은하의 화학적 진화에 주변 환경이 미치는 영향에 관한 연구

● 정현진[1], 이석영[2], 경재만[1]

한국천문연구원[1], 연세대학교[2]

1. 과학 목적 및 요약

은하는 어떻게 생성되었으며 어떤 과정을 거쳐 진화해왔을까? 이 질문에 대한 답을 얻기 위해서는 은하의 과거 별 생성 역사 및 현재의 별 생성 여부를 알 수 있는 흡수선 및 방출선 분석이 필수적이다. 이에 본 관측 제안팀은 GMT-GMACS를 이용하여 비교적 가까이에 있는 은하단 내 다양한 종류의 은하에 대해 분광관측을 수행하고자 한다.

처음으로 은하를 형태에 따라 분류했던 허블은 극히 단순한 형성 과정을 통해 타원은하가 먼저 생성되고 이들이 렌즈형 은하를 거쳐 나선은하로 진화해갈 것이라 생각하였다. 그러나 최근 연구 결과를 종합해보면, 은하의 생성 과정은 다음과 같을 것으로 예측된다. 먼저 중력의 영향 아래에서 최초의 밀도 요동 붕괴에 의해 암흑물질 헤일로가 형성되는데 이때 작은 헤일로들이 먼저 생겨난 후 이

들의 병합으로 좀 더 큰 헤일로가 만들어진다. 최초의 은하는 바로 이 암흑물질 헤일로가 먼저 발달된 지역의 중심부에서 형성되는데, 암흑물질 헤일로가 병합을 통해 커져가면 은하를 구성하는 바리온도 그곳에 모이게 되기 때문이다. 이렇듯 암흑물질이 많이 몰려 있는 곳에는 큰 중력장이 형성되고 초기의 바리온 입자들이 그 중심부로 끌려들어가면서 점점 밀도가 높아지고 차가운 가스들로부터 별 그리고 은하가 탄생하게 되는 것이다. 이때 탄생하는 은하는 대부분 원반 형태를 가지고 있었을 것으로 생각되며, 이런 은하는 주변의 매우 작은 은하가 유입되거나 차가운 가스를 끌어들이면서 지금의 우리은하 형태의 나선은하로 성장했을 것이다. 이에 반해 타원은하는 비슷한 규모의 나선은하가 충돌하여 생겼을 것으로 생각되는데, 여기서 주목해야 할 점은 z~0에서 관측되는 거대 타원은하의 특성을 재현하기 위해서는 비슷한 규모의 은하 간 병합은 우주 초기(z~2)에 끝나고 그 이후로는 질량이 작은 은하와 병합하면서 크기만 커지는 방향으로 진화해야 한다는 것이다.

실제로 타원은하는 과거에 은하 간 병합이 용이했을 것으로 생각되는 밀도가 높은 지역에서 주로 발견된다. 그러나 거대한 중력장인 은하단에 있는 은하는 매우 빠른 속도로 움직이므로 은하단 중심부에서 은하 간 병합은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 흥미로운 사실은 일반 관측보다 노출시간을 길게 준 은하단 내 은하의 측광관측 연구에서 약 40%의 은하가 은하 간 병합의 흔적을 보인다는 점인데, 이런 은하의 경우 현재의 은하단이 아닌 중력장이 작은 환경에서 은하 간 병합을 겪은 후에 현재의 은하단으로 흘러들어왔을 가능성이 있다. 이렇듯 복잡하고 다양한 과정을 거쳐 진화해온 은하의 기원을 연구하기 위해서는 그 형성 역사를 고스란히 반영하는 은하의 화학적 특성 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 은하단 내 은하의 흡수선 및 방출선 분석을 통해 은하의 별 생성 과정을 분석하고, 은하 진화에 질량 등 은하단 자체 특성 및 은하단 내 은하의 위치, 주변 은하와의 상호작용 등, 환경적 요인이 미치는 영향을 연구하고자 한다. 특히 최근 나트륨 흡수선(5890Å, 8190Å) 세기 분석 연구에 의하면 거대 타원은하의 경우 초기질량함수나 나트륨 함량([Na/Fe])이 일반 은하와 다를 수 있으며, 이때 은하의 질량 및 집중도(concentration index)가 중요한 영향을 미쳤을 가능성이 높다. 그러므로 다양한 질량을 가지는 은하의 화학적 조성을 연구함으로써, 나트륨 흡수선 세기에 특이 현상을 보이는 은하가 환경적 요인에 어떤

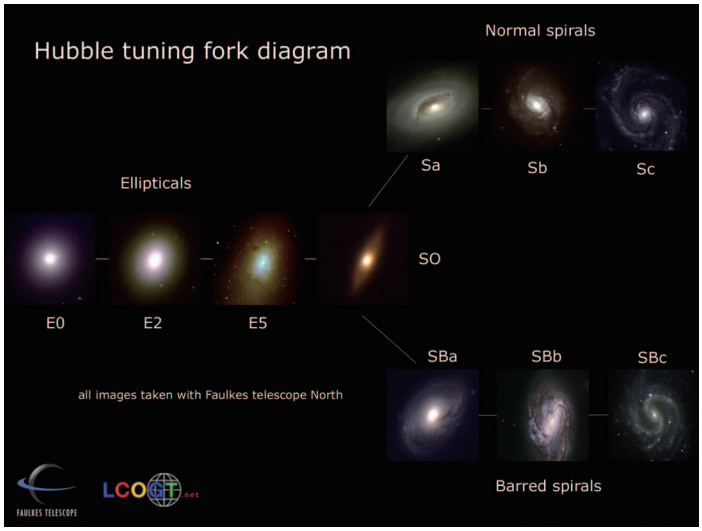


그림 1. 허블의 형태에 따른 은하 분류 그림. 허블은 은하를 형태에 따라 타원은하, 렌즈형 은하, 나선은하, 그리고 막대나선은하로 분류하였다.

영향을 받는지 이해할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한 본 연구를 위해 자외선, 가시광선 및 적외선 등 다파장 측광 자료를 최대한 활용하여 은하의 형태 및 측광학적 그리고 분광학적 특성을 같이 분석할 계획이며, 다양한 적색이동에 있는 은하단(최소 3개의 은하단, 8190Å에 있는 NaI 분석을 위해 z~0.05 정도의 은하단 하나 포함)을 대상으로 함으로써 우주 초기부터 현재까지 다양하고 복잡한 은하 형성 및 진화, 그리고 이에 영향을 미치는 환경적 요인에 대한 총체적인 이해를 얻고자 한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

은하단은 다양한 형태의 수많은 은하들이 모여 있다는 점 이외에도 은하단 자체가 은하 진화에 영향을 미치는 환경 요인으로 작용한다는 점에서 흥미로운 연구 대상이다. 즉 은하단 내 은하는 주변의 더 큰 은하에게 기체를 빼앗기거나(strangulation), 은하단의 거대 중력장 내에서 뜨거운 가스의 압력에 의해 기체

를 잃을 수 있으며(ram pressure stripping), 주변 은화와의 지속적인 조석 상호작용(galaxy harassment)을 겪을 수 있다. 이런 은하단 환경 효과는 관측을 통해서 확인할 수 있는데, 은하단 중심에 가까울수록(즉 고밀도 지역일수록) 붉은색을 띠는 (즉 새로운 별을 거의 만들어내지 못하고 있는) 타원 형태의 은하가 많이 발견되며 외곽부에서는(즉 저밀도 지역에서는) 나선팔을 가지고 있는 은하가 많이 발견된다(Dressler 1980). 또한 저밀도 지역에 있는 은하일수록 높은 별 생성률을 가지며 동일한 질량의 은하라도 더 큰 암흑헤일로에 있을 경우 별 생성률은 낮아진다(van den Bosch et al. 2008). 이는 은하가 어떤 환경에 있느냐에 따라 별 생성 역사가 달라질 수 있음을 의미한다. 그렇다면 환경에 따라 서로 다른 특성을 가진 은하가 형성되는 것일까? 최근 연구를 종합해보면, 암흑물질 헤일로 속 바리온으로부터 형성된 원시은하는 나선은하의 형태를 가졌을 것으로 생각된다. 이 은하들은 암흑물질 헤일로가 충돌과 병합의 과정을 겪을 때마다 함께 충돌과 병합의 과정을 겪으면서 형태와 특성이 끊임없이 변화해왔을 것이다. 그렇다면 오늘날 관측되는 거대 타원은하와 나선은하는 언제 어떻게 생겨났으며 주변 환경에 어떤 영향을 받아 은하단 내에서 서로 다른 위치에 존재하는 것일까?

먼저 나선은하의 경우 원시은하로부터 출발한다. 처음 탄생하는 은하는 대부분 원반의 형태를 가졌을 것으로 예측된다. 이렇게 만들어진 원반 형태의 은하는 주변의 작은 은하와 병합하거나 주변의 차가운 가스가 유입되면서 z~0에서 발견되는 우리은하와 같은 거대 나선은하로 성장하게 된다. 그렇다고 해서 오늘날 발견되는 나선은하가 과거에도 꼭 나선은하였을 필요는 없다. 은하 형성 모형에 의하면 오늘날의 은하는 은하 간 충돌과 병합 과정을 거치면서 그 형태 역시 변화할 수 있다. 예를 들어, 두 개의 나선은하가 병합하면서 폭발적으로 새로운 별을 만들어내는 은하(starburst galaxy)가 만들어졌다가 이후 새로운 별을 만들 수 있는 기체가 소진되면서 타원 형태의 은하로 진화했다가 주변에서 기체가 유입되면서 렌즈형 은하가 되거나 질량이 큰 나선은하와 병합하면서 나선은하 형태로 변화할 수 있는 것이다. 즉 같은 나선은하라도 다양한 환경 조건하에서 그 성장 과정은 다를 수 있으며 이에 따라 은하의 화학적 성질은 차이를 보일 수 있다.

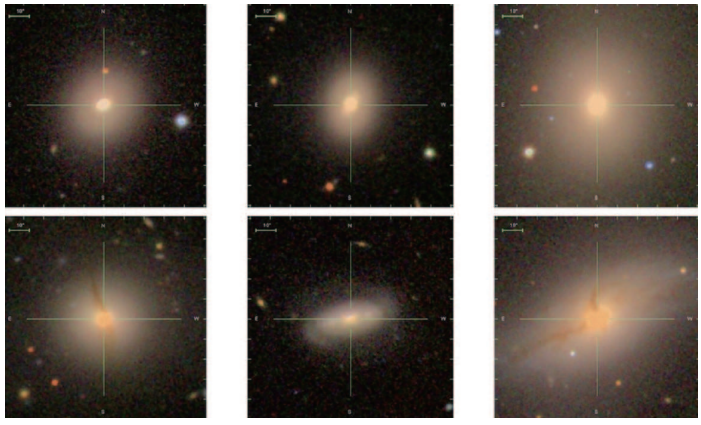
한편 타원은하는 비슷한 질량의 나선은하 간 병합(major merger)으로부터 시작된 것으로 보인다. 꽤 오랜 시간 학계에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비슷한 규모의 나선은하가 충돌하면 타원 형태의 은하가 만들어짐을 증명해왔다

(Toomre & Toomre 1972). 그러나 문제는 이렇게 만들어진 은하의 경우 z~0에서 관측되는 거대 타원은하의 관측된 특성을 재현하지 못한다는 데 있다. 그 대표적인 예가 [α /Fe] 값이다. 알파 원소(α -elements)는 알파 입자(α particle)인 헬륨 포획(capture) 과정 중 만들어지는 원소로 수소, 네온, 나트륨, 마그네슘, 칼슘 등을 일컫는다. 이 원소는 비교적 무거운 Type 2 초신성이 폭발하면서 주로 생성되는데, 이 Type 2 초신성은 알파 원소는 많이 방출하는 반면 철은 방출하지 못한다. 이와 달리 상대적으로 작은 질량을 가지는 Type 1 초신성의 경우 철까지 모두 방출하기 때문에 별 생성이 짧은 시간에 이루어져 무거운 Type 2 초신성의 영향만 받은 경우 [α /Fe] 값은 커지며, 별 생성이 긴 시간에 걸쳐 이루어진 경우 [α /Fe] 값은 작아지게 된다. 그러므로 이 값을 통해 은하의 형성 과정을 추측할 수 있는데, 거대 타원은하의 경우 0.3 정도의 값을, 나선은하의 경우 0.0 정도의 값을 갖는다. 즉 거대 타원은하의 경우 별 생성이 은하 형성 초기에 집중되어야 한다는 것인데, 과거 무수한 은하 간 병합으로 만들어진 타원은하가 z~0에서 관측되는 거대 타원은하의 관측된 특성을 재현하기 위해서는 타원 형태를 만드는 데 필수적인 비슷한 규모의 나선은하 간 충돌과 병합이 매우 먼 과거에 끝났어야 한다. 이를 설명하기 위해 타원은하의 중심부는 우주 초기 아주 효율적인 별 생성을 통해 만들어진 반면 외곽부는 질량이 아주 작은 은하와의 병합으로 만들어졌다는 주장이 지지받고 있다(van Dokkum et al. 2010). 이 주장이 맞는다면, 타원은하의 중심부와 외곽부의 화학적 성질은 다를 수 있다.

최근 은하의 화학적 진화를 설명하는 데 있어 가장 주목받고 있는 원소는 나트륨이다. 몇몇 타원은하의 근적외선 영역에서의 나트륨 흡수선 세기를 측정한 결과 항성 진화 모델에서 예측하는 것보다 훨씬 강하게 나타나는데, van Dokkum & Conroy(2011)는 이런 은하의 경우 기존의 초기질량함수(Initial Mass Function)에 질량이 작은 별을 더 많이 포함시킨 변형된 형태의 초기질량함수를 가정함으로써 자연스럽게 설명할 수 있다고 주장하였다. 새롭게 생성된 항성종족의 질량 분포를 나타내는 초기질량함수는 은하의 형성 및 진화를 연구함에 있어 가장 근본이 되는 지표 중 하나이다. 학계에서는 서로 다른 환경에서 태어나는 항성종족을 관측한 자료를 바탕으로 오랜 시간 단일한 초기질량함수 가능성에 무게를 두어왔지만, 은하의 초기질량함수가 다를 수 있다는 주장은 꾸준히 제기되었다. 위의 주장대로 은하마다 초기질량함수가 다르다면 은하 진화 모델은

이를 반영하여 최소 수십 가지의 모델을 새로 만들어내야 하는 등 새로운 도전에 직면하게 될 것이며, 은하 형성 및 진화에 대한 이해 역시 새로운 모델을 바탕으로 다시 연구되어야 할 것이다. 그러나 이에 앞서 근적외선 영역에서보다 훨씬 높은 signal-to-noise(S/N) 값을 갖는 가시광선 영역의 나트륨 흡수선의 세기를 분석하고 초기질량함수가 변화할 경우 영향을 받을 수밖에 없는 다른 흡수선(예를 들어 Mgb, Fe5270)의 세기에 대한 종합적인 검증 작업이 선행되어야 한다. 이에 본 연구팀은 은하 전천후 탐사 연구인 SDSS의 자료를 좀 더 정밀하게 분석한 OSSY 카탈로그를(Oh et al. 2011) 이용하여 적색이동 0.08 이내에 있으면서 r 밴드 절대등급이 -20.5보다 밝은 거대 은하 전체에 대한 측광학 및 분광학적 특성(색, 등급, 속도 분산 등) 및 흡수선과 방출선 세기를 분석하여 기존 연구에서 사용된 은하 수보다 최소 수십 배 많은 나트륨 흡수선이 강한 은하를 찾아냈다[그림 2]. 그리고 이 자료를 바탕으로 은하의 형태에 따라 나트륨 흡수선 초과 현상의 기원이 다름을 발견하였는데, 나선은하의 경우 성간물질(Interstellar Medium)에 의해 나트륨 흡수선이 세게 나타났을 가능성이 높다. 반면 타원은하의 나트륨 흡수선 초과 현상의 기원은 최근 많은 관심을 받고 있는 은하 초기질량함수변화에 따른 것이 아니라 나트륨 금속함량 자체가 은하 형성 초기 증가함으로써 나타날 수 있다[그림 2]. 위의 주장대로 타원은하의 중심부와 외곽부가 서로 다른 형성 과정을 거쳐 만들어졌다면 은하의 위치에 따라 나트륨 흡수선의 세기 역시 다른 양상을 보일 것이다.

그런데 왜 타원은하는 주로 고밀도 지역에서 발견되는 것일까? 고밀도 지역에서의 빈번한 은하 간 충돌과 병합이 타원 형태의 은하가 만들어질 수밖에 없는 환경 요인으로 작용하는 것일까? 그러나 고전 역학적 이해에 따르면 은하단은 은하단 자체가 거대한 중력장의 역할을 하기 때문에 은하단 중심부에 있는 은하일수록 빠른 속도로 움직이게 되어 은하 간 병합은 거의 불가능하다. 그렇다면 은하단 중심부에 있는 은하들은 병합의 흔적을 보이지 않을까? 대답은 그렇지 않다. 적색이동 0.07에 있는 Abell 2670 은하단을 자세히 관측한 자료를 보면 많은 수(~40%)의 붉은색 은하들이 은하 병합(dry merger)의 흔적을 보인다(Sheen et al. 2012). 이는 기존의 이해에 반하는 것처럼 보이지만 이런 은하들이 현재의 은하단에 속하기 이전에 이미 병합을 겪은 후 흘러들어온 것이라면 설명 가능하다(Yi et al. 2013). 사실 은하 형성 모델에 따르면 거대 은하단은 작은 은하군이 서



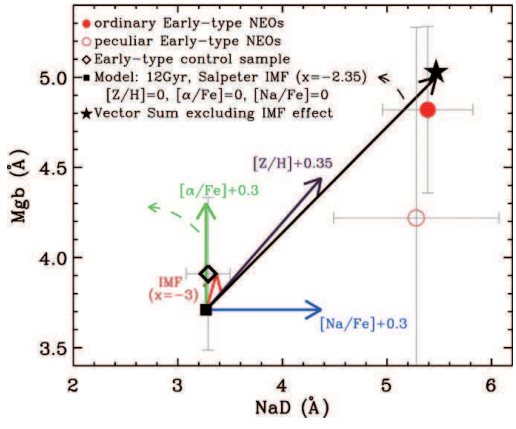


그림 2. 나트륨 흡수선 세기의 초과 현상을 보이는 은하 및 이 은하들의 관측된 금속함량과 항성종족 모델 예측치 비교 그림.

로 병합함으로써 형성될 수 있으며, 은하 형태 변화의 핵심인 은하 간 충돌과 병합은 은하군 규모에서 가장 활발하게 일어난다고 알려져 있다. 즉 은하군 환경에서 은하는 나선은하에서 타원은하로 점점 변화해간다. 또한 은하군에 속한 은하들은 서로 비슷한 특성을 보이는 것으로 알려져 있는데(Philips et al. 2013), 은하단이 은하군의 병합으로 만들어진다면 은하단 내 중심은하와 주변의 위성은하 역시 비슷한 특성을 보일 가능성이 있다(Lee et al. 2014). 물론 그렇다고 은하군에 나선은하가 없는 것은 아니다. 그렇다면 왜 밀도가 높은 지역에선 나선은하를

찾을 수 없는 것일까? 아마도 위에서 설명한 은하단의 환경 효과(strangulation, ram pressure stripping, galaxy harassment 등) 때문일 것으로 예측되는데, 이는 은하의 형태뿐만 아니라 화학적 성분에도 영향을 미칠 것이다. 실제로 처녀자리 은하단(virgo cluster) 내 나선은하를 은하단 내 위치에 따라 분석해본 결과 중심부에 있는 나선은하의 산소 함량이 높은 것으로 나타났으며(Skillman et all 1996), 서로 다른 은하단 내 불규칙 은하를 비교해본 결과 역시 거대 은하단에 존재하는 은하일수록 산소 함량이 높은 것으로 나타났다(Petropoulou et al. 2012). 그러나 최근 Hughes et al.(2013)의 연구에 의하면 은하단과 필드 환경에 속한 은하들의 산소 함량은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 이는 환경에 따른 은하의 화학적 진화에 대한 이해가 아직 명확하지 않음을 보여준다.

이에 본 연구에서는 비교적 가까이에 있는 은하단 내 은하의 (Mr > −19의 왜소은하 포함) 흡수선 및 방출선 분석을 통해 은하의 별 생성 과정을 분석하고, 은하 진화에 질량 등 은하단 자체 특성 및 은하단 내 은하의 위치, 주변 은하와의 상호작용 등, 환경적 요인이 미치는 영향을 연구하고자 한다. 특히 밝은 은하의 경우 중심부와 외곽부를 나누어 관측함으로써 은하 형성 및 진화에 대한 이해를 얻고

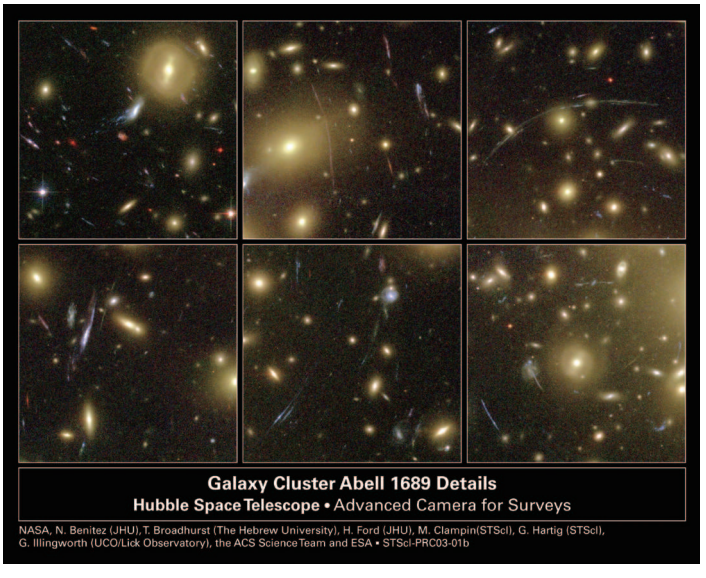


그림 3. HST로 관측된 Abell 1689 은하단에 속한 은하들의 모습.

자 한다. 또한 본 연구를 위해 자외선, 가시광선 및 적외선 등 다파장 측광 자료를 최대한 활용하여 은하의 형태 및 측광학적, 그리고 분광학적 특성을 같이 분석할 계획이며, 다양한 적색이동에 있는 은하단(최소 3개의 은하단, 8190Å에 있는 NaI 분석을 위해 z~0.05 정도의 은하단 하나 포함)을 대상으로 함으로써 우주 초기부터 현재까지 다양하고 복잡한 은하 형성 및 진화, 그리고 이에 영향을 미치는 환경적 요인에 대한 총체적인 이해를 얻고자 한다.

2) GMT의 필요성

은하의 정확한 항성종족 분석을 위해서는 충분히 좋은 S/N 값을 가지는 분광 데이터가 필요하다. 특히 멀리 있는 은하단이나 은하의 외곽부 관측, 그리고 NaI8190과 같이 약한 세기의 흡수선 관측을 위해서는 충분한 광량 확보를 통해 안정적인 연속선(continuum)을 갖는 분광 데이터를 얻는 것이 중요하다. 우리는 6.5m 마젤란 망원경을 이용하여 중심부 등급이 17(AB mag) 정도인 은하를 2시간 노출을 주어 만족스러운 분광 데이터를 얻은 경험이 있는데, 이는 조금 더 어두운 은하를 관측하기 위해서는 상당히 많은 시간이 필요함을 의미한다. 또한 Keck 망원경을 이용한 van Dokkum의 NaI8190 연구에서도 가까이에 있는 거대 타원은하를 대상으로 하였음에도 불구하고 오차를 줄이기 위해 여러 은하의 분광 데이터를 하나로 합쳐서 분석에 이용하였다. 그러므로 어두운 은하가 다수 포함되어 있는 은하단의 항성종족 분석을 위해서는 GMT 같은 비교적 넓은 시야를 가지면서 multi-object 분광관측이 가능한 초대형망원경이 꼭 필요하다.

3) 국내외 연구 동향

은하단 관측은 다양한 종류의 은하를 한 번에 관측함과 동시에 은하단 환경효과에 대한 연구가 가능하다는 점에서 매력적인 관측 대상이다. 이에 다양한 적색이동에서 은하단 관측이 수행되어왔는데 멀리 있는 은하단의 경우 광량의 한계로, 가까이에 있는 은하단의 경우 좁은 시야의 한계로 비교적 밝은 은하의 중심부에 집중하여 연구가 수행되었다.

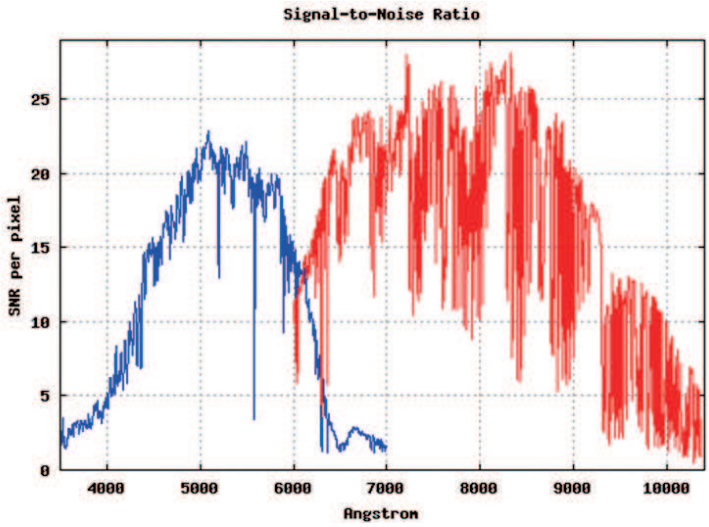


그림 4. GMT/GMACS 노출시간 계산기를 이용하여 구한 파장별 S/N비. z~0.1 정도의 r-band 절대등급이 -15인 은하를 4개 거울로 1시간 관측했을 경우(slit width=1arcsec) 대략 전 파장대에 걸쳐 S/N~20 정도의 관측 결과를 얻을 수 있다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 연구에서는 비교적 가까운 은하단($z < 0.1$)에 속한 다양한 질량의 은하(왜소은하부터 거대 타원은하까지)를 비교적 깊게 관측하여 흡수선 및 방출선을 분석함으로써 타원은하와 나선은하(그리고 왜소은하)의 기원 및 환경 요인이 은하의 화학적 진화에 미치는 영향을 연구하고자 한다. GMACS의 시야와 8190Å에 있는 NaI(NaI8190) 흡수선의 효과적인 관측을 고려하여 적색이동이 0.05 정도 되는 은하단(예를 들면, Abell3128) 및 은하단 특성에 따른 은하의 특성 차이 연구를 위해 최근 은하단-은하단 병합을 겪은 은하단(예를 들면, Abell2163)을 포함하여 최소 3개의 은하단에 대해 관측을 수행하고자 한다. 또한 은하의 중심부와 외곽부에서 화학적 성질에 차이가 존재하는지 연구하기 위해 비교적 밝은 은하를 대상으로 외곽부 분광관측을 수행할 계획이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 연구에서는 저분해능으로 다중분광관측이 가능한 GMACS를 사용하여 은하단에 속한 은하를 관측하고자 한다. 분광관측을 수행하기 위해 SDSS(LSST) 등 전처 후 탐사 자료는 물론 공개 아카이브 자료 및 본 연구진이 그동안 관측한 측광 자료로부터 은하단에 속할 가능성이 높은 은하 후보군을 고른 후 최소한 은하단의 비리얼 반경 안에 들어오는 은하에 대해 분광관측을 수행하려고 한다. z~0.1 정도의 은하단을 비리얼 반경까지 관측할 경우 GMACS의 시야를 고려하면 한 번의 노출로도 가능할 것으로 예상되지만, 한 번에 관측할 수 있는 슬릿의 숫자가 한정되어 있으므로 은하단 내 관측해야 하는 은하의 수가 약 1000 개일 경우 대략 은하단마다 4~5번의 노출이 필요할 것으로 생각된다. 또한 Mr이 -15 정도인 은하에 대해 S/N~20 정도의 관측 자료를 얻기 위해서는 약 1시간의 노출시간이 요구된다. 그러므로 하나의 은하단에 대해 최소 5시간의 관측 시간이 필요하며(slit mask 교체 및 기타 시간을 포함하면 6시간), 본 연구의 목적인 은하단 특성에 따른 은하 진화 연구를 위해서는 약 20시간의 시간이 필요할 것으로 예측된다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 연구는 기존 연구와 비교하여 비교적 어두운 은하(왜소은하)를 포함한다는 점에서 차별성을 갖는다. 비교적 가까운 거리에 있는 은하단에 속한 다양한 질량의 은하를 분광관측함으로써 은하의 화학적 진화에 주변 환경이 미치는 영향에 대해 연구하고자 하는 본 연구를 통해 답을 얻고자 하는 질문은 다음과 같다.

(1) 은하의 형태학적 특성에 환경 요인이 미치는 영향 연구 : 타원은하는 왜 고밀도 지역에서 주로 관측되는가? 반대로 나선은하는 왜 저밀도 지역에서 주로 관측되는가? 은하의 진화에 있어 은하단은 어떤 영향을 미치는가? 왜소은하 역시 비슷한 양상을 보일까? 모은하와 주변의 왜소은하는 비슷한 특성을 보이는가? 은하단의 위치에 따라 은하의 화학적 특성은 달라질까?

(2) 은하의 중심부와 외곽부 특성 차이 연구 : 타원은하의 중심부와 외곽부는 금속함량

(특히 α/Fe와 Na/Fe) 및 운동학적 관점에서 차이를 보이는가? 차이를 보인다면 (혹은 차이를 보이지 않는다면) 타원은하의 형성과 관련하여 어떤 해석이 가능한가? 나선은하의 중앙팽대부는 타원은하와 비슷한 특징을 보이는가?

위의 질문에 대한 답을 찾아가는 과정에서 우리는 가장 근본적인 질문인 은하란 무엇이며, 질량 그리고 형태에 따라 은하가 어떻게 진화해왔는지에 대한 이해의 폭을 넓힐 수 있을 것이다.

5. 인용문헌

Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351

Hughes, T. M., Cortese, L., Boselli, A., Gavazzi, G., Davies, J.I. 2013, A&A, 550, 115

Jeong, H. et al. 2013, ApJS, 208, 7

Lee, J. H. et al. 2014, ApJ, in press (arXiv:1406.6421)

Oh, K. et al. 2011, ApJS, 195, 13

Petropoulou, V., Vılchez, J., Iglesias-Páramo, J. 2012, ApJ, 749, 133

Phillips, J. I. et al. 2014, MNRAS, 437, 1930

Sheen, Y., Yi, S. K., Ree, C. H., Lee, J. 2012, ApJS, 212, 8

Skillman, E. D., Kennicutt, R. C., Shields, G. A., Zaritsky, D. 1996, ApJ, 462, 147

Toomre, A. & Toomre, J. 1972, ApJ, 178, 623

van den Bosch, F. C. et al. 2008, MNRAS, 387, 79

van Dokkum, P. G. et al. 2010, ApJ, 709, 1018

van Dokkum, P. G. & Conroy, C. Nature, 468, 940

Yi, S. K., Lee, J., Jung, I., Ji, I., Sheen, Y. K. 2013, A&A, 554, 122