 546
- Pryor, C., & Meylan, G. 1993, in ASPCS vol. 50, *Structure and Dynamics of Globular Clusters*, eds. S. Djorgovski & G. Meylan (San Francisco: ASP), p.357
- Schmidt, K.-H. 1996, *Astronomische Nachrichten*, 317, 333
- 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. .995, DAOPHOT II User' Manual (Victoria: Dominion Astrophysical Observatory)

van den Bergh, S. 1983, PASP, 95, 839

van den Bergh, S. 1984, PASP, 96, 329

White, R. E., & Shawl, S. J. 1987, ApJ, 317, 246