J. Space Technol. Appl. 4(1), 48-61 (2024)
https://doi.org/10.52912/jsta.2024.4.1.48

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

지상-우주 레이저 연구를 위한 큐브위성 CLUB(CNU Laser Unity Bus)의 임무 중심 개념설계

송석민[1,2], 송호섭[2], 김채령[3], 강영인[3], 주양하[3], 최만수[2], 임형철[2], 이유[1,3†]

[1]충남대학교 우주 · 지질학과
[2]한국천문연구원
[3]충남대학교 천문우주과학과

Received: January 22, 2024
Revised: February 9, 2024
Accepted: February 12, 2024

†Corresponding author :
Yu Yi
Tel : +82-42-821-5468
E-mail : euyiyu@cnu.ac.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Seok-Min Song
https://orcid.org/0000-0002-6451-4161
Ho Sub Song
https://orcid.org/0000-0001-5371-7003
Chae-Ryeong Kim
https://orcid.org/0009-0003-1276-4825
Young-In Kang
https://orcid.org/0009-0003-2063-3518
Yang-Ha Ju
https://orcid.org/0009-0000-8333-4580
Mansoo Choi
https://orcid.org/0000-0003-2019-3615
Hyung-Chul Lim
https://orcid.org/0000-0001-5266-1335
Yu Yi
https://orcid.org/0000-0001-9348-454X

Mission-Oriented Conceptional Design of the Cube Satellite CNU Laser Unity Bus (CLUB) for Ground-Space Laser Research

Seok-Min Song[1,2], Ho Sub Song[2], Chae-Ryeong Kim[3], Young-In Kang[3], Yang-Ha Ju[3], Mansoo Choi[2], Hyung-Chul Lim[2], Yu Yi[1,3†]

[1]Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[2]Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea
[3]Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

요 약

본 논문에서 우리는 여러 지상-우주 레이저 어플리케이션의 통합 인프라를 제공하는 '충남대학교 레이저 통합 버스'(Chungnam National University Laser Unity Bus, CLUB) 큐브위성의 컨셉을 소개한다. 오늘날 뉴스페이스 시대에 들어 우주공간의 활용이 급속도로 확대되면서 전파의 한계가 드러나기 시작했고, 수행하는 임무들이 다양해짐에 따라 대체 가능한 수단인 레이저가 주목 받고 있다. 레이저는 지상과 우주공간 사이에서 인공위성 레이저 거리측정(satellite laser ranging, SLR), 레이저 무기, 레이저 통신 등 다양한 응용분야에 이용할 수 있다. 하지만 지상과 우주공간 사이에서 사용되는 레이저는 지구 대기의 상당한 영향을 받게 된다. 이에 레이저 전파에 영향을 미치는 대기효과에 대한 이해가 필수적으로 요구된다. 특히 레이저의 전파 방향을 굴절시키고 파면을 왜곡시키는 대기 난류는 지상과 가까워질수록 강해지기 때문에 하향링크에 비해 상향링크에 더 큰 영향을 미친다. 하향링크의 경우 지상에서 검출할 수 있기 때문에 검증이 용이한 반면, 상향링크의 경우 우주공간에서 검출해야 하는 어려움 때문에 검증에 어려움이 있다. 이에 우리는 상향링크의 레이저 전파에 대한 이해를 돕고 검증하기 위한 큐브위성의 아이디어를 제안한다. 또한 체계적인 큐브위성 개발을 위해 시스템공학의 진행단계에 따라 CLUB 큐브위성의 임무설계를 중심으로 요구사항을 분석하여 개념설계를 진행한 결과를 제시한다.

Abstract

In this paper, we introduce the concept of the cube satellite Chungnam National University Laser Unity Bus (CLUB), which can provide an integrated infrastructure for various ground-space laser applications. With the advent of the new space era, the rapid expansion of space utilization has begun to reveal the limitations of conventional radio frequencies. As space missions diversify, lasers are garnering attention as a viable alternative. Between ground and space, lasers are applied in various fields including satellite laser ranging

(SLR), laser weapons, and laser communication. However, laser used between the ground and space are significantly influenced by the Earth's atmosphere. Consequently, understanding the atmospheric effects on laser propagation is crucial. In particular, atmospheric turbulence, which refracts and distorts laser beams, intensifies closer to the Earth's surface, exerting a greater impact on the uplink than on the downlink. While downlink verification is facilitated by ground detection, verifying the uplink poses challenges due to the necessity of space-based detection. In response to these challenges, we propose the idea of cube satellite as a means to enhance understanding and verification of laser propagation in the uplink. Additionally, we present the results of conceptual design by analyzing requirements, focusing on mission design of the CLUB cube satellite, following the stages of systems engineering for systematic cube satellite development.

핵심어 : 지상-우주 레이저, 우주 레이저 응용, 큐브 위성, 초소형 위성, 레이저 통신
Keywords : ground-space laser, space laser application, cube satellite, nano satellite, laser communication

1. 서론

전통적으로 우주와 지구 사이의 미션 수행을 위해서는 우주와 지구 사이에 존재하는 대기의 영향을 최소화하기 위해 전파(radio frequency)가 필수적으로 사용되었다. 그러나 우주공간의 활용이 점차 증가하게 되면서 전파의 한계가 드러나기 시작했다. 특히 통신에 있어서 전파는 사용할 수 있는 주파수 대역이 고갈되고 있는 상황이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 전파를 대체할 수단으로 레이저가 주목 받고 있다[1].

우주공간을 활용함에 있어서 레이저를 통해 우리는 인공위성 레이저 거리측정(satellite laser ranging, SLR), 레이저 무기, 레이저 통신 등 여러 응용 분야에 이용할 수 있다. SLR은 지상에서 인공위성을 레이저로 추적함으로써 인공위성과의 거리를 수 cm 단위로 정밀하게 측정하여 위성의 정밀궤도를 산출하는데 사용된다[2]. 또한 지상-우주 레이저는 첩보위성의 임무수행을 방해하는 용도의 무기로도 사용될 수 있다[3]. 마지막으로 위성과 지상국과의 통신에 있어서 전파를 대체하는 용도로 레이저 통신을 사용할 수 있다. 레이저 통신은 전파와 비교하여 주파수 제약에 자유롭고, 높은 주파수로 인해 고속의 데이터 전송속도를 달성할 수 있으며, 빔의 발산각이 작아 보안적인 측면에서도 뛰어난 성능을 보여줌으로써 차세대 위성통신 수단으로 각광받고 있다[4]. 이러한 레이저 어플리케이션은 큐브위성을 통해서도 여러 연구들이 진행되고 있다. 2018년 발사된 CHOMPTT 큐브위성은 우주공간에서 정밀한 시각측정과 시각동기화를 위해 플로리다 대학과 나사의 협업으로 개발되었다[5]. CHOMPTT 큐브위성은 임무를 수행하기 위해 레이저 반사경(laser retro-reflector array, LRA)을 탑재하여 지상에서 SLR을 수행한다. 또한 2015년과 2017년에는 나사의 광학 통신과 센서 실험(optical communications and sensor demonstration, OCSD) 프로그램을 통해 Aerospace 사에서 제작된 1.5 U 크기의 Aerocube-7A;7B;7C가 발사되었다. 이들은 저궤도에서 직경 30 cm의 지상국까지 최소 5 Mbps의 레이저 통신을 시연하면서, 큐브위성을 통해 레이저 통신이 가능하다는 것을 보여주었다[6].

이러한 지상과 우주공간 사이에서 레이저의 운용은 지구 대기로부터 상당한 영향을 받게 된다[7]. 이에 레이저 전파(propagation)에 영향을 미치는 대기 효과에 대한 이해가 필수적으

로 요구된다. 특히 대기에 존재하는 난류는 광학렌즈 역할을 하면서 레이저의 전파 경로를 굴절시키며(beam wandering), 파면을 왜곡하면서 세기의 변동(intensity fluctuation)과 함께 레이저 빔이 퍼지게 된다(beam spreading). 이때, 우주 레이저는 지상에서 우주로 전파되는 상향링크(uplink)와 우주에서 지상으로 전파되는 하향링크(downlink)로 나눌 수 있는데, 레이저 전파의 영향을 미치는 대기 난류는 지상에서 그 세기가 더 크기 때문에 하향링크에 비해 상향링크에서 더 큰 영향을 미친다는 특징이 있다. Fig. 1에는 하향링크와 상향링크에서의 레이저 전파 특징을 대략적으로 설명한다.

Fig. 1과 같은 대기의 영향으로 인해 효율적인 지상-우주 레이저 운용을 위해서는 대기 효과의 이해와 이를 극복할 수 있는 방안이 필요하다. 대기 효과를 극복할 수 있는 방안으로는 적응광학(adaptive optics) 시스템을 이용할 수 있다. 대기 난류로 인해 왜곡된 파면을 적응광학을 통해 보상해줌으로써 대기 효과를 완화시킬 수 있다. 이러한 대기 완화기술들의 효과 검증은 하향링크의 경우 지상에서 빔을 검출할 수 있기 때문에 검증이 용이한 반면, 상향링크의 경우 우주공간에서 빔을 검출해야 된다는 문제 때문에 검증에 어려움이 있다.

이에 우리는 상향링크의 레이저 전파에 대한 이해를 돕고 이를 검증할 수 있는 큐브위성의 아이디어를 제시한다. 뿐만 아니라 지상-우주 레이저를 이용할 수 있는 통합 인프라를 제공할 수 있는 '충남대학교 레이저 통합 버스'(Chungnam National University Laser Unity Bus, CLUB) 큐브위성의 컨셉을 소개하고 큐브위성의 체계적인 개발을 위한 시스템공학 기반의 개발 단계[8]에 따라 임무설계를 중심으로 요구사항을 분석하여 식별된 요구사항을 토대로 CLUB 큐브위성의 개념설계를 진행한 결과를 제시한다.

2. 임무 설계

CLUB 큐브위성은 지상-우주 레이저 통합 인프라를 제공하기 위해 다음의 세 가지 임무를 갖는다. 첫 번째로 상향링크의 레이저 빔을 검출하여 빔의 중심 위치를 측정함으로써 상향링크의 beam wandering 효과를 측정하거나, 지상에서의 사전보상을 이용한 상향링크 빔의 보상효과를 직접적으로 검증한다. 두 번째 임무는 큐브위성에 LRA를 탑재하여 큐브위성을 이

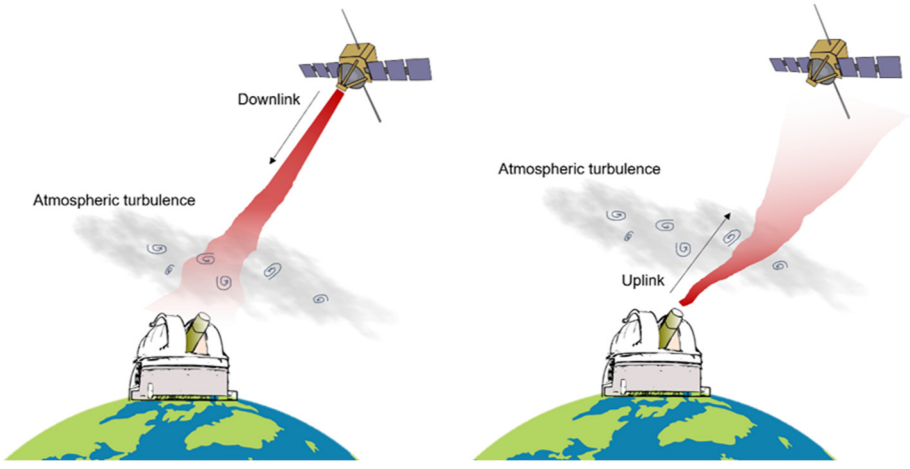


Fig. 1. Propagation features of uplink and downlink lasers. Atmospheric turbulence has a greater impact on uplinks because it is stronger on the ground.

용한 SLR 기술을 실현함으로써 큐브위성의 정밀궤도를 결정하고 정밀한 위치와 속도를 측정한다. 마지막으로 레이저 통신 터미널을 탑재하여 지상과 위성 간의 레이저 통신을 수행하는 것을 주 목표로 한다.

2.1 레이저의 상향링크 전파 특성 검증

지상과 우주공간 사이의 레이저 빔은 대기 중의 난류에 의해 본래의 전파 경로에서 굴절되어 도착 각도의 변동을 일으키며 이는 곧 빔의 변위로 이어진다(Fig. 2). 이 효과는 하향링크에서 보다 상향링크에서 더욱 크게 나타나며, 난류의 세기가 커질수록 증가한다. 굴절된 빔은 무작위한 분포를 가지며 도달하지만, 이러한 랜덤 분포는 레일리 분포(Rayleigh distribution)를 따르는 것으로 알려져 있다. 또한 랜덤 분포를 가지는 제곱평균제곱근(root-mean-square, RMS) 빔 중심의 변위 $\sqrt{\langle r_c^2 \rangle}$ 값은 상향링크에서 다음과 같이 나타난다[9]:

$$\sqrt{\langle r_c^2 \rangle} = \left[0.54(H - h_0)^2 \sec^2(\zeta) \left(\frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left(\frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3} \right]^{1/2} \tag{1}$$

여기서 H는 위성의 고도, h_0는 관측소의 고도, ζ는 관측소 기준 위성의 천정 각이며, W_0는 초기 레이저 빔의 크기, λ는 빔의 파장, r_0는 대기 중의 난류가 광학계에 미치는 영향을 나타내는 값으로 프리드 매개변수(fried parameter)라고 불린다.

$$r_0 = 2.1 \left[\frac{\cos\zeta}{1.46(\frac{2\pi}{\lambda})^2(\mu_{1u} + 0.622\mu_{2u}\Lambda^{11/6})} \right]^{3/5} \quad (for\ uplink) \tag{2}$$

여기서 μ_{1u}와 μ_{2u}는 상향링크에서 대기 난류를 고려한 레이저 전파를 나타내는 매개변수이며, Λ는 사용하는 레이저의 출력-평면 빔 매개변수(output-plane beam parameter)이다. 약한 난류 조건에서 식 (1)과 식 (2)를 각각 천정 각 0°, 30°, 60°에서 계산된 fried parameter와 RMS 빔 중심 변위는 Table 1에서 정리된다.

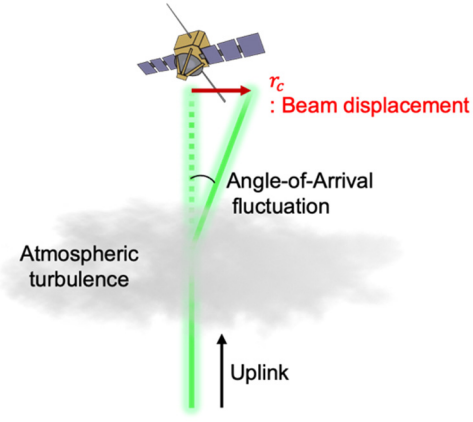


Fig. 2. The laser beam propagated by atmospheric turbulence is refracted, resulting in displacement from the center.

Table 1. r_0 and $\sqrt{\langle r_c^2 \rangle}$ according to zenith angle under weak turbulence condition

Parameters	Symbols [unit]	Values		
Zenith angle	ζ [°]	0	30	60
Fried parameter	r_0 [cm]	19.34	17.74	12.76
RMS displacement	$\sqrt{\langle r_c^2 \rangle}$ [m]	2.34 (1.21")	2.91 (1.30")	6.63 (1.71")

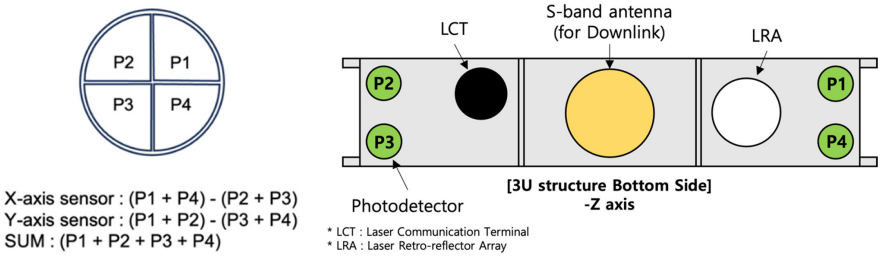
RMS, root-mean-square.

우리는 이러한 빔의 변위를 우주공간에서 측정함으로써 대기 난류에 의한 상향링크 레이저 빔 전파의 특성을 검증할 수 있는 큐브위성의 아이디어를 제시한다. 큐브위성을 통한 빔의 변위 측정은 사분면 검출기(quadrant detector)의 빔 위치 측정 방법에 초점을 맞춘다. 사분면 검출기는 4개의 구역으로 나누어진 각각의 셀에서 측정된 광량을 계산하여 빔의 중심 위치를 측정하는 장비이다[Fig. 3(a)]. 위 개념을 응용하여 우리는 큐브위성의 각 모서리 부분에 하나의 광검출기(photodetector)를 배치[Fig. 3(b)]함으로써 각각의 광검출기에서 측정된 광량을 토대로 상향링크 빔의 중심위치를 측정한다. Fig. 3에는 사분면 검출기의 개념과 CLUB 큐브위성의 개념을 각각 그림으로 표현되어 있다.

Fig. 3(b)와 같이 3U 큐브위성의 각 모서리에 광검출기를 배치하여 각 위치의 광검출기에서 측정된 광량을 각각 P1, P2, P3, P4라고 한다면, 우리는 다음과 같은 식을 통해 빔의 중심 위치(x_{pos}, y_{pos})를 계산할 수 있다.

$$x_{pos} = \alpha \frac{(P1 + P4) - (P2 + P3)}{(P1 + P2 + P3 + P4)} \tag{3a}$$

$$y_{pos} = \beta \frac{(P1 + P2) - (P3 + P4)}{(P1 + P2 + P3 + P4)} \tag{3b}$$



(a) (b)

Fig. 3. Concept of uplink beam position detection in CLUB cube satellite. (a) Concept of the beam position measurement method using a quadrant detector and (b) configuration of the photodetector for measuring the uplink beam position of the CLUB cube satellite utilizing the concept of a quadrant detector. CLUB, Chungnam National University Laser Unity Bus.

지상에서 발사되어 큐브위성에 도달한 레이저는 보통 큐브위성의 크기보다 더 큰 빔 사이즈를 갖는다(e.g., 지상에서 10 cm 크기의 시준된 빔(collimated beam)은 400 km 우주공간에서 최소 1.98 m로 퍼지게 된다). 또한 사분면 검출기와는 다르게 각 광검출기 사이가 분리되어 있기 때문에 빔의 중심위치를 계산하기 위해서는 각 축에서의 가중치(α,β)가 추가로 계산되어야 한다.

우리는 이러한 설계가 상향링크 빔의 중심 위치를 잘 측정할 수 있을지에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 약한 난류 조건에서 상향링크 빔의 무작위한 변위 분포가 2.34 m, 큐브위성에 도달한 빔의 크기는 1.98 m이며, 도달한 레이저 빔이 가우시안 광도 프로파일을 갖는다고 가정했을 때, 1,000개의 샘플에 대해 큐브위성에 탑재된 각 광검출기의 크기를 2 cm로 가정하여 측정된 광량을 시뮬레이션하였으며, 식 (3a)와 식 (3b)를 통해 중심위치를 계산할 수 있는지 확인하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 빔의 중심위치 계산결과의 상대 오차율이 평균적으로 1% 이내인 것을 확인하였다. 빔의 변위가 커질수록 상대 오차율 또한 증가하지만, 그럼에도 불구하고 10% 이내의 오차율로 빔의 중심을 잘 계산하는 것을 확인하였다(Fig. 5). 이는 Fig. 3(b)와 같은 설계를 통해서 레이저의 상향링크 전파 특성을 확인할 수 있음을 시사한다.

2.2 SLR(Satellite Laser Ranging)용 큐브위성의 활용

SLR은 지상에서 위성으로 레이저를 쏘아 반사되어 되돌아오는 광자의 비행시간을 측정함으로써 위성과 관측소 간의 거리를 정확하게 측정하는 시스템이다. 되돌아오는 광자수가 많을수록 관측 값의 신뢰도를 더욱 높일 수 있다. 이에 성공적인 SLR을 수행하기 위해서는 지

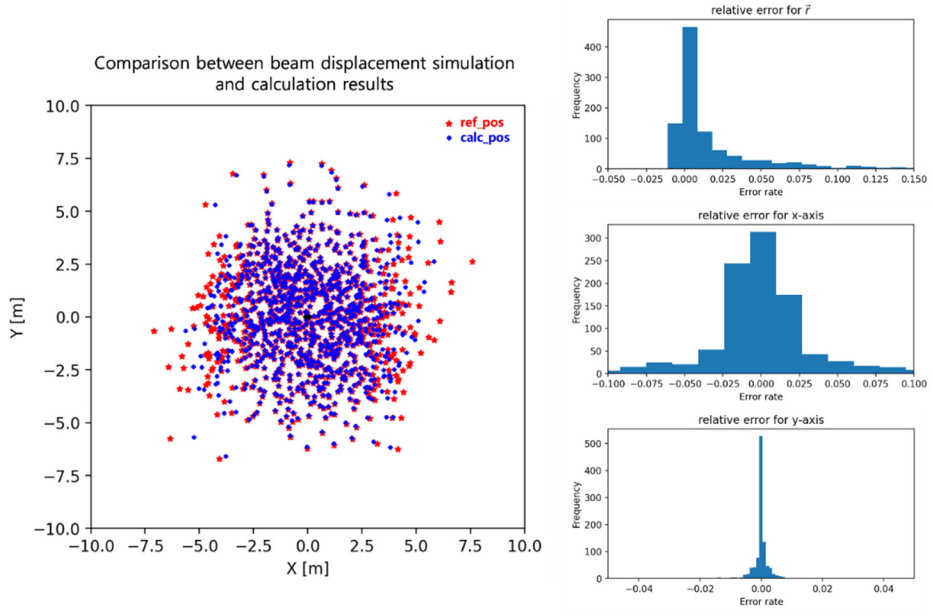


Fig. 4. Simulation of the accuracy of the uplink beam position calculation. (Left) Comparison between the simulated results of beam center displacement (red star) and the calculated beam center position of the CLUB (blue cross); and (right) depiction of the relative error rates in the calculated results on the vector positions, x-axis and y-axis, respectively. CLUB, Chungnam National University Laser Unity Bus.

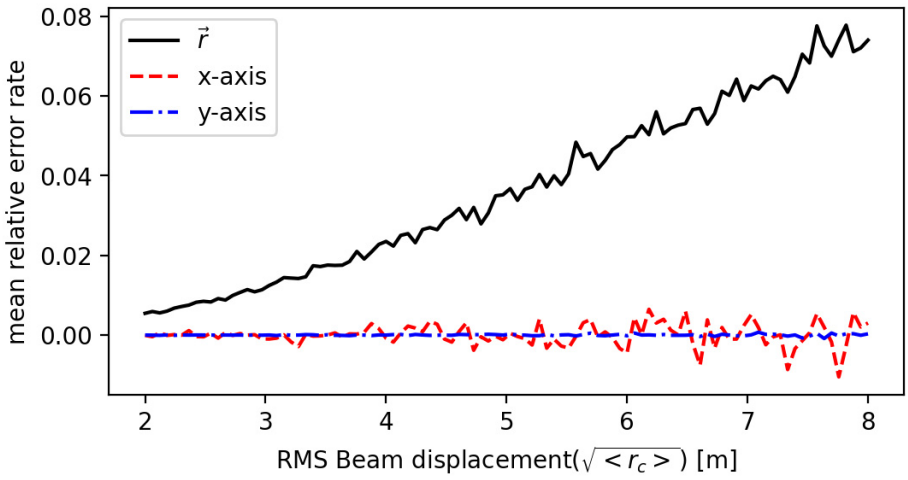


Fig. 5. Variation in beam center displacement and center position tracking performance according to the intensity of turbulence (The black solid line represents the relative error in vector position, the red dashed line indicates the error on the x-axis, and the blue dotdash line shows the error on y-axis).

상국의 레이저 성능도 중요하지만 목표물이 받은 레이저를 얼마나 반사할 수 있는지에 대한 능력 또한 요구된다.

SLR 관측소에서 발사하여 목표 위성에 맞고 돌아온 레이저의 평균 검출 광자수 N_{pe}에 대한 링크 버짓(link budget)은 다음의 식으로 구할 수 있다[10]:

$$N_{pe} = \eta_q \left(E_T \frac{\lambda_{SLR}}{hc}\right) \eta_T G_T \sigma_s \left(\frac{\cos^2(\zeta)}{4\pi(H-h_0)^2}\right)^2 A_R \eta_R T_A^2 T_C^2 \quad (4)$$

여기서 η_q는 검출기 양자 효율, E_T는 레이저의 펄스 에너지, λ_{SLR}은 SLR을 위해 사용되는 레이저의 파장, h는 플랑크 상수, c는 빛의 속도이다. η_T 와 η_R은 각각 SLR 관측소의 송신/수신 광학 효율을 나타내며, G_T는 송신기 이득을 의미한다. 또한 A_R은 유효 망원경 면적, T_A와 T_C는 각각 대기 투과율과 권운 투과율을 나타낸다. 이때, 레이저 유효면적(σ_s)은 $\sigma_s = \rho G A_{LRA}$로 구할 수 있으며, 여기서 ρ는 광반사율, G는 목표물의 이득이며, A_{LRA}은 LRA의 반사 면적을 의미한다. 우리는 CLUB 큐브위성을 SLR 용도로 활용하기 위한 LRA의 요구성능을 식 (4)의 링크 버짓 수식을 통해 계산한다. 링크 버짓을 계산하는데 필요한 SLR 시스템과 관련된 매개변수들은 거창 SLR 관측소를 기준으로 하였다[11]. 거창 SLR 관측소와 관련된 매개변수들을 고정하면 평균 검출 광자수는 결국 위성의 고도와 천정 각, 그리고 레이저 유효면적 σ_s에 의해서 결정된다. 즉, 효과적인 SLR 임무 수행을 위해서 CLUB 큐브위성이 운용될 고도와 큐브위성에 탑재될 LRA의 반사면적을 고려하여 큐브위성을 설계한다.

2.3 레이저 통신 임무 수행

현재 해외에서는 이미 지상-위성 레이저 통신에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔다. 특히 독일의 TESAT사는 2016년 독일항공우주센터 DLR과 함께 소형 및 초소형 인공위성을 위한

우주 레이저 통신 터미널(laser communication terminal, LCT)인 '광학 우주 적외선 하향링크 시스템'(optical space infrared downlink system, OSIRIS)을 개발하였다. OSIRIS를 통해 TESAT사는 기술 상용화를 하여 우주 레이저 통신 모듈을 판매하고 있다[12]. 우리의 CLUB 큐브위성은 레이저 통신을 실현하기 위해 TESAT사에서 개발한 큐브위성용 레이저 통신 터미널을 구매하여 탑재함으로써 레이저 통신을 수행할 수 있게 한다. 또한 레이저 통신을 실현하기 위해서는 위성을 지속적으로 정밀하게 추적할 수 있는 마운트와 최소 40 cm 구경의 망원경으로 이루어진 지상국이 필요하다. 현재 한국천문연구원에서는 거창 SLR 관측소의 인공위성 추적 인프라를 기반으로 한 레이저 통신 지상국 구축을 계획하고 있으며[13]. 이에 본 CLUB 큐브위성의 레이저 통신 지상국으로 거창 SLR 관측소를 이용할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 위성과 지상국 간의 안정적인 통신링크를 확보하기 위해 위성은 지상국을 정밀하게 지향해야 한다. 이를 위해 LCT 제품을 선정한 뒤, 요구되는 지향 정밀도를 식별하여 큐브위성의 자세제어 정밀도 요구사항의 근거를 추가한다.

3. 요구사항 분석

3.1 레이저의 상향링크 전파 특성 검증을 위한 요구사항

CLUB 큐브위성의 각 모서리에 배치되는 광검출기들은 큐브위성의 각 모서리 부분에 위치해야 한다고 제한하면, 그 크기에 따라서 센서의 중심 위치가 변화하기 때문에 빔 중심 추적 성능에 영향을 미치게 된다. Fig. 6은 광검출기의 크기변화에 따른 빔 중심 추적 성능의 변화를 각각의 축에 대해서 보여준다.

Fig. 6에서 보이는 바와 같이 광검출기의 크기는 반지름이 2 cm인 크기에서 빔의 위치를 평균적으로 가장 적은 오차로 추적할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 우리는 상향링크 레이저의 전파 특성을 확인하는 임무를 효과적으로 수행하기 위해 각 광검출기의 크기를 반지름 2 cm로 제한한다.

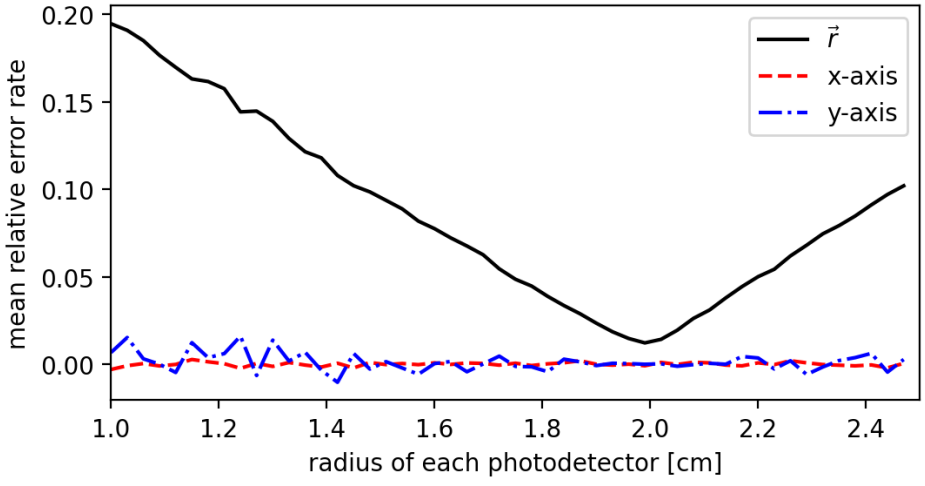


Fig. 6. Error rate in the calculation of beam center position based on the size of the photodetector. The performance of beam center tracking is influenced by the size of the photodetector, as it leads to variations in the sensor's position.

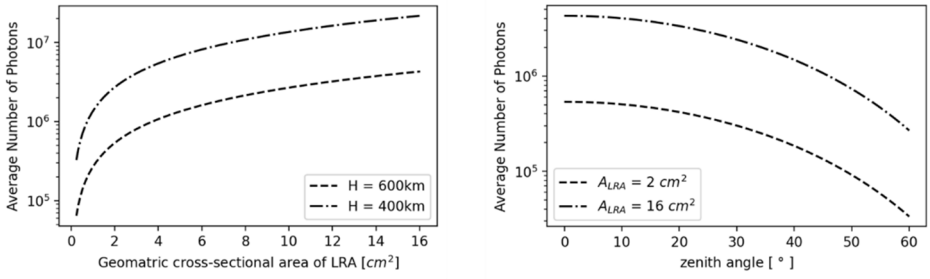
3.2 SLR(Satellite Laser Ranging) 임무 수행을 위한 요구사항

식 (4)의 평균 검출 광자수에 대한 링크 버짓을 계산하는 과정에서 SLR 관측소 성능에 관한 요소와 자연적인 요소를 고정하면 결국 평균 검출 광자수는 위성의 고도와 위성에 탑재된 LRA 성능에 의해 결정된다. Fig. 7(a)는 천정각 0°에서 LRA의 반사면적과 위성의 고도에 따라 거창 SLR 관측소에서 측정할 수 있는 평균 검출 광자수를 보여주며, Fig. 7(b)는 600 km 고도의 위성에서 천정각과 LRA의 반사면적에 따른 평균 검출 광자수를 보여준다. Fig. 7의 그림에서 보이는 바와 같이 위성의 고도가 낮을수록, LRA의 면적이 커질수록 SLR 임무수행의 효과가 증가할 것이다. 이에 우리는 위성의 운용고도를 400–600 km로 제한하고, LRA의 크기와 이를 구성하는 코너 큐브 역반사체(corner cube reflector, CCR)는 큐브위성의 공간적/질량적 한계를 고려하여, 이후 CLUB 큐브위성의 운용을 위해 필요로 되는 탑재체들을 우선적으로 고려한 뒤 LRA의 크기를 결정한다. 이때, Fig. 7(b)에서 보이는 바와 같이 높은 고도($H = 600$ km), 적은 반사면적($A_{LRA} = 2$ cm^2)을 가지는 경우 높은 천정 각에서 평균 검출 광자수가 10^5 이하로 계산되었다. 이는 가장 좋지 못한 성능을 모사함으로 우리는 CLUB 큐브위성의 SLR 링크 버짓 요구사항으로 10^5 이상의 평균 검출 광자수를 얻을 수 있게끔 설계해야 한다.

3.3 레이저 통신을 수행하기 위한 요구사항

레이저 통신은 TESAT사에서 판매하는 LCT를 사용한다. 이에 해당 LCT에서 요구되는 위성의 성능들이 CLUB 큐브위성의 요구사항에 반영되어야 한다. 우리가 레이저 통신을 위해 이용하고자 하는 큐브위성 LCT의 세부 스펙은 Table 2에서 나타난다.

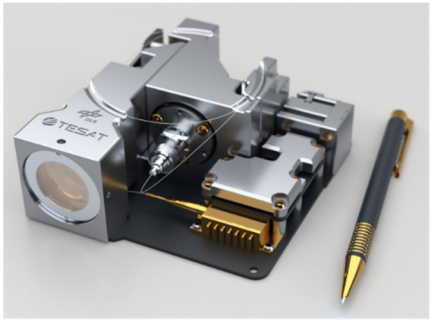
해당 큐브위성 LCT는 최대 10 W의 전력을 소모하며, 397 g의 질량과 0.3 U의 크기를 가지고 있다. 저궤도에서 지상국과의 통신 범위가 보장되어 있으며, 수명 또한 3년으로 큐브위성의 탑재체로써 적합한 규격을 가지고 있다. 하지만 최대 10 W의 높은 전력소모량은 CLUB 큐브위성의 전력계 서브시스템(electrical power subsystem)을 설계할 때 고려되어야 할 것이다. 또한 안정적인 레이저 통신을 운용하기 위해서는 큐브위성이 지상국을 1° 이내의 정밀



(a) (b)

Fig. 7. Calculation of link budget to determine satellite altitude and LRA size for SLR mission performance. (a) Variation of the average detected photon count at the Geochang SLR station with LRA area and satellite altitude at a zenith angle of 0°. (b) Changes in average number of photons according to the zenith angle of the 600 km satellite and the cross-sectional area of the LRA. SLR, satellite laser ranging; LRA, laser retro-reflector array.

Table 2. Specification of the selected cube satellite laser communication terminal



Commercial off-the-shelf laser communication terminal for cube satellite [Tesat-Spacecom]

Key parameter	Specification
Range	LEO to ground; 1,500 km
Channel data rate	(Downlink) 100 Mbps (Uplink) 1 Mbps
Mass	397 g
Size	9 x 9.5 x 3.5 cm^3 (0.3 U)
Power consumption	10 W (peak)
Lifetime	3 years in LEO orbit
Field of regard	±1° integrated fine steering mirror capability (requires S/C body pointing)

LEO, low-earth orbit.

도로 지향(pointing)할 수 있어야 한다. 이는 자세제어계 서브시스템(attitude determination & control subsystem)을 설계할 때의 요구조건으로 두어 안정적인 레이저 통신을 실현한다.

4. 결과

위에서 우리는 CLUB 큐브위성의 임무설계에 중점을 맞춰 요구사항들을 분석하였다. 레이저 빔의 상향링크 전파 특성을 검증하기 위해서는 각 모서리에 배치된 광검출기 크기가 2 cm 수준으로 제작되어야 하며, SLR 임무를 수행하기 위해 탑재되는 LRA는 크기가 커질수록 임무수행의 효과가 향상되지만, 큐브위성 플랫폼의 공간과 질량적 제약으로 인해 최대 반경 5 cm의 LRA를 탑재할 수 있으며, 정확한 LRA의 구성은 큐브위성의 서브시스템을 설계한 이후 유동적으로 조절하여 결정한다. 또한 레이저 통신 임무를 수행하기 위해 우리는 TESAT사에서 개발된 상용 큐브위성 LCT를 사용할 예정이며, 이는 높은 전력소모량으로 인하여 적절한 배터리 용량과 전력생산이 요구됨과 동시에 일정 수준의 지향 정밀도를 달성해야 한다. 이와 같이 식별된 CLUB 큐브위성의 요구사항들은 Table 3에서 정리된다. 이는 CLUB 큐브위성의 임무수행을 위한 요구사항만을 반영하였으며, 큐브위성의 운용에 필요한 서브시스템들에 대한 요구사항은 반영되지 않았음을 강조한다. 또한 해당 요구사항들을 토대로 CLUB 큐브위성의 초기 3D CAD 모델을 제작하였다. Fig. 8에서는 제작된 CLUB 큐브위성의 3D CAD 모델과 큐브위성에 탑재된 부품들의 구성을 보여준다.

Fig. 8에서 보여주는 3D CAD 모델에서는 CLUB 큐브위성을 3 U 크기로 가정하고 임무수행을 위한 탑재체(payload)를 제외한 나머지 서브시스템들은 요구사항과는 무관하게 일반적으로 구성되는 부품들을 적재하여 CLUB 큐브위성의 초기 컨셉 모델을 구상하였다. 명령&데

Table 3. Requirements for mission performance according to the conceptual design of the CLUB cube satellite

Level 1		User requirement definition
ID	Title	Requirements
URD0001	Size	The satellite shall be designed as 3 U [TBD] cube satellite
URD0002	Orbit	The satellite shall be operated on low earth orbit (LEO) at 400–600 km [TBD] of altitudes
URD0003	Payloads	The satellite shall carry at least the following payloads – Four photodetectors – Laser retro-reflector array – Laser communication terminal (LCT)
URD0004	Uplink propagation measurement	The four photodetectors shall be able to measure the center position of the beam within the relative error rate of 1% [TBD]
URD0005	SLR link budget	The reflected laser from the satellite shall have an average number of photons of at least 1E + 5 [TBD] or more
URD0006	Laser communication field of view (FOV)	Laser shall enter a LCT at least 1° [TBD] from the center axis

CLUB, Chungnam National University Laser Unity Bus; TBD, to be determined; SLR, satellite laser ranging.

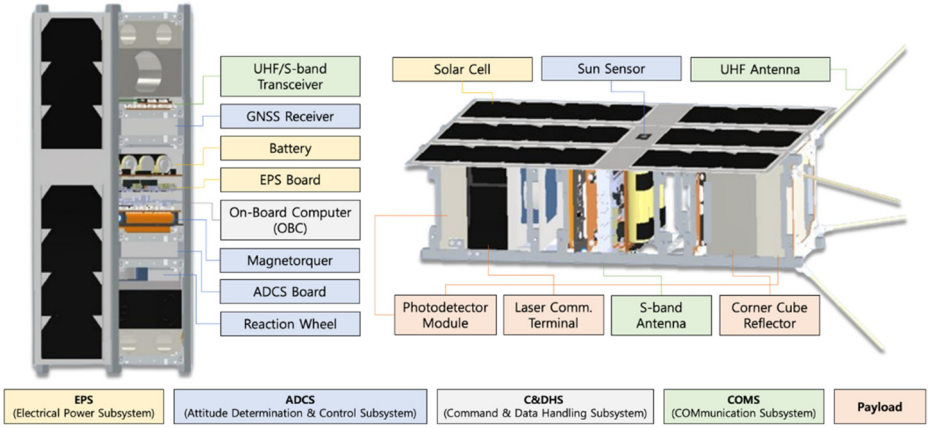


Fig. 8. Initial CLUB cube satellite 3D CAD model equipped with payloads required for mission execution and subsystems fundamentally necessary for cube satellite operations. GNSS, global navigation satellite system; CLUB, Chungnam National University Laser Unity Bus.

이터처리 서브시스템으로 온보드 컴퓨터(on-board computer)를 두어 각 서브시스템 간의 연결을 도모하고, 동시에 CLUB 큐브위성의 임무 중 하나인 관측된 빔의 중심을 계산하는 역할을 한다. 전력계 서브시스템은 모든 탑재체들에게 전력을 충분히 공급할 수 있는 배터리와, 이를 충전할 태양전지, 그리고 전력을 효율적으로 분배해 줄 전력계 보드(EPS board)로 구성된다. 자세제어계 서브시스템은 자기토커(magnetorquer)와 태양센서(sun sensor), 그리고 GNSS(global navigation satellite system) 정보를 수신하여 자세를 결정하고, 반작용휠(reaction wheel)을 통해 큐브위성을 제어한다. 이후의 과정에서 추가로 식별되는 자세제어계의 요구사항에 맞추어 별 추적기 등의 추가 요소들을 고려한다. 마지막으로 CLUB 큐브위성은 레이저 통신과는 별개로 통신계 서브시스템을 구성한다. 하향링크로 S-밴드, 상향링크로 UHF(ultra high frequency) 대역을 사용하여 큐브위성에서 명령을 전송하거나, 큐브위성에서 수집된 데이터를 지상으로 전송하는 역할을 한다. 이와 동시에 레이저 통신을 통해 데이터를 송수신하여 전파통신과 레이저 통신의 차이를 직접적으로 확인할 수 있다.

5. 결론 및 논의

본 논문에서는 지상-우주 레이저 어플리케이션을 효과적으로 이용하기 위해 레이저 전파의 이해와 검증을 수행하는 큐브위성의 아이디어를 제시한다. 이와 동시에 지상-우주 레이저 어플리케이션을 우주공간에서 통합적으로 이용할 수 있는 인프라를 만드는 것을 목표로 한다. 이를 목표로 큐브위성의 임무를 설계하고 임무의 실현 가능성을 검토하며, 효과적인 임무수행을 위한 요구사항들을 분석한다. 본 논문에서 식별된 요구사항들은 CLUB 큐브위성의 임무수행을 위한 탑재체들을 중점으로 진행되었으며, 서브시스템들에 대해 자세한 요구사항들은 고려되지 않았다.

이와 같은 CLUB 큐브위성의 임무 컨셉과 개념설계 결과를 기반으로 개발에 필요한 요소들을 계속해서 발전시켜 나갈 것이며, 이후 예비설계 단계에서는 현재까지 수행된 국내 큐브위성 발사와 운영사례를 분석하여 도출된 발생 가능한 문제점들[14]을 함께 고려하면서 위험요소들에 대해 대응해 나갈 것이며, 시스템 공학의 기술 관리 프로세스에 따라 체계적인 관리를 통해 큐브위성을 개발하고자 한다. 또한 우리의 CLUB 큐브위성을 통해 앞으로의 지상-우주 레이저 전파의 이해를 돕고, 우주공간에서 다양한 레이저 응용기술의 사용이 가능한 인프라를 구축함으로써 우리의 큐브위성이 앞으로의 지상-우주 레이저 사용에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2022R1A2C1092602).

References

1. Carrasco-Casado A, Biswas A, Fields R, Grefenstette B, Harrison F, et al., Optical communication on CubeSats — enabling the next era in space science, Proceedings of the

2017 International Conference on Space Optical Systems and Applications, Okinawa, Japan, 14-16 Nov 2017.

2. Lim HC, Sung KP, Yu SY, Choi M, Park E, et al., Satellite laser ranging system at Geochang station, J. Astron. Space Sci. 35, 253-261 (2018). https://doi.org/10.5140/JASS.2018.35.4.253
3. Butt Y, Effects of Chinese laser ranging on imaging satellites, Sci. Glob. Secur. 17, 20-35 (2009). https://doi.org/10.1080/08929880902864376
4. Kaushal H, Kaddoum G, Optical communication in space: challenges and mitigation techniques, IEEE Commun. Surv. Tutor. 19, 57-96 (2016). https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2603518
5. Ritz T, Coogan D, Conklin JW, Coffaro JT, Serra P, et al., Laser time-transfer facility and preliminary results from the CHOMPTT CubeSat mission, Adv. Space Res. 71, 4498-4520 (2023). https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.018
6. Rose TS, Rowen DW, LaLumondiere S, Werner NI, Linares R, et al., Optical communications downlink from a 1.5U CubeSat: OCSD program, Proceedings of the International Conference on Space Optics, Chania, Greece, 9-12 Oct 2018.
7. Buck AL, Effects of the atmosphere on laser beam propagation, Appl. Opt. 6, 703-708 (1967). https://doi.org/10.1364/AO.6.000703
8. Koo IH, Lee MK, Park SH, Systems engineering for system design and fabrication of CubeSats, J. Space Technol. Appl. 3, 342-354 (2023). https://doi.org/10.52912/jsta.2023.3.4.342
9. Andrews LC, Phillips RL, Laser Beam Propagation through Random Media, 2nd ed. (SPIE Press, Bellingham, 2005).
10. Lim HC, Park JU, Kim DJ, Seong K, Ka NH, Laser tracking analysis of space debris using SOLT system at Mt. Gamak, J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 43, 830-837 (2015). https://doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.9.830
11. Park JU, Lim HC, Sung KP, Choi M, Link budget analysis with laser energy for time transfer using the Ajisai satellite, Remote Sens. 13, 3739 (2021). https://doi.org/10.3390/rs13183739
12. Schmidt C, Fuchs C, The OSIRIS program at DLR, Proceedings of SPIE LASE, San Francisco, CA, 15 Feb 2018.
13. Song SM, Lim HC, Choi M, Yi Y, Analysis of tip/tilt compensation of beam wandering for space laser communication, J. Astron. Space Sci. 40, 237-245 (2023). https://doi.org/10.5140/JASS.2023.40.4.237
14. Koo I, Lee M, Park S, Lessons and countermeasures learned from both domestic and foreign CubeSat missions, J. Space Technol. Appl. 3, 355-372 (2023). https://doi.org/10.52912/jsta.2023.3.4.355

Author Information

송 석 민 smsong@kasi.re.kr

충남대학교 대학원 우주지질학과에서 2024년 석사 학위를 취득한 후, 동 대학원에서 박사학위 과정 중에 있다. 2022년부터 한국천문연구원 우주위험감시센터에서 학생연수원으로 참여하여 인공위성 레이저 추적 시스템과 지상-우주 간 레이저 통신에 대한 연구를 수행하고 있다.

송 호 섭 hssong@kasi.re.kr

충남대학교 대학원 우주지질학과에서 2019년 우주지질학 석사학위를 취득하고, 동 대학원에서 2023년 우주지질학 박사학위를 받았다. 석박사 학위기간 동안 도요샛 프로젝트의 과학 탑재체 및 이리듐 통신 모듈 개발에 참여하였다. 현재는 한국천문연구원에서 박사 후 연수원으로서 큐브위성 개발 및 전리권 관측 데이터 분석 연구를 하고 있다.

김 채 령 rlacofud01@o.cnu.ac.kr

2021년 충남대학교 천문우주과학과에 입학하여 재학 중이다. 현재 학부생으로서 미래 우주 산업에 관심을 가지고 큐브위성에 대해 공부하고 있다.

강 영 인 kyi8707@o.cnu.ac.kr

2018년 충남대학교 천문우주과학과에 입학하여 학사과정 중에 있다. CLUB 큐브위성의 개념설계를 함께 수행하였으며, 초소형위성의 설계 및 제작, 위성의 Attitude Determination and Control System(ADCS), 레이저 통신에 관심을 가지고 있다.

주 양 하 jush020902@o.cnu.ac.kr

2021년 충남대학교 천문우주과학과에 입학하여 학부생으로 재학 중이며, CLUB 큐브위성의 임무 설계와 개념 설계에 참여하여 큐브위성의 구조적인 설계를 함께 수행했다.

최 만 수 cmsoo@kasi.re.kr

충남대학교 전자공학과에서 제어 및 항법 전공으로 박사학위를 취득하였으며, 2008년부터 한국천문연구원에서 위성항법시스템 운영 및 활용과 관련된 연구를 수행하였고, 현재는 우주위험감시센터에서 인공위성 레이저 추적시스템 및 우주 국방관련 연구를 수행하고 있다.

임 형 철 hclim@kasi.re.kr

KAIST 항공우주공학과에서 위성제어 전공으로 박사학위를 취득하였다. 1996년부터 ㈜현대전자 위성사업단에서 근무한 이후, 2000년부터는 한국천문연구원에 재직 중이다. 2009년부터 1년간 NASA/GSFC에서 Visiting scientist로 근무하였고, 2015년부터 2020년까지 과학기술연합대학원대학교에 교수로 지냈으며, 현재 서태평양 레이저추적 네트워크(WPLTN) 기구의 의장을 맡고 있다. 레이저에 기반한 우주물체 추적, 광통신 및 우주탐사 관련 연구를 수행하고 있다.

이 유 euyiyu@cnu.ac.kr

미국 콜로라도 대학(University of Colorado at Boulder)에서 물리학 박사(1994)를 취득하였고, 그 후 LASP(Laboratory for Atmospheric and Space Physics)에서 Research Associate로 근무하다가 1997년부터는 충남대학교 천문우주과학과(대학원 우주지질학과)에서 교수로 재임 중이다. 다양한 자연현상에 관한 호기심으로 달과 화성에 인류의 미래 기지 조성과 자원 탐사를 위한 기초연구로 용암동굴, 화산 및 절벽 등 지질학적 연구를 하고 있으며, 위성 원격탐사 자료를 활용하여 지구 해양 및 대기 변화의 근원이 되는 열의 기원 등을 연구하고 있다.