

## 우리은하 구상성단들의 역학적 세부구조 III. NGC 7006

이종환<sup>1,2</sup>, 손영종<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>연세대학교 자외선우주망원경연구단

### DYNAMICAL SUBSTRUCTURES OF GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS III. NGC 7006

Jonghwan Rhee<sup>1,2</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: hwany@srl.caltech.edu, sohnyj@yonsei.ac.kr

(Received June 24, 2005; Accepted November 9, 2005)

#### 요 약

구상성단 NGC 7006의 거성종족에 따른 성단 중심부의 역학적 세부구조 변화를 알아보기 위해서 NGC 7006의 BV CCD 영상에 대해 점광원 함수 측광을 실시하여 4개의 거성종족을 분류한 후 각 종족을 차례대로 제거하면서 ellipse 맞추기를 실시하여 성단의 중심으로부터 반경에 따른 타원을 과 위치각의 변화를 얻었다. 타원율과 위치각의 전체적인 변화를 살펴보면,  $r_{\text{eff}} < 3r_h$  영역에서 타원율은 0.02 ~ 0.06의 변화를 보이며 위치각의 경우는  $-10^\circ \sim +90^\circ$ 의 변화를 보인다. 거성종족의 제거에 따른 NGC 7006의 중심부 타원율과 위치각의 변화를 보면,  $r_{\text{eff}} < r_h$ 인 영역에서 밝은 거성종족을 제거했을 경우 타원율과 위치각의 변화가 각각  $-0.05 \sim +0.05$ ,  $-20^\circ \sim +20^\circ$ 로 나타났으며, 수평계열을 제거했을 경우에는 각각  $-0.05 \sim +0.025$ ,  $-25^\circ \sim +20^\circ$ 로 나타나는 것으로부터 중심부에서는 밝은 거성종족과 수평계열에 의한 영향이 가장 크다는 것을 유추할 수 있다. 또한, 어두운 거성종족에 의한 중심부의 타원율과 위치각의 변화도 확인 할 수 있었던 반면 준거성종족에 대해서는 크게 영향을 받지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

#### ABSTRACT

To study the effects of giant population on dynamical substructures of the central region of NGC 7006, we examine the radial variations of ellipticity and position angle on BV stellar photometry using ellipse fitting technique. Total variations of ellipticity and position angle lie in the range 0.02 ~ 0.06 and  $-10^\circ \sim +90^\circ$ , respectively, from the center out to three times the half light radius. Our ellipse fitting results, after removing giant populations, show that the apparent central dynamical substructures of NGC 7006 are mainly affected by red giant, horizontal branch stars. On the contrary, the contribution of light from subgiant stars to the inner dynamical substructure seems to be insignificant.

*Keywords:* globular cluster, NGC 7006, dynamical substructure

<sup>†</sup>corresponding author

## 1. 서론

구상성단의 역학 모형은 생성 초기 조건과 현재의 역학적 상태에서 추정하게 된다. 구상성단 중심부의 이완시간은 약 108yr로서 구상성단의 나이에 비해 짧다(Peterson & King 1975, Webbink 1985, Elson et al. 1987). 따라서 구상성단은 생성이후 지금까지 여러 번의 역학적 진화과정을 거치게 되어 생성 초기의 조건들을 잃게 된다. 즉, 구상성단의 역학적 진화 모형을 위해 필요한 초기 조건들에 대한 정보를 얻기 힘들기 때문에 현재 구상성단의 역학적 상태를 통한 초기 조건에 대한 가정으로 그것을 가장 잘 설명할 수 있는 모형들이 제시되어 왔다(King 1966, Da Costa & Freeman 1976, Gunn & Griffin 1979, Lupton et al. 1987). 지금까지 구상성단의 역학적 구조의 모형에 대한 연구는 관측적으로 구상성단의 역학적 상태를 보여주는 표면 광도분포와 속도 분산분포 등을 통해서 이루어져 왔다. 초기의 King(1966)은 단일 질량, 등방 속도분포를 가정한 모형을 제시 하였으며, King 모형이 맞지 않는 몇몇 구상성단이 발견되어(Illingworth 1976), 뒤를 이어 Da Costa & Freeman(1976)은 다중 질량, 등방 속도분포를 가정한 모형을, 시선속도 자료를 이용한 Gunn & Griffin(1979)은 다중 질량분포와 비등방 속도분포를 가정한 모형에서 속도분산과 광도분포를 통해 M/L비를 구하여 구상성단의 질량함수를 이끌어 내었다. 또한 Binney & Tremaine(1987)는 텐서 비리얼 정리를 이용해서 구형 항성계의 타원율과 회전 속도 대 속도분산 비 ( $v/\sigma$ )의 상관관계를 이끌어 냈으며 주어진 타원율에 대한 다양한 회전속도 대 속도분산 비( $v/\sigma$ )는 비등방 속도분산의 영향으로 설명하고 있다. 계속해서 구상성단의 역학적 모형에 다중 질량분포를 가지며 비등방 속도분산의 영향을 고려한 모형들을 제시하였는데 (Lupton et al. 1985, 1987, Meylan 1987, 1989, Pryor et al. 1986, 1988, 1989) 이를 통해서 구상성단의 모형에 영향을 주는 관측적 인자로 광도분포, 속도분포, 질량분포 등을 고려하게 되었다.

구상성단의 찌그러짐 정도를 나타내는 타원율에 대한 연구는 초기 Pease & Shapley(1917)의 연구 이래로 많은 연구자들에 의해서 진행되었으며 그 결과 구상성단의 찌그러짐은 일반적인 현상이라는 것이 밝혀졌다(Geyer et al. 1983). White & Shawl(1987)은 99개의 우리 은하 구상성단들에 대한 타원율을 조사하여 평균 타원율이  $0.07 \pm 0.01$ 이라는 것을 얻었으며 Staneva et al.(1996)은 M31내 173개의 구상성단의 평균 타원율이  $0.086 \pm 0.038$ 이라는 값을 구해 냈다. 또한 구상성단내의 많은 별들에 대한 시선속도 측정 자료를 통해서 구상성단의 찌그러짐이 회전에 의한 것이며 구상성단의 단반경이 회전축과 거의 일치 한다는 연구 결과들도 있었으며(Meylan & Mayor 1986) 비등방 속도분포나 조석력에 의한 왜곡으로 구상성단의 찌그러짐을 설명하기도 하였다(White & Shawl 1987).

이처럼 성단의 역학적인 구조에 대한 모형과 관측적 사실들을 일치시켜가는 과정에서 여러 요소들이 고려되고 있다. 역학적 모형에서는 다양한 질량분포를 가진 모형을 통해서 좀 더 실제에 가까운 모형을 찾아가며 관측을 통해서 얻어지는 인자들을 반영하고 있다. 즉, M5와 NGC 6934의 역학적 세부구조의 연구 결과(Rhee & Sohn 2004, Rhee et al. 2004)에서 성단 중심의 밝은 거성의 분포가 성단의 세부구조에 영향을 준다는 사실이 확인된 것처럼, 동일한 질량을 가진 별들로 구성된 구상성단의 역학적 모형보다는 다양한 질량의 별을 가진 구상성단 모형이 구상성단의 역학을 설명하는데 있어서 더 잘 맞는다는 것을 간접적으로 유추할 수 있었다. 이 논문의 NGC 7006에 대한 역학적 세부구조 연구는 앞의 결과들의 연장선상에 있는 연구로서 성단 중심부의 밝은 거성들의 분포가 성단의 구조 분석에 얼마나 영향을 미치는 가에 대한 초점이 맞추어져 있으며, 이를 통해서 이런 현

상들이 모든 구상성단내에서의 일반적인 현상인지에 대한 검증은 할 수 있을 것이다.

이 연구의 목적은 구상성단의 역학적 세부구조에 대한 세 번째 결과로서 구상성단 NGC 7006의 영상 자료로부터 성단을 구성하는 별들에 대한 측광을 실시하고, 측광된 별들에 대해 밝기와 색분포에 따라 항성 종족을 구분하며, 이들 종족을 NGC 7006의 영상으로부터 제거하면서 각 항성 종족이 성단의 역학적 세부구조에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보는 것이다. 각 항성 종족의 제거에 따른 성단의 역학적 세부구조 변화는 성단의 중심으로부터 반경에 따른 ellipse 맞추기를 실시하여 타원율(즉,  $1-b/a$ ,  $a$ =장반경,  $b$ =단반경) 및 위치각의 반경에 따른 변화 형태를 분석함으로써 유추한다.

NGC 7006의 은위는  $b = -19.4^\circ$ 로서 같은 시선 방향에 있는 주변별의 영향을 받으며 공간 적색화량은  $E(B-V) = 0.05$ , 평균 타원율은 0.01로 거의 원형에 가까우며, 평균 위치각은 정북 방향으로 부터 시계방향으로  $17^\circ$  기울어져 있다. 거리지수는  $(m-M)_0 = 18.17$ (Buonanno et al. 1991)이며, 중원소 함량은  $[Fe/H] = -1.63$ (Harris 1996)이고 중심 집중도를 나타내는  $c(=\log(r_t/r_c)) = 1.42$ (Trager et al. 1993)이다. 한편, 중심부 밀도는  $\log[\sigma_0/(M_\odot/pc^3)] = 2.908$ , 속도분산  $\sigma = 4.37km/s$ 로 알려져 있다.

## 2. 관측과 자료처리

NGC 7006의 BV CCD영상은 UT 1998년 9월 1일 미국 KPNO 0.9m 망원경을 이용하여 얻었다. 사용한 검출기는 T2KA CCD로서  $2048 \times 2048pixel^2$  크기이다.  $f/7.5$  초점면에서의 영상은 1pixel당 0.68arcsec의 척도를 가지며, 따라서 전체 영상은  $23.5 \times 23.5arcmin^2$ 의 하늘 영역에 해당한다. 검출기의 이득(gain)은 3.6e-/ADU이며, 출력잡음(readout noise)은 1.1ADU/pixel이다. 노출시간은 B 파장에서는 360초, V 파장영역에서는 240초이며, 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 7006의 V 영상을 나타내었다. NGC 7006에 대한 관측된 BV CCD영상의 시상은 약 1.9arcsec였다. 관측 기간 중 측광 표준화에 대한 결과는 Sohn et al.(1999)에 정리되어있다. 이 연구에서는 성단의 표면 측광에 의한 역학적 세부구조 분석이 목적이므로 측광 결과의 표준화는 시도하지 않았다.

구상성단 NGC 7006의 반경에 따른 타원율과 위치각의 변화를 알아보기 위해 먼저, 성단의 항성 종족을 구분하기 위한 점광원 함수 측광(PSF photometry)을 실시하고 분류한 항성 종족에 따른 타원율과 위치각의 변화를 분석하는 ellipse 표면 측광과정을 실시하게 된다. 이를 위해 NGC 7006의 BV CCD영상에 DAOPHOT II / ALLSTAR(Stetson 1987, 1995)를 적용하여 성단 내 밝은 별들의 점광원 함수 측광을 실시하여 별들의 기계 등급과 색지수를 결정하며, 이를 통해서 측광된 구성 별들에 대한 색등급도를 완성한다. NGC 7006은 은위가 낮기 때문에 성단의 영상에는 성단의 구성 별들이 아닌 별들이 상당히 많이 존재하게 된다. 따라서 구성하는 별들에 대한 측광으로부터 색등급도를 완성하는 과정에서 성단의 구성 별들이 아닌 별들을 제거하고 성단의 구성 별들만을 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

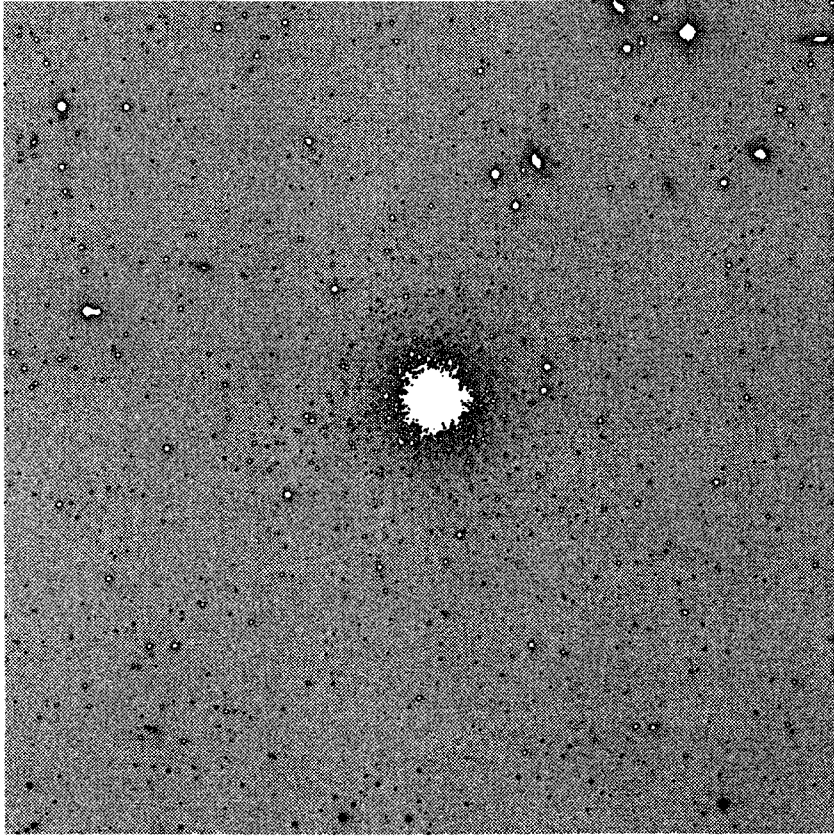


그림 1. 전처리 과정이 끝난 NGC 7006의 V 영상. 전체 영상은  $23.5 \times 23.5$  arcmin<sup>2</sup>의 하늘 영역에 해당하며 노출시간은 240초이다.

구성원이 아닌 별들을 통계적으로 제거했지만 색등급도 상에서 보면 NGC 7006의 거성단계 끝의 별들보다 밝기가 밝은 별들이 존재한다. 이런 별들도 NGC 7006의 구성원이 아닌 것으로 간주하여 종족 구분에 앞서 따로 분류하였다. NGC 7006의 거성단계 끝에 있는 별들의 밝기 값은 Buonanno et al.(1991)의 결과를 인용하였다. 이 과정을 거친 후에 색등급도에서 별들의 밝기와 진화 상태를 기준으로 항성 종족 집단을 분류하며, NGC 7006의 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 타원율과 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 7006의 역학적 세부 형태에 대한 항성종족의 역할을 분석한다.

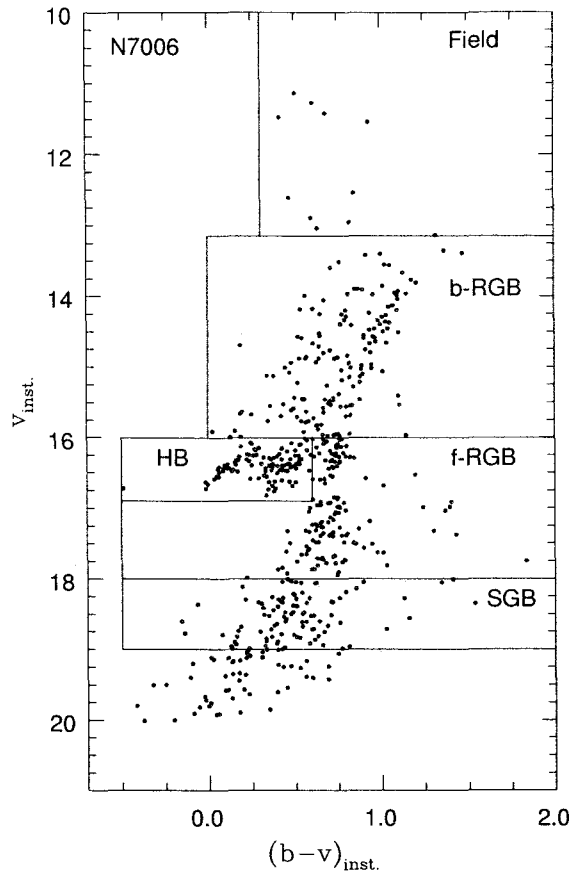


그림 2. NGC 7006의 색등급도와 항성 종족 분류. Field 영역과 b-RGB, HB, f-RGB, SGB와 같이 4개의 종족을 임의로 분류하였다.

### 3. 종족 분류와 역학적 세부구조

구상성단 NGC 7006의 항성 종족 분류는 앞서 기술한 바와 같은 전처리 과정을 거쳐 얻은 색 등급도(그림 2)를 통해서 이루어지게 된다. 성단 내 거성들의 밝기와 색분포에 대해 그림 2에서 b-RGB(밝은 거성종족), HB(수평계열), f-RGB(어두운 거성종족), SGB(준거성종족)와 같이 4개의 종족을 등급과 색지수에 따라 임의로 분류하였다. b-RGB와 f-RGB의 경계를 구분하는데 있어 특별한 조건은 주지 않았으며, NGC 7006의 수평계열은 상당히 붉은 쪽으로 치우쳐 있다는 것이 알려져 있어서(Buonanno et al. 1991) 앞서 진행했던 M5와 NGC 6934의 경우(Rhee & Sohn 2004, Rhee et al. 2004)와 달리 수평계열을 푸른 수평계열(BHB)과 붉은 수평계열(RHB)로 분류하지 않았다. SGB 종족의 경우는 V 등급 오차가 0.1 이하 되는 지점까지로 정하여 분류하였다. 이 연구의 목적이 성단 내 종족들의 밝기에 대한 역학적 구조의 영향을 분석하는데 있으므로 종족의 분류에 대한 특별한 측광학적 조건을 부여하지 않았다.

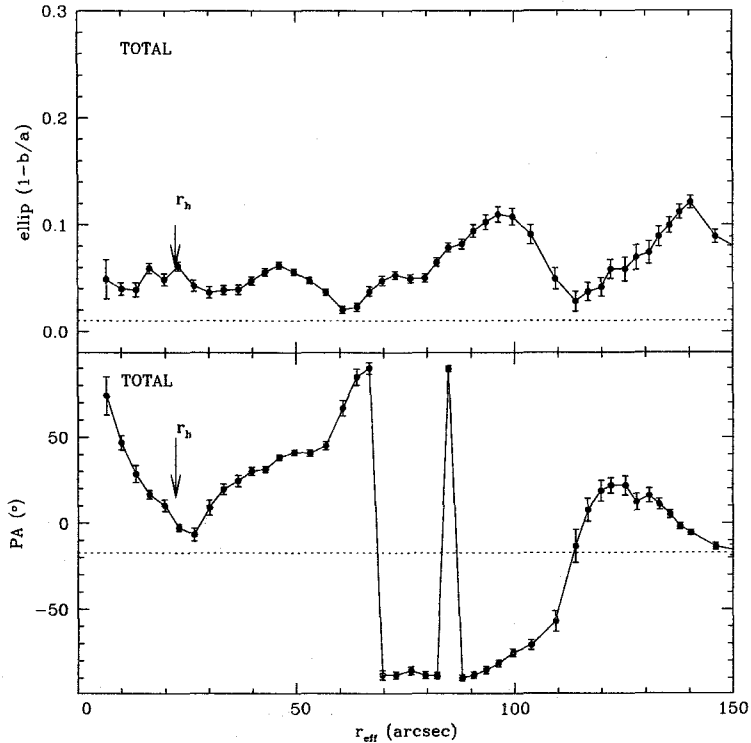


그림 3. NGC 7006의 전체 종축을 포함한 V 영상에 대한 ellipse 맞추기로부터 얻어진 반경에 대한 타원율과 위치각의 변화.

앞으로의 분석을 위한 기준이 되는 전체 종축을 포함한 NGC 7006의 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(Busko 1996, Jedrzejewski 1987)를 실시하였다. 개개의 별들로 분해되는 밝은 별들에 의한 과도한 영향을 없애기 위해 전처리된 원래 영상에 대해  $41 \times 41 \text{pixel}^2$  중치 여과를 실시하였다. 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 NGC 7006의 V 영상에 대해 IRAF ellipse 맞추기 기법을 적용하여 타원율과 위치각의 변화를 측정하였으며, 이때 장축의 증가폭은 5 pixel, ellipse 맞추기의 최대 반경은 NGC 7006의 조석 반경  $r_t = 380.19 \text{arcsec}$ (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 종축을 포함하고 있는 영상에 대한 ellipse 맞추기 결과를 나타내었다. 가로축은 유효 반경  $r_{\text{eff}}$ 이며  $\sqrt{ab}$ ( $a$ =장반경,  $b$ =단반경)으로 정의되고, 세로축은 각각 타원율( $1-b/a$ )과 위치각(PA)을 나타낸다. 타원율과 위치각에서 점선으로 표시한 부분은 White & Shawl(1987)에 의해 측정된 평

균 타원율(0.01)과 평균 위치각( $-17^\circ$ ) 값이다. 화살표로 표시한 부분은 각각 반 광도 반경( $r_h$ )이다. 그림 3에서 보면 타원율의 경우는 중심에서  $3r_h$ 까지 White & Shawl(1987)에 의해 측정된 평균 타원율을 보다 큰 0.02 ~ 0.06까지의 값들을 가지며 반경에 따라 증가하거나 감소하는 것이 아니라 0.04 값을 중심으로  $\pm 0.02$ 의 작은 변화폭으로 증감을 반복하는 것을 알 수 있다. 영역  $r_{\text{eff}} > 3r_h$ 에서도 전체적으로 뚜렷하게 증가하거나 감소하는 경향을 보이지는 않으며 0.02 ~ 0.12 사이에서 증가와 감소를 반복하는 것을 확인 할 수 있다. 이 영역에서 타원율의 변화폭이  $r_{\text{eff}} < 3r_h$  영역의 타원율 변화폭 보다 큰 것으로 나타나는데 이는 NGC 7006의 영상을 보면  $3r_h$  근처에서 NGC 7006의 밀도가 낮아지기 시작하기 때문에 이 영역에서의 타원율의 변화폭이 큰 것으로 해석할 수 있다. 위치각의 경우는 중심으로부터  $r_h$ 까지  $+75^\circ \sim -10^\circ$ 로 급격히 감소하다가  $r_h$ 부터  $3r_h$ 까지  $-10^\circ \sim +90^\circ$ 까지 다시 증가하는 양상을 보인다. 영역  $r_{\text{eff}} > 3r_h$ 에서는  $+90^\circ \sim -90^\circ$ 로 급격한 변화를 보이다가 서서히 증가하여  $0.5r_t$  부근에서 White & Shawl(1987)에 의해 측정된 위치각 값에 이르는 것을 알 수 있다. 위치각에서도  $r_{\text{eff}}$ 가  $3r_h$ 를 지나면서 급격한 변화를 보이기 시작하는데 이는 이 지점에서 나타난 타원율의 변화와 마찬가지로 NGC 7006를 구성하고 있는 항성들의 밀도가 크게 떨어지기 시작하는 지점이  $r_{\text{eff}} \sim 3r_h$ 이기 때문이다.

그림 4는 전체 종족을 포함한 NGC 7006의 영상에서 앞서 분류한 4개의 종족을 차례대로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시한 결과 나타나는 타원율과 위치각의 변화를 보여주는 그래프이다. 각 종족을 순차적으로 제거한 영상으로부터 얻은 타원율과 위치각의 변화는  $r_{\text{eff}} < r_h$  인 중심부 영역에서 종족에 따른 변화를 보이는 것으로 나타난다. 즉,  $r_{\text{eff}} < r_h$ 까지의 중심부 영역에 대해 전체 종족을 포함한 경우의 타원율과 위치각의 변화를 나타낸 그림 3과 가장 밝은 종족인 b-RGB를 제거한 경우의 타원율과 위치각의 변화를 나타낸 그림 4a를 비교해 보면,  $r_{\text{eff}} < r_h$ 인 영역에서 그림 3의 경우 타원율은 0.03 ~ 0.06까지의 변화를 보이고 위치각은  $+75^\circ \sim -10^\circ$ 의 변화를 보이던 형태가 그림 4a의 b-RGB를 제거했을 경우 타원율은 중심에서 White & Shawl(1987)의 평균 타원율을 가지며 반경이 커짐에 따라서 0.01 ~ 0.06까지의 변화를 보이며, 위치각의 경우는 중심부의  $+75^\circ \sim -10^\circ$ 의 변화가  $+60^\circ \sim 0^\circ$ 로 변한 것을 볼 수 있었다. 또한,  $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$  영역에서는 전체 종족을 포함한 그림 3의 경우와 비교해 볼 때 타원율은 큰 변화를 보이지 않지만 위치각의 경우는 약간의 변화를 보이는 것을 알 수 있으며  $r_{\text{eff}} > 3r_h$ 인 영역에서는 그림 3과 같은 형태의 변화를 보여주고 있다. 그림 4b에서는 b-RGB와 HB를 제거한 경우인데 그림 4a의 b-RGB만을 제거한 경우와 비교해 보면 HB를 제거함에 따라  $r_{\text{eff}} < r_h$  영역에서 타원율과 위치각의 변화가 나타나며  $r_{\text{eff}} > r_h$  영역에서의 반경에 따른 타원율의 변화 형태는 크게 차이가 없지만 위치각은 약간의 변화를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 그림 4c는 그림 4b의 b-RGB와 HB를 제거한 영상에서 f-RGB를 추가로 제거한 경우로서 f-RGB를 제거함에 따라  $r_{\text{eff}} < r_h$  영역에서 타원율과 위치각의 변화가 있으며,  $r_h < r_{\text{eff}} < 3r_h$  영역에서는 타원율과 위치각의 큰 변화는 없지만 약간의 변화가 존재하는 것으로 보인다.  $r_{\text{eff}} > 3r_h$  영역에서는 타원율과 위치각의 변화 형태가 크게 달라지지 않았다. 마지막의 그림 4d는 b-RGB, HB, f-RGB와 SGB를 제거한 경우인데, 그림 4c의 타원율 및 위치각 변화와 크게 다르지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 4의 결과들을 종합해보면 NGC 7006의 중심부  $r_{\text{eff}} < r_h$  영역은 b-RGB, HB, f-RGB에 의해서 타원율의 변화에 영향을 받으며, 위치각의 경우는 약간의 변화가 생기지만 두드러진 변화는 아닌 것으로 볼 때 b-RGB, HB, f-RGB의 영향이 그다지 크지는 않다는 것을 알 수 있다. SGB 종족을 제

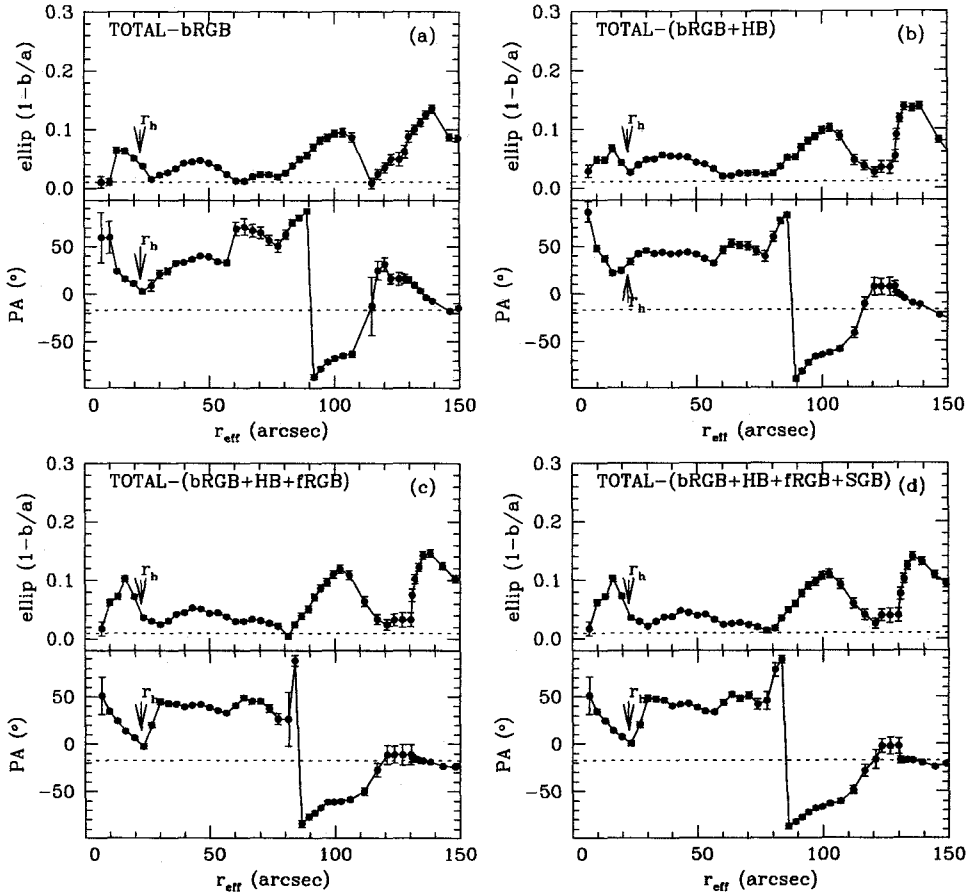


그림 4. NGC 7006 거성종족들의 순차적인 제거를 통한 타원율과 위치각의 변화. 전체 종족을 포함한 영상으로부터 각 거성종족을 차례대로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하여 얻은 타원율과 위치각의 변화이다. (a) b-RGB를 제거한 경우, (b) b-RGB와 HB를 제거한 경우, (c) b-RGB, HB 그리고 f-RGB를 제거한 경우, (d) b-RGB, HB, f-RGB, 그리고 SGB를 제거한 경우.

거 했을 경우는 NGC 7006의 전체 타원율과 위치각의 변화에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 영역  $r_h < r_{eff} < 3r_h$ 에서는 모든 종족의 제거에 따른 변화가 없는 것으로 나타났다. 영역  $r_{eff} > 3r_h$ 에서는 항성 종족 제거에 따른 반경에 타원율과 위치각의 변화 형태는 같은 것으로 나타나지만 변화 폭이 작지만 다르게 나타나는데 이는 NGC 7006의 V 영상에서 구상성단을 구성하는 항성의 밀도가  $r_{eff} < 3r_h$  영역에 비해서 상대적으로 크게 낮은 바깥쪽 영역이기 때문에 ellipse 맞추기 과정에서 변화가 심하게 되는 것과 이 영역에 있는 마스크 기법에 의해 완벽하게 제거 되지 않은, 과도하게 노출된 별들의 영향으로 타원율과 위치각의 변화폭에 큰 변화가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

항성 종족이 NGC 7006의 중심부 타원율과 위치각의 변화에 기여하는 정도를 확인해 보기 위해서 우선 NGC 7006의 전체 종족을 포함한 영상에서 각 항성 종족을 독립적으로 제거한 후 ellipse 맞



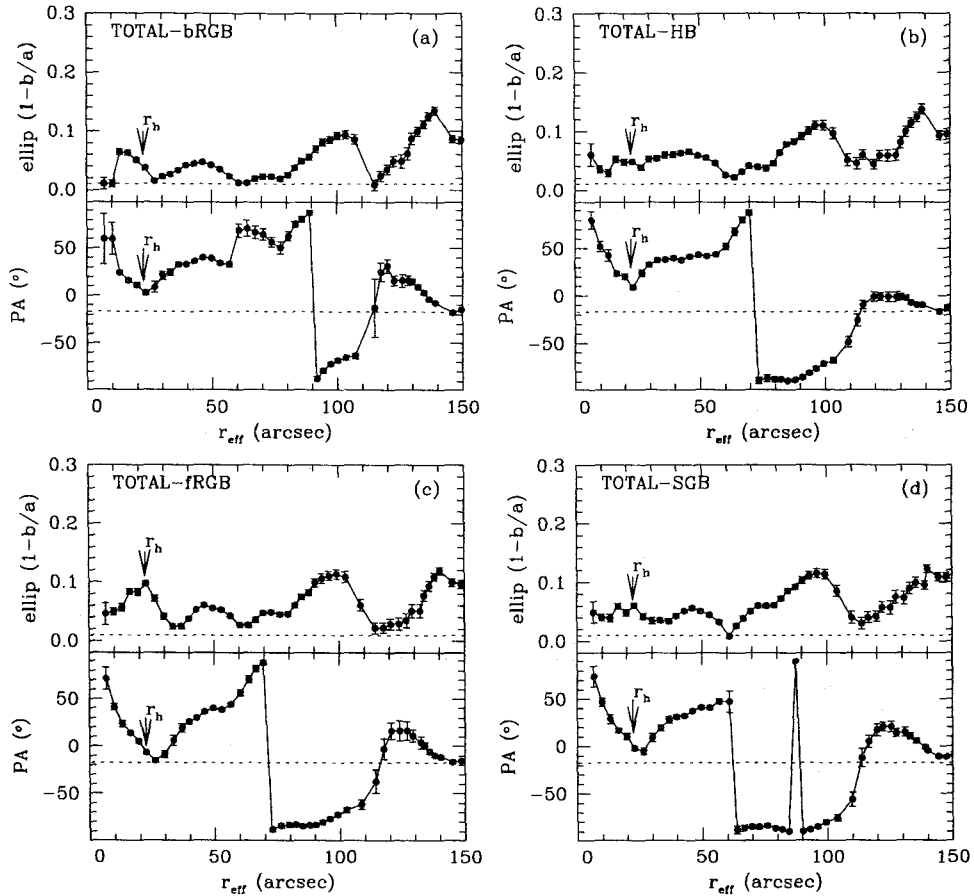


그림 5. NGC 7006 거성종족들의 독립적인 제거를 통한 타원율과 위치각의 변화. 원래의 영상으로부터 거성종족을 독립적으로 제거한 후 ellipse 맞추기를 실시하여 얻은 타원율과 위치각의 변화이다. (a) b-RGB를 제거한 경우, (b) HB를 제거한 경우, (c) f-RGB를 제거한 경우, 그리고 (d) SGB를 제거한 경우.

추기를 실시하여 반경에 따른 타원율과 위치각의 변화를 살펴보았다. 그림 5a-d는 전체 종족을 포함하고 있는 영상에서 나타나는  $r_{\text{eff}} < r_h$ 까지의 중심부 영역의 타원율과 위치각의 변화에 가장 밝은 b-RGB를 제거한 경우, HB를 제거한 경우, f-RGB를 제거한 경우와 SGB를 제거한 경우의 반경에 따른 타원율과 위치각의 변화를 나타내고 있다. 그림 5a에서 b-RGB를 제거했을 경우,  $r_{\text{eff}} < r_h$ 까지의 중심부에서 전체 종족을 포함했을 때의 타원율과 위치각의 변화(그림 3)에서 보이던 형태들이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이런 변화가 b-RGB만의 효과라면 b-RGB를 제거하지 않고 다른 종족들을 제거한 경우에는 b-RGB의 경우에서 사라졌던 전체 종족의 타원율과 위치각의 형태가 다시 나타나야 한다. 그림 5b,c 그리고 그림 5d를 보면 전체 종족을 포함 경우의 타원율과 위치각의 변화 형태가 다시 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 구상성단 NGC 7006의 중심부에서 나타나는 타원율과 위치각의 변화는 b-RGB의 효과에 의해 크게 영향을 받는 것임을 알 수 있다. 그런데 그림 4b,c에서 나타

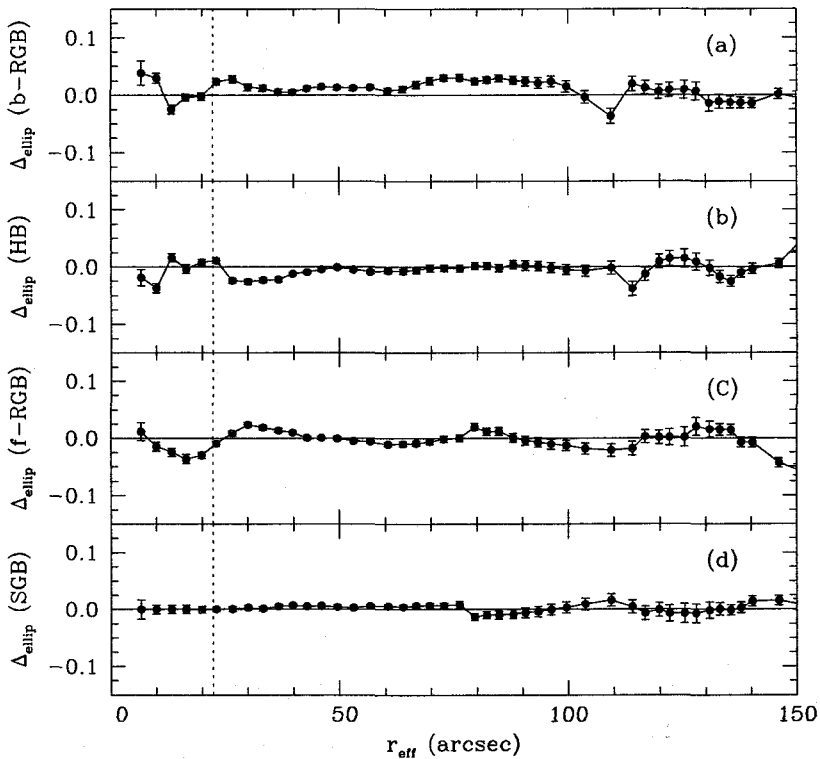


그림 6. NGC 7006의 각 거성종족에 대한 타원을 변화의 차이. (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 HB 종족을 제거한 경우, (c) b-RGB, HB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, HB, f-RGB종족을 제거한 경우, (d) b-RGB, HB, f-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, HB, f-RGB, SGB 종족을 제거한 경우, 각각에 대한 반경에 따른 타원율의 차이. 왼쪽의 수직 점선은 NGC 7006의  $r_h$ 를 나타낸다. 가로축은 유효반경, 세로축은 타원율의 차이를 나타낸다.

났던 HB와 f-RGB의 타원율과 위치각의 변화가 그림 5에서는 뚜렷하게 나타나지 않고 있는데 그림 5는 전체 항성 종족을 포함한 영상에서 각각의 거성종족을 독립적으로 제거하여 타원율과 위치각의 변화를 나타낸 것이므로 HB, f-RGB와 SGB 각각에 의해 구상성단 NGC 7006의 타원율과 위치각의 변화에 미치는 독립적인 효과가 가장 밝은 항성 종족인 b-RGB에 의해 가려지게 되어서 확연하게 나타나지 않는 것으로 해석할 수 있다.

이와 같은 각각의 개별 종족 구성의 상대적 차이에 의한 타원율과 위치각의 세부 변화 경향을 알아보기 위해, (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 HB 종족을 제거한 경우, (c) b-RGB, HB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, HB, f-RGB 종족을 제거한 경우, (d) b-RGB, HB, f-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, HB, f-RGB, SGB 종족을 제거한 경우, 각각에 대한 타원율과 위치각의 상대적 차이를 계산하였으며, 그림 6과 그림 7에 각각 타원율과 위치각의 차이를 나타내었다. 이러한 분석은 각 종족이 구상성단 NGC 7006의 중심부 세부구조에 미치는 독립적인 효과를 더욱 명확하게 알아 볼 수 있게 한다.

그림 6에서  $r_{\text{eff}} < 3r_h$  영역에 대한 타원율의 차이를 보면, b-RGB의 경우  $+0.05 \sim -0.05$ 로 성단 중심부( $r_{\text{eff}} < r_h$ ) 타원율의 변화에 상대적으로 가장 큰 영향을 미치고 있으며, HB, f-RGB의 경우 둘다  $+0.025 \sim -0.05$ 의 독립적인 변화를 나타낸다. SGB에 의한 성단 중심부의 타원율의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 반경이  $3r_h$ 가 되는 지점을 지나서 약  $r_{\text{eff}} \sim 100\text{arcsec}$  이후부터 b-RGB, HB, f-RGB와 SGB에 의한 영향이 나타나는 것으로 보이는데 이는 성단의 밀도가 현저히 떨어지는 성단 외곽부이기 때문에 ellipse 맞추기 과정에서 나타나는 변화폭이 크기 때문으로 볼 수 있다. 위치각 차이의 경우는 그림 7에서 보는 바와 같이 성단 중심부( $r_{\text{eff}} < r_h$ )에서 거성종족의 차이에 따른 변화가 b-RGB의 경우 약  $+20^\circ \sim -20^\circ$ , HB의 경우  $+20^\circ \sim -25^\circ$ , f-RGB의 경우  $+30^\circ \sim 0^\circ$ , SGB의 경우 약  $0^\circ$ 로서 거성종족의 차이에 따른 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 그러나  $r_{\text{eff}} > 3r_h$ 인 영역에서 타원율의 경우와 마찬가지로 위치각의 변화폭이 크게 나타나는 것이 보이는데 이는 앞서 설명한 것처럼 성단의 밀도가 현저히 떨어지는 외곽부까지 ellipse 맞추기를 실시하여 발생하는 현상으로 설명할 수 있다. 그림 6과 그림 7로부터 구상성단 NGC 7006의 중심부  $r_{\text{eff}} < r_h$  영역은 b-RGB, HB, f-RGB에 의해서 역학적 세부구조에 변화가 있음을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결과 요약 및 논의

구상성단 NGC 7006의 항성 종족에 따른 성단 중심부의 역학적 세부구조 변화를 알아보기 위해서 NGC 7006의 BV CCD 영상에 대해 점광원 함수 측광을 실시하여 NGC 7006의 색등급도를 얻은 후, 가장 밝은 거성종족(b-RGB), 수평계열(HB), 어두운 거성종족(f-RGB), 준거성종족(SGB) 등 4개의 거성종족을 분류하였다. 분류한 각 종족에 해당하는 별들을 NGC 7006의 V 영상에서 차례대로 제거한 후, ellipse 맞추기를 실시하여 성단의 중심으로부터 반경에 따른 타원율과 위치각의 변화를 조사하여 각 항성 종족이 NGC 7006의 중심부 역학적 세부구조에 미치는 영향을 살펴보았다.

분류한 항성 종족을 제거하지 않은 원래 NGC 7006 영상에 대해 반경에 따른 타원율과 위치각의 변화를 보면,  $r_{\text{eff}} < 3r_h$  영역에서 타원율은  $0.02 \sim 0.06$ 의 변화를 보이며 위치각의 경우는 중심으로 부터  $r_h$ 까지  $+75^\circ$ 에서  $-10^\circ$ 로 급격히 감소하다가  $r_h$ 부터  $3r_h$ 까지  $-10^\circ$ 에서  $+90^\circ$ 까지 다시 증가하는 양상을 보인다.  $r_{\text{eff}}$ 가  $3r_h$ 를 지나면서는 타원율과 위치각의 변화폭이 크게 나타나는데 이는 이 지점부터 NGC 7006를 구성하고 있는 항성들의 밀도가 크게 떨어지기 시작하기 때문이다. 항성 종족의 제거에 따른 NGC 7006의 중심부 타원율과 위치각의 변화를 보면,  $r_{\text{eff}} < r_h$ 인 영역에서 b-RGB를 제거했을 경우 타원율과 위치각의 변화가 각각  $-0.05 \sim +0.05$ ,  $-20^\circ \sim +20^\circ$ 로 나타났으며, HB를 제거했을 경우에는 각각  $-0.05 \sim +0.025$ ,  $-25^\circ \sim +20^\circ$ 로 나타나는 것으로부터 중심부에서는 b-RGB와 HB에 의한 영향이 가장 크다는 것을 유추할 수 있다. 또한 f-RGB에 의한 중심부의 타원율과 위치각의 변화도 확인 할 수 있었던 반면 SGB에 의해서는 크게 영향을 받지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 종합해 보면, NGC 7006의 중심부  $r_{\text{eff}} < r_h$  영역은 b-RGB, HB, f-RGB에 의해서 역학적 세부구조에 변화가 있음을 알 수 있다.

구상성단에서 거성들은 상대적으로 개수는 적지만 전체 광량의 대부분을 차지하며, 상대적으로 많지만 작은 질량의 별들은 중력장에 큰 영향을 미친다. 따라서 구상성단의 역학적 구조에 대한 관측적 접근을 시도할 때 밝은 거성들에 의한 영향을 고려해야 한다. 거성들이 수평계열보다 중심에 더 밀집되어 분포하고 있다는 연구는(Oort & van Herk 1959, Woolf 1964, Richer & Fahlman 1989,

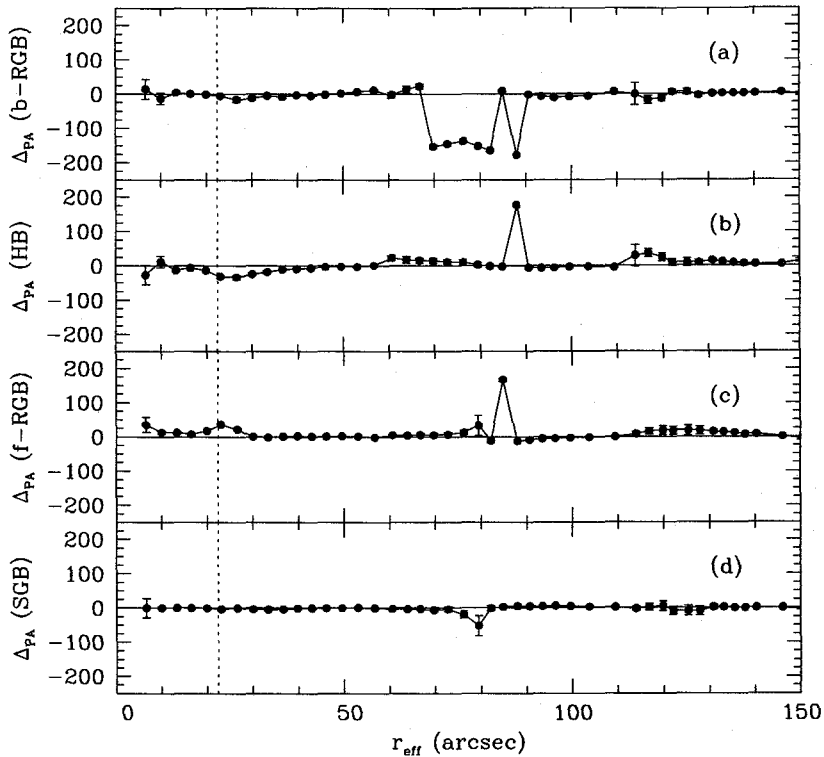


그림 7. NGC 7006의 각 거성종족에 대한 위치각 변화의 차이. (a) 전 종족을 포함하는 경우와 b-RGB 종족을 제거한 경우, (b) b-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB 및 HB 종족을 제거한 경우, (c) b-RGB, HB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, HB, f-RGB 종족을 제거한 경우, (d) b-RGB, HB, f-RGB 종족을 제거한 경우와 b-RGB, HB, f-RGB, SGB 종족을 제거한 경우, 각각에 대한 반경에 따른 위치각의 차이. 왼쪽의 수직 점선은 NGC 7006의  $r_h$ 를 나타낸다. 가로축은 유효반경, 세로축은 위치각의 차이를 나타낸다.

Drukier et al. 1993, Paresce et al. 1995, King et al. 1995) 거성단계 이후에 질량을 잃으면서 수평계열로 접어든 수평계열성들이 새로운 질량에 의한 역학적 이완이 진행되어 일어나는 것으로 해석할 수 있다. 이는 또한 구상성단의 역학적 진화 과정에서 일어나는 질량 분리현상을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다. 이처럼 구상성단의 역학적 연구에 있어서 밝은 거성종족은 무시할 수 없는 요소가 되며 이에 따라 구상성단의 특성이 달라질 수 있다. 이는 앞서 M5와 NGC 6934의 역학적 세부구조 연구 결과(Rhee & Sohn 2004, Rhee et al. 2004)에서 밝은 거성종족들이 중심부의 역학적 세부구조에 영향을 준다는 사실이 확인된 것처럼 NGC 7006의 경우에도 중심부 역학적 세부구조에 밝은 거성, 수평계열 및 어두운 거성종족들이 큰 영향을 주고 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서, 이 연구는 구상성단의 거성종족이 역학적 구조 연구에 미치는 영향의 연구를 통해서 전체 구상성단의 역학적 구조 연구에 있어서 거성종족의 영향을 검증하는 표본으로 삼을 수 있다는 의미를 갖는다.

**감사의 글:** 이 논문은 과학기술부 창의적 연구진흥 사업의 지원으로 이루어 졌습니다.

## 참고문헌

- Binney, J. & Tremaine, S. 1987, *Galactic Dynamics* (New Jersey: Princeton University Press), pp.211-221
- Buonanno, R., Pecci, F. F., Capellaro, E., Ortolani, S., Richtler, T., & Geyer, E. H. 1991, *AJ*, 102, 1005
- Busko, I. 1996, in *ASPCS vol.101, Astronomical Data Analysis Software and Systems*, eds. G. H. Jacoby & J. Darnes (San Fransisco: ASP), p.139
- Da Costa, G. S. & Freeman, K. C. 1976, *ApJ*, 206, 128
- Drukier, G. A., Fahlman, G. G., Richer, H. B., Searle, L., & Thompson, I. 1993, *AJ*, 106, 2335
- Elson, R., Hut, P., & Inagaki, S. 1987, *ARA&A*, 25, 565
- Geyer, E. H., Hopp, U., & Nelles, B. 1983, *A&A*, 125, 359
- Gunn, J. E. & Griffin, R. F. 1979, *AJ*, 84, 752
- Harris, W. E. 1996, *AJ*, 112, 1487
- Illingworth, G. D. 1976, *ApJ*, 204, 73
- Jedrzejewski, R. I. 1987, *MNRAS*, 226, 747
- King, I. R. 1966, *AJ*, 71, 64
- King, I. R., Sosin, C., & Cool, A. M. 1995, *ApJ*, 452, L33
- 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
- Lupton, R., Gunn, J. E., & Griffin, R. F. 1987, *AJ*, 93, 1114
- Meylan, G. 1987, *A&A*, 184, 144
- Meylan, G. 1989, *A&A*, 214, 106
- Meylan, G. & Mayor, M. 1986, *A&A*, 166, 122
- Oort, J. H. & van Herk, G. 1959, *Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands*, 14, 299
- Paresce, F., De Marchi, G., & Jedrzejewski, R. I. 1995, *ApJ*, 442, L57
- Peterson, C. J. & King, I. R. 1975, *AJ*, 80, 427
- Pryor, C., McClure, R. D., Fletcher, J. M., Hartwick, F. D. A., & Kormendy, J. 1986, *AJ*, 91, 546
- Pryor, C., McClure, R. D., Fletcher, J. M., & Hesser J. E. 1988, in *IAU Symp. 126, Globular Cluster Systems in Galaxies*, eds. J. E. Grundly & A. G. D. Philip (Dordrecht: Kluwer), p.661
- Pryor, C., McClure, R. D., Fletcher, J. M., & Hesser J. E. 1989, *AJ*, 98, 596
- Rhee, J. & Sohn, Y.-J. 2004, *JA&SS*, 21, 181
- Rhee, J., Sohn, Y.-J., Shin, M., & Kang, A. 2004, *JA&SS*, 21, 249
- Richer, H. B. & Fahlman, G. G. 1989, *ApJ*, 339, 178
- Sohn, Y. J., Chun, M. S., Lee, J. W., & Oh, J. 1999, *JA&SS*, 16, 91
- Staneva, A., Spassova, N., & Golev, V. 1996, *A&AS*, 116, 447
- 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
- Woolf, N. J. 1964, ApJ, 139, 1081