우리은하 구상성단들에서 나타나는 다중종족의 기원

● 한상일, 이영욱, 임동욱

연세대학교

초 록

우리은하에 있는 구상성단들은 오랜 시간 동안 동일한 화학조성과 동일한 나이를 가지고 있는 별들로 구성되어 있다고 알려져왔다. 하지만 관측기기의 발달로 인해 많은 수의 측광 및 분광관측으로부터 많은 수의 구상성단들이 최소한 두 개 이상의 종족들로 이루어져 있다는 증거들이 계속해서 발견되고 있다. 이러한 구상성단에서 보이는 다중종족의 기원을 알기 위해서는 분광관측을 통한 화학조성에 대한 연구가 중요하다. 그렇지만 현재까지 대부분의 구상성단 분광관측은 상대적으로 밝기가 밝은 진화 후반부에 있는 별들에 집중되어 있어서 내부 진화 효과에 의한 영향에서 자유롭지 못하다. 따라서 진화 효과에서 자유로운 주계열에 있는 별들에 대한 관측이 필요하다. 이러한 관측을 통해 구상성단 형성 초기의 화학조성을 연구할 수 있을 뿐 아니라 기존에 관측된 진화 후반부에 있는 별

들과 비교하여 한 성단 내에서의 화학적 진화 또한 연구할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 우리은하에서 가장 오래된 천체 중 하나인 구상성단의 형성 및 진화에 대한 연구를 통해 우리은하의 형성 및 진화 연구에도 기여할 수 있을 것으로 예상한다.

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 우리은하 구상성단들 중 다중종족의 양상을 보이고 있는 성단들의 주계열 별들에 대해 다중분광관측기를 사용한 분광관측을 수행하여, 주계열 전향점보다 약 1등급 정도 어두운(V~20) 별들에 대한 분광자료를 얻고자 한다. 이 관측을 통해 구상성단의 다중종족들 사이에 화학조성의 차이를 확인함을 목적으로 하며, 이 자료를 적색거성이나 수평계열에 위치한 별들의 관측 자료와의 비교를 통해 한 성단 내에서 서로 다른 진화 단계에서 화학적 진화의 관계를 연구하고자 한다.

주계열 별들에 대한 분광관측은 현재 가까이에 있는 몇몇 성단에 대해서만 수행되었으며, 그 개수 또한 제한적이다. 또한 구상성단의 낱별들에 대한 분광관측은 주로 진화 후반부인 별들에 집중되어 있어서 내부 진화의 효과에 의한 영향을 완벽하게 배제할 수 없다. 따라서 진화 효과에 의한 영향으로부터 상대적으로 자유로운 주계열에 위치한 별들을 관측함으로써 구상성단의 초기 생성 당시의 화학조성을 연구할 수 있을 것으로 기대한다. 이 외에도 구상성단의 다중종족에서 나타나는 C, N, O와 같은 가벼운 원소들은 함량 변화의 차이에 따른 색등급도에서의 변화가, 온도가 상대적으로 높은 주계열에서 적색거성계열보다 잘 나타나기 때문에 색등급도상에서 서로 다른 종족에 해당하는 별들을 구분하기가 상대적으로 유리하다.

본 관측 제안팀은 우리은하 구상성단들 중 다중종족의 양상을 보이고 있는 성단들을 그 정도에 따라서 2~3개의 범주로 구분을 해서 각각의 집단에 따라 고분산 분광관측을 통해 현재 많은 연구가 진행되어 있는 C, N, O, Na, Ca, Si, Ti, Ba, Fe 등의 주요 원소들을 얻고자 한다. 관측 파장대는 3500A에서 9000A까지이며 GMT G-CLEF의 mutil-faber 방식이 요구된다. 이 관측을 통해 서로 다른

정도의 다중종족의 양상을 보이고 있는 구상성단들 사이에 생성 초기 화학조성의 공통점과 차이점에 대한 연구뿐 아니라 한 성단 내에서 서로 다른 진화 단계에서의 화학적 진화에 대한 연구도 가능할 것으로 예측된다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

구상성단은 우주에서 가장 오래된 천체 중 하나로 은하 형성 초기의 정보를 간직하고 있기 때문에 우리은하뿐 아니라 외부은하 형성 연구에도 중요한 역할을 한다. 특히 우리은하 구상성단들은 거리가 가깝고 낱별로 분해되기 때문에 많은 연구들이 이루어져왔다. 구상성단은 1990년대 말까지 단일종족으로 이루어져 있다고 알려져왔으나 ω-Centauri의 적색거성단계의 별들이 여러 개로 나누어져 있다는 측광관측(Lee 등 1999) 이후 다른 구상성단들에서도 서로 다른 화학조성

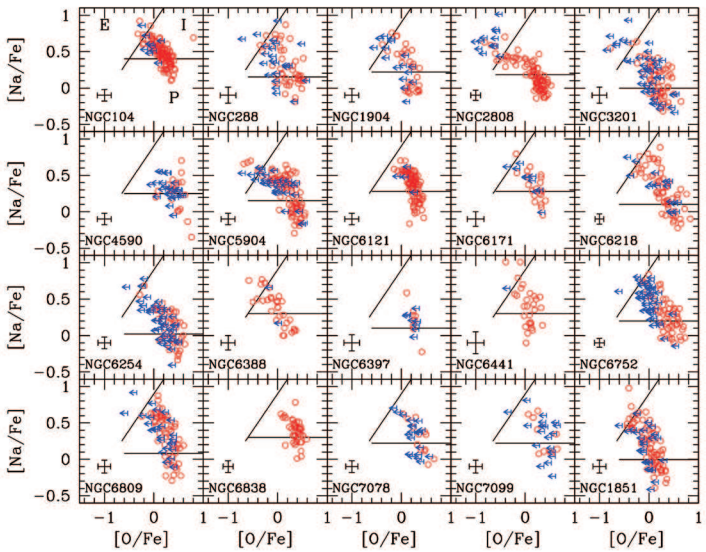

그림 1. 우리은하 구상성단의 적색거성 별들에서 나타나는 Na-O anticorrelation. 우리은하 필드에 있는 별들에 비해 구상성단에서는 Na 함량이 높고 O 함량이 낮은 별이 관측되고 있다(Gratton 등 2012).

및 나이를 가지고 있는 종족이 있다는 연구 결과가 발표되고 있다. 분광관측에서도 많은 수의 구상성단들의 적색거성 별들 사이에 C, N, O와 같은 가벼운 원소들이 동일하지 않다는 연구 결과들이 있었다(Gratton 등 2004와 그 안의 참고문헌). 최근 8m급 망원경을 사용하여 많은 수의 적색거성 별들의 Na과 O 함량을 관측한 결과 관측된 대부분의 성단들에서 Na-O anticorrelation이 발견이 되었고 이는 구상성단들이 서로 다른 형성 과정을 거친 다중종족으로 이루어져 있는 증거라고 주장되어진다(Gratton 등 2012와 그 안의 참고문헌).

그림 1에서 보이는 것과 같이 구상성단의 적색거성계열 별들 중에서는 필드에 있는 별들에 비해 Na 함량이 높고 O 함량이 낮은 별이 관측되고 있으며, 이러한 별들은 구상성단에서 초기에 생성된 별들의 영향을 받은 후 생성된 두 번째 종족으로 여겨지고 있다(Gratton 등 2012와 그 안의 참고문헌). 이러한 상관관계의 생성 기작은 빨리 회전하는 질량이 큰 주계열 별들이나 점근거성 별들에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Decressin 등 2007; D'Antona & Ventura 2007). 적색거성 외에도 최근 들어서 상대적으로 밝은 수평계열에 위치한 별들에 대한 Na, O 관측이 진행되고 있다. 그림 2는 우리은하 구상성단 M5의 수평계열 별들을 분광관측한 결과이며 상대적으로 온도가 높은 청색 수평계열 별들이 온도가 낮은 적색 수평계열 별들보다 Na의 함량이 높고 O의 함량이 낮은 것을 볼 수 있다. 수평계열은

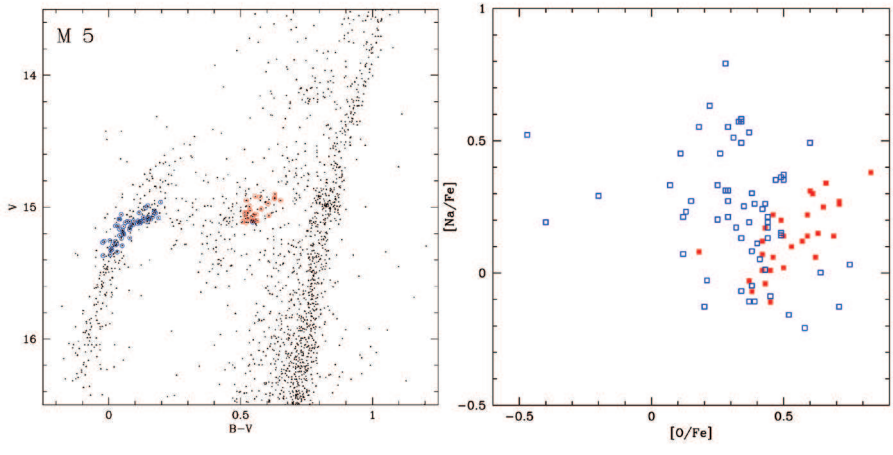

그림 2. 구상성단 M5의 Na-O 분광관측 결과. (좌) 색등급도 상에서 관측된 청색과 적색 수평계열 별들의 위치. (우) 청색과 적색 수평계열 별들의 Na-O 관계(Gratton 등 2013).

또한 헬륨의 함량에도 영향을 받기 때문에 구상성단의 별들 사이에 헬륨 함량의 차이가 있다면 청색 수평계열 별들의 헬륨 함량이 적색 수평계열보다 높을 것으로 예상된다. 따라서 청색 수평계열에 위치한 별들은 적색 수평계열에 위치한 별과 비교하였을 때 Na 함량이 증가되어 있으며 O 함량은 감소되어 있고 헬륨 함량 또한 높을 것으로 알려져 있다. 즉, 첫 번째 종족의 영향을 받아서 생성된 후기 종족은 Na이 증가되어 있는 것과 동시에 헬륨 또한 증가되어 있을 것으로 생각된다.

하지만 이러한 관측들은 현존하는 망원경들의 집광력이 충분하지 않아 상대적으로 밝기가 밝은 적색거성과 수평계열 단계에 있는 별들과 같이 진화 후반에 있는 별들에 집중이 되고 있다. 진화 후반에 있는 별들은 진화 효과에 따라 화학조성이 달라질 수 있기 때문에 이러한 다중종족들의 생성 당시의 초기 화학조성을 반영하고 있는지 확신을 할 수 없다. 따라서 이러한 화학조성의 다중 분포가 생성 당시의 화학조성에 의한 것인지를 알아보기 위해서는 진화 효과를 받지 않는 주계열에 있는 별들에 대한 분광관측이 필요하다. 또한 각각의 원소들마다 진화 단계에 미치는 영향이 다르기 때문에 기존에 있는 적색거성과 준거성들의 분광 결과와 비교하여 구상성단의 다중종족들에 대한 생성 기작을 밝혀낼 수 있을 것이다.

2) GMT의 필요성

본 제안서의 관측이 기존의 망원경으로 관측하기에는 어려움이 있지만 GMT로 가능한 이유는 기본적으로는 8m급 망원경의 한계 때문이다. 초기 GMT 관측은 반사경 4장으로 이루어지며 이는 현존하는 8m급 망원경에 비해 약 4배의 집광력을 가지고 있고 반사경 7장으로 관측이 가능해지면 약 10배 가까운 집광력을 가지게 된다. 이는 같은 노출시간으로 관측했을 때 4장의 반사경으로는 약 1.5등급, 7장의 반사경으로는 약 2.5등급 더 어두운 별들을 관측할 수 있다. 따라서 현존하는 가장 큰 망원경 중 하나인 VLT로도 집광력이 충분하지 않아 가까이에 있는 몇몇 성단의 주계열 별들만을 관측하였다. 또한 이러한 관측에서는 다중분광기를 사용하지 않았기 때문에 관측된 별들의 개수가 다양한 연구를 하기에는 충분하지 않았다. 따라서 GMT에 장착될 G-CLEF의 multi-fiber 방식으로 관측이 진행되면 관측 대상이 되는 구상성단들에서 충분한 개수의 주계열 별들

을 관측할 수 있을 것으로 예상된다. 그렇지만 GMT 관측이 시작되기 전에도 현존하고 있는 8-10m급 망원경을 이용하여 가까이에 있는 구상성단들에 있는 더 많은 수의 주계열 별들을 관측하여, 충분한 개수의 별들을 관측한 최소한 1-2개의 구상성단들을 통해 사전 연구를 진행할 필요가 있다. 또한 한 성단 내부에서 서로 다른 진화 단계에 따른 화학적 진화를 연구하기 위해서는 8-10m급의 망원경을 이용하여 상대적으로 관측된 별들이 적은 준거성 및 수평계열 별들에 대한 관측도 필요하다.

3) 국내외 연구 동향

현재까지 구상성단에 속한 별들을 분광관측한 기존의 자료들은 밝기가 밝은 적색거성계열과 수평계열에 위치한 별들에 집중되어 있다. 적색거성계열에 있는 별들에 대해서는 현재까지 30여 개의 구상성단들에서 2,000개 이상의 별들에 대한 분광관측이 진행되었으며 수평계열에 있는 별들은 2011년 이후 6개의 구상성단에 있는 별들에 대한 분광관측이 수행되었다. 주계열 별들에 대한 분광관측은 2000년대 초부터 상대적으로 가까이 있는 성단들에 대해 8~10m급의 망원경으로 수행되어졌으나 Na-O 관측 자료가 있는 성단은 5개에 불과하다[표 1].

표 1. 주계열 별들에 대한 Na-O 분광관측

성단	별 개수	논문
NGC6752	9	Gratton+01
NGC6397	5	Gratton+01
M71	3	Ramirez & Cohen 02
M5	6	Ramirez & Cohen 03
47Tuc	3+90	Carretta+04, D'Orazi+10

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

현재는 대부분의 구상성단들이 단일종족이 아닌 다중종족으로 이루어져 있다고 알려졌다. 하지만 각각의 구상성단들은 크게, 별들 사이에서 가벼운 원소들만의 차이를 보이고 있는 경우와 무거운 원소들까지 차이를 보이고 있는 경우로 나눌 수 있다. 서로 다른 정도의 다중종족 양상을 보이는 것은 생성 기작이 다를 수 있음을 시사한다. 따라서 본 분광관측은 첫 세대의 점근거성단계의 별들의 영향만을 받았을 것으로 생각되는 성단들과 초신성의 영향까지 받았을 것으로 알려진 성단들을 각각 관측하려고 한다. 또한, 진화가 많이 진행되지 않은 별들을 관측하여서 진화 효과의 영향을 받지 않은 생성 초기의 화학조성을 연구하는 것을 목표로 한다. 대상 성단은 Fe의 차이를 보이지는 않지만 헬륨의 차이가 큰 것으로 알려진 NGC 2808, 무거운 원소들의 차이는 없지만 가벼운 원소들의 차이를 보이고 있는 NGC 288, NGC 6121, 그리고 가벼운 원소들뿐 아니라 초신성에서 생성되는 무거운 원소들까지 차이를 보이고 있는 NGC 1851, NGC 6656, NGC 5139 등 총 6개의 성단이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 분광관측에서는 고분해능 관측이 가능한 G-CLEF의 multi-faber 방식으로 대상을 관측하려고 한다. MANIFEST가 가동되면 약 40개의 대상이 관측 가능하기 때문에 2개의 조합으로 관측을 하면 성단당 60개 이상의 별을 관측할 수 있을 것이다. 관측 대상 중 어두운 편에 속하는 구상성단들의 주계열 전향점의 등급은 V~19 정도이기 때문에 필요한 S/N을 얻기 위해서는 약 1시간의 노출이 요구된다. 각각의 좌표에 대해서 1시간씩 3번의 노출을 주는 경우 구상성단 1개당 6시간이 소요될 것으로 예상되며 총 36시간의 노출이 필요해서 약 4일의 관측 시간이 필요하다.

본 관측에서 얻고자 하는 원소들 중 대표적인 원소들은 O:6300.3 & 6363.8A, Na:5672-88 & 6154-60A, Si:5645-6145A, Ca:5260-5867 & 6161-6717A 등의 분광선을 이용하여 측적하려고 한다. 이러한 원소들을 측정하기 위해서는 20000~40000 정도의 분해능이 필요하며 G-CLEF의 MOS 방식은 40000의 분해

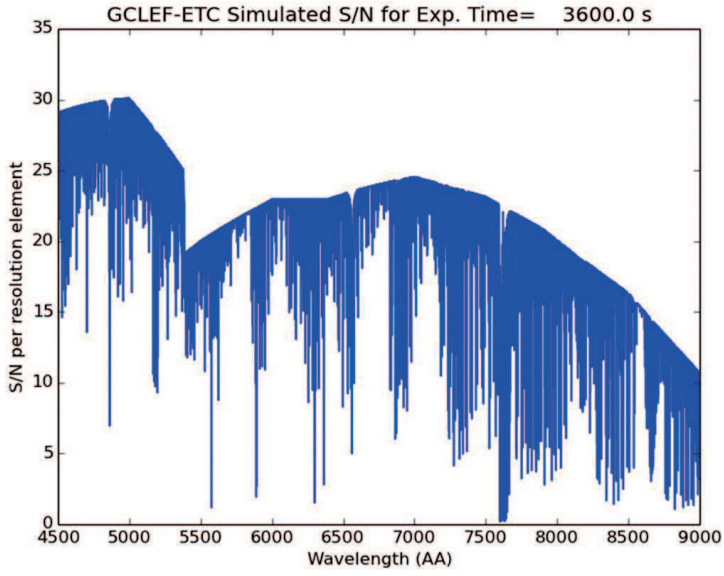

그림 3. GMT G-CLEF 파장별 S/N비. V=20에 대하여 7개 거울로 1시간 노출했을 경우.

능으로 관측이 가능하기 때문에 관측 목적에 부합하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. GMT의 노출시간 계산기를 이용하여 20등급의 별에 대해서 1시간 노출을 주었을 때의 S/N은 다음 그림 3과 같다.

4. 연구 결과의 기대 성과

구상성단의 주계열 별들에 대한 분광관측은 현재 수행되고 있는 적색거성 및 수평계열 별들에 대한 분광관측과 비교했을 때 여러 가지 장점이 있다. 첫째는 기존의 관측들이 진화의 후반부에 있는 별들을 대상으로 하였기 때문에 진화 과정에서 생성된 원소들이 대류에 의해 별 표면으로 올라와서 관측되거나 적색거성에서 수평계열로 이동할 때 핵 부분만 남기 때문에 생성 당시의 화학조성과는 변화가 있을 가능성이 있다. 하지만 본 제안서의 관측을 통해서 주계열에 있는 별들의 관측을 수행하면, 진화가 별의 내부에서만 진행이 되고 있는 별들을 관측하기 때문에 진화 효과를 배제한 생성 초기의 화학조성을 연구할 수 있다. 따라

서 구상성단을 이루고 있는 서로 다른 항성종족의 화학조성을 알아내는 데 큰 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다. 또한 현재까지 많은 관측이 이루어지고 있는 적색거성이나 수평계열 단계에 있는 별들의 화학조성과 비교를 통해서 항성 진화에 의한 화학조성 변화를 연구할 수 있을 것이다. 즉, 성단을 이루고 있는 서로 다른 종족들의 화학조성 차이에 대한 연구뿐 아니라 구상성단 내에서의 화학적 진화 연구에도 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

둘째로 구상성단에서 별들 사이에 많은 차이를 보이고 있는 C, N, O와 같은 원소들은 이온화 퍼텐셜이 높기 때문에 적색거성계열보다는 상대적으로 온도가 높은 주계열에서 색등급도상에 더 많은 영향을 주기 때문에 서로 다른 종족을 구분하기가 용이하다. 또한 이러한 원소들과 이론적인 모델을 비교함으로써 헬륨의 증가량 또한 추측할 수 있다. 중원소가 증가를 하면 온도가 낮아지는 데 반해 헬륨이 증가하면 온도가 높아지기 때문에 이론적인 차이보다 온도가 낮아지는 양이 적다면 헬륨에 영향을 받았을 가능성이 높다고 예상할 수 있다. 따라서 직접적으로 관측이 어려운 헬륨의 양을 추측하는 데 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 구상성단은 우주에서 가장 오래된 천체 중의 하나이며 은하 형성 초기를 연구할 수 있는 단서가 될 뿐만 아니라 은하를 이루고 있는 기본 천체 중의 하나이다. 따라서 낱별로 분해되는 우리은하의 구상성단들의 형성 과정을 이해하면 외부은하의 구상성단 및 은하의 형성을 연구하는 데 기여할 수 있을 것이다.

5. 인용문헌

Carretta, E., Gratton, R. G., Bragaglia, A., Bonifacio, P., & Pasquini, L. 2004, A&A, 416, 925

D'Orazi, V., Lucatello, S., Gratton, R., et al. 2010, ApJL, 713, L1

D'Antona, F., & Ventura, P. 2007, MNRAS, 379, 1431

Decressin, T., Meynet, G., Charbonnel, C., Prantzos, N., & Ekström, S. 2007, A&A, 464, 1029

Gratton, R. G., Bonifacio, P., Bragaglia, A., et al. 2001, A&A, 369, 87

Gratton, R., Sneden, C., & Carretta, E. 2004, ARA&A, 42, 385
Gratton, R. G., Carretta, E., & Bragaglia, A. 2012, A&ARv, 20, 50
Gratton, R. G., Lucatello, S., Solima, A., et al. 2013, A&A, 549, A41
Lee, Y.-W., Joo, J.-M., Sohn, Y.-J., et al. 1999, Natur, 402, 55
Ramirez, S. & Cohen, J. 2002, AJ, 123, 3277
Ramirez, S. & Cohen, J. 2003, AJ, 125, 224