막대나선은하의 핵주위 별 형성 영역에 분포하는 성단들에 대한 분광관측

● 장인성, 이명균

서울대학교

초 록

나선은하의 중심부에서 발견되는 핵주위 별 형성 영역은 가까운 우주에서 가장 별 형성이 강한 영역 중 하나이다. 이 영역에서는 나이가 젊고 무거운 별과 성단, 그리고 거대 분자운 등이 대거 발견되기 때문에 강한 별 형성이 일어나는 환경을 연구하기에 적합하다. 은하의 중심부에 막대구조를 가진 은하들은 그렇지 않은 은하들보다 더 높은 비율로 핵주위 별 형성 영역을 보여준다. 이와 같은 경향은 은하의 막대구조가 중심부 별 형성에 영향을 미치고 있음을 암시한다. 하지만 구체적으로 어떠한 영향으로 이처럼 강한 별 형성이 발생하는지에 대해서는 아직까지 명확한 해답을 얻지 못하고 있다. 본 연구에서는 기존에 수행된 연구들의 단점을 보완하기 위해 GMT의 GMACS를 이용하여 핵주위 별 형성 영역에 분포하는 성단들에 대한 분광관측을 수행하고자 한다. 이를 통해 수십-수백 개의

성단들의 속도, 나이, 금속함량, 그리고 질량 등을 더 높은 신뢰도로 측정하고자 한다. 이 결과를 통해 핵주위 별 형성 영역의 별 형성 역사, 화학적 진화, 동역학적 특성 등을 논의할 수 있다. 더불어 강한 별 형성 영역에서 발생한 성단들의 특징을 논의할 수 있다. 이와 같은 논의는 강한 별 형성이 일어나는 환경을 이해하는 데 큰 도움을 줄 것이다.

1. 과학 목적 및 요약

나선은하의 중심부에서 발견되는 핵주위 별 형성 영역(Circumnuclear Starforming region)은 가까운 우주에서 가장 강한 별 형성 영역중 하나이다. 이 영역에서는 나이가 젊은 별과 매우 무거운 성단, 그리고 이들이 태어나는 거대 분자운이 대거 발견되기 때문에 강한 별 형성이 일어나는 환경을 연구하기에 적합하다. 핵주위 별 형성 영역은 특히 막대구조를 가지고 있는 은하에서 더 자주 발견된다. 이를 통해 은하의 막대구조와 은하의 중심부 별 형성과의 관계에 대해서도 조사할 수 있다. 이와 같은 중요성으로 지금껏 많은 선행 연구가 수행되어왔지만, 대부분은 측광 자료에 의존하거나,[1] 가장 밝은 몇 개의 성단에 대한 분광관측만을 수행하여[2] 자세한 물리적 특성을 알아보는 데 어려움이 많았다.

이와 같은 어려움을 극복하기 위해 본 관측 제안팀은 GMT의 GMACS를 이용하여 핵주위 별 형성 영역과 은하의 막대구조에 분포하는 개개의 성단들에 대한 분광관측을 제안하고자 한다. 이를 통해 성단의 나이와 금속함량, 속도, 그리고 질량을 추정할 것이다. GMT의 강한 집광력은 기존 4~8m급 망원경을 이용한 연구들보다 3~1.5등급 더 어두운 성단들에 대해서도 분석이 가능하게 할 것이다. 이를 통해 기존 연구에서보다 6~15배 더 많은 성단들에 대한 정보를 얻어 통계적으로 신뢰도가 높은 결과를 제시할 수 있을 것으로 예상한다.

도출된 성단의 물리량을 통해 아래와 같은 사안들에 대해 논의하고자 한다. 1) 성단의 나이분포를 통해 핵주위 별 형성 영역과 막대구조의 별 형성 역사에 대해

1 Benedict et al. 2002, Buta et al. 2000, Maoz et al. 2001
2 Ryder et al. 2001; Konstantopoulos et al. 2008; Bastian et al. 2008

논의하고, 2) 성단의 금속함량 분포를 통해 은하와 성단의 화학적 진화를 논의하며, 3) 성단의 속도 분포를 통해 은하의 막대구조와 핵주위 별 형성 영역의 동역학적 특성을 논의하고, 4) 성단의 성간소광량과 밝기, 필요에 따라 성단의 속도 분산 정보를 이용하여 강한 별 형성 영역에서 태어난 성단의 질량함수에 대해 논의할 것이다.

이와 같은 논의는 핵주위 별 형성 영역과 같이 강한 별 형성이 일어나는 환경이 일반적인 환경과 어떠한 차이가 있는지, 은하의 막대구조가 은하의 중심부 별 형성에 어떠한 영향을 주는지, 그리고 핵주위 별 형성 영역과 같은 고밀도 환경에서 태어나는 성단들이 일반적인 성단들에 비해 어떠한 차이가 있는지 알려줄 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

약 20%의 나선은하들은 은하의 중심부에서 고리모양으로 분포하는 강한 별 형성 영역을 보여준다. 핵주위 별 형성 영역(Circumnuclear Starforming region)이라 불리는 이 영역은 가까운 우주에서 발견되는 가장 강한 별 형성 영역 중 하나이다. 막대나선은하의 경우 막대구조가 없는 나선은하들보다 더 높은 ~40% 비율로 핵주위 별 형성 영역이 발견된다.[3] 이러한 점으로 미루어볼 때, 은하의 중심부에서 일어나는 강한 별 형성은 막대구조의 역할과 관계가 있을 것으로 추측된다.

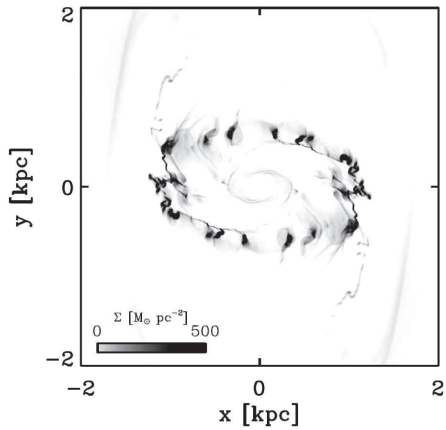

그림 1. 수치실험을 통해 재현된 핵주위 별 형성 영역 주위의 가스밀도 분포(Seo & Kim 2013).

수치실험 연구에 의하면 은하의 외곽부에 위치한 가스와 먼지는 은하의 막대

3 Knapen 2005, A&A, 419, 141, Comerón et al. 2008, MNRAS, 402, 2462

구조를 따라 은하의 중심부로 흘러들어 중심부에 반지름 200~1000kpc 크기의 고리모양 구조를 형성한다. 고리모양 구조에서는 은하의 원반부와 같은 다른 영역에 비해 가스의 밀도가 매우 높다. 그 결과로 강한 별 형성이 일어나 무거운 별과 성단, 그리고 거대분자운이 대거 분포할 것으로 예측된다.[4] 실제로 핵주위 별 형성 영역을 허블 우주망원경으로 관측한 연구에 따르면 이 영역에서는 우리은하에 분포하는 산개성단들보다 훨씬 무거운 성단들이 대거 발견된다.[5]

수치실험의 예측과 관측적 사실의 일치는 막대구조를 따라 은하 중심부로 유입된 가스와 강한 별 형성이 밀접한 관계가 있음을 암시한다. 하지만 유입된 가스가 구체적으로 어떠한 과정을 거쳐 별 형성을 야기하는지는 알려져 있지 않다. 이를 알아내기 위해서는 가장 먼저 핵주위 별 형성 영역이 어떠한 환경을 가지는지 조사해야 한다. 이 영역에 분포하는 별, 성단, 그리고 거대분자운의 나이와 금속함량, 그리고 속도 등을 분석한다면, 핵주위 별 형성 영역의 별 형성 역사, 화학적 진화, 그리고 동역학적 특성 등을 논의할 수 있을 것이다. 이를 통해 핵주위 별 형성 영역과 같이 밀도가 높은 환경에서 별 형성이 일어나는 과정과 막대구조와의 연관성을 함께 논의할 수 있을 것이다.

핵주위 별 형성 영역이 가지는 환경을 조사하기에 성단은 유용한 도구다. 개개의 성단을 이루고 있는 별들은 거의 같은 나이와 금속함량을 가지고 있을 것으로 예상되기 때문에, 이를 통해 비교적 정확한 나이와 금속함량을 알아내는 것이 가능하다. 또한 성단은 낱별들보다 밝기 때문에 관측이 용이하고 은하 내에 많은 수가 존재하기 때문에 통계적 분석이 용이하다. 따라서 성단의 나이와 금속함량, 그리고 속도 등을 측정하여 통계적으로 분석하면 핵주위 별 형성 영역과 막대구조가 가지는 환경에 대한 정보를 얻을 수 있다.

핵주위 별 형성 영역에서는 다른 영역에서는 발견되지 않는 특이한 성단이 발견되기도 한다. 초거대 성단(Super Star Cluster)으로 불리는 성단들이다. 이들은 일반적인 성단들보다 훨씬 더 밝고($MV \leq -9$), 더 무거운 ($M \geq 10^5 M_\odot$) 특징을 가지며, 핵주위 별 형성 영역과 같이 아주 강한 별 형성이 일어나는 영역에서만 발견된다. 하지만 이처럼 무겁고 밝은 성단이 어떠한 과정을 거쳐 형성되는지, 그리

4 Athanassoula 1992, MNRAS, 259, 345, Seo & Kim ApJ, 769, 100
5 Benedict et al. 2002, Buta et al. 2000, Maoz et al. 2001

고 이들이 일반적인 성단에 비해 어떠한 특징을 가지는지는 아직까지 명확히 밝혀지지 않았다.

이처럼 핵주위 별 형성 영역에서 발견되는 성단들은 그 자체로도 흥미로울 뿐 아니라, 핵주위 별 형성 영역이 가지는 환경을 보여줄 유용한 도구이다. 하지만 지금껏 수행된 연구는 관측 장비의 한계로 인해 분석에 큰 제한이 있었다. 본 관측 제안팀은 기존 연구에서 제기되었던 어려움을 GMT를 이용하여 해결하고자 한다.

2) GMT의 필요성

본 관측 제안팀은 GMT의 GMACS를 이용하여 핵주위 별 형성 영역과 막대구조에 분포하는 성단들에 대한 분광관측을 수행하고자 한다. 이를 위해서는 GMT가 반드시 필요하다.

핵주위 별 형성 영역에 분포하는 성단에 대한 분광관측은 현재 4~8m급 망원경을 이용하여 진행되고 있다.[6] 4m 망원경을 이용하여 수행된 연구의 경우 V~19등급의 성단을 R~2500의 분광분해능으로 관측하기 위해 1시간 20분을 노출했어야 했다. 기본적으로 망원경의 집광력이 부족하기 때문에 관측 가능한 성단이 은하 내에서 가장 밝은 몇몇 개의 성단으로 제한되며, 그 대상들에 대해서도 오랜 노출시간이 필요하다.

거울 4장이 장착된 초기 GMT의 경우 4m 망원경에 비해 16배의 집광력을 보여줄 것으로 기대된다. 초기 GMT를 이용하여 동일한 대상을 관측할 경우, 산술적으로 5분이면 비슷한 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio)를 가진 스펙트럼을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 초기 GMT를 이용하여 1시간 20분 노출을 할 경우 4m 망원경을 이용했을 때보다 약 3등급 더 어두운 성단들까지도 관측이 가능할 것으로 예상된다. 은하 내 성단은 어두울수록 더 많이 발견되므로, 3등급 어두운 성단들까지 관측한다면 현재보다 약 10~15배 더 많은 성단들에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

6 Hagele et al. 2007, Ryder et al. 2001

표 1. 성단을 이용한 핵주위 별 형성 연구 요약

논문	은하	관측 대상	관측 장비	성단 개수	연구방법
Buta et al. 2000	NGC 1326	V<22.5	허블 우주망원경	25	측광학적 분석
Maoz et al. 2001	NGC 1512	V<22.5	허블 우주망원경	38	측광학적 분석
Benedict et al. 2002	NGC 4314	V<22.5	허블 우주망원경	76	측광학적 분석
Dizs-Santos et al. 2007	NGC 7469	V<23.0	허블 우주망원경	30	측광학적 분석
Jang & Lee 2014	NGC 1672	V<24.0	허블 우주망원경	135	측광학적 분석
Hagele et al. 2007	NGC 3351	V<19.0	허셸 4m망원경	6	분광학적 분석
Dizs-Santos et al. 2007	NGC 7469	V<20.0	4m UKIRT	~10	분광학적 분석
Hagele et al. 2007	NGC 2903	V<19.0	허셸 4m망원경	~10	분광학적 분석
Galliano & Alloin 2008	NGC 1808	Ks<16	8m VLT	3	분광학적 분석

3) 국내외 연구 동향

지금껏 수행된 성단을 이용한 핵주위 별 형성 영역 연구는 크게 두 가지 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 측광을 통해 성단의 특성을 분석하고, 이를 통해 핵주위 별 형성 영역이 가지는 환경을 논의한 연구이다. 허블 우주망원경과 같이 높은 공간분해능을 가진 기기를 이용할 경우, V~24등급에 해당하는 어두운 성단들까지 분석에 사용할 수 있다. 따라서 가까운 우주에 위치한 은하들을 분석할 경우 ~수십 개의 성단들을 분석하여 통계적으로 신뢰도가 높은 결론을 도출할 수 있다. 하지만 도출된 성단의 나이, 질량 등의 값에 큰 오차를 포함하고 있기 때문에 분석에 어려움이 있다. 특히 핵주위 별 형성 영역은 막대구조를 따라 유입된 가스와 먼지의 밀도가 높아 성간소광이 매우 클 것으로 예상되는데, 이는 성단의 나이와 질량 추정에 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

두 번째는 분광을 통해 성단의 특징을 분석한 연구이다. 개개의 성단을 분광하여 방출선과 흡수선의 세기를 측정하면 측광학적 분석으로 사용할 때보다 더 정확한 성단의 나이와 금속함량, 그리고 성간적색화량을 얻을 수 있다. 하지만 성단을 분광하기 위해서는 4~8m급 대형 지상망원경을 이용하더라도 V~20보다 어두운 성단들은 관측하기 어렵다. 그렇기 때문에 분석에 사용할 수 있는 성단의 수가 크게 줄어든다.

표 1은 지금껏 수행된 측광, 분광학적 연구들을 보여준다. 측광학적 분석을 수행한 연구들은 수십 개의 성단들을 분석에 사용할 수 있었지만, 분광학적 분석을 수행한 연구들은 10개 내외의 성단들만을 사용하였다. GMT를 이용한다면 분광을 통해서도 수십 개 이상의 성단들에 대해 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 관측 제안팀은 1) 15Mpc보다 가까운 우주에 위치하고, 2) 강한 핵주위 별 형성 영역을 보여주며, 3) GMT가 위치한 남반구에서 관측이 가능한 은하들을 선별하였다. 선별된 은하들은 3개이며[그림 2], 각각의 특징은 아래와 같다.

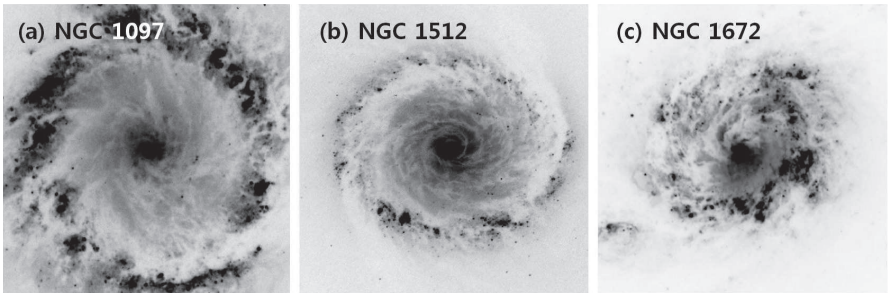

그림 2. 막대나선은하 NGC 1097(a), NGC 1512(b), 그리고 NGC 1672(c)의 중심부 영역의 허블 우주망원경 영상. 고리구조를 따라 분포하는 성단의 들이 잘 관측됨.

(1) NGC 1097 : NGC 1097은 약 14Mpc[7] 떨어진 곳에 위치한 막대나선은하로, 중심부에 반경 크기의 핵주위 별 형성 영역을 잘 보여준다. Barth et al.(1995)는 허블 우주망원경으로 관측된 영상자료를 측광분석하여 핵주위 별 형성 영역에서 $V \leq 21.5$의 성단 88개를 발견하였으며, 이 중 대부분은 $M_V \leq -10$의 밝기를 가진 초거대 성단인 사실을 발표하였다. Lin et al.(2013)은 알려진 NGC 1097의 초기조건을 이용하여 수치실험을

7 Nasonova et al. 2011

수행하였고, 막대구조를 따라 유입된 가스가 중심부 R_{GC}~700pc 영역에서 강한 별 형성을 야기한다는 결과를 얻었다. 이는 관측적으로 알려진 사실과 일치한다. 또한 핵주위 별 형성 영역으로 주입되는 가스의 양 0.17$M_{\odot}yr^{-1}$은 이며, 고리구조 자체는 중력적으로 안정적이지 않을 것임을 예측하였다. NGC 1097은 핵주위 별 형성 영역이 매우 뚜렷하고, 측광학적, 수치실험 연구가 잘 되어 있기 때문에 GMT를 이용한 분광관측에 적절한 은하다.

(2) NGC 1512 : NGC 1512는 약 10Mpc[8] 떨어진 곳에 위치하며, 핵주위 별 형성 영역을 보여주는 가장 가까운 은하 중 하나이다. Maoz et al.(2001)은 허블 우주망원경으로 관측된 영상자료를 측광분석하여 $V \leq 21.5$의 성단 38개를 발견하였다. 성단들은 1~300Myr 정도의 나이를 가지며, $\alpha = -2$의 질량함수 기울기를 보여준다.

(3) NGC 1672 : NGC 1672는 SBb로 분류되는 은하로 중심부에 반경 ~6″ 크기의 핵주위 별 형성 영역을 보여준다. Jang & Lee(2014)는 허블 우주망원경으로 관측된 영상자료를 측광분석하여 $V \leq 24.0$, $-7 \sim M_V \sim -13$의 성단 135개를 발견하였다. NGC 1097과 NGC 1512에서는 핵주위 별 형성 영역의 고리모양 구조를 따라서 성단이 주로 분포하는 데 반해, NGC 1672에서는 고리모양의 안쪽과 바깥쪽에서도 성단이 발견되는 것이 특징이다. 또한 NGC 1672에서는 막대구조의 먼지띠를 따라 분포하는 성단들이 대거 발견되었다. 그렇기 때문에 막대와 핵주위 별 형성 영역에 분포하는 성단의 특징을 비교하기에 유용하다.

2) 8미터급 망원경을 이용해서 GMT 완성 전에 수행 가능한 사전 연구

본 연구 과제와 유사한 연구들이 현재 8미터급 망원경을 이용하여 수행되고 있다. Bastian et al.(2006)은 8미터급 망원경인 Very Large Telescope(VLT)를 이용하여 NGC 4038/39(Antennae galaxies)에 분포하는 V < 18의 6개의 별군집 영역(Stellar complex)에 대해 Integral Field Unit 분광관측을 수행하였다. 관측을 통해 총 27″X27″영역에 해당하는 분광정보가 수집되었으며, 총 2시간 40분의 노출이 소요되었다. 이를 통해 별군집 영역의 성간적색화량, 나이, 금속함량, 그리고 질량 등을 도출하고, 그 특성을 은하 내 별 형성 환경과 연관 지어 논의하였다. 이후 Bastian et al.(2009)은 8미터급 망원경인 Gemini를 이용하여 NGC

8 Maoz et al. 2001

4039/39에 분포하는 개개의 성단들에 대해 긴 슬릿 분광관측을 수행하였다. 총 4시간의 노출을 통해 수집된 V < 21의 16개 성단의 분광정보를 통해 각 성단의 물리량을 도출하고 그 특성을 논의하였다.

이와 같은 연구는 3.1장에서 언급된 3개의 은하, NGC 1097, NGC 1512, 그리고 NGC 1672에 대해서도 수행할 수 있다. 각 은하에 대해 기존에 수행된 사전 연구에 의하면 각 은하에는 V < 21의 밝은 성단들이 적어도 10개 이상은 존재한다.[9] 특히 NGC 1097의 경우, V < 21의 성단이 50개 이상 분포하고 있기 때문에 8미터급 망원경을 이용해서 사전 연구를 수행하기에 매우 적합하다.

3) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 탐사에서는 GMACS를 이용하여 핵주위 별 형성 영역과 은하의 막대구조에 분포하는 성단들에 대해 고분해능 분광관측을 수행하고자 한다. 현재 예상되는 GMACS의 시야는 대략 4.5′×9.0′이며, 슬릿의 개수는 300개이다. 막대나선은하 NGC 1672의 경우 핵주위 별 형성 영역을 포함하는 막대구조의 크기가 대략 2.0′×4.0′이고, 이 영역에 $V < 23.0$ 성단이 약 300개가 분포한다.[10] 그러므로 GMACS를 이용하면 한 번의 노출로도 핵주위 별 형성 영역과 막대구조에 분포하는 성단들을 관측할 수 있다. 다만 핵주위 별 형성 영역의 경우 성단이 매우 조밀하게 분포하고 있기 때문에 슬릿의 충돌이 우려되는데, 이는 추후 공개되는 기기의 제원을 고려하여 보정할 계획이다. 성단의 나이, 금속함량, 성간적색화량, 그리고 속도는 Starburst99 모델과 같은 항성진화 스펙트럼 맞춤을 수행하거나, 성단의 나이에 따라 예측되는 방출선과 흡수선을 이용해 도출할 계획이다.

그림 3은 거울 4장이 장착된 초기 GMT의 GMACS를 이용하여 고분산으로 2시간 동안 관측하였을 때 A0V 타입, $r=23$등급 별의 예상되는 스펙트럼을 보여준다.[11] 그림은 2시간의 노출로 9000Å보다 짧은 파장대역에서 신호대잡음비 5 이상의, 6000Å보다 짧은 파장대역에서는 신호대잡음비 10 이상의 양질의 스펙트럼을 얻을 수 있음을 보여준다.

9 Maoz et al. 2001, Jang & Lee 2014
10 Jang & Lee 2014
11 http://instrumentation.tamu.edu/cgi-bin/gmacs.cgi 참고

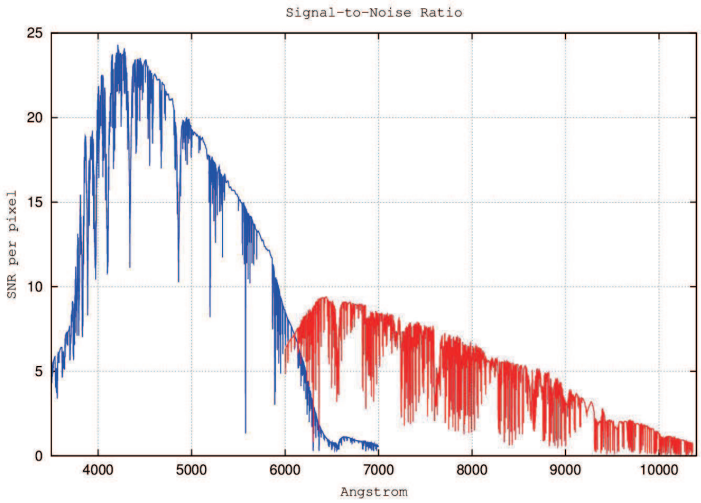

그림 3. GMACS를 이용하여 고분산으로 2시간 동안 관측하였을 때 A0V 타입, 등급 별의 예상되는 스펙트럼.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 탐사를 통해 핵주위 별 형성 영역과 막대구조에 분포하는 성단의 물리량을 얻는다면 아래와 같은 사안들에 대해 현재보다 더 명확한 답을 알려줄 것으로 기대한다.

첫 번째로 강한 별 형성이 일어나는 환경이 일반적인 환경과 어떠한 차이점을 갖는지 알려줄 것이다. 수치실험 연구는 핵주위 별 형성 영역에서의 별 생성이 유입되는 가스의 양과 관계가 있으며, 특히 유입되는 가스와 고리구조가 충돌하는 영역에서 가장 강할 것으로 예측한다. 관측을 통해 밝혀질 성단의 나이와 공간, 그리고 속도 분포는 수치실험에서의 예측을 검증하는 데 유용할 것이며, 이를 통해 별 형성이 효과적으로 일어나는 환경에 대해 논의할 수 있을 것이다.

두 번째로 은하와 성단이 어떠한 화학적 진화 과정을 겪는지 알려줄 것이다. 일반적으로 은하의 중심부는 바깥쪽보다, 나이가 젊은 성단은 나이가 많은 성단들보다 금속함량이 높을 것으로 예측된다. 하지만 이와 같은 예측이 관측적으로 증명된 사례는 매우 적다. 핵주위 별 형성 영역과 막대구조에 분포하는 성단들의 금속함량 분포와 나이분포는 은하와 성단이 겪는 화학적 진화를 보여주는 직접

적인 증거가 될 것이다.

마지막으로 강한 별 형성 영역에서 태어난 무거운 성단들이 어떠한 질량분포를 갖는지 알려줄 것이다. 질량함수 기울기 값으로 대변되는 성단의 질량분포는 은하의 밝기와 질량을 결정하는 기초적인 변수이다. 하지만 무거운 성단이 갖는 질량분포와 상대적으로 가벼운 성단이 갖는 분포가 보이는 공통점과 차이점은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다. 본 탐사를 통해 높은 무거운 성단들의 질량을 높은 신뢰도로 측정한다면, 성단의 질량함수 기울기 값이 성단의 질량과 어떠한 관계를 갖는지 알려줄 것이다.

5. 인용문헌

Athanassoula, E., 1992, MNRAS, 259, 345

Benedict, G. Fritz; Howell, D. Andrew; Jørgensen, Inger., et al. 2002, AJ, 123, 473

Buta, R.; Treuthardt, Patrick M.; Byrd, G. G., et al. 2000, AJ, 120, 1289

Comerón, S.; Knapen, J. H.; Beckman, J. E, et al. 2008, MNRAS, 402, 2462

Díaz-Santos, T.; Alonso-Herrero, A.; Colina, L.; Ryder, S. D., et al. 2007, ApJ, 661, 149

Galliano, E.; Alloin, D., 2008, ApJ, 679, 310

Hägele, Guillermo F.; Díaz, Ángeles I.; Cardaci, Mónica V., et al. 2007, MNRAS, 378, 163

Jang & Lee 2014, in preparation

Knapen 2005, A&A, 419, 141

Maoz, Dan; Barth, Aaron J.; Ho, Luis C., et al. 2001, AJ, 121, 3048

Nasonova, O. G.; de Freitas Pacheco, J. A.; Karachentsev, I. D., et al. 2011, A&A, 532, 104

Ryder, S. D.; Knapen, J. H.; Takamiya, M., et al. 2001, MNRAS, 323, 663

Seo, Woo-Young; Kim, Woong-Tae, 2013, ApJ, 769, 100