구상성단 시스템을 이용한 외부은하의 형성 과정 규명

● 김학섭, 이상윤, 김수영, 정철, 윤석진

연세대학교

초 록

구상성단은 성단의 형성 당시 주변 환경의 연령, 중원소함량, 역학적 특성 등을 고스란히 간직하고 있으므로 은하의 형성과 진화를 연구하는 데 있어서 아주 중요한 단서가 되는 천체이다. 무거운 은하에 속한 대부분의 구상성단계에서 나타나는 대표적인 특징인 색분포 양분 현상은 은하 형성 이론의 기초가 되어왔는데, 최근 이 현상의 기원에 대하여 서로 다른 중원소함량을 가지는 두 개의 성단계의 공존설과 중원소함량-색지수 관계의 비선형성에 의한 현상설로 나누어져 활발한 논쟁이 이루어지고 있다. 이 연구는 GMT/GMACS 장비를 사용하여 Fornax 은하단에 속한 조기형 은하 및 저밀도 환경에 위치한 조기형 은하들의 구상성단계에 대한 분광탐사관측을 수행하여 충분한 숫자의 구상성단계에 대한 화학적, 운동역학적 특성을 조사하는 것을 제안한다. 이를 통하여 색분포 양분

현상의 기원을 규명하고, 나아가 은하의 형성과 진화 과정을 밝힐 수 있을 것으로 기대한다.

1. 과학 목적 및 요약

구상성단의 대표적 관측적 특성인 '색분포 양분 현상(bimodal color distribution)'은 대부분의 타원은하에서 구상성단들의 색지수가 두 개의 봉우리(peak)를 가지는 분포를 보이는 것을 말한다. 일반적으로 이 현상은, 구상성단의 중원소함량과 색지수와의 관계가 선형적(linear)이라는 가정에 의해 최근 20년 동안 한 은하 안에 두 그룹의 구상성단계가 공존하는 것으로 이해되었다. 현존하는 은하 형성론의 다수는 이러한 해석, 즉 두 개의 성단계 공존설에 그 근거를 두고 있다(Ashman & Zepf 1992; Forbes, Brodie, & Grillmair 1997; Cote, Marzke, & West 1998; M. Lee 2003).

그러나 Yoon et al.(2006, 2011a,b, 2013)과 S. Kim et al.(2013)은 구상성단의 중원소함량과 색지수 사이의 관계가 비선형적(nonlinear)임을 최초로 밝히고, 이러한 비선형성으로 인하여 중원소함량 분포함수가 단순히 펑퍼짐한 형태(예를 들면 정규분포)를 갖더라도 색분포 양분 현상이 발생할 수 있음을 주장하였다. 이 새로운 가설에 의하면 기존 성단 및 은하 형성 시나리오들이 상당 부분 수정되어야 함을 의미한다. 최근 이 가설을 둘러싼 논쟁이 활발하게 진행되고 있다(e.g., Blakeslee et al. 2012; Chies-Santos et al. 2012; Usher et al. 2012; Brodie et al. 2012).

색분포 양분 현상의 원인을 규명하는 가장 핵심적인 방법은 (1) 다수의 외부은하 구상성단을 분광관측하여 중원소함량 분포함수의 모양을 밝히고, (2) 성단의 중원소함량과 색지수 간의 관계식의 정확한 모양을 알아내는 것이다. 지금까지 외부은하 구상성단계에 대하여 다양한 분광관측이 시도되어왔으나, 관측기기의 한계로 인해 비교적 가까운 은하들인 M31(Caldwell et al. 2009; S. Kim et al. 2013), NGC 5128(Beasley et al. 2008; H. Kim et al. in prep.), M87(S. Kim et al. in prep.) 정도에 대해서만 상세한 연구가 진행되었다.

우리는 Fornax 은하단에 속한 조기형 은하 30여 개와 밀도가 낮은 필드 환경

(field environment)에 속한 조기형 은하 10여 개에 대하여 GMT/GMACS를 사용한 분광관측을 수행하고자 한다. 이 연구는 통계적으로 충분한 숫자의 구상성단들의 중원소함량을 구하고, 이를 통해 최근 논란이 되고 있는 중원소함량과 색지수와의 관계 및 중원소함량 분포함수를 밝혀내고자 한다. 또한 색분포 양분 현상이 뚜렷하게 보이는 은하와 약화되어 나타나는 은하의 구상성단들의 화학적, 운동역학적 특성을 각각 조사하여 비교함으로써, 구상성단의 색분포 형태를 결정짓는 요소를 규명하고자 한다. 이를 통하여 궁극적으로 구상성단계의 모(母)은하가 어떻게 형성되어 현재까지 진화하여왔는지 밝혀내는 것을 목표로 한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

은하 안에서 별 생성이 있을 때 대부분의 별들은 성단의 일원으로 태어난다. 성단은 그 형성 당시 모은하의 연령/중원소함량/운동역학 정보를 간직한 "은하 생태계의 살아 있는 화석"이다. 따라서 우리은하 및 외부은하의 구상성단계 특성과 기원을 정확히 이해하는 것은 은하의 형성 및 진화를 규명하는 가장 중요한 열쇠 중 하나이다.

은하 연구에 있어 중요한 정보는 항성종족의 화학조성과 나이분포이다. 이 두 가지 정보를 독립적으로 얻어야만 은하의 역사를 재구성할 수 있기 때문이다. 항성종족의 화학조성과 나이분포 정보를 동시에 측정하여 연구할 수 있는 가장 좋은 대상이 바로 구상성단들이다.

구상성단은 단일 종족(simple/single stellar population) 항성계로 이루어져 있기 때문에 복합종족(composite stellar populations) 항성계로 이루어져 있는 은하에 비해 나이 및 중원소함량 등의 물리적 특성을 용이하게 이끌어낼 수 있다. 개개의 별들로 분해(resolved)되지 않는 멀리 있는 은하의 경우 누적된 은하의 빛(integrated galaxy light)으로부터는 별들의 광도에 따라 가중치가 주어진(luminosity weighted) 평균 물리량 정보만을 알 수 있다는 한계가 있으며, 이것은 은하의 자세한 진화 역사를 기술하는 데 어려움을 주고 있다. 반면에 단일종족으로 이루어진 구상성단의 경우 단일항성종족모델과의 비교를 통해 상대적으로 용

이하게 물리량을 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 구상성단의 다양한 관측적 특성과 이로부터 구한 물리량들의 분포를 분석함으로써 각 구상성단계가 속해 있는 모은하의 형성 과정을 유추할 수 있다.

구상성단에서 나타나는 가장 중요한 관측적인 특징 중 하나는 특정한 질량 이상을 가지고 있는 은하에 속한 대부분의 구상성단계의 색지수가 두 개의 고점(peak)을 가지는 분포를 나타낸다는 것이다. 이러한 구상성단의 색분포 양분 현상(color bimodality)은 전통적으로 구상성단의 색지수와 중원소함량과의 관계가 선형적이라는 가정하에 하나의 은하에 속한 구상성단계 내에 서로 다른 중원소 함량 분포를 가지는 두 개의 종족이 존재하는 것으로 해석되어왔으며, 이를 설명하기 위한 다양한 은하 형성 시나리오들이 제시되어왔다(Ashman & Zepf 1992; Forbes, Brodie, & Grillmair 1997; Cote, Marzke, & West 1998; M. Lee 2003).

한편 최근 본 연구 그룹은 이 현상에 대하여 기존의 해석과는 다른 새로운 이론을 제시하였는데, 단일항성종족모델에 따르면 구상성단의 색지수와 금속 함유량 관계는 비선형적일 것으로 예상되고 이 경우에 정상분포의 중원소함량을 갖는 하나의 종족만으로도 색분포 양분 현상을 설명할 수 있다는 것을 주장하였다(Yoon et al. 2006). 이 새로운 이론은 기존의 구상성단 및 은하 형성 시나리오에 대하여 상당 부분 재해석을 필요로 하는 것이어서 이 분야 연구에 큰 반향을 일으켰다. 구상성단의 색분포 양분 현상의 기원을 밝히는 것은, 이 현상이 특정 은하에서만 나타나는 현상이 아니라 거의 모든 은하에서 나타나는 현상이라는 점에서 은하의 형성과 기원 연구에 있어서 핵심적인 일이라 말할 수 있다.

2) 국내외 연구 동향

본 연구 그룹뿐만 아니라 전 세계 여러 연구 그룹에서 다양한 방법으로 본 연구 그룹이 제시한 새로운 이론을 검증하고자 하는 연구들을 수행함으로써, 색분포 양분 현상의 기원에 대한 논쟁이 활발하게 진행되고 있다.

측광학적 방법으로는 다양한 파장에서 구상성단의 색지수 분포의 형태 변화를 분석하는 방법이 주로 사용되고 있다. 본 연구 그룹에서는 가시광 영역에서 관측되는 색지수 분포와 비교해볼 때 근자외선 밴드(near-ultraviolet band)를 포함한 색지수에서 분포함수의 심각한 형태 변화가 일어나는 것을 발견하였다(Yoon et al. 2011a; Yoon et al. 2011b; H. Kim et al. 2013). 이러한 형태 변화는 기

존의 선형적 색지수-중원소함량 관계로는 설명이 불가능한 반면에, 본 연구 그룹이 제시한 새로운 이론하에서는 단일항성종족모델에서 예측하는 비선형적 색지수-중원소함량 관계를 사용한 모의실험을 통해 잘 재현되고 있음을 확인하였다[그림 1]. 또한 해외 연구 그룹에서는 색지수-중원소함량 관계의 비선형성이 비교적 약할 것으로 예상되는 근적외선(near-infrared) 색지수 분포에서 색분포 양분 현상이 심각하게 약화되거나 사라지는 것을 발견하기도 하였다(Blakeslee et al. 2012; Chies-Santos et al. 2012).

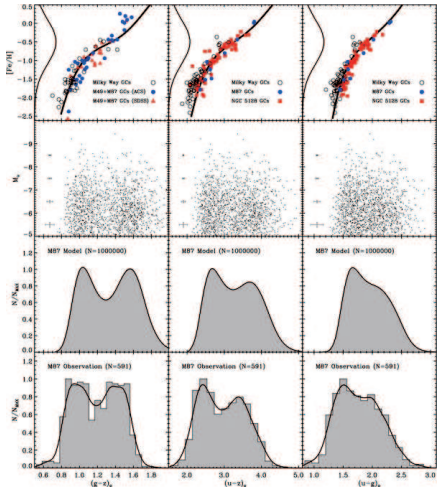

그림 1. M87 구상성단의 색지수 분포 형태 변화. 관측된 색지수 분포는 근자외선 밴드를 포함한 색지수에서 심각한 변화가 나타나고 있으며(4행), 이러한 변화는 모델을 사용한 모의실험에서 잘 재현되고 있다(3행). 1행은 모의실험에 사용된 가상의 중원소함량 분포(⟨[Fe/H]⟩=-0.5)와 이론적인 색지수-중원소함량 관계(13.9Gyr)를 보여주고 있다. 2행은 모의실험을 통해 생성된 가상의 색등급도를 나타낸다(Yoon et al. 2011b).

분광학적 방법으로는 분광흡수선을 통하여 중원소함량 분포를 구하거나 측광 자료와 결합하여 직접 색지수와 중원소함량과의 관계를 조사하는 방법 등이 사용되고 있다(e.g., Usher et al. 2012; Brodie et al. 2012). 특히 본 연구 그룹은 최근 M31 구상성단계 분광자료 분석을 통하여 색지수-금속함유량 관계뿐만 아니라 분광흡수선과 중원소함량 간의 관계 역시 비선형적임을 발견하여 발표하기도 하였다(S. Kim et al. 2013).

또한 본 연구 그룹이 최근 허블 우주망원경에 장착된 ACS(Advanced Camera for Surveys) 장비를 이용한 Virgo 은하단 은하들의 구상성단 색분포 탐사 자료를 조사해본 결과, 전체의 약 20% 정도의 은하에서 구상성단 색분포의 두 개의 고점 사이의 골(dip)이 뚜렷하지 않거나 세 번째 고점이 존재하는 것처럼 보이는 등, 색분포 양분 현상이 약화되어 나타나고 있다는 것을 발견하였다[그림 1]. 이러한 현상을 보이는 은하들의 구상성단계는 색지수-중원소함량 관계의 비선형성을 고려했을 때 나이가 많은 하나의 종족만으로는 설명이 어려우며 은하 내에 추가적인 젊은 구상성단 종족이 존재할 때 가능한 것으로 해석된다[그림 2]. 이와 같이 뚜렷한 색분포 양분 현상을 보이는 은하와 색분포 양분 현상이 약화되어 나

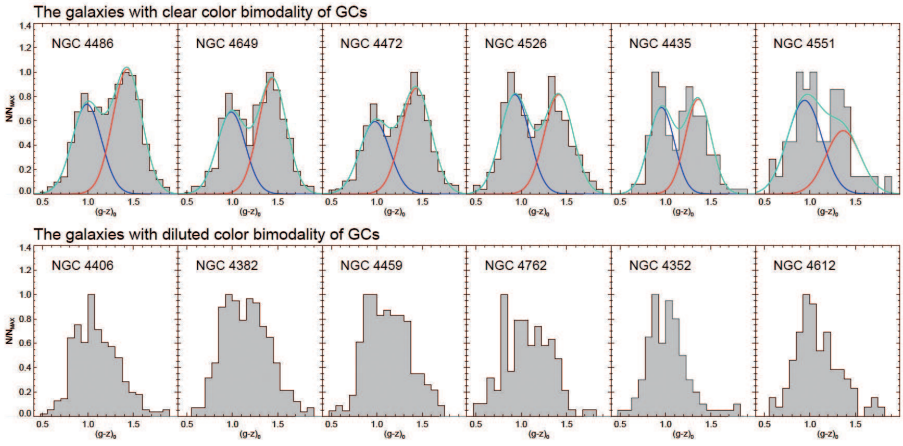

그림 2. Virgo 은하단 은하들의 구상성단 색지수분포. (위) 뚜렷한 색분포 양분 현상을 보이는 은하들의 구상성단 색지수 분포이며 실선은 GMM(Gaussian Mixture Modeling; Muratov & Gnedin 2010) 테스트 결과를 나타낸다. (아래) 약화된 색분포 양분 현상을 보이는 은하들의 구상성단 색지수 분포.

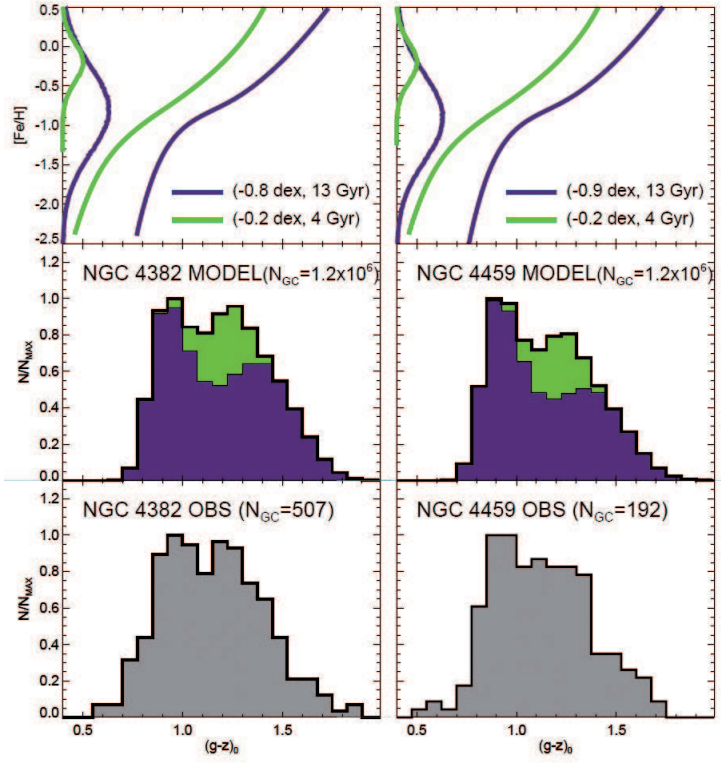

그림 3. 약화된 색분포 양분 현상을 나타내는 은하들에 대한 모의실험. (위) 나이가 다른 두 개의 구상성단 종족의 중원소함량 분포 및 각각의 색지수-중원소함량 관계. 보라색으로 표시한 나이 든 구상성단 종족(⟨[Fe/H]⟩=-0.8; 13 Gyr)의 중원소함량 분포에 20%의 녹색으로 표시한 젊은 구상성단 종족(⟨[Fe/H]⟩=-0.2; 4 Gyr)을 추가했다. (중간) 두 개의 구상성단 종족이 있는 경우에 대한 모의실험 색지수 분포. (아래) 관측된 구상성단 색지수 분포.

타나는 은하의 구상성단계에 대한 분광관측을 수행하여 이들의 나이분포를 조사하고 비교한다면 구상성단의 색지수 분포 형태에 따른 모은하의 형성 과정 및 진화 연구에 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

3) GMT의 필요성

이 연구 목표를 달성하기 위해서는 많은 수의 은하들에 대해서 충분한 수의 구상성단 분광자료를 확보하는 것이 중요하다. Fornax 은하단은 남반구에서 관측이 용이한 가장 가까운 은하단으로서 한 번의 관측 시기에 여러 은하의 구상성단계를 동시에 관측할 수 있을 뿐만 아니라 개개의 은하들이 많은 수의 구상성단을 가지고 있어 이 연구에 매우 적합한 관측 대상이다.

Fornax 은하단 정도의 거리에서는 구상성단의 밝기가 매우 어둡기 때문에 현재의 8-10미터급 망원경을 사용하더라도 이들에 대한 분광관측은 굉장히 많은 관측 시간이 소요되며, 화학조성 연구를 할 수 있을 정도의 좋은 신호대잡음비(S/N)를 갖는 스펙트럼 데이터를 얻는 것도 쉽지 않다.

이러한 제약 때문에 Fornax 은하단 은하의 구상성단에 대한 화학조성 연구는 지금까지 거의 이루어지지 않았으며, 비슷한 거리 은하들의 구상성단계에 대한 화학조성 연구도 몇몇 소수의 은하에 속한 밝은 구상성단들에 대해서만 한정적으로 이루어져왔다. 그러나 구상성단 시스템의 색-등급 관계(color-magnitude relations)에서 나타나는 blue tilt 현상(밝은 성단들의 색지수가 푸른 성단과 붉은 성단의 중간값으로 수렴하는 현상)을 고려할 때, 밝은 구상성단들이 전체 구상성단 시스템을 대표한다고 단정하기 어렵다.

뛰어난 집광력을 가지고 있는 GMT는 그동안 연구되지 않았던 Fornax 은하단의 구상성단 시스템뿐만 아니라 비슷하거나 더 먼 거리에 놓인 저밀도 영역(field environment)의 구상성단 시스템에 대해서도 어두운 성단까지의 깊은 관측이 가능할 것으로 예상된다.

다양한 모은하, 즉 서로 다른 밝기(luminosity), 형태(morphology), 주변환경(environment)을 가진 은하에 속한 구상성단 시스템의 화학적 조성 및 역학적 특성을 통합적, 체계적으로 연구함에 있어 GMT는 최적의 기기이다.

4) 8m급 망원경을 이용하여 수행 가능한 사전 연구

GMT/GMACS가 본격적으로 가동되기까지는 아직 5~6년의 시간이 남아 있다. GMT/GMACS가 완성되어 본 연구를 수행하기 전에 현재 사용 가능한 8m급 망원경을 활용한 사전 연구를 통해 GMT/GMACS 시대를 준비할 필요가 있다. 예를 들어 본 연구의 주요 대상인 Fornax 은하단 은하들에 대한 분광탐사관측(spectroscopic survey)을 수행하여 각 은하의 화학적, 역학적 특성을 확보한다면, 현재 ACS FCS(Advanced Camera for Surveys Fornax Cluster Survey)를 통해 관측된 이 은하들의 구상성단 측광 자료와 결합하여 구상성단의 색지수 분포 형태와 모은하의 특성과의 관계에 대한 연구를 진행할 수 있을 것이다. 또한 이 자료는 향후 GMT/GMACS를 사용한 본 연구의 구상성단 분광자료와 결합하여 더욱 정밀한 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

최근의 ACS FCS는 12개의 은하에서 200개 이상의 성단에 대한 측광 자료를 보고했다. 우리는 이들 은하의 구상성단 시스템을 우선 관측 대상으로 선정하였고, 향후 50개 이상의 구상성단 측광 자료를 가지고 있는 은하들을 포함하여 최소 30개의 은하단 소속 은하들을 관측 대상으로 포함시킬 예정이다.

또한 우리는 저밀도 환경에 위치한 은하들의 성단 시스템에 대해서도 관측을 수행하여 주변의 밀도 환경이 은하의 형성 및 진화에 미치는 영향에 관한 연구를 진행할 예정이다.

아래의 표는 우선 관측 대상인 ACS FCS 12개 은하와 저밀도 환경에 있는 7개 은하의 목록이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 연구에서는 GMACS를 사용하여 Fornax 은하단 은하들 및 저밀도 환경에 있는 은하들의 구상성단에 대한 중분산 분광관측을 수행하고자 한다.

Fornax 은하단 거리(거리지수 m-M=31.2)에서 구상성단은 20-25등급의 V-밴

표 1. 관측 대상

Object	R.A.	Decl.	B_T	Type	Env.
NGC 1172	03:01:36.05	-14:50:11.7	12.6	E+	Field
NGC 1316	03:22:42.09	-37:12:31.6	9.4	S0+p	FC
NGC 1336	03:26:31.97	-35:42:44.6	13.3	E4	FC
NGC 1339	03:28:06.55	-32:17:05.9	12.7	E4	FC
NGC 1340	03:28:19.70	-31:04:05.0	11.3	E5	FC
NGC 1351	03:30:35.04	-34:51:14.5	12.3	E5	FC
NGC 1374	03:35:16.74	-35:13:33.9	11.9	E0	FC
NGC 1380	03:36:27.45	-34:58:31.1	11.3	S0/a	FC
NGC 1387	03:36:56.84	-35:30:23.9	12.3	SB0	FC
NGC 1399	03:38:29.14	-35:27:02.3	10.6	E0	FC
NGC 1404	03:38:52.08	-35:35:37.7	10.9	E2	FC
NGC 1426	03:42:49.11	-22:06:30.1	12.3	E4	Field
NGC 1427	03:42:19.16	-35:23:36.0	11.8	E4	FC
NGC 1439	03:44:49.95	-21:55:14.0	12.2	E1	Field
IC 2006	03:54:28.45	-35:58:01.7	12.2	E	FC
IC 2035	04:09:01.87	-45:31:03.1	12.6	S0	Field
NGC 3818	11:41:57.36	-06:09:20.4	12.5	E5	Field
NGC 4033	12:00:34.74	-17:50:33.4	12.5	E6	Field
NGC 7173	22:02:03.19	-31:58:25.3	12.5	E+p	Field

* Note : Env.=Environment, FC=Fornax Cluster

드 광도 분포(luminosity function)를 가지며, 턴오버 등급(turn-over magnitude)은 약 23.8등급이다. GMT 웹사이트에서 제공하는 노출시간 계산기에 따르면 23등급의 구상성단에 대하여 달 없는 밤(dark night)에 1,800초 노출시간을 주면 5000 Å에서 신호대잡음비(S/N) 약 50의 분광 데이터를 얻을 것으로 예상된다.

우리는 한 마스크당 최대 100개 정도의 관측 대상에 대하여 동시에 분광관측을 수행할 수 있는 GMACS를 사용하여 Fornax 은하단 및 저밀도 영역에 있는 은하들의 구상성단 시스템에 대하여 광학 영역에서 R~2000 정도의 중분산 분광관

측을 수행할 것이다.

이렇게 획득한 분광 스펙트럼으로부터 Lick 흡수선 세기 지수(Lick absorption-strength indices)를 측정하여 구상성단의 화학조성 및 나이분포, 역학적 특성에 대한 연구를 수행한다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 연구를 통하여 최소 30개 이상의 은하단 환경 내의 은하들과 10개 이상의 저밀도 환경 내의 은하들에 속한 구상성단에 대하여 높은 신호대잡음비를 가지는 동종의(homogeneous) 분광자료를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이는 현재의 관측기기로는 얻을 수 없는 매우 가치 있는 자료로, 이를 활용하면 개별 은하의 형성 특성을 넘어서 전체적인 은하의 형성 과정에 대하여 통계적인 연구를 진행할 수 있을 것이다.

ACS FCS의 측광 자료와 결합하여 구상성단의 색지수와 중원소함량 간의 관계의 비선형성 및 그 영향을 직접적으로 조사할 수 있을 것이며, 이를 통해 현재 활발한 논쟁이 이루어지고 있는 구상성단의 색분포 양분 현상의 기원을 밝힐 수 있을 것으로 기대된다. 또한 은하단 은하 구상성단과 저밀도 환경 은하의 구상성단의 중원소함량 분포 비교를 통하여, 주변의 밀도 환경이 은하의 형성 및 진화 과정에 미치는 영향을 밝힐 수 있을 것이다. 특히 몇몇의 분광흡수선을 얻는 것이 아니라 가시광 영역의 Lick 흡수선 전체를 얻음으로써 각 구상성단의 나이분포 및 화학조성에 대하여 더욱 정밀하게 조사할 수 있을 것이며, 이를 모은하의 다양한 특성과 결합한다면 은하의 형성 및 진화 과정에 대한 보다 체계적인 연구가 가능할 것으로 기대된다.

5. 인용문헌

Ashman, K. M., & Zepf, S. E. 1992, ApJ, 384, 50
Beasley, M. A., Bridges, T., Peng, E., et al. 2008, MNRAS, 386, 1443

Blakeslee, J. P., Cho, H., Peng, E. W., et al. 2012, ApJ, 746, 88
Brodie, J. P., Usher, C., Conroy, C., et al. 2012, ApJ, 759, L33
Caldwell, N., Harding, P., Morrison, H., et al. 2009, AJ, 137, 94
Chies-Santos, A. L., Larsen, S. S., Cantiello, M., et al. 2012, A&A, 539, A54
Cote, P., Marzke, R. O., & West, M. J. 1998, ApJ, 501, 554
Forbes, D. A., Brodie, J. P., & Grillmair, C. J. 1997, AJ, 113, 1652
Lee, M. G. 2003, Journal of Korean Astronomical Society, 36, 189
Kim, H.-S., Yoon, S.-J., Sohn, S. T., et al. 2013, ApJ, 763, 40
Kim, S., Yoon, S.-J., Chung, C., et al. 2013, ApJ, 768, 138
Muratov, A. L. & Gnedin, O. Y. 2010, ApJ, 718, 1266
Usher, C., Forbes, D. A., Brodie, J. P., et al. 2012, MNRAS, 426, 1475
Yoon, S.-J., Lee, S.-Y., Blakeslee, J. P., et al. 2011a, ApJ, 743, 150
Yoon, S.-J., Sohn, S. T., Kim, H.-S., et al. 2013, ApJ, 768, 137
Yoon, S.-J., Sohn, S. T., Lee, S.-Y., et al. 2011b, ApJ, 743, 149
Yoon, S.-J., Yi, S. K., & Lee, Y.-W. 2006, Science, 311, 1129