

부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 활용한 외계행성 보유 후보 천체 TOI-3653의 광도곡선 분석

이수현¹ · 전호석¹ · 임 구^{2,3,*} · 김도형^{1,2,*}

¹부산대학교 지구과학교육과, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

²부산대학교 지구과학과, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

³부산대학교 미래지구환경연구소, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Transiting Light Curve Analysis of A Possible Planet Hosting Star TOI-3653 using the PNUO 0.5 m Telescope

Su-hyeon Lee¹, Hoseok Jeon¹, Gu Lim^{2,3,*}, and Dohyeong Kim^{1,2,*}

¹Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²Department of Earth Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

³Institute for Future Earth (IFE), Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract: This paper presents the results of a transit light curve analysis for TOI-3653, a possible planet hosting star. Observations were conducted for 2.2 h from 15 h 28 m on August 12, 2024 (UT) using the 0.5 m telescope at Pusan National University Observatory (PNUO). The light curve was obtained through data reduction and relative photometry using ambient comparison stars in the target field. Consequently, we detected a flux dimming of ~1.7% relative to the baseline flux in the light curve, which fits well with the transit light curve model from *EXOFAST* ($\chi^2_{\nu} = 1.08$). Despite its model dependency, the best-fit model estimates the planetary radius to be 3.15 R_{\oplus} , suggesting the presence of the transiting exoplanet TOI-3653 b. Our results demonstrate that the PNUO 0.5 m telescope can detect flux variations due to exoplanet transit and supports its utility in exoplanet studies.

Keywords: exoplanets, transiting light curve, observational astronomy

요약: 본 연구에서는 부산대학교 천문대(Pusan National University Observatory; PNUO)의 0.5 m 망원경을 이용해 외계행성을 가진 것으로 알려진 항성 TOI-3653의 식현상을 관측한 결과를 제시한다. 관측은 협정세계시(UT) 기준 2024년 8월 12일 15시 28분부터 2.2시간 동안 진행되었으며, 수집한 관측 데이터를 전처리한 뒤 TOI-3653의 주변 비교성을 사용하여 비교 측광함으로써 광도 곡선을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻은 광도 곡선을 *EXOFAST* 프로그램을 이용해 모형 맞추기한 결과, 우리가 관측한 식현상에서 약 1.7%의 감광이 발생했으며 이를 통해 모형 의존성이 존재하나 TOI-3653이 목성의 3.15배 크기의 외계행성인 TOI-3653 b를 지니고 있다고 통계적으로 유의미($\chi^2_{\nu} = 1.08$)하게 결론을 내릴 수 있었다. 본 결과는 PNUO 0.5 m 망원경이 외계행성 식현상에 따른 미세한 광도 변화를 감지할 수 있음을 보여주며, 향후 외계행성 연구에 유용한 관측 장비로 활용될 수 있음을 시사한다.

주요어: 외계행성, 식현상 광도곡선, 관측천문학

S. Lee and H. Jeon contributed equally to this work and share first authorship.

*Corresponding author: lim9gu@gmail.com; dohyeong@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2705

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

태양계 너머에 존재하는 외계행성(exoplanet)을 탐사하고 그들의 물리적 특성을 이해하는 것이 현대 천문학에 있어 중요한 과제로 떠올랐다. 이는 행성의 다양성을 파악함으로써 생명체 존재 가능성을 탐색하고, 행성 형성과 진화 이론을 검증하는 데 핵심적인

단서를 제공하기 때문이다(Seager 2013).

이러한 외계행성을 탐사하는데 있어서는 여러 관측 방법이 이용되고 있다. 첫째, 행성의 중력으로 인해 모항성의 시선속도의 주기적 변화를 스펙트럼의 도플러 이동(doppler shift)을 통해 감지하는 시선속도 측정법(radial velocity technique)을 이용하는 방법이 있다(Lovis & Fischer 2010). 둘째, 멀리 있는 배경별의 빛이 그 앞을 지나가는 행성계의 중력에 의해 일시적으로 밝아지는 미시중력렌즈(micro-gravitational lensing) 현상을 이용하는 방법이다(Tsapras 2018). 셋째, 밝은 별 빛을 코로나그래프로 가린 뒤 행성을 적외선 파장에서 관측하는 직접 검출 방법(direct imaging)이 있다(Hinkley et al. 2022). 마지막으로, 식현상 광도곡선(transiting light curve)을 이용하는 방법이 있다. 외계행성이 관측자 시선방향에서 모항성 앞을 통과할 때 식현상이 발생하며, 이 과정에서 모항성 밝기의 미세한 감소량을 검출할 수 있다. 식현상 광도곡선 분석을 통해 외계행성의 반지름과 공전 주기를 정밀하게 측정할 수 있으며, 반복 관측이 가능해 통계적 신뢰도를 높일 수 있다는 장점이 있다(Seager & Mallén-Ornelas 2003). 뿐만 아니라, 여러 파장대에서 측정된 광도곡선을 분석함으로써 외계 행성의 대기나 구름이 존재하는지를 파악할 수 있다(Wakeford & Sing 2015; Gaidos et al. 2017; Kreidberg et al. 2018). 이렇듯 광도곡선 분석은 모항성과 외계행성의 물리량을 추정할 수 있는 핵심 수단으로서, 행성의 형성과 진화 과정을 규명하는데 있어 중요한 역할을 담당하고 있다. 이 방법을 이용하여 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)의 케플러우주망원경(Kepler; Borucki et al. 2010)과 Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS; Ricker et al. 2015) 등 여러 우주망원경으로 다수의 외계행성 후보들을 탐사해 왔다.

하지만 망원경의 수명과 제한된 관측 기간으로 인해 이들 후보 중 상당수는 장기적으로 모니터링되지 못하고, 실제 외계행성으로의 확정이나 물리량을 측정하는 데에 여전히 한계가 있다. Kepler는 지구 공전궤도 상에서 지구를 따라가며 백조자리와 거문고자리 부근의 제한된 영역만을 관측했고(Borucki et al. 2010; Koch et al. 2010), 자체제어될 고장 이후에도 K2 임무(Howell et al. 2014)를 통해 황도 근처의 다양한 시야를 순차적으로 관측하여 외계행성 후보를 다수 확보했다. 후속 우주망원경인 TESS는 더 많은

식현상 외계행성을 찾기 위해 탐사 영역을 전천으로 확장하여 운영 중이며, 지속적으로 새로운 후보 천체들을 공개하고 있다(Ricker et al. 2015).

외계행성의 식현상은 공전주기에 따라 주기적으로 반복되기 때문에, 식현상을 장기적으로 추적 관측함으로써 신호의 진위를 검증하고, 공전 주기나 식 깊이의 변화 여부 등 외계행성의 물리적 특성을 보다 정밀하게 파악할 수 있다. 이를 위해 우주망원경들이 공개한 외계행성 후보들을 지상 망원경으로 후속 관측하여 광도곡선을 확보할 수 있다. 후보 천체들의 밝기에 따라 다를 수 있으나, 구경이 1 m 이하의 소형망원경으로도 광도곡선에서 외계행성에 의한 감광 현상을 충분히 검출해낼 수 있다는 것이 여러 소형 망원경 탐사로 알려져 있다(HATNet; Hartman et al. 2004, QES; Alsubai et al. 2013, TEMP; Wang et al. 2018).

본 연구에서는 부산대학교 천문대(Pusan National University Observatory; PNUO)의 0.5 m 망원경을 이용하여 외계행성 보유 후보 TOI-3653의 광도곡선을 획득하고, 이를 분석하여 TOI-3653을 공전하는 외계행성 후보(ToI-3653 b)의 존재 여부 및 물리적 특성에 대해 처음으로 논의했다. TESS 관측에서 TOI-3653의 식현상 깊이는 약 1.4%로 측정되었으며(Guerrero et al. 2021), 이후 TRAPPIST-North, Acton Sky Portal, RFAC, MuSCAT2의 지상 망원경 관측에서도 식현상이 검출되었다.¹⁾ 특히 MuSCAT2의 *r*-band 관측에서도 약 1.4%의 식현상 깊이가 보고되었으나, 앞선 관측 결과에서 행성의 존재에 대한 구체적인 논의는 이루어지지 않았다. 본 연구는 부산대학교 천문대 관측 데이터를 기반으로 TOI-3653 b에 대해 처음으로 분석하고 논의하고자 한다.

또한 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 통해 얻은 관측 데이터의 신뢰도 제고에 기여하고, 추후 해당 망원경을 이용해 광도곡선 분석 및 외계행성 연구가 추가적으로 이루어질 수 있을지 그 가능성을 제시하고자 한다. 2026년 증축될 경상남도 진주시 소재 경상남도교육청 과학교육원부설천문대 1 m 망원경을 통해 고분산 분광관측이 가능해질 예정이기에, 부산대학교 천문대에서 수행하는 외계행성 식현상 관측과 결합함으로써 외계행성 연구 전반에 한층 더 풍부한 정보를 제공할 수 있으리라 기대한다.

1) <https://www.ipac.caltech.edu/project/exofop>

Table 1. Information of TOI-3653 and its exoplanet candidate from TOI catalog (Guerrero et al. 2021)

Host star (TOI-3653)		Exoplanet candidate	
R.A. (deg.)	27.528542	Period (days)	4.602±0.001
Dec. (deg.)	49.104842	Radius (R_p)	1.2
Effective temperature (K)	5981±122	Equilibrium temperature (K)	851
Mass (M_\odot)	1.1	Transit duration (hrs)	1.5±0.3
Radius (R_\odot)	1.121	Transit depth (%)	1.4±0.1
V (mag.)	13.6±0.1		
$B-V$ color (mag.)	0.6±0.1		
Distance (pc)	622		

2. 관측 대상

TOI-3653은 TESS 망원경이 관측한 천체 중 하나로서 TESS Objects of Interest (TOI) Catalog (Guerrero et al. 2021)에 포함된 외계행성 후보이다. 우주망원경 관측 데이터를 공개적으로 이용할 수 있는 Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST)²⁾로부터 등급, 거리, 그리고 TESS 광도 곡선 분석을 통해 추정된 TOI-3653과 이를 공전하는 외계행성 후보의 물리량을 정리하면 Table 1과 같다.

관측 당시의 시간과 관측지(관측 및 데이터 처리 부분에서 후술)를 고려할 때, 23시 20분부터 해가 뜰 때까지 지표면으로부터 고도 30도 이상 떠 있으므로, 1.5시간 동안 진행되는 TOI-3653의 식현상을 모두 관측하는 것이 가능하다. 또한 주변에 각크기가 큰 은하 또는 성운이나 매우 밝은 항성이 없기에 측광 정밀성을 높여 망원경의 성능을 시험해볼 수 있다는 장점도 있다. 그러므로 TOI-3653은 부산대학교 천문대에서 관측하기에 적당한 외계행성 보유 후보 천체라 할 수 있다.

3. 관측 및 데이터 처리

TOI-3653은 2024년 8월 12일 15시 28분 31초 (UT)에서 2024년 8월 12일 17시 40분 54초 (UT)까지 2.2시간 동안 부산대학교 천문대에서 0.5 m 망원경을 이용하여 관측했다. 단일 노출 영상에서 TOI-3653의 1.42% 식현상 깊이에 해당하는 약 0.016 등급의 밝기 감소를 검출하기 위해, 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR) 350 이상을 목표로 설

정했다. 또한 TOI-3653의 포화를 방지하기 위해 180 초 노출을 적용했으며, 총 41장의 단일 노출 영상을 획득했다. 식현상은 UT기준 12일 15시 44분 경에 시작해 17시 11분까지 87분 동안 진행할 것으로 예측³⁾되었으나, 추후 광도곡선 모형 맞추기를 용이하게 하기 위해 식현상 시작 16분 전부터 식현상 종료 28분 후까지 관측을 진행했다. 다만 관측 초반 20분 가량은 구름의 영향을 받았으나, 식현상 종료 28분 후까지 전반적으로 맑은 날씨 아래 관측이 진행되었다. 관측일의 평균 기온은 2.0초로, 부산·경남 지역의 평균기온(3.1초; Lim et al. in prep.)보다 낮아 전반적으로 우수한 관측 환경에서 관측이 진행되었음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 관측일의 달은 월령 7-8일에 해당하는 상현이었고 TOI-3653과 약 145도 떨어져 있었기 때문에, 밝은 TOI-3653을 측광하는데 달의 영향은 무시하고 진행했다.

본 관측에 사용한 망원경은 PlaneWave사의 Corrected Dall-Kirkham 광학계를 사용하는 CDK20이며 0.5 m 구경의 반사망원경이다. 이 0.5 m 망원경은 0.36 m 반사망원경과 함께 경위대식 가대에 부착되어 있으며, 이 모습은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 또한 연구에서 사용한 부산대학교 천문대 위치 정보는 북위 35°14'02.4", 동경 129°04'46.2", 해발고도 50 m이다. 검출기는 Moravian Instruments사의 CMOS 카메라 C3-61000 (Back-illuminated)을 사용한다. 위 광학계와 검출기를 결합하여 나오는 화각(field of view; FOV)은 36°×24°이다. 필터 시스템으로는 동일 제조사의 필터휠 EFW-3M-7-II가 검출기에 부착되어 있으며, Baader사의 Bessell B , V 필터, SDSS g , r , i , z

2) <https://mast.stsci.edu/>

3) NASA Exoplanet Archive
(<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>)



Fig. 1. The PNUO telescope system. The 0.5m telescope is co-mounted on the same mount with a 0.36m telescope for visual observation.

필터, 그리고 $H\alpha$ 협대역 필터까지 총 7개의 필터셋을 사용할 수 있다. 그 중 TOI-3653의 광도곡선의 SNR을 보다 잘 확보하기 위하여 감도가 상대적으로 좋은 r 필터를 사용했다. 이러한 부산대학교 천문대의 관측시스템의 성능은 추후 개별 연구(Lim et al. in prep.)에서 자세히 기술할 예정이다. 관측을 통해 얻어진 영상은 천체 영상 전처리 소프트웨어인 Image Reduction and Analysis Facility (IRAF; Tody 1986)의 ccdproc 패키지를 이용하여 영점영상(Bias), 암전류영상(Dark)을 차감한 뒤 바닥고르기(Skyflat) 영상으로 나누어 전처리했다. 이 후 각 이미지에 하늘의 좌표(World Coordinate System)를 입력하기 위하여, Astrometry.net (Lang et al. 2010)을 이용하여 측성(astrometry)을 수행했다.

4. 측광 및 광도곡선 분석

TOI-3653의 측광 및 광도곡선을 얻기 위하여 주변의 비교성을 선택했다. 이를 위해 관측된 영상 내의 별들 중 아래의 조건을 만족하는 것들을 비교성으로 선택했다.

- (1) The American Association of Variable Star Observers (AAVSO) Photometric All-Sky Survey (APASS) Data Release 9 (DR9; Henden et al. 2016) 목록에 수록된 것
- (2) 11등급 < V < 15등급 범위 내에 있는 것
- (3) TOI-3653의 $B-V$ 색지수 0.61 ± 0.14 와 비슷한 것
- (4) 모든 영상 내에 관측된 것

- (5) 시상의 2배 각거리 이내 다른 별과 겹치지 않은 것

이를 통해 i) 좋은 SNR의 데이터를 얻을 수 있도록 충분히 밝되 포화되지는 않으며, ii) TOI-3653와 비슷한 대기소광을 받는 천체들을 비교성으로 뽑을 수 있었다. 본 관측에서는 총 7개의 천체가 비교성으로 선정되었으며, 이들의 모습과 정보는 Fig. 2와 Table 2에 각각 정리되어 있다. 선택된 비교성들의 $B-V$ 색지수는 0.61 ± 0.01 으로 TOI-3653의 색지수와 거의 비슷한 값을 가짐을 확인했다.

이렇게 선정된 비교성들을 이용하여 비교 측광(relative photometry)를 수행했다. 먼저 천문학에서 일반적으로 널리 사용되는 측광 프로그램인 SExtractor (Bertin & Arnouts 1996)를 이용하여, 구경 측광(aperture photometry)을 수행했다. 이 때 사용한 구경은 시상의 2배 직경의 구경을 선택하여 천체의 SNR을 최대한 높이고자 했다(Howell 2006). 다음으로 배경하늘 값의 요동보다 5배 이상 큰 신호를 천체로 간주하여, 각 이미지 내 천체에 대한 측광 목록을 생성했다. 이렇게 측광된 비교성들과 TOI-3653의 밝기를 비교해 TOI-3653의 상대플럭스(relative flux)를 측정할 수 있었다. 단, 위 측광 과정은 i) 동일 화각 내 천체들이 구름 및 대기의 영향을 동일하게 받고, ii) 비교성들의 변광 효과는 무시할 수 있다는 가정하에 진행되었다.

이를 통해 얻은 TOI-3653의 광도곡선은 Fig. 3과 같다. 관측 초반 구름의 영향을 받아 측정오차가 큰 데이터가 있음에도 불구하고, TOI-3653의 SNR은 평균적으로 590 ± 218 이었으며, 이는 곧 0.003등급 이내의 정밀도로 감광을 측정할 수 있다는 것을 의미한다. 뿐만 아니라, TOI-3653의 광도 곡선을 통해 최대 약 2%의 감광이 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 NASA Exoplanet Archive에서 예측한 것보다 실제 식 현상이 예측 시간보다 약 17분 일찍 시작되었고 약 2분 일찍 종료되었으며, 예상했던 식 지속 시간인 87분보다 15분 더 길게 진행된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 해당 관측에서 식현상의 초입부가 관측되지 않았으며, NASA Exoplanet Archive에 등록된 TOI-3653의 식현상 정보가 완전히 정확하지 않다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 불일치는 기존 관측 데이터의 불충분 또는 아직 확인되지 않은 추가 외계행성의 존재 때문일 수 있으나, 이를 명확히 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

NASA Exoplanet Archive (Akeson et al. 2013)는 관측된 광도 곡선을 입력하면 이를 가장 잘 설명하는 외계행성 식현상 광도곡선 모형을 맞추어주는(fitting) 도구인 *EXOFAST*⁴⁾ (Eastman et al. 2013)을 제공한다. *EXOFAST*는 공전 주기, 궤도 경사각, 모항성과 행성의 반지름 비율과 같은 외계행성의 궤도 요소들과 모항성의 주연감광(limb darkening) 효과를 함께 고려하여 광도곡선을 맞춰준다. *EXOFAST*의 모형 맞추에는 필수적으로 모항성의 유효온도(effective temperature; T_{eff}), 중원소함량(metallicity; $[Fe/H]$), 행성의 공전주기(P)가 사전제약(prior) 값에 제공되어야만 한다. 본 연구에서는 TOI-3653의 알려진 반지름($1.121 R_{\odot}$)과 유효온도($5981 K$)를 고려할 때(Guerrero et al. 2021), TOI-3653을 태양과 비슷한 별로 가정하여 태양의 중원소함량($[Fe/H] = 0.0$)을 사용했다. 그리고 모항성 질량과 반지름 값은 Torres et al. (2010)의 질량-반지름 관계를 이용하며, TOI-3653 b의 공전 주기 Table 1의 값(Guerrero et al. 2021)을 사용했다. 결론적으로 이러한 사전제약 값들을 이용해 *EXOFAST* 모형 맞추기를 수행할 수 있었다. 단, 앞서 기술한 바와 같이 본 연구를 통해 TOI-3653의 식현상의 시간이 17분 앞당

겨진 것을 확인했고, 그에 따라 수정된 행성의 공전 주기를 사용해야 한다. 하지만, i) 식현상의 시간이 앞당겨진 이유를 명확히 밝히지 못했고, ii) 그 공전주기의 차이로 인한 *EXOFAST* 결과값의 차이가 미미하기에 NASA Exoplanet Archive에 제공되어 있는 행성의 공전주기 그대로 값을 사용했다.

관측된 TOI-3653 광도곡선의 *EXOFAST* 모형 맞추기 결과에 따르면, TOI-3653 b의 궤도 장반경은 약 0.056 AU다. 이는 TOI-3653 b이 모항성 TOI-3653으로부터 매우 가까운 거리에서 공전하고 있음을 의미하며, 그로 인해 TOI-3653 b의 복사 평형 온도(T_{eq})가 매우 높을 것($1184 K$)으로 예상할 수 있다. 뿐만 아니라, 모형 맞추기를 통해 TOI-3653 b은 목성에 비해 3.15배 크다는 결과 역시 얻을 수 있었다. 이러한 특성들을 종합해 볼 때(Prinoth et al. 2024의 Fig. 2), TOI-3653 b은 뜨거운 목성(hot Jupiter) 계열의 행성임을 알 수 있었다.

이러한 *EXOFAST*의 광도곡선 맞추기 결과는 Fig. 3에 나타나 있고, 모형 맞추기를 통해 얻은 TOI-3653과 그 외계행성 TOI-3653 b의 모든 물리량은 Table 3에 제시되어 있다. Table 3에서 얻은 물리량 값 중 이번 관

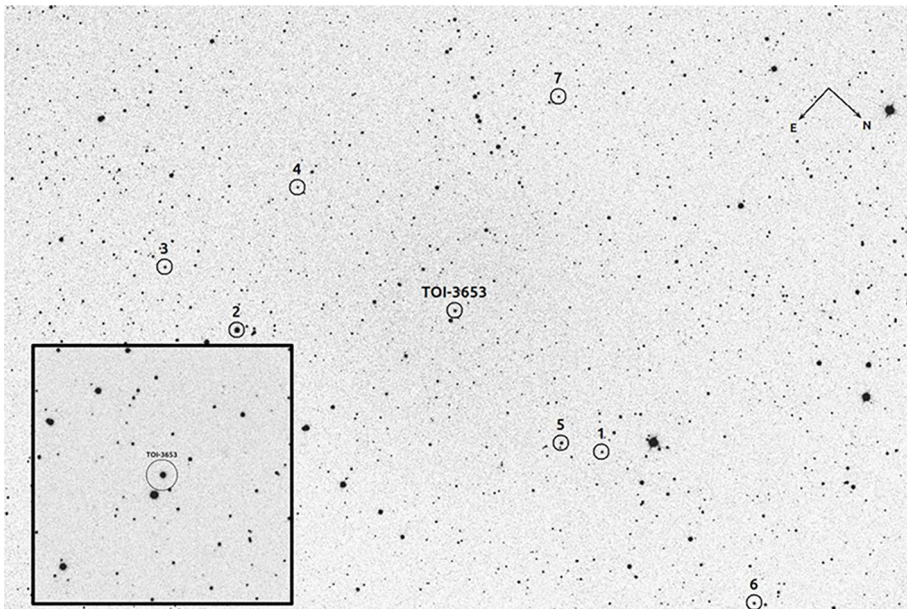


Fig. 2. A single r -band image of TOI-3653 obtained with a 180-second exposure using the PNUO 0.5 m telescope. TOI-3653 and 7 comparison stars in the ambience are marked by black circles. The field of view is $36' \times 24'$, and the orientation is indicated in the upper right. A zoomed-in view of the $5' \times 5'$ region around TOI-3653 is shown in the lower left corner.

4) <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/ExoFAST/nph-exofast>

Table 2. Information of the comparison stars selected from APASS DR9 catalog

Number	R. A. (deg.)	Dec. (deg.)	V (mag.)	$^{\dagger}\sigma_V$ (mag.)	$B-V$ (mag.)	σ_{B-V} (mag.)
1	27.532383	49.238887	14.40	0.04	0.61	0.07
2	27.691276	49.008454	10.94	0.06	0.60	0.08
3	27.694228	48.945528	14.13	0.05	0.61	0.06
4	27.545175	48.973964	14.83	0.05	0.61	0.12
5	27.553494	49.215467	13.31	0.04	0.60	0.05
6	27.539681	49.379932	13.95	0.05	0.61	0.05
7	27.300275	49.058572	14.49	0.05	0.62	0.08

 Note: $^{\dagger}1\sigma$ photometric uncertainty

Table 3. The best-fit results of stellar and planetary parameters of TOI-3653 from *EXOFAST*

Parameter	Units	Values	Method
Primary Transit Parameters			
T_c	Mid-transit time (BJD _{TDB})	2460535.18	measured
R_p/R_*	Radius of planet in stellar radii	0.344	measured
a/R_*	Semi-major axis in stellar radii	12.70	measured
u_1	linear limb-darkening coefficient	0.353	model-derived
u_2	quadratic limb-darkening coefficient	0.300	model-derived
i	Inclination (deg.)	84.7	model-derived
b	Impact Parameter	1.17	measured
τ	Ingress/egress duration (days)	0.0386	measured
T_{14}	Total duration (days)	0.0773	measured
δ	Transit depth for non-grazing transits with no limb darkening	0.120	model-derived
Depth	Flux decrement at mid-transit time	0.0165	measured
Stellar Parameters			
M_*	Mass (M_{\odot})	1.08	model-derived
R_*	Radius (R_{\odot})	0.940	model-derived
L_*	Luminosity (L_{\odot})	1.02	model-derived
ρ_*	Density (g cm^{-3})	1.84	model-derived
$\log(g)$	Surface gravity (cgs)	4.53	model-derived
T_{eff}	Effective temperature (K)	5981	prior
[Fe/H]	Metallicity	0.000	prior
Planetary Parameters			
e	Eccentricity	0.00000100	model-derived
P	Orbital period (days)	4.60	prior
a	Semi-major axis (AU)	0.0556	model-derived
R_p	Radius (R_j) calculated by δ	3.15	model-derived
T_{eq}	Equilibrium Temperature (K)	1186	model-derived
$\langle F \rangle$	Average incident flux ($10^9 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	0.449	model-derived
T_P	Time of periastron (BJD _{TDB})	2460534.03	model-derived

측을 통하여 직접 측정된 물리량(measured), *EXOFAST*의 모형로부터 얻은 물리량(model-derived), 그리고 사전제약으로 넣어준 값(prior)을 따로 표시하였다.

Table 3에서 한번의 식현상 광도곡선 관측으로부터 최대 감광량(Depth), 식 지속시간(T_{14})을 측정하여 행성과 모항성 반지름 비율(R_p/R_*), 궤도장반경과 모항

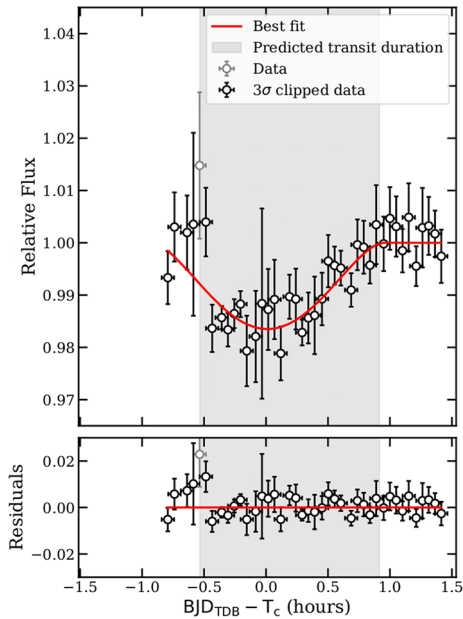


Fig. 3. *r*-band light curve of TOI-3653, plotted as a function of time relative to the mid-transit time T_c (2460535.18 BJD_{TDB}). The flux is normalized using the last data point, which represents the baseline level. The red solid line represents the best-fit planetary transit model obtained using EXOFAST. Data point that significantly deviates from the model after 3σ clipping are shown in gray. The gray shaded region marks the predicted transit duration based on the NASA Exoplanet Archive. The RMS of the residuals after subtracting the best-fit model is 0.006, indicating a good agreement between the model and the observed data.

성 반지름 비율(a/R_*)을 측정할 수 있다. 또한 식이 일어날 때 광도곡선에서의 평평한 부분을 보이는 기간(τ)과 식 지속시간을 통하여 충돌 파라미터(impact parameter; $b = (a/R_*)\cos(i)$)를 구할 수 있다. 한편, 항성 파라미터는 EXOFAST의 모형에 의하여 얻어진 값들이다. 이를 이용하여 행성의 물리량을 모형 기반으로 얻게 된다. 해당 모형 맞추기의 자유도 보정 카이제곱값(reduced chi-square; χ^2_ν)이 1.08로 계산된 것을 고려하면, EXOFAST에서 제시한 모형이 TOI-3653의 광도곡선을 잘 설명한다고 볼 수 있다.

5. 토 의

5.1. TOI-3653 광도곡선 모형 맞추기의 한계

본 연구에서 관측된 TOI-3653의 식현상으로부터

구한 최대 감광량(Depth)은 약 1.7%였다. 이 감광량을 바탕으로, 주연감광 효과를 고려하지 않고 단순히 $(Rp/R_*)^2$ 관계를 적용하면, Rp/R_* 은 약 13%로 추정되며, 이 경우 행성 반지름은 약 1.19 R_R 로 계산된다. 그러나 EXOFAST 모형의 Table 3에 제시된 δ 값으로부터 구한 Rp/R_* 은 약 34.4%에 해당한다. 이는 EXOFAST가 광도곡선 피팅 과정에서 Mandel & Agol (2002)의 주연감광(limb darkening) 모형(Eastman et al. 2013의 식 (20) 참조)을 적용하여 광도곡선을 모형화한 데 반하여, δ 는 주연감광을 고려하지 않고 이상적인 조건 하에서 $(Rp/R_*)^2$ 로 계산된 값이기 때문이다. 실제 관측과 EXOFAST 모형 피팅 모두 주연감광 효과를 반영하고 있으므로, 관측된 약 1.7%의 감광량은 모형 추정값과 자연스럽게 일치한다고 해석할 수 있다.

또한, 광도곡선의 모양에서 식현상 중 평평한 구간이 관측되지 않았고, 충돌변수가 $1 - Rp/R_* < b \leq 1 + Rp/R_*$ 범위 내인 $b = 1.17$ 임을 고려할 때, TOI-3653 b 는 항성면을 일부만 스치듯 통과하는 grazing transit을 보였던 것으로 판단된다(Oshagh et al. 2015). 이러한 grazing transit을 보이면서도 비슷한 감광량을 나타내는 사례로는 Qatar-6 b 가 있으며($b = 0.878$, 감광량 약 1.8%; Alsubai et al. 2018), 이는 본 연구 결과와도 잘 부합한다.

본 연구에서 적용한 EXOFAST 모형은 광도곡선에 기반하여 최소제곱 방법으로 맞춤형 결과를 사용하고 있으며, 결과값에 대한 오차 추정은 제공되지 않는다. 향후 식현상의 주기에 따라 추가적인 관측을 수행하고, 마르코프 연쇄 몬테카를로(Markov Chain Monte Carlo; MCMC) 기법을 활용한 통계적인 분석을 통해 모형의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

5.2. 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 활용한 외계행성 탐사

앞으로 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 활용해 TOI-3653뿐만 아니라 다수의 외계행성 보유 후보 항성들의 식현상을 관측하고자 한다. 본 단락에서는 이 망원경으로 얼마나 많은 외계행성들을 탐지할 수 있을지, 그 가능성을 평가하고자 한다.

부산대학교 천문대 0.5 m 망원경으로 식현상에 의한 감광을 확인할 수 있는 외계행성 보유 후보 항성의 수를 다음 조건을 바탕으로 평가해보았다. 첫째, 0.5 m 망원경으로 충분한 SNR의 자료를 얻을 수 있

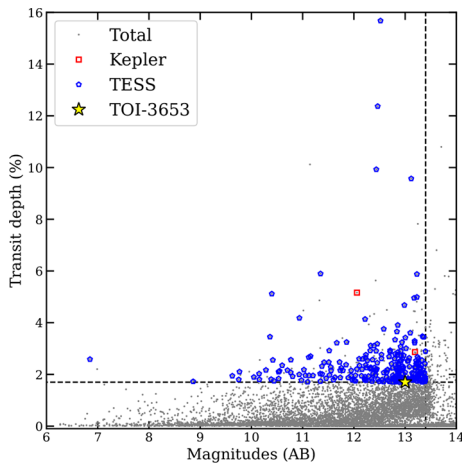


Fig. 4. Observable follow-up targets at PNUO for stars potentially hosting exoplanets. Gray dots represent all stars with planet candidates and confirmed planets, while blue pentagons and red squares indicate those discovered by TESS and Kepler, respectively. TOI-3653 is highlighted as a yellow star. The horizontal and vertical dashed lines mark the observational limits of PNUO, corresponding to 13.4 magnitudes and a 1.7% transit depth.

을만큼 밝아야 한다. 이를 위해 TESS와 Kepler 후보 천체들 가운데 본 연구에서 실험적으로 얻은 13.4등급보다 밝은 천체들을 선택했다. 왜냐하면 13.4등급보다 밝으면 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 통해 관측했을 때 구름 영향이 없을 때 180초 노출만으로 750의 높은 SNR을 확보할 수 있기 때문이다. 단, TESS 후보 천체의 경우 TESS 등급을, 그리고 Kepler 후보 천체의 경우 r 필터 등급을 기준으로 했다. 물론, TESS 등급은 광대역 필터를 이용해 측정되므로, r 필터 등급과 완벽히 같다고 할 수 없다. 하지만 r 필터 역시 굉장히 넓은 파장 영역을 포함하기에 대략적인 관측 가능성 평가를 위해 두 종류의 등급값을 함께 사용했다. 둘째, 주기가 알려져 있어, 식현상 시간을 예측할 수 있어야 한다. 셋째, 적위 > -20 deg으로 북반구인 부산에서 관측 가능하여야 한다. 적위가 -20 deg 이상인 천체들은 전체 후보 천체들에 대하여 84%에 해당하며, 적위가 -20 deg인 후보 천체는 적어도 약 3시간 정도 관측 가능하다. 넷째, 식현상 깊이가 1.7% 이상으로 0.5 m 망원경을 통해 탐지가 가능한 천체들을 선택했다. 13.4등급 천체는 r 필터에서 180초 노출 시 단일 영상에서 SNR가 750이 확보되며, 이 경우 식현상의 깊이가 1.7%이면

단일 이미지에서도 약 12.8σ 수준으로 충분히 감광을 검출할 수 있다. 이러한 기준에 따라 선정된 외계행성 보유 후보 천체는 총 242개이며, 이들은 Fig. 4에 나타나 있다.

이렇게 부산대학교 천문대에서 외계행성 탐사 연구가 이루어진다면, 이들을 7차원적 망원경(7-Dimensional Telescope; Kim et al. 2024)과 SPHEREx (Spectro-Photometer for the History of the Universe, Epoch of Reionization, and Ices Explorer; Doré et al. 2014; Crill et al. 2020) 우주망원경으로 추가 관측하여 외계행성의 대기 특성과 같은 중요한 정보들을 알아낼 수 있을 것으로 기대된다. 7차원적 망원경과 SPHEREx 우주망원경은 가시광부터 적외선까지 다양한 중대역 필터를 활용해 관측할 수 있어, 외계행성 대기의 구름, 미세입자층(haze), 물의 존재 여부 등을 확인하는 연구도 수행할 수 있다(Sing et al. 2016; Kreidberg et al. 2018). 최근에는 제임스웹우주망원경(James Webb Space Telescope; JWST)을 통한 외계행성 대기 연구도 활발히 이루어지고 있으며(Feinstein et al. 2023; August et al. 2023), 외계 대기 성분 분석은 외계 생명체 존재 가능성 탐색에 핵심적인 역할을 하고 있다.

그러나 서론에서 언급했듯이, 우주망원경들은 관측 시간과 자원의 제한으로 인해 모든 외계행성 후보를 장기적으로 모니터링하거나 지속적인 후속 관측을 수행하는 데 한계가 있다. 이러한 점에서 지상관측의 역할은 매우 중요하다. 특히, 부산대학교에서 활용하고 있는 밀양아리랑우주천문대(Lim et al. 2024), 부산대학교 천문대(Lim et al., in prep), 그리고 앞으로 설치될 경상남도교육청 과학교육원부설천문대의 1m 망원경을 활용하여 광도곡선 모니터링 및 시선속도 측정을 수행할 수 있다면, 외계행성의 공전주기와 질량, 궤도 특성 등을 보다 정확히 제약할 수 있다. 지상관측을 통한 장기 모니터링은 외계행성 후보의 식반복을 확인하고 위성 탐사로 발견된 신호의 진위를 검증하는 데 필수적이며, 이는 외계행성의 기원 및 진화 시나리오를 이해하는 데 핵심적인 기여를 할 것으로 기대된다.

6. 결론 및 제언

본 연구는 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 이용해 외계행성 후보 TOI-3653의 광도곡선을 분석했

으며, 그 결과는 아래와 같다.

- i. TOI-3653의 광도곡선 모형 맞추기를 통해 행성 식현상(transit)이 있었음을 확인했으며, 식현상을 통해 최대 약 1.7%의 감광이 발생했음을 확인했다.
- ii. 광도곡선 모형 맞추기를 통해 외계행성 TOI-3653 b의 궤도 장반경(0.056 AU), 반지름($3.15 R_J$) 등의 물리량을 구했다.
- iii. TOI-3653 b는 모항성으로 부터 매우 가까운 거리에서 공전하고 있는 뜨거운 목성(hot Jupiter) 계열 행성이다.

추가적으로 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경을 사용해 얼마나 많은 외계행성들을 탐지할 수 있는지, 그 가능성을 평가해 보았다. TESS와 Kepler 임무에서 보고된 외계행성 보유 후보 천체들 가운데 약 242개의 천체가 부산대학교 천문대 0.5 m 망원경 관측을 통해 광도 곡선 분석이 가능할 것으로 예상된다. 향후에는 다른 관측 시설과의 연계를 통하여 외계 행성의 질량 및 궤도 특성 연구와 그 대기 성분 연구 역시 가능할 것으로 기대된다. 마지막으로 본 연구에서 도출된 실험적인 관측 한계 기준(13.4 등급과 1.7% 감광)은 국내외 소행 관측소의 전략적 관측 후보 선정에 있어, 유용한 기준점으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음. 이 논문은 NASA 외계행성 아카이브(NASA Exoplanet Archive)에서 제공하는 EXOFAST (Eastman et al. 2013)을 활용했음. 해당 아카이브는 캘리포니아 공과대학교(California Institute of Technology)가 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration)의 외계행성 탐사 프로그램(Exoplanet Exploration Program)과의 계약 하에 운영되고 있음(<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/ExoFAST/nph-exofast>).

References

Akeson, R. L., Chen, X., Ciardi, D., et al., 2013, The NASA Exoplanet Archive: Data and Tools for Exoplanet Research. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125, 989. doi:10.1086/672273

Alsubai, K. A., Parley, N. R., Bramich, D. M., et al., 2013, The Qatar Exoplanet Survey. Acta Astronomica, 63, 465. doi:10.48550/arXiv.1401.1984

August, P. C., Bean, J. L., Zhang, M., et al., 2023, Confirmation of Subsolar Metallicity for WASP-77Ab from JWST Thermal Emission Spectroscopy. The Astrophysical Journal, 953, L24. doi:10.3847/2041-8213/ace828

Bertin, E., & Arnouts, S., 1996, SExtractor: Software for source extraction. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 117, 393. doi:10.1051/aas:1996164

Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., et al., 2010, Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. Science, 327, 977. doi:10.1126/science.1185402

Crill, B. P., Werner, M., Akeson, R., et al., 2020, SPHEREx: NASA's near-infrared spectrophotometric all-sky survey. Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 11443, 114430I. doi:10.1117/12.2567224

Doré, O., Bock, J., Ashby, M., et al., 2014, Cosmology with the SPHEREx All-Sky Spectral Survey. arXiv e-prints, arXiv:1412.4872. doi:10.48550/arXiv.1412.4872

Feinstein, A. D., Radica, M., Welbanks, L., et al. 2023, Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRISS. Nature, 614, 670, doi:10.1038/s41586-022-05674-1.

Gaidos, E., Kitzmann, D., & Heng, K. 2017, Exoplanet characterization by multi-observatory transit photometry with TESS and CHEOPS. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 468, 3418, doi:10.1093/mnras/stx615.

Guerrero, N. M., Seager, S., Huang, C. X., et al. 2021, The TESS Objects of Interest Catalog from the TESS Prime Mission. The Astrophysical Journal Supplement Series, 254, 39, doi:10.3847/1538-4365/abefe1.

Hartman, J. D., Bakos, G., Stanek, K. Z., & Noyes, R. W. 2004, HATNET Variability Survey in the High Stellar Density "Kepler Field" with Millimagnitude Image Subtraction Photometry. The Astronomical Journal, 128, 1761, doi:10.1086/423920.

Henden, A. A., Templeton, M., Terrell, D., et al. 2016, VizieR Online Data Catalog: AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden+, 2016). VizieR Online Data Catalog, 2336, II/336.

Hinkley, S., Carter, A. L., Ray, S., et al., 2022, The JWST Early Release Science Program for the Direct Imaging and Spectroscopy of Exoplanetary Systems. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 134, 095003. doi:10.1088/1538-3873/ac77bd

Howell, S. B., 2006, Handbook of CCD Astronomy. Cambridge, Cambridge University Press, UK, 117 p.

Howell, S. B., Sobeck, C., Haas, M., et al. 2014, The K2 Mission: Characterization and Early Results.

- Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126, 398, doi:10.1086/676406.
- Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., & Roweis, S., 2010, Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images. *The Astronomical Journal*, 139, 1782. doi:10.1088/0004-6256/139/5/1782
- Kim, J. H., Im, M., Lee, H. M., et al. 2024, Introduction to the 7-Dimensional Telescope: Commissioning Procedures and Data Characteristics. arXiv e-prints, arXiv:2406.16462, doi:10.48550/arXiv.2406.16462.
- Koch, D. G., Borucki, W. J., Basri, G., et al. 2010, Kepler Mission Design, Realized Photometric Performance, and Early Science. *The Astrophysical Journal*, 713, L79, doi:10.1088/2041-8205/713/2/L79.
- Kreidberg, L., Line, M. R., Thorngren, D., Morley, C. V., & Stevenson, K. B. 2018, Water, High-altitude Condensates, and Possible Methane Depletion in the Atmosphere of the Warm Super-Neptune WASP-107b. *The Astrophysical Journal*, 858, L6, doi:10.3847/2041-8213/aabfce.
- Lim, G., Kim, D., Lim, S., et al., 2024, The Robotic MAAO 0.7 m Telescope System: Performance and Standard Photometric System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 136, 055001. doi:10.1088/1538-3873/ad3ff4
- Lovis, C., & Fischer, D., 2010, Radial Velocity Techniques for Exoplanets. *Exoplanets*, 27.
- Mandel, K., & Agol, E., 2002, Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches. *The Astrophysical Journal*, 580, L171. doi:10.1086/345520
- Oshagh, M., Santos, N. C., Figueira, P., et al., 2015, Polar stellar-spots and grazing planetary transits. Possible explanation for the low number of discovered grazing planets. *Astronomy and Astrophysics*, 583, L1. doi:10.1051/0004-6361/201527274
- Prinoth, B., Sedaghati, E., Seidel, J. V., et al., 2024, High-resolution Transmission Spectroscopy of Warm Jupiters: An ESPRESSO Sample with Predictions for ANDES. *The Astronomical Journal*, 168, 133. doi:10.3847/1538-3881/ad5a7f
- Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., et al. 2015, Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 014003, doi:10.1117/1.JATIS.1.1.014003.
- Seager, S., & Mallén-Ornelas, G. 2003, A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve. *The Astrophysical Journal*, 585, 1038, doi:10.1086/346105.
- Seager, S., 2013, Exoplanet Habitability. *Science*, 340, 577. doi:10.1126/science.1232226
- Sing, D. K., Fortney, J. J., Nikolov, N., et al. 2016, A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion. *Nature*, 529, 59, doi:10.1038/nature16068.
- Torres, G., Andersen, J., & Giménez, A. 2010, Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications. *Astronomy and Astrophysics Review*, 18, 67, doi:10.1007/s00159-009-0025-1.
- Tsapras, Y., 2018, Microlensing Searches for Exoplanets. *Geosciences*, 8, 365. doi:10.3390/geosciences8100365
- Wakeford, H. R., & Sing, D. K. 2015, Transmission spectral properties of clouds for hot Jupiter exoplanets. *Astronomy and Astrophysics*, 573, A122, doi:10.1051/0004-6361/201424207.
- Wang, S., Wang, X.-Y., Wang, Y.-H., et al. 2018, Transiting Exoplanet Monitoring Project (TEMP). I. Refined System Parameters and Transit Timing Variations of HAT-P-29b. *The Astronomical Journal*, 156, 181, doi:10.3847/1538-3881/aadfcf.

Manuscript received: April 22, 2025

Revised manuscript received: April 28, 2025

Manuscript accepted: May 2, 2025