G-CLEF를 이용한 외계행성 후보의 시선속도 후속 관측

● 이병철, 한인우, 김강민, 정광희

한국천문연구원

1. 과학 목적 및 요약

1992년 펄사 PSR B1257+12 주위에서 최초의 외계행성(exoplanet)이 발견된 이후, 관측 기술의 향상과 더불어 다양한 방법으로 외계행성 탐색 연구가 수행되고 있다. 2000년대 후반까지만 해도 분광관측을 이용한 시선속도(radial velocity) 방법으로 가장 많은 외계행성이 발견되었다. 그러나 2009년에 발사된 케플러(Kepler) 우주망원경에 의하여 외계행성 탐색 연구에 혁명적인 변화가 일어났다. 즉, 식현상(transit) 방법을 이용하여 3,500여 개의 외계행성 후보가 발견되었고, 이 중에서 305개의 별 주위에서 715개가 실제 외계행성으로 확인되었다. 이것은 그때까지 발견된 외계행성의 70%에 해당하는 수치다.

식현상 방법으로 발견된 외계행성 후보가 실제 외계행성임을 확인하기 위해서는 분광관측을 통한 시선속도 방법으로 궤도운동을 확인해야 한다. 또한, 분광

관측을 이용하면 외계행성의 가장 중요한 물리량 중의 하나인 질량을 결정할 수 있다. 식현상 방법에 의하여 외계행성의 크기를 알 수 있으므로, 결과적으로 행성의 밀도를 계산할 수 있어 지구처럼 암석으로 이루어진 행성을 확인하는 데는 두 방법이 같이 사용되어야 한다. 즉 케플러 우주망원경에 의하여 발견된 수천 개의 외계행성 후보에서 외계행성 형성에 관한 통계적 연구는 가능하지만, 각각의 행성에 대하여 자세한 물리적 특징을 연구하기 위해서는 후속 분광관측이 요구된다.

시선속도 후속 관측의 또 다른 장점으로는 식현상에 의해 발견된 외계행성 외에 또 다른 외계행성의 존재를 추가로 발견할 수 있다는 것이다. 2014년 10월 현재까지 1,130여 개의 외계행성계에서 모두 1,800여 개의 행성이 발견되었으며, 이 중에서 다행성계는 467개로 밝혀졌다. 케플러 관측 결과에서도 대부분의 외계행성이 다행성계일 것으로 생각된다. 외계행성이 한 개만 존재하는 외계행성계의 시선속도 곡선은 대부분 궤도 이심률이 0.1 이상임을 보여준다. 그러나 Rodigas & Hinz(2009)의 모의실험 결과 행성이 두 개 있을 경우 궤도가 원형이 되는 경우가 많았다. 따라서 한 개의 외계행성이 발견된, 이심률이 비교적 작은 행성들 중 약 15%가 숨겨진 다른 행성이 있을 가능성이 있다. 일반적으로 식현상 방법에 의한 외계행성 발견은 궤도반경이 작은 행성 쪽으로 편향되어 있으므로, 시선속도를 지속적으로 관측하면 더 큰 궤도반경을 가진 행성도 발견할 수 있을 것이다.

식현상으로 발견된 외계행성의 후속 분광관측에서 가장 흥미로운 점은, 이를 통해서 외계행성대기의 물리적 현상을 알 수 있다는 것이다. 식현상이 일어날 때(외계행성이 모성을 가릴 때) 획득한 스펙트럼에서, 식현상이 아닐 때 획득한 스펙트럼을 제거하면 순수하게 행성에 기인한 스펙트럼만 얻을 수 있다. 만약 행성대기에 수증기와 같은 분자가 존재한다면 이는 별빛의 특정 부분을 흡수하게 되고, 그 결과 망원경에 도착한 빛에서는 약한 신호가 남겨지게 된다. 이러한 기술을 활용하여 외계행성대기의 다양한 구조와 성분에 대한 중요한 정보를 제공할 것이다.

현재 NASA가 주관하는 케플러 우주망원경은 식현상 방법을 이용한 외계행성 탐색 연구를 종료하고 두 번째 미션(K2; Kepler mission 2)을 진행하고 있다. ESA가 2013년 말에 발사한 GAIA는 측성학과 식현상 방법으로 수천 개의 외계행성

을 발견할 것으로 예상하고 있다. 이 외에도 크고 작은 다양한 종류의 식현상 외계행성 탐색 연구가 진행 혹은 계획 중이다. 따라서 GMT가 첫 관측을 시작하는 2020년 무렵에는, 이미 다른 프로그램에서 식현상으로 발견한 외계행성에 초점을 맞춰서 후속 관측하는 것이 연구 경쟁력을 높일 것으로 생각한다. 즉, 지구형 외계행성 중에서 생명체 서식 가능 영역(HZ; habitable zone)에 존재하는 후보들을 대상으로 후속 고분산 분광관측을 진행하는 것이 최선책으로 보인다. 이를 위하여 우리는 현재의 연구 수준을 직시하고 단계별 전략으로 GMT 시대를 대비하여야 하겠다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

2000년대 초반, 식현상 방법으로 외계행성이 발견[1]되면서 외계행성 연구는 큰 전환점을 맞이하게 되었다. 당시만 해도 외계행성 발견 그 자체에 집중되었던 연구가 식현상 외계행성의 발견 이후, 행성의 물리량에 더욱 관심을 가지게 되었던 것이다. 식현상으로 발견된 외계행성의 후속 분광관측이 진행될 경우 과학적인 가치가 매우 크다. 시선속도 방법으로는 행성 검출과 궤도요소를 해석하는 데에는 매우 성공적인 반면, 행성계의 궤도경사각을 짐작할 수 없기 때문에 행성의 질량을 정확하게 계산할 수 없는 단점이 있다. 하지만 식현상 방법을 병행한다면 행성 그 자체의 물리적 특성(행성의 질량, 부피, 평균밀도, 행성대기성분 등)을 밝힐 수 있는 장점이 있다. 이는 이미 여러 외계행성 전문가들에 의해서 연구가 진행되고 있다(Charbonneau et al. 2005; Knutson et al. 2007; Snellen et al. 2008).

외계행성의 대기성분을 연구하는 가장 근본적인 이유는, 생명체가 서식 가능하며 지구와 유사한 제2의 지구가 존재하는가에 대한 의문에서 시작되었다. 이를 위해서는 먼저 서식 가능 지역에서 지구와 유사한 크기의 외계행성을 찾아야 한다. 그다음에는 행성의 대기성분을 검출하는 연구를 진행하는 식이다. 행성대기 연구에서 초유의 사건은 시선속도 방법으로 발견된 HD 209458 b[2]

1 식현상 방법으로 발견된 최초의 행성은 2002년 발견된 OGLE-TR-56 b(Udalski et al. 2002)이다.

(Charbonneau et al. 2000)을 식현상 방법으로 검증(Charbonneau et al. 2002)하면서 시작되었다. 이를 계기로 식현상으로 발견된 외계행성대기 연구로부터 다양한 종류의 대기성분이 검출되었으며 아직도 꾸준하게 진행 중이다.

앞으로는, 특이한 외계행성의 발견뿐만 아니라 행성의 물리적 특성을 연구하고 나아가서는 외계생명체의 서식 가능성이나 흔적을 연구하는 것이 외계행성 연구의 중점 분야가 될 것이다. 흥미로운 사실로는, 최근 발표된 《네이처(Nature)》 논문에서 외계행성 연구와 관련된 주제 중에서 외계행성의 대기에 관한 연구가 다수 포함된 점을 들 수 있다. 《네이처》가 천문학계의 주 저널이 될 수는 없다 하더라도, 일반 대중의 관심 대상이 되고 막대한 연구비 투자의 모티브임을 간과해서는 아니 되겠다.

2) 현재의 한계와 GMT의 필요성

Charbonneau et al.(2002)은 허블 우주망원경으로 HD 209458 b의 나트륨 흡수선이 밴드폭 12Å에서 0.023%, Sing et al.(2008)은 동일한 자료를 분석하여 밴드폭 4.4Å에서 0.11%가 증가하는 것을 밝혔다. 이후, HD 189733 b의 대기관측 연구에서 밴드폭 1.5Å 0.135%(Snellen et al. 2008), 밴드폭 12Å에서 0.067%(Redfield et al. 2008)의 흡수가 있음을 발표하였다. 스피처(Spitzer) 우주망원경을 이용한 연구에서는 HD 189733 b의 대기에서 물의 흔적을 찾기 위한 시도(Tinetti et al. 2007)를 하였고, Swain et al.(2008)은 허블 우주망원경을 사용하여서 HD 189733 b의 대기에서 메탄(methane)과 물을 찾는 시도를 하였다. 최근에는 WASP-17 b[3](Anderson et al. 2010)에 대한 연구가 진행이 되었는데 밀도가 매우 낮아서 HD 209458 b보다 부피가 5배 정도 큰 것으로 알려졌다. 따라서 나트륨(Na D1 & D2) 시그널이 상대적으로 클 것으로 예상이 된다.

반면에, 지상 대형망원경인 VLT 망원경(구경 8m)의 GIRAFFE 분광기를 이용하여 조사한 바에 따르면 밴드폭 1.5Å에서 0.55±0.13% 증가된 나트륨 흡수선을

2 HD 209458 b는 목성 질량의 0.69배, 3.5일 주기로 모성 주위를 공전한다. 모성 앞을 통과할 때 약 1.5% 별빛이 줄어들며 3시간 정도 유지된다. 분광과 측광관측이 동시에 이루어지면서 정확한 질량과 반지름도 알려지게 되었다. 2005년에는 스피처 우주망원경을 이용하며 행성의 적외선을 검출하였는데 행성의 유효온도는 적어도 섭씨 750도임이 밝혀졌다.

3 식현상으로 지금까지 발견된 가장 밀도가 낮은 행성으로 주기는 3.74일이며, 스피처 우주망원경 자료 분석 결과 질량은 목성의 0.49배, 반경은 목성의 2배로 밝혀졌다.

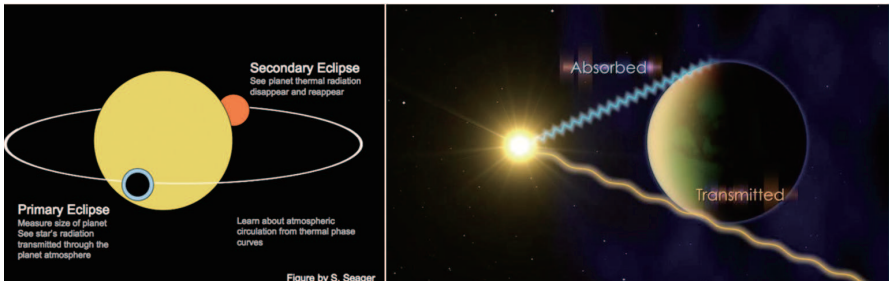

그림 1. 식현상 외계행성의 개념도. (왼쪽) 외계행성이 모성의 앞을 통과할 때 대기가 존재할 경우의 상상도(이미지 자료: Seager 2010). (오른쪽) 외계행성대기를 통과한 모성의 별빛이 특정 파장 영역에서 부분적으로 흡수(단파장 영역)하거나 전송(장파장 영역)함으로써 행성대기의 정보를 제공한다(NASA 이미지 참고).

찾았을 뿐이다. Bundy & Marcy(2000)는 Keck I 망원경(구경 10m)의 HIRES을 이용할 경우 HD 209458(H_β, H_r, Fe)와 51 Pegasi(Li, H_α, Na D1 & D2)에서, 밴드폭 0.3Å에서 최대 3-20%까지 시그널이 변할 것이라고 했다. Moutou et al.(2001)은 VLT 망원경의 UVES를 사용하여(특정 영역은 제시하지 않았지만) 밴드폭 0.2Å에서 최대 ~1%의 스펙트럼 시그널이 변할 것이라고 계산하였다. 근적외선 영역에서는 He, CO, H_2O, CH_4 등에서 변화를 찾기 위하여 Keck II/NIRSPEC을 이용한 연구가 진행 중이다(Brown et al. 2002; Moutou et al. 2003; Deming et al. 2005). Narita et al.(2005)은 Subaru/HDS를 이용한 연구에서 비록 추가적인 라인은 발견하지 못하였지만 밴드폭 0.3Å에서 전형적으로 나트륨 흡수선 시그널의 상한값이 0.1-1%까지 가능할 것으로 예측하였다. 이처럼 지상망원경을 이용한 외계행성대기관측에서는 별다른 성과를 이루지 못하였다.

현재까지 발표된 식현상 외계행성대기성분 연구 성과는 대부분 허블 우주망원경과 스피처 우주망원경을 이용한 후속 분광관측으로 이루어졌으며, 지상망원경을 이용한 연구에서는 별다른 성분을 검출할 수가 없었다. 가장 큰 원인은 지상망원경의 집광력과 분해능일 것이다. 하지만 GMT를 이용할 경우엔 이러한 문제가 많이 해소될 것으로 본다. 이와 더불어서 새로운 형태의 외계행성에 대한 대기모형 연구를 통하여 대기분자들의 조성 및 온도구조 등 분광학적 특성을 유도해내기 위한 복사전달모형 개발이 필요하겠다. HZ에 존재하는 지구와 유사한 행성으로부터 산란광에 각인된 산소(oxygen) 흡수라인은 생명체의 흔적을 추정하는 가장 유력한 생물지표로 간주된다. 이러한 이유로 외계행성대기 연구에서

는 산소 흡수선 발견이 관심의 대상이 되고 있다. Kawahara et al.(2012)는 HZ에서 발견된 외계행성 중에서 1.27μm에서 산소 성분이 검출 가능할 것인지 실험하였다. 이 실험에서 1.27μm 주위의 한밤중 대기광을 분석한 결과, 산소의 강한 대기 방출선이 밤 동안 감소하는 것을 발견하였다. 이것은 전천배경모델(sky background model)을 이용하여 가까운 10pc 이내의 M, K-형 별 목록을 대상으로, GMT 등 20-50m 구경의 차세대 지상 대형망원경을 사용한다면 지구형 행성 대기의 산소 흡수선을 찾을 가능성이 있을 것으로 보고 있다.

3) 국내외 연구 동향

외계행성대기성분을 연구하는 방법은 식현상이 일어날 때 행성대기의 특정 파장대에서 관측된 스펙트럼의 변화를 분석하는 것이다. 뜨거운 목성형(hot jupiter) 외계행성의 스펙트럼의 경우, 가시광에서 가장 변화가 많은 영역은 나트륨 라인(Na D1, D2; Seager & Sasselov 2000)이다. Charbonneau et al.(2002)은 허블 우주망원경의 STIS 분광기를 사용하여 아주 적은 양이지만 행성의 대기에서 나트륨 흡수선의 흔적을 찾았다. 이것이 첫 번째 외계행성대기를 관측한 사례가 되겠다. 또한 대기 상층부의 구름이 하층 대기를 가리고 있음을 밝혀냈다. 이후에 수소, 탄소 등 여러 가지 종류의 대기성분들이 발견되었다. 수증기의 발견은 많은 논란의 대상(Tinetti et al. 2007; Ehrenreich et al. 2007)이 되었으며, Richardson et al.(2007)은 규산염 먼지로 이루어진 구름의 존재를 나타내는 결과를 《네이처》에 발표하였다. 허블 우주망원경으로 수증기와 메탄의 발견도 보고되었다(Swain et al. 2008).

2005년 발견된 HD 189733 b는 매우 특이한 성질을 가진 외계행성으로 알려졌다. 이 행성에서는 강한 적외선 열방출 현상이 검출되었는데, 행성이 모항성의 뒤로 넘어가 사라질 때(2차 식 현상을 보일 때) 플럭스가 감소하는 것을 통하여 발견했다. 이 행성은 모성 앞을 통과하면서 별빛을 3% 가리는데, 이 값은 발견된 외계행성들 중 가장 큰 수치다. 행성이 모성 앞을 통과하면서 행성과 모성은 로시터-맥러플린 효과(Rossiter-McLaughlin effect)를 보여주기도 한다. 이 결과 규산마그네슘($MgSiO_3$)이 존재할 가능성이 있다는 결과도 나왔다(Lecavelier des Etangs et al. 2008). 또한, 외계행성들 중에서 행성표면의 지도가 작성된 첫 번째 사례이다(Knutson et al. 2007). 스피처 우주망원경을 이용하여 행성을 관측한 결과 상당

량의 수증기가 행성대기 내에 포함되어 있으며, Swain et al.(2008)은 허블 우주망원경으로 후속 관측을 한 결과 수증기와 메탄의 존재도 확인하였다. 하지만 극도로 뜨거운 환경에서 일산화탄소 대신 어떻게 메탄이 생겨날 수 있었는지는 앞으로의 연구 과제로 남아 있다.

최근에, Fraine et al.(2014)는 해왕성 크기의 HAT-P-11 b라는 외계행성의 낮은 대기층에서 수증기를 발견하였다. 지금까지는 목성형 외계행성에서 대기 전체에 두꺼운 구름이 존재하는 형태인 반면, 이번 발견은 해왕성급 행성의 낮은 대기에서 구름의 존재가 발견되었기 때문에 큰 주목을 받았다. 앞으로 추가적인 연구가 이뤄질 경우 외계행성의 표면조성과 물리적 변화에 중요한 단서를 제공할 것으로 본다. 이 외에도 식현상 외계행성이 아닌 τ Bootis b에서도 행성의 대기가 관측되기도 하였다(Brogi et al. 2012; Rodler et al. 2012).

2014년 10월 현재까지 식현상 외계행성의 개수는 케플러 우주망원경에 힘입어 1,180개 정도로 늘어났다. 직접 영상으로 관측된 행성의 개수도 51개다. 이 중에서 50여 개의 식현상 행성과 5개의 직접 영상으로 발견된 행성에 대하여 대기 분자선의 변화량, 대기온도변화, 대기구조 등이 관측되었다. 이처럼 외계행성 연구 분야에서 행성대기와 관련된 연구는 다양하게 진행되고 있다. 이를 위해서 우주망원경을 비롯한 지상의 대형망원경이 중추적 역할을 하고 있다. 최근 《네이처》에서는 외계행성과 관련하여 대기 연구 관련 논문이 주를 이루고 있으며 이 중에서 HD 189733 b의 행성대기 관련 논문 두 편이 연달아 출판되었듯이 세간의 관심이 외계행성대기 연구에 집중되고 있음을 짐작할 수 있다.

국내에서는 보현산 천문대 1.8m에 부착된 BOES(Bohyunsan Observatory Echelle Spectrograph)로 정밀 시선속도 방법을 이용하여 2003년부터 외계행성 탐색 연구를 진행 중이며, 현재까지 10여 개의 목성형 외계행성이 발견되었다. 또한, 미세중력렌즈 현상을 이용하여 2개의 행성을 발견하였으며, 극심시각 방법(timing)으로 1개의 행성을 발견한 바가 있다. 하지만 행성대기를 연구한 사례는 아직까지 없다. 현재 천문연구원에서 진행 중인 Korea Microlensing Telescope Network(KMTNet)는 칠레, 남아공화국, 호주 등 3개의 관측소에 지름 1.6m 광시야 망원경을 설치하여 미세중력렌즈 현상과 식현상을 이용하여 우리은하 벌지 영역에서 외계행성을 찾고자 하는 프로젝트다. KMTNet의 가장 큰 장점은, 3개의 관측소를 활용하여서 하나의 대상 천체를 24시간 모니터링이 가능하다는 것

이다. 2015년부터 본격적으로 탐색 연구가 시작되며, 예상되는 외계행성 발견 건수는 2015년 10개를 시작으로 2019년에는 연간 100개 이상의 외계행성을 발견할 것으로 예상한다. 특히, 식현상으로 발견된 외계행성은 GMT를 이용한 외계행성대기 연구 자료로 사용이 가능할 것이다.

표 1. 외계행성대기 관련 연도별 주요 연구 결과

년도	연구 그룹	대상 천체	관측기기	연구 내용
2002	Charbonneau et al.	HD 209458 b	Hubble	나트륨 흡수선 발견
2007	Knutson et al.	HD 189733 b	Spitzer	표면지도 작성
2008	Swain et al.	HD 189733 b	Hubble	수증기, 메탄 발견
2012	Brogi et al.	tau Boo b	VLT	행성의 궤도 운동 포착
2013	Demory et al.	Kepler-7 b	Spitzer	구름 발견
2013	Mandell et al.	WASP-12 b, WASP-17 b, WASP-19 b	Hubble	물 발견
2014	Knutson et al.	GJ 436 b	Hubble	해왕성 크기 행성에서 구름 발견
2014	Kreidberg et al.	GJ 1214 b	Hubble	수퍼지구에서 구름 발견
2014	Fraine et al.	HAT-P-11 b	Hubble/ Spitzer	해왕성 크기 행성에서 수증기 발견

3. 연구의 내용 및 방법

앞서 식현상 외계행성 연구의 후속 분광관측의 중요성을 언급한 바가 있다. 이 중에서 추가적인 행성을 찾는 연구에 관하여서는 논하지 않기로 하겠다. 이는 망원경의 운영비와 관측 시간 측면에서 판단할 때 GMT에서는 효율적이지 않기 때문이다.

1) 연구 방법

행성대기는 행성주위의 열전달을 조절하고 항성으로부터 유입되는 플럭스의 흡수되는 양을 결정하는 역할을 한다. 뜨거운 목성형 행성의 경우에는 행성의 구조, 진화 등에 막대한 영향을 미칠 것으로 생각된다. Levrard et al.(2009)은 모성의 연속적인 히팅은 행성의 대기 부피를 확장시키는 요인으로 작용되거나, 모성과 행성의 조석 작용을 증가시킴으로써 결국에는 행성의 붕괴를 초래할 수도 있다고 주장했다.

외계행성이 모항성의 앞을 통과할 때 행성대기의 정보를 알기 위해서는 후속 분광관측이 요구된다. 전송분광학(transmission spectroscopy) 혹은 흡수분광학(absorption spectroscopy)이라고 알려진 이 기술은 행성의 대기를 통과해서 나오는 별빛을 분석하는 방법이다. 모성에서 나온 빛이 외계행성의 대기를 통과할 때, 특정 파장 영역에서 라인들은 매우 강하게 흡수가 된다. 뜨거운 목성형 행성대기의 전체 스펙트럼 변화율은 항성의 10^{-4}~10^{-3}%로 계산되며, 식현상에서 이 비율만큼 특정 흡수선의 깊이가 증가할 것이다. 이와 관련하여 이미 여러 편의 연구 결과가 발표되었다(Charbonneau et al. 2002; Sing et al. 2008; Snellen et al.

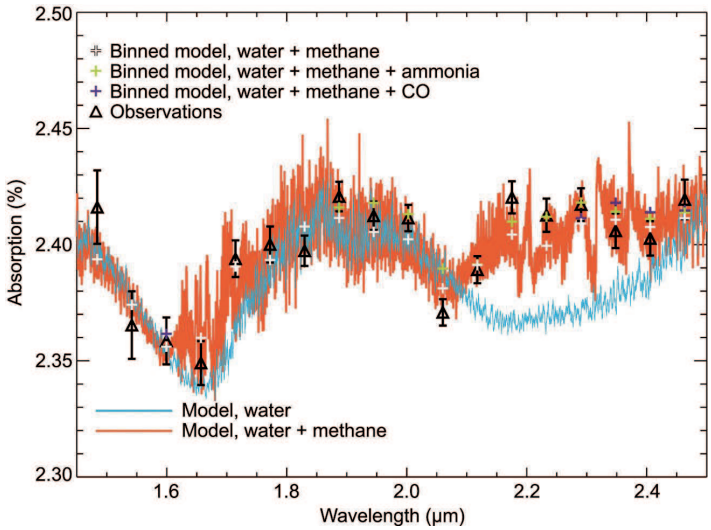

그림 2. 허블 우주망원경으로 촬영한 HD 189733 b의 식현상을 일으킬 당시의 분광 스펙트럼. 검은색 삼각형이 실제 관측된 것으로 행성대기에서 메탄이 존재할 경우의 모델과 잘 일치한다(Swain et al. 2008).

2008; Redfield et al. 2008).

다른 한편으로는, 행성대기를 통과하여 전송된 빛을 분석할 경우 특정 파장대에서 전이되는 경우가 있다. 예를 들어, 달의 먼지에 태양 빛이 부딪치면 그 먼지는 광전 효과에 의해서 전하를 띄게 된다. 전하를 띈 먼지는 서로 척력을 작용하며 이 척력이 일으키는 정전기 부양에 의해 달의 중력을 이기고 달 표면에서 떠오른다. 이것은 지구 대기에 낀 먼지와 같은 형태 혹은 얇은 안개나 아지랑이의 형태로 관측되며 해가 진 후의 어렴풋한 빛을 받고 눈에 보인다. 즉, 식현상 과정에서 모성의 별빛이 행성의 대기를 통과할 때, 대기 중에 존재하는 원자, 분자 또는 입자에 의해 흡수가 되고 이로 인하여 외계행성의 부피가 큰 것처럼 보이게 만든다. 특정한 파장에서 행성의 크기가 변하는 것으로 스펙트럼상에 나타나게 된다. 이로 인하여, 행성의 반경이 특정 파장대에서는 커지게 되는데, 뜨거운 목성형 행성의 경우에 나트륨 D 라인 영역에서 강하게 흡수가 될 것으로 예측하였다(Seager & Sasselov 2000). 이러한 식현상 외계행성에서 전송분광학 기술로 행성대기의 특성을 연구하기 위해서는 후속 고분산 분광관측이 이루어져야 하겠다.

2) 연구 대상

앞서 설명한 바와 같이 식현상 외계행성의 후속 관측을 위해서는 후보 행성들의 검증 작업이 필요하다. 더군다나, 지구형 외계행성이면서 HZ에 존재하는 후보들의 검증을 위해서는 더욱 신중하게 조사를 해야 한다. 2009년 발사된 케플러 위성의 가장 큰 목적은 '지구와 유사한 외계행성이 얼마나 일반적인가?'라는 질문에 대한 답을 찾는 것이었다. 5년 6개월 동안의 관측 결과 지구와 유사한 외계행성을 다수 발견하는 성과를 올렸다. 이들 대부분은 이미 다른 관측기기로 연구가 진행 중이며, 2019년 시작되는 GMT 시대와는 시간적인 차이로 연속적인 연구 과제로 적절치 않다.

이와 유사한 과제로, '가장 가까운 거리의 지구형 외계행성이 어디에 있을까?' 하는 의문에 답을 주고자 시작된 식현상 외계행성 탐색 과제인 Transiting Exoplanet Survey Satellite(TESS)[4]가 있다. 주요 임무는 태양 근처 밝은 항성 주위의 작은 행

4 TESS는 NASA의 우주미션으로써 식현상을 이용한 외계행성 탐색을 목적으로 설계되었으며 2017년 발사되어서 2년간 임무를 수행할 계획이다.

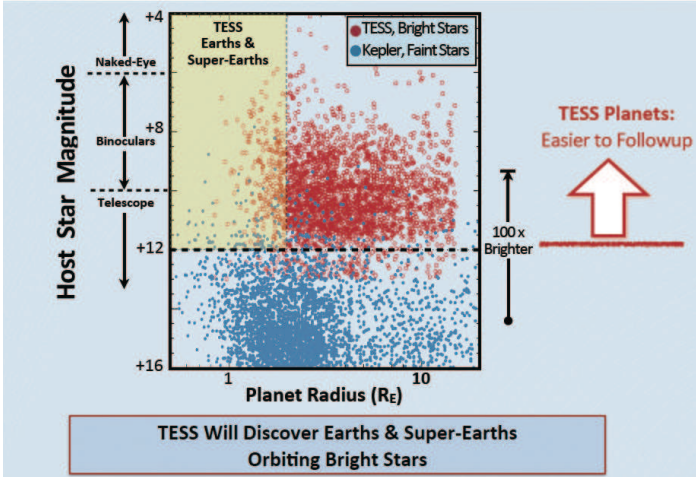

그림 3. TESS로 발견 가능한 밝은 항성 주위에서 지구형 및 수퍼지구형 행성(Ricker 2014, 발표자료 참고).

성을 검출해서 행성대기의 자세한 특성 분석을 수행할 수 있는 기반을 조성하는 것이다. TESS는 전천에 걸쳐서 질량, 항성의 대기 등 특성이 잘 알려진 가깝고 밝은 항성(F5~M5 dwarfs, V=4~12, d<60pc) 500,000개 이상의 천체에 대하여 2년 동안 관측할 예정이다. 특정한 영역에 관측이 집중된 케플러 우주망원경보다 400배 넓은 영역인 전천을 대상으로 관측이 진행될 예정이다.

케플러의 거리 한계는 ~1000광년인 반면 TESS는 ~100광년으로 100배 밝은 항성을 관측하는 결과가 되기 때문에, 케플러 외계행성보다 후속 관측이 용이하여 항성의 특성을 더 쉽게 파악할 수 있겠다. 시뮬레이션 결과 주기가 두 달 미만의 지구형 혹은 슈퍼지구형 식현상 외계행성 약 5,000개의 발견이 예상된다. 이 후보들은 이후에, LCOGT(Las Cumbres Observatory Global Telescope Network), MEarth(searching for transiting habitable super-Earths around nearby M-dwarfs), Euler telescopes 등을 이용한 직접영상관측(direct imaging)으로 확인 작업을 거쳐서 약 2,000개로 정리될 것이다. 그런 다음, LCOGT, Euler telescope, OHP(Observatoire de Haute-Provence) 등의 분광관측을 통하여 다시 한번 더 선별 작업을 거쳐서 지구형 외계행성 ~500개를 찾은 후에, 마지막으로 HARP(ESO 3.6m 망원경) 등의 고분산 분광관측으로 ~50개 정도를 선별하는 것이 최종 목표다. 즉, 2017년 발사되는 TESS는 2년간의 관측 기간 후에 HZ 영역에서 지구형

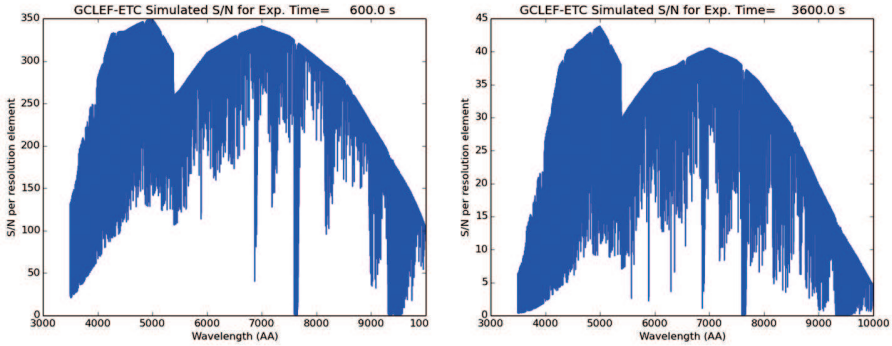

그림 4. (왼쪽) V=12등급의 태양과 유사한 별을 10분 노출했을 때 S/N~300 정도를 보인다. (오른쪽) V=18등급의 태양과 유사한 별을 한 시간 노출했을 때 S/N~40 정도를 보인다. 두 경우 모두 네 개의 미러만을 장착하고, airmass 1.2를 가정해서 시뮬레이션한 결과다.

외계행성 ~50개의 후보를 생산하고, 이것은 2020년 시작될 GMT의 1세대 관측 장비인 G-CLEF[5]의 적합한 관측 대상이 될 것으로 전망한다.

이와 함께 KMTNet으로 발견될 외계행성 중에서도 흥미로운 천체를 선별할 수도 있다. TESS 관측 자료는 관측과 동시에 공개되는 것이 내부 방침이지만 KMTNet은 일정 기간 외부에 공개하지 않을 정책이므로, 흥미로운 식현상 행성의 후속 연구 주제에 대해서는 선구자적인 기회가 제공될 것으로 본다. 밝은 항성 주위에서 식현상 방법으로 발견된 외계행성 목록은 상당히 유용한 연구용 자료가 될 것이다. 즉, TESS는 GMT뿐만 아니라 차세대 관측기기인 JWST(James Webb Space Telescope) 등 미래의 대형 관측에 좋은 모티브를 제공할 것으로 생각된다.

3) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

식현상이 일어날 때 외계행성의 대기 관측에서 충분한 시그널을 획득하는 것이 가장 중요한 포인트다. 일반적으로 식현상 외계행성이 모성을 통과하는 시간

5 GMT CfA-Carnegie-Chicago Large Earth Finder(G-CLEF)를 의미하며, 주목적 중의 하나는 지구형 외계행성을 찾는 것이다. 가시광 영역(0.35-1.0μm)에서 High Thoughput(R=25,000), Precision Abundance(R=40,000) 및 Precision Radial Velocity(R=120,000) 등 3종류의 분해능을 가지며, 궁극적인 시선속도 정밀도는 9cm/s이다. 이것은 고분산 분광기로 시선속도 관측을 할 경우 지구 크기의 외계행성을 검출할 수 있는 정밀도다.

은 대략 2시간 이내로 짧다. 따라서 이 시간 내에 충분한 시그널을 획득하는 것이 관건이다. 현재 가장 큰 지상망원경(VLT, Keck I & II, Subaru 망원경)을 사용해서 구체적인 성과를 보인 예는 없다. 하지만 GMT는 이들보다 최소 6배 이상의 집광력으로 충분한 시그널 획득이 가능할 것이다. GMT의 1세대 관측 장비인 G-CLEF는 하나의 별에 대한 고분산 분광관측이 가능하도록 디자인된 외계행성의 대기 연구에 가장 적합한 시스템이다.

3장 2절에서 이미 설명했듯이 TESS와 KMTNet으로 검증된 지구형 외계행성의 목록을 근거로 G-CLEF의 PRV 광섬유모드를 사용하여 관측할 계획이다. TESS로 관측된 항성은 12등급보다 밝으므로 외계행성이 모성을 통과할 동안, G-CLEF 후속 관측에서는 충분한 시그널이 획득되고 정밀한 대기분자조성 분석이 가능할 것으로 본다. KMTNet으로 발견된 외계행성 후보는 TESS 결과보다는 월등하게 어두운(V < ~20) 별까지 관측이 가능하다. 모두 7개의 미러 중에서 4개만 사용하는 GMT 1세대 관측에서, PRV 모드를 사용할 경우 18등급의 태양과 유사한 항성을 1시간 노출 후 획득 가능한 시그널(S/N)은 대략 40 정도로 계산 된다[그림 4]. 이것은 행성대기 분석연구에 적절할 것으로 생각된다. 따라서 동일한 노출로, 식현상이 아닌 시점과 모성의 뒤편으로 사라져서 행성이 가려진 시점에서도 추가로 스펙트럼을 얻고, 획득된 스펙트럼과 외계행성대기모형으로부터 HZ 영역에서 지구형 외계행성에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 본다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 연구에서는 식현상 방법으로 발견된 HZ 영역의 지구형 외계행성의 대기성분을 GMT/G-CLEF 후속 관측을 통하여 검출하고자 한다. 외계행성대기 연구의 궁극적 목표의 하나는 발견된 행성의 대기에서 산소의 흔적을 찾는 것이다. 현재까지는 Subaru/IRCS를 이용하여 1.27μm 주위의 대기광을 분석하는 시도(Kawahara et al. 2012)가 있었지만, 실제 외계행성대기모형에 적용하는 등의 진척은 없었다. 이를 위해서는 TESS 외계행성대기 후속 관측이 매우 흥미로운 연구가 될 것이다. 또한, KMTNet으로 발견될 외계행성은 한국이 독점적으로 외계

행성의 후속 분광관측을 진행할 수 있기 때문에, 상당한 경쟁력을 지닐 것으로 본다.

불과 20여 년 전의 상식에서는 상상조차 어려웠던 '외계행성계 분야'가 이제는 천문학의 중요한 분야로 자리매김을 하고 있다. 이를 가능하게 한 근본적인 힘은 창의적인 아이디어와 편견 없는 시각으로 연구에 몰입한 덕이었을 것이다. GMT 시대의 외계행성 연구에 대비하기 위해서는 앞으로 수년 동안 차분한 준비가 필요할 것으로 본다. 우선 외계행성대기 연구를 위한 연구 그룹을 만들어서 대기분자모형을 만들 수 있는 인력 확보 및 외계행성 관측 연구의 노하우를 쌓아야 하겠다. 태양계가 아닌 외계에서 생명체의 존재 가능성에 대한 의문은 인간의 근원적인 질문으로 천문학자들이 해결해야 할 숙명이다. 하지만 외계생명체 발견이라는 장대한 목표는 아직은 시기상조로 남겨두기로 하고, 다만 이러한 외계행성대기 연구가 향후 10년 이내 지구형 행성이나 특이한 행성을 연구하는 데 있어 필요한 요소로써 작용하여, 천문학자들이 외계행성 연구에서 한 계단 올라설 수 있는 발판을 만드는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

5. 인용문헌

Anderson, Helllier, Cillon, et al., 2010, ApJ, 709, 159
Brogi, Snellen, de Kok, et al. 2012, Nature 486, 502
Brown, Libbrecht & Charbonneau, 2002, PASP, 114, 826
Bundy & Marcy, 2000, PASP, 112, 1421
Charbonneau, Brown, Latham, et al., 2000, ApJ, 529, 45
Charbonneau, Brown, Timothy, et al., 2002, ApJ, 568, 377
Charbonneau, Allen, Megeath, et al., 2005, ApJ, 626, 523
Deming, Seager, Richardson, et al., 2005, Nature, 434, 740
Ehrenreich, Hébrard, Lecavelier des Etangs, et al., 2007, 668, 179
Fraine, Deming, Benneke, et al., 2014, Nature, 513, 526
Knutson, Charbonneau, Allen, et al., 2007, Nature, 447, 183
Kawahara, Matsuo, Takami, et al., 2012, ApJ, 758, 13
Kreidberg, Bean, Désert, et al., 2014, Nature, 505, 69
Knutson, Benneke, Deming, et al., 2014, Nature, 505, 66
Lecavelier des Etangs, Pont, Vidal-Madjar, et al., 2008, A&A, 481, L83

Levrard, Winisdoerffer & Chabrier, 2009, ApJ, 692, 9
Mandell, Haynes, Sinukoff, et al., 2013, ApJ, 779, 128
Moutou, Coustenis, Schneider, et al., 2003, A&A, 405, 341
Narita, Suto, Winn, et al., 2005, PASJ, 57, 471
Redfield, Endl, Cochran, et al., 2008, ApJ, 673, 87
Richardson, Deming, Horning, et al., 2007, Nature, 445, 892
Rodigas & Hinz, 2009, ApJ, 702, 716
Rodler, Lopez-Morales & Ribas, 2012, ApJ, 753, L25
Seager & Sasselov, 2000, ApJ, 537, 916
Sing, Vidal-Madjar, Désert, et al., 2008, ApJ, 686, 658
Snellen, Albrecht, de Mooij, et al., 2008, A&A, 487, 357
Swain, Vasisht & Tinetti, 2008, Nature, 452, 329
Tinetti, Vidal-Madjar, Liang, et al., 2007, Nature, 448, 169
Udalski, Paczynski, Zebrun, et al., 2002, Acta Astron, 52, 1