



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(5), 391-399(2020)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.5.391

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

거창 레이저 추적 시스템의 광 경로 전환을 위한 회전 디스크의 우주쓰레기 레이저 추적 성능 분석

성기평¹, 임형철², 유성열³, 최만수⁴, 류재철⁵

Space Debris Tracking Coverage Analysis of Spinning Disk for Optical Path Switch of Geochang Laser Tracking System

Ki-Pyoung Sung¹, Hyung-Chul Lim², Sung-Yeol Yu³, Man-Soo Choi⁴ and Jae-Cheol Ryou⁵Korea Astronomy and Space Science Institute^{1,2,3,4}Chungnam National University⁵

ABSTRACT

KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute) has been developing the multipurpose laser tracking system with three functions of satellite laser tracking, adaptive optics and space debris laser tracking for scientific research and national space missions. The space debris laser tracking system provides the distance to space debris without a laser retro-reflector array by using a high power pulse laser, which employs a spinning disk to change the optical path between the transmit and receive beams. The spinning disk causes the collision band which is unable to reflect the returned signal to a detector and then has an effect on the tracking coverage of space debris. This study proposed the mathematical model for tracking coverage by taking into account the various specifications of spinning disk such as disk size, spinning velocity and collision rate between the disk and hole. In addition, the spinning disk specifications were analyzed in terms of tracking coverage and collision band based on the mathematical model to investigate tracking requirements of the Geochang laser tracking system.

초 록

한국천문연구원은 인공위성 레이저 추적, 적응광학, 우주쓰레기 레이저 추적 등 과학 연구 및 국가적 미션을 수행하기 위해 다목적 레이저 추적 시스템 개발을 추진해 오고 있다. 지상에서 고출력 펄스 레이저를 발진하여 우주쓰레기로부터 반사된 신호를 바탕으로 거리를 측정하는 우주쓰레기 레이저 추적 시스템은 광 경로 전환을 위해 회전 디스크 방식을 이용한다. 이러한 방식은 수신 검출기로 반사시킬 수 없는 충돌 영역이 발생하여 우주쓰레기 추적 성능에 영향을 미친다. 본 논문에서는 회전 디스크가 추적 성능에 영향을 미치는 홀 크기, 홀 개수, 회전 속도, 레이저와 홀의 중첩 비율, 레이저 빔 반경을 고려하여 추적 성능 분석 모델을 제시하였다. 제시된 성능 분석 모델을 이용하여 추적 범위 및 충돌 영역을 분석하고 거창 레이저 추적 시스템의 요구 조건을 만족하는 회전 디스크 사양을 제시하였다.

Key Words : Satellite Laser Ranging(인공위성 레이저 추적), Debris Laser Tracking(우주쓰레기 레이저 추적), Transmit/Receive Spinning Disk(송수신 회전 디스크)

† Received : January 7, 2020 Revised : March 30, 2020 Accepted : April 10, 2020

¹ Researcher, ² Principal Researcher, ^{3,4} Senior Researcher, ⁵ Professor

¹ Corresponding author, E-mail : kpsung@kasi.re.kr, ORCID 0000-0003-2639-4127

© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

I. 서 론

인공위성 레이저 추적은 레이저 반사경(Retro-reflector)이 장착된 인공위성을 대상으로 미리 예측한 궤도 정보(Consolidated Prediction Format, CPF)를 이용하여 인공위성까지 거리를 센티미터(cm) 수준으로 정밀하게 측정하는 시스템이다. 지상에서 극초단파 펄스 레이저 발사 시간과 인공위성으로부터 반사되어 되돌아온 레이저의 도착 시간을 바탕으로 비행시간(Time of Flight)을 측정하고 이를 이용하여 거리를 계산하는 원리이다[1].

한국천문연구원은 세종 레이저 추적 시스템을 개발하여 운영 중에 있으며, 지상에서 고 반복율 레이저를 발진하여 고도 250km ~ 25,000km 상공의 레이저 반사경을 탑재한 인공위성을 추적한다. 이는 인공위성 정밀 궤도 결정, 우주 측지, 회전 역학 등 다양한 연구에 활용되고 있다. 또한 거창 레이저 추적 시스템은 인공위성 레이저 추적(Satellite Laser Ranging, SLR), 적응광학(Adaptive Optics, AO), 우주쓰레기 레이저 추적(Debris Laser Tracking, DLT) 시스템으로 구성되어 있으며, 우주 감시, 달 레이저 거리 측정, 자국의 우주 미션 등 국가적 미션을 수행하기 위한 용도로 사용될 예정이다. 인공위성 레이저 추적 및 적응광학 시스템은 2019년에 개발이 완료되어 현재 시험 운영 단계에 있으며, 우주쓰레기 레이저 추적 시스템은 개발 계획 단계에 있다. 거창 인공위성 레이저 추적 시스템은 지상에서 레이저를 발진하여 고도 200km ~ 36,000km 상공의 레이저 반사경이 장착된 인공위성을 추적하며, 적응광학 시스템은 10등급(Magnitude) 보다 밝고 고도 1,000km 이하의 우주쓰레기에 대한 영상을 취득할 수 있다.

1957년 10월 4일 인류 최초로 스푸트니크(Sputnik) 인공위성 발사를 시작으로 약 62년간 인공 우주 물체가 지구 궤도에 다양한 형태로 발생하였다[2]. 중국이 자국의 인공위성에 대한 미사일 요격과 Iridium33과 Cosmos2251 간 충돌로 우주쓰레기가 급격하게 증가하였으며, 이로 인해 우주 위협의 인식 변화와 함께 그 중요성이 증가 되었다. 우주쓰레기는 수명이 다해 제어할 수 없는 인공위성, 발사체 부산물, 우주 물체 간 충돌에 의해 발생한 파편 등을 말한다. 2019년 1월 기준 1cm보다 작은 우주쓰레기는 약 12,800만 개, 1cm ~ 10cm 크기는 약 90만 개, 10cm보다 큰 크기는 약 34,000개로 추정되고 있다[3]. 이러한 우주쓰레기는 인공위성 또는 국제우주정거장과 충돌로 인한 우주 자산 피해 및 지구 추락으로 인한 인류 안전에 큰 위협이 된다. Fig. 1에서 보듯이 고도 약 2000km 미만의 저궤도(Low Earth Orbit) 우주쓰레기가 가장 많이 분포되어 있어, 저궤도에서의 충돌 및 추락 위험성은 더욱 크다. 따라서 저궤도 우주쓰레기의 정밀한 위치 추적을 통한 궤도 예측(Orbital Prediction)은

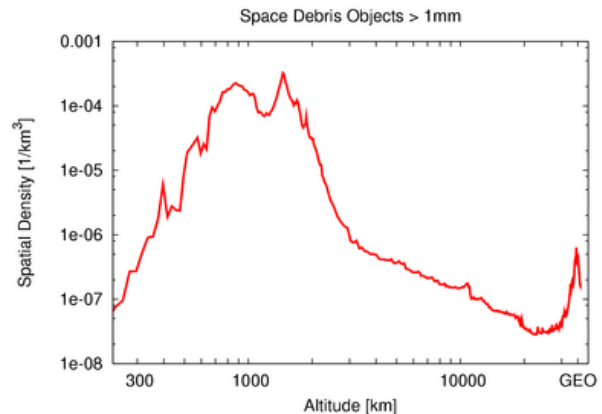


Fig. 1. Spatial density of space debris by altitude according to ESA MASTER-2001, without debris from the Chinese ASAT and 2009 collision events [6,7]

자국 우주 자산과 인류 안전에 매우 중요하다. 레이저 추적 시스템은 가장 정밀한 거리측정 정보를 제공하기 때문에 예측궤도력 정밀도를 향상시킬 수 있는 대안으로 인식되고 있다[4].

우주쓰레기 레이저 추적은 레이저 반사경이 없는 우주쓰레기를 대상으로 하며, 현재 기술로는 5cm 크기의 우주쓰레기에 대해서 레이저 추적이 가능하다. 이러한 우주쓰레기는 레이저 반사경이 장착된 인공위성에 비해 레이저 유효면적(Laser Cross Section)은 수 천 cm^2 수준으로 매우 작아 고출력 레이저를 이용한다 하더라도, 평균적으로 지상의 검출기에서 검출할 수 있는 평균 광자 수가 1,000km 거리에서는 10여 개 이하 수준이다[4]. 따라서 적은 광자를 검출하기 위해 정밀한 광 정렬과 높은 효율의 신호 검출기가 요구된다. 인공위성 레이저 추적은 정밀한 예측 정보 CPF를 사용하는 반면에, 우주쓰레기 추적은 JSpOC (Joint Space Operations Center)에서 제공하는 TLE (Two Line Elements)을 사용하는데, 이는 시간 오차 (Time Bias) $\pm 1\text{sec}$, 거리 오차(Range Bias)가 $\pm 1\text{km}$ 의 오차를 갖는다[4]. 이러한 궤도 오차 및 적은 검출 광자 수로 인해 우주쓰레기 추적 시 반사된 광자를 손실 없이 수신 검출기로 유도하는 것이 매우 중요하다.

우주쓰레기로부터 반사된 적은 광자 수로 인한 미약한 신호는 광 경로 전환을 위한 회전 디스크 충돌 영역에 의해 신호가 손실되기 때문에 이를 개선하고자 하는 연구가 진행되었다[5]. 이전 연구에서는 회전 디스크 균형문제에 의해 2개의 홀로 한정된 회전 디스크 충돌 영역만 분석하였지만, 본 논문에서는 무게 균형 문제 해결을 위한 방안과 회전 디스크가 1개와 2개의 홀로 이루어진 경우에 홀 크기, 홀 개수, 회전 속도, 레이저와 홀의 중첩 비율, 레이저 빔 반경을 고려한 추적 성능 모델을 제시하였다. 거창 레이저 추적 시스템은 고도 200 ~ 1,800km에 존재하는

우주쓰레기를 추적하도록 요구되는데, 추적 성능 모델을 이용하여 우주쓰레기의 추적 범위 및 충돌 영역을 분석하고 요구 조건을 만족하는 회전 디스크 사양을 제시하였다. 이러한 연구 결과는 개발 계획 단계인 거창 우주쓰레기 추적 시스템과 공군 고출력 레이저 위성추적체계 등 우주쓰레기 레이저 추적 시스템에 적용될 것으로 기대된다.

II. 본 론

2.1 거창 레이저 추적 시스템

거창 레이저 추적 시스템은 한국천문연구원과 호주 EOSSS(Electro Optic Systems Space Systems)사의 공동 개발로 진행되었다. 거창 시스템을 구성하는 SLR, AO, DLT 시스템은 별도의 물리적 공간에 구성되어 있지만, 동시에 운영할 수 없다. 그 이유는 단일 송수신 광학 망원경과 광학 경로가 일체형으로 설계되었기 때문이다. 즉, 인공위성 또는 우주쓰레기로 향하는 레이저 광 경로는 단일 경로이지만, 관측 시스템은 3개인 것이다. 따라서 이러한 다중 시스템을 효과적으로 구동하기 위한 방법으로 Fig. 2와 같이 3개 시스템(SLR, AO, DLT)의 광 경로 교차 지점에 회전 미러(Rotation Mirror)가 회전하면서 인공위성 레이저 추적 시스템 또는 적응광학 시스템 또는 우주쓰레기 레이저 추적 시스템 방향으로 레이저 빔을 반사하는 방식으로 운영된다.

2.1.1 레이저 추적 광학 시스템 개요

우주쓰레기 레이저 추적을 위해선 레이저, 추적마운트, 전자, 광학, 소프트웨어 등 다양한 분야의 기술이 요구된다. 본 논문에서는 광 경로 전환을 위한 회전 디스크 사양에 따른 우주쓰레기 레이저 추적 성능 분석을 위해 광학 시스템 중심으로 설명한다. 광학 시스템은 송수신 광학망원경, 수신부, 레이저 유도계로 구분된다. 송수신 광학망원경은 송신된 레이저를 조사하고, 우주쓰레기로부터 반사된 빛을 집광

하는 용도로 사용된다. 수신부는 배경 잡음과 후방 산란(Back scattering)을 제거하기 위한 ND 필터(Neutral Density Filter), 협대역 통과 필터(Narrow Band Pass Filter), 공간 필터(Spatial Filter)와 높은 양자 효율을 갖는 SPAD(Single Photon Avalanche Diode) 검출기로 구성된다. 레이저 유도계는 쿠테 미러(Coude Mirrors), 빔 확장기, 회전 디스크로 구성되어 있으며, 레이저 빔 증폭과 송신 망원경 또는 수신 검출기 방향으로 레이저를 유도하는 역할을 한다 [8]. 즉, 지상의 광학 테이블에서 발사된 레이저가 송신 망원경으로 전달되도록 유도하고, 우주쓰레기로부터 반사되어 되돌아온 신호는 다시 광학 테이블의 수신 검출기로 보내는 역할을 하는 것이다. 이러한 레이저 유도계는 송수신 일체형(Common Coude)과 분리형(Separate)으로 구분된다. 송수신 일체형은 하나의 송수신 광학 망원경으로 구성되고, 레이저 송수신 경로가 단일 형태로 구성되어 있는 것을 의미하며, 송수신 분리형은 송신 광학 망원경과 수신 광학 망원경이 별도로 구성되고, 레이저 송수신 경로도 각각 분리된 형태를 의미한다.

거창 레이저 추적 시스템은 Table 1에서 보듯이 송수신 일체형으로 개발되었다[9]. 송수신 일체형은 레이저 송신 및 수신 경로가 단일 경로이기 때문에 레이저 경로를 전환하기 위한 기술이 필수적으로 요구된다. 미국, 러시아, 호주, 일본, 독일 등의 인공위성 레이저 추적 관측소에서 사용되고 있는 방법은 레이저 광자가 통과할 수 있는 하나 또는 그 이상의 특수 코팅된 작은 광 홀(Coated Optical Hole)이 있는 구형 모양의 디스크를 이용하여 송신과 수신 광 경로를 전환하는 방법이다. 이를 회전 디스크(Spinning Disk) 방식 또는 T/R 디스크(Transmit/Receive Disk) 방식이라 부른다. 회전 디스크 방식은 송신 시 특수 코팅된 광 홀을 통과하게 되고, 수신 시 회전하는 디스크 표면 또는 광 홀에 반사되어 수신 검출기 방향으로 레이저 빔의 광 경로를 전환한다. 그러나 우주쓰레기 레이저 추적을 위해서는 고출력 레이저를 사용하므로 완전히 파여 있는 디스크 홀(Empty Disk Hole)을 가지는 회전 디스크를 사용한다. 이러한 방식은 우주쓰레기의 거리가 가까운 경우 디스크 홀이 충분히 회전하기 전에 수신 레이저 빔이 디스크 홀로 다시 입사되거나, 레이저 빔의 비행시간 동안 회전 디스크 홀이 원래 위치로 되돌아와 수신 레이저 빔을 수신 검출기로 반사시킬 수 없는 영역이 발생하는데, 이를 충돌 영역(Collision Band)이라 한다[10]. 이러한 충돌 영역은 회전 디스크가 단일 홀이면 최소화할 수 있지만, 회전 디스크의 무게 불균형으로 인해 정밀한 회전을 제어하기 어렵다. 따라서 현존하는 우주쓰레기 레이저 추적 관측소는 대칭된 다중 홀 방식을 사용하지 않지만, 단일 홀에 비해 넓은 충돌 영역을 가지고 있어 우주쓰레기 레이저 추적 범위가 제한적이다.

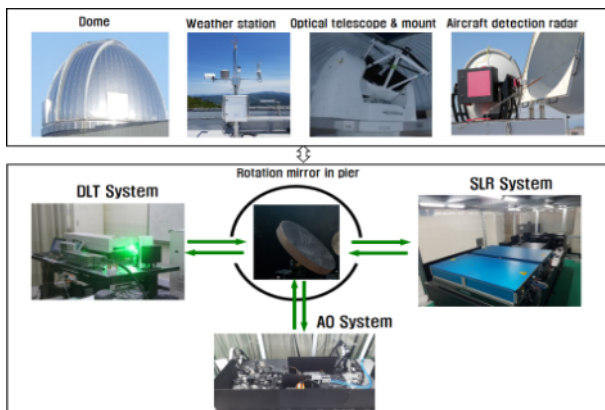


Fig. 2. Geochang system configuration

Table 1. Transmit and receive optical path of major observatories in ILRS network

Nation/Site	Observation Name	Optical Path	Switch Method
Republic of Korea	Geochang	Common Coude	T/R Disk
Ukraine	Simeiz	Common Coude	T/R Disk
Latvia	Riga	Common Coude	T/R Disk
Switzerland	Zimmerwald	Common Coude	T/R Disk
Peru	Arequipa	Common Coude	T/R Disk
Germany	Wetzell	Common Coude	T/R Disk
Australia	Mt Stromlo	Common Coude	T/R Disk
Italy	Matera	Common Coude	T/R Disk
Russia	Mendeleevo2	Common Coude	T/R Disk
Texas	McDonald Observatory	Common Coude	T/R Disk
Republic of Korea	Sejong	Separate	-
China	Changchun	Separate	-
Japan	Simosato	Separate	-
United Kingdom	Herstmonceux	Separate	-
Australia	Yarragadee	Separate	-
Germany	Potsdam	Separate	-
Maryland	Greenbelt	Separate	-
China	Kunming	Separate	-
Austria	Graz	Separate	-
China	Beijing	Separate	-

2.1.2 우주쓰레기 레이저 추적 시스템

우주쓰레기 레이저 추적을 위한 광학 망원경은 단일망원경으로 인공위성 레이저 추적, 적응광학 시스템과 같이 사용한다. 지름 100cm 직경에 초점비 $f/1.5$ 오목 포물면 주경(M1)과 지름 25cm 직경에 볼록 포물면 부경(M2)으로 구성된 CPBE(Confocal Paraboloid Beam Expander) 형태로 설계되었고, 주경과 부경을 포함하여 총 7개의 쿠데 미러로 구성되어 있다.

현재 개발 계획 단계의 우주쓰레기 레이저 추적을 위한 광학 시스템은 광학 망원경과 쿠데 미러를 제외한 수신부와 레이저 유도계가 별도로 구성된다. 수신부는 광학 정렬에 사용되는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라, 수신 광 신호 검출기, 검출기를 보호하는 ND 필터, 배경 잡음을 제거하는 광학 필터 및 미러 등으로 구성된다. 레이저 유도계는 레이저 빔을 확장하기 위한 빔 확장기, 레이저 빔 전환을 위한 회전 디스크로 구성된다. 빔 확장기는 2.7배 굴절형(Refraction Expander)과 7배 반사형(Reflection Expander)이며, 회전 디스크는 엔코더, 모터, 베어링, 커플링 등 정밀 제어를 위한 부품과 원형 모양의 회전 디스크가 포함된다. Fig. 3은 우주쓰레기 추적용 회전 디스크의 3차원 어셈블리를 보여주고 있다. 이러한 회전 디스크는 광 경로 전환을 위한 홀이 요구되는데 단일 홀을 고려할 경우 회전 디스크 무게 균

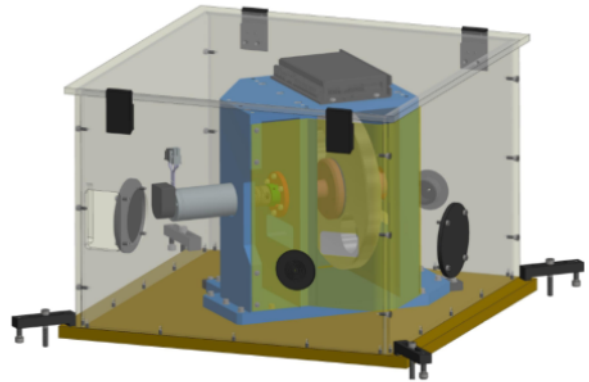


Fig. 3. T/R disk design concept

형 문제를 해결하기 위한 방안이 요구된다. 이러한 불균형 문제를 해결하기 위해 세종 인공위성 레이저 추적 시스템에 사용된 후면 풀 오픈(Rear Side Full Open, RSFO) 방식을 사용할 수 있다[11]. 후면 풀 오픈 방식은 미러 후면에 원형 셀 형태로 홈(Groove)을 내는 방식인데 미러의 무게를 줄이기 위한 방법으로 사용되었다. 따라서 회전 디스크의 단일 홀로 야기되는 무게 불균형을 단일 홀의 대각선에 위치하는 디스크의 뒷면에 RSFO 방식을 적용하면 회전 디스크의 무게 불균형을 최소화하여 정밀한 회전 디스크 제어가 가능하다.

Table 2. Specifications of debris laser ranging system in Geochang

Item	Parameter	Specifications
Optical Telescope	Optical path type	Common Coude
	Primary mirror aperture	100 cm
	Secondary mirror aperture	25 cm
	Max slew rate(Az, El)	30 deg/sec, 15 deg/sec
	Tracking & Pointing accuracy	< 1 arcsec
Detector	Type	C-SPAD
	Quantum efficiency	20%
	Timing delay stability	~1 psec
Laser	Wavelength	532 nm
	Power	25 W
	Pulse width	5 ns
	Repetition rate	10 Hz
	Beam diameter	100 cm

거창 우주쓰레기 추적용 레이저는 펄스 당 평균 출력은 25W로 인공위성 추적용 레이저 1W에 25배이다. 따라서 인공위성 추적용 레이저는 특수 코팅된 두 개의 광 홀을 가지는 회전 디스크를 사용하여 회전 디스크에 상관없이 충돌 영역을 가지지 않는다. 그러나 높은 출력을 가지는 우주쓰레기 추적용 레이저는 물리적 광 홀을 가지기 때문에 회전 디스크 사양 및 레이저 비행시간에 따라 충돌 영역을 가진다. Table 2는 우주쓰레기 레이저 추적 시스템의 사양이다.

2.2 우주쓰레기 추적 성능 모델

우주쓰레기 추적용 레이저 시스템에서 생성된 고출력 레이저 빔은 쿠데 미러와 광학 망원경을 통해 우주쓰레기로 발사하게 된다. 우주쓰레기로부터 반사되어 되돌아오는 레이저 빔은 광학 망원경에 집광되어 동일한 쿠데 미러를 따라 회전 디스크에 도달한다. 회전 디스크는 주어진 회전 속도에 따라 레이저 빔의 비행시간 동안 회전하기 때문에 디스크 홀이 아닌 표면에 반사되어 수신 검출기로 전달된다. 이때 수신 검출기 방향으로 레이저를 반사하기 위해서 회전 디스크를 약 45도 기울여서 설치해야 한다. 우주쓰레기 사거리가 짧아 비행시간이 적은 경우에 반사되어 되돌아오는 레이저 빔이 회전 디스크가 충분히 회전하기 전에 회전 디스크 홀에 도달할 수 있어 수신 검출기로 반사시킬 수 없다. 또한 회전 디스크가 레이저 빔의 비행시간 동안 회전한다 하더라도 반사되어 되돌아오는 레이저 빔이 회전 디스크 홀에 도달하는 경우에도 레이저 빔을 수신 검출기로 반사시킬 수 없는 충돌 영역이 발생하기에 회전 속도와 디스크 홀 크기는 추적 범위에 영향을 끼친다. 따라서 추적 범위에 영향을 끼치는 홀 크기, 회전 디스크 홀에 레이저 빔의 중첩 여부, 회전 속도 등을 고려한 추적 성능 모델을 제시한다.

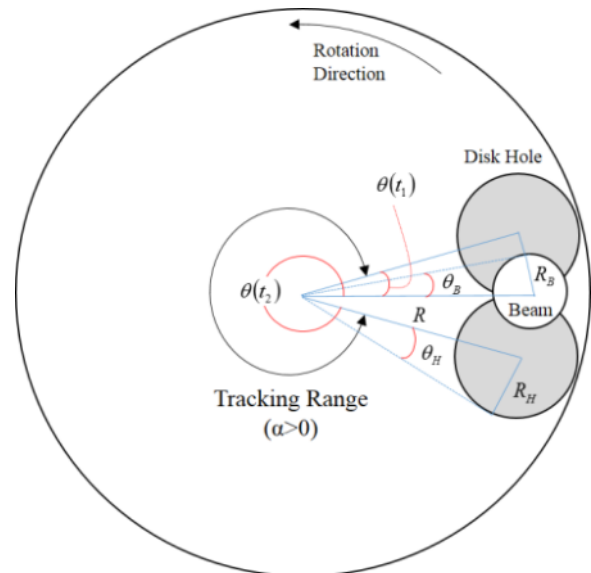
Fig. 4. Tracking range for one hole ($\alpha = 0$)

Figure 4는 회전 디스크가 하나의 홀을 가지는 경우에 대해서 레이저 빔이 디스크 표면에 50% 반사되었을 때의 추적 영역을 보여 주며, t_1 및 t_2 시간에 대한 디스크 홀의 위치를 나타낸다. 여기서 디스크가 45도 기울어져 있지만, 추적 범위 분석을 위한 수식 전개를 위해서 레이저 빔과 디스크 홀은 원으로 가정하였다. α 는 레이저 빔과 회전 디스크 홀의 중첩 비율로 $-1 \leq \alpha \leq 1$ 값을 가진다. $\alpha = 1$ 은 레이저 빔이 회전 디스크 홀과 중첩이 되지 않아 레이저 빔을 수신 검출기로 모두 반사함을 의미하고, $\alpha = 0$ 은 50% 중첩, $\alpha = -1$ 은 완벽하게 100% 중첩되어 레이저 빔을 전혀 수신 검출기로 반사할 수 없음을 의미한다.

레이저 빔의 비행시간과 회전 디스크의 회전 각도는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\tau = \frac{2 \cdot d}{c} = \frac{\theta(t)}{2\pi \cdot f} \quad (1-a)$$

$$\theta(t) = 2\pi f \cdot \tau = 2\pi f \cdot \left(\frac{2d}{c}\right) \quad (1-b)$$

여기서, τ 는 비행시간, d 는 우주쓰레기의 사거리, c 는 광속, $\theta(t)$ 는 회전 디스크의 회전각도, f 는 회전 속도(Hz)를 의미한다. 충돌 영역을 구하기 위해서 회전 디스크 중심에서 홀의 중심까지 거리를 R , 디스크 홀의 반경을 R_H , 우주쓰레기에 반사되어 되돌아오는 레이저 빔의 반경을 R_B 이라 하면 θ_H 및 θ_B 를 다음과 같이 정의한다.

$$\theta_H = \sin^{-1}\left(\frac{R_H}{R}\right) \quad (2-a)$$

$$\theta_B = \sin^{-1}\left(\frac{R_B}{R}\right) \quad (2-b)$$

회전 디스크의 회전수와 관계없이 충돌 영역은 디스크 홀 위치와의 관계이므로 디스크 홀의 회전각도 $\theta_n(d)$ 는 $(0 \leq \theta_n \leq 2\pi)$ 의 값을 가지며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_n(d) = \text{mod}\left(2\pi f \cdot \left(\frac{2d}{c}\right), 2\pi\right) \quad (3)$$

$\text{mod}(a,b)$ 함수는 a 를 b 로 나누었을 때 나머지를 계산한다. 따라서 우주쓰레기의 사거리에 따른 추적 영역은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_m \leq \theta_n(d) \leq (2\pi - \theta_m) \quad (4)$$

여기서 θ_m 은 충돌 영역을 나타내는 변수로 다음과 같이 정의된다.

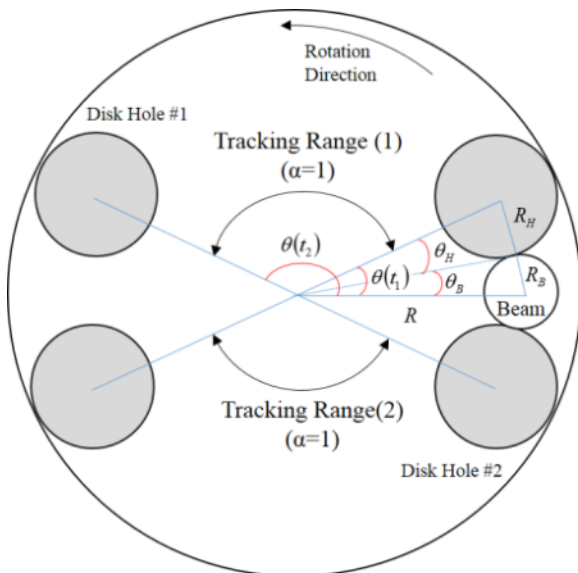


Fig. 5. Tracking range for two holes ($\alpha = 1$)

$$\theta_m = \theta_H + \alpha \cdot \theta_B \quad (5)$$

Figure 5는 회전 디스크가 두 개의 홀을 가지며 레이저 빔이 100% 반사되는 경우($\alpha=1$)에 대한 추적 영역을 보여주고 있는데, 두 개의 디스크 홀은 무게 균형을 위해서 180도 각도로 대각선 방향에 위치한다. 하나의 홀을 가지는 회전 디스크의 경우, 1개의 연속적인 추적 영역을 가지는 수식 (4)와는 달리 두 개의 디스크 홀이 존재하므로 우주쓰레기의 사거리에 따른 추적 영역은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_m \leq \theta_n(d) \leq (\pi - \theta_m) \quad (6-a)$$

$$(\pi + \theta_m) \leq \theta_n(d) \leq (2\pi - \theta_m) \quad (6-b)$$

2.3 우주쓰레기 추적 성능 분석

거창 우주쓰레기 레이저 추적 시스템은 고각 20 ~ 90도 사이에 운영되며, 고도 200 ~ 1,800km 고도의 우주쓰레기를 추적하도록 요구된다. 20도 미만의 고각은 지상의 안전상의 이유로 제한된다. 회전 디스크는 우주쓰레기 사거리에 따라 추적 영역이 달라지므로, 우주쓰레기 고도에 따른 사거리는 다음과 같이 계산된다[4].

$$R = -(R_E + h_S)\cos\theta_Z + \sqrt{(R_E + h_S)^2\cos^2\theta_Z + 2R_E(h_D - h_S) + h_D^2 - h_S^2} \quad (7)$$

여기서 R_E 는 지구 반경, h_S 는 관측소의 고도, θ_Z 는 우주쓰레기의 천정각, h_D 는 우주쓰레기 고도를 나타낸다. Fig. 6은 1,800km 고도를 가지는 우주쓰레기가 고각에 따른 사거리의 변화를 보여준다. 90도 고도에서는 사거리 약 1,800km이지만, 20도 고도에서는 사거리가 3,400km로 변한다. 따라서 거창 우주쓰레기 레이저 추적 시스템은 사거리 200 ~ 3,400km를 가지는 우주쓰레기에 대해서 추적이 가능해야 한다.

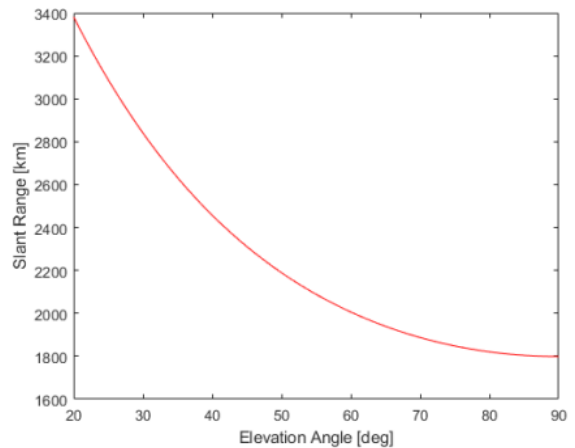


Fig. 6. Slant range vs zenith angle for space debris with 1,800km altitude

회전 디스크의 홀 지름과 회전 속도의 범위는 우주 쓰레기 추적용 레이저와 관련이 있다. 거창 우주쓰레기 추적용 레이저는 미국 Continuum사 Powerlite DLS 2J 모델로 레이저 빔 지름(Beam Diameter) 12mm, 반복률(Repetition-rate) 10Hz이다. 송신 레이저가 회전 디스크 홀을 통과하기 위한 회전 디스크 홀 지름은 최소 레이저 빔 지름과 같거나 커야 하며, 회전 속도는 레이저 반복률의 배수를 가져야 한다. 회전 디스크에 3개 이상의 홀은 추적 영역이 작아지므로 일반적으로 채택하지 않는다. 결국, 거창 우주쓰레기 추적용 회전 디스크 홀은 2개 이하, 크기는 12mm 이상, 회전 속도는 레이저 반복율의 배수를 가져야 하며, 수신된 레이저 빔의 중첩 비율에 따른 반사율을 고려하여 개발해야 한다.

일부 송신 레이저 빔이 회전 디스크 홀에 의해 차단되는 것을 최소화하기 위해 레이저 빔 지름보다 회전 디스크 홀 지름을 크게 설계하는 것이 일반적이다. 호주 Stromlo 관측소의 경우 회전 디스크 홀 사이즈를 3mm 여유를 두고 있다[5]. 거창 우주쓰레기 회전 디스크 홀 지름은 레이저 빔 지름 12mm보다 3mm 여유를 둔 15mm, 회전 속도는 현재 보유하고 있는 레이저 반복률에 따라 10Hz ~ 60Hz, 디스크 홀 개수는 최대 2개, 중첩 비율 $\alpha = 1$ 과 $\alpha = 0$ 을 조건으로 우주쓰레기 레이저 추적 성능을 분석하였다.

Table 3과 Figs. 7~8은 레이저 빔의 중첩 비율이 $\alpha = 1$ 인 경우에 우주쓰레기 사거리, 회전 디스크의 회전 속도, 홀 개수에 따른 우주쓰레기 추적 가능 영역을 나타내고 있으며, Table 4와 Figs. 9~10은 레이저 빔의 중첩 비율이 $\alpha = 0$ 인 경우에 대한 우주쓰레기 추적 가능 영역을 보여준다. 회전 디스크의 회전 속도가 느리면 사거리가 낮은 우주쓰레기의 경우 수

Table 3. Analysis of tracking range according to the rotating disk speed ($\alpha = 1$)

f (hz)	Range(km)	
	One hole($d_{min} \sim d_{max}$)	Two hole($d_{min} \sim d_{max}$)
10	975~3400	974~3400
20	488~3400	488~3260
30	325~3400	325~2173 2824~3400
40	244~3400	244~1630 2118~3400
50	200~2802 3193~3400	200~1304 1694~2802 3193~3400
60	200~2335 2661~3400	200~1806 1412~2335 2661~3400

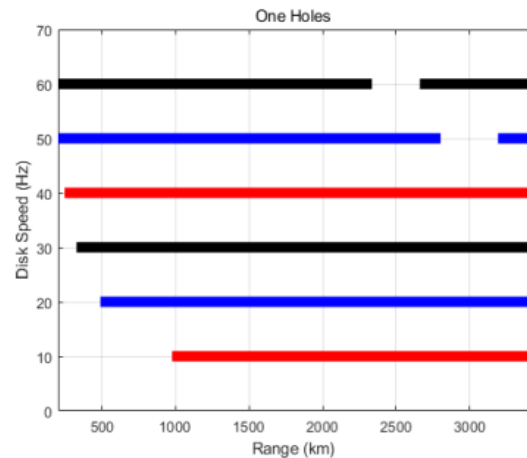


Fig. 7. Tracking Range according to the rotating disk speed at one hole ($\alpha = 1$)

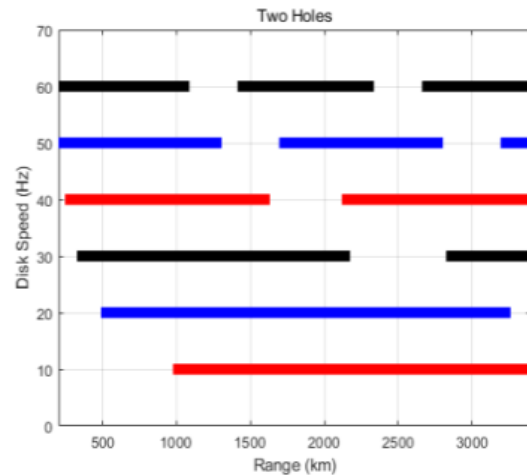


Fig. 8. Tracking Range according to the rotating disk speed at two hole ($\alpha = 1$)

신 검출기로 반사시키기 위한 디스크 회전이 이루어지기 이전에 레이저 빔이 도달하여 충돌 영역이 존재하지만, 그 반대로 회전 속도가 빨라질수록 낮은 사거리의 우주쓰레기 충돌 영역이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 회전 속도가 빠르면 우주쓰레기의 사거리가 길어질수록 충돌 영역 발생도 커진다. 즉, 회전 속도가 느리면 낮은 사거리에서 충돌 영역이 발생하고, 회전 속도 빠르면 긴 사거리에서 충돌 영역이 발생하여 우주쓰레기 추적이 불가능한 것을 확인할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 Table 3의 우주쓰레기 추적 가능 범위를 홀 개수에 따라 분리하여 막대그래프 형태로 나타낸 것이다. Fig. 9와 Fig. 10도 Table 4의 우주쓰레기 추적 가능 범위를 그래프 형태로 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 10에서 보듯이 2개의 홀을 갖는 경우에는 단일 홀에 비해 충돌 영역이 자주 발생하여 우주쓰레기 추적 성능을 저하시키는 요인이 된다.

Table 4. Analysis of tracking range according to the rotating disk speed ($\alpha = 0$)

f (hz)	Range(km)	
	One hole($d_{min} \sim d_{max}$)	Two hole($d_{min} \sim d_{max}$)
10	399~3400	699~3400
20	350~3400	350~3398
30	233~3400	233~2265 2732~3400
40	200~3400	200~1699 2049~3400
50	200~2858 3138~3400	200~1359 1639~2858 3138~3400
60	200~2381 2615~3400	200~1132 1366~2381 2615~3400

중첩 비율 $\alpha = 1$ 인 경우에는 회전 수 및 홀의 개수에 상관없이 충돌 영역이 존재한다. 그러나 중첩 비율이 $\alpha = 0$ 인 경우인 Table 4 또는 Fig. 9를 보면 충돌 영역이 발생하지 않는 조건이 존재한다. 즉, 단일 홀과 회전 속도가 40Hz인 경우에는 거창 우주쓰레기 추적 요구 조건인 고도 20 ~ 90도, 우주쓰레기 사거리 200km ~ 3,400km 내에서 충돌 영역이 발생하지 않는 조건을 확인할 수 있다. 한 개의 홀을 가지고 회전 속도가 40Hz인 경우, $\alpha = 1$ 인 경우에 사거리 244km 이상인 범위에서 충돌 영역이 존재하지 않지만, 200 ~ 243km 범위에서는 충돌 영역이 발생한다. 그러나 $\alpha = 0$ 인 경우, 이러한 범위에서 충돌 영역이 발생하지 않는데, 리턴 광자 수는 거리의 4승에 반비례하므로, 이러한 사거리에서 회전 디스크에 의해 반사율이 50% 감소된다 하더라도 레이저 추적이 가능하다고 할 수 있다.

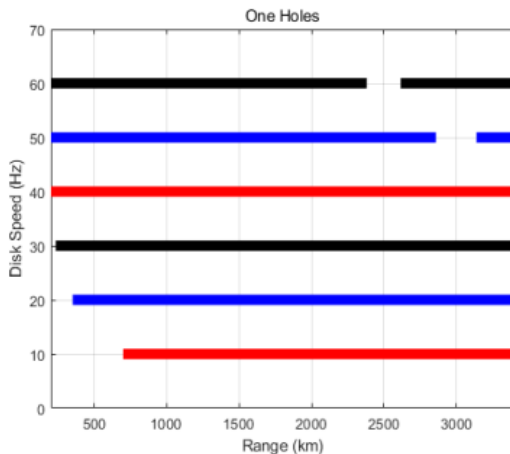


Fig. 9. Tracking Range according to the rotating disk speed at one hole ($\alpha = 0$)

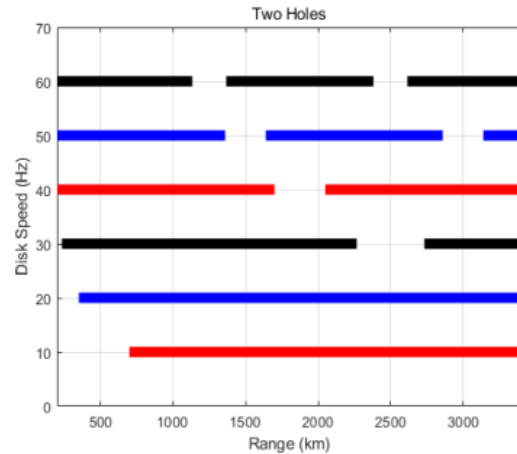


Fig. 10. Tracking Range according to the rotating disk speed at two hole ($\alpha = 0$)

III. 결 론

거창 레이저 추적 시스템은 인공위성 레이저 추적, 적응광학, 우주쓰레기 레이저 추적이 가능한 다목적 시스템으로, 송수신 일체형으로 개발되어 광 경로 전환이 필수적이기 때문에 이를 위해 회전 디스크 방식을 채택하였다. 이러한 방식은 디스크 홀에 따른 충돌 영역이 발생하여 우주쓰레기 레이저 추적 시스템의 추적 성능에 영향을 미친다. 본 연구에서는 회전 디스크의 충돌 영역에 대한 분석 모델을 제시하고 이를 바탕으로 홀 크기, 홀 개수, 회전 속도, 레이저와 홀의 중첩 비율 조건에 따라 우주쓰레기 레이저 추적 성능 분석을 수행하였다. 이러한 분석 결과를 통해서 사거리에 따른 우주쓰레기 추적 가능 범위와 충돌 영역을 확인할 수 있었다.

중첩 비율 $\alpha = 1$, 단일 홀, 회전 속도가 40Hz인 경우 200km 근처 저고도에서만 충돌 영역이 발생하여 우주쓰레기 추적이 불가능하다. 그러나 작은 사거리인 점을 감안하면 충분한 리턴 광자 수를 검출할 수 있으므로 중첩 비율 $\alpha = 0$ 인 50% 반사 경우에는 레이저 추적이 가능하다고 할 수 있다. 또한, 단일 홀의 경우 정밀 제어를 위해서 회전 디스크 무게 균형 문제가 대두되지만, RSFO 방식을 통해 해결할 수 있다. 따라서 거창 우주쓰레기 추적 시스템은 사거리 200 ~ 1,800km 추적 요구 조건을 만족하기 위해서 회전 디스크는 단일 홀 및 40Hz의 회전 속도를 가져야 한다.

References

1) Sung, K. P., Choi, E. J., Lim, H. C., Jung, C. G., Kim, I. Y., and Choi, J. S., "Development of Operation Software for High Repetition rate

Satellite Laser Ranging," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 12, December 2016, pp. 1103~1111.

2) <http://www.celestrak.com/satcat/boxscore.php>

3) "Space debris by the numbers," https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers, ESA, January 2019, Retrieved 5 March 2019.

4) Lim, H. C., Park, J. U., Kim, D. J., Seong, K. P., and Ka, N. H., "Laser Tracking Analysis of Space Debris using SOLT System at Mt. Gamak," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 34, No. 9, September 2015, pp. 830~837.

5) Moore, C. J., "The Impact And Resolution of Collision Bands On the Tracking Targets at Various Ranges," in Proceedings of 15th International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia, October 2010.

6) De Santis, C., Bigazzi, A., Berrilli, F., and Casolino, M., "A New Debris Detection Algorithm for Orbiting Solar Telescope," *Advances in the Astronautical Sciences*, Vol. 112, No. 1, January 2002, pp. 199~218.

7) https://www.wikiwand.com/en/Space_debris

8) Park, J. U., et al, "Development of Satellite Laser Ranging System for Space Geodesy," KASI, 2009.

9) International Laser Ranging Service, ILRS, <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/stations/index.html>

10) Lim, H. C., Sung, K. P., Yu, S. Y., Choi, M. S., Park, E. S., Park, J. U., Choi, C. S., and Kim, S. M., "Satellite Laser Ranging System at Geochang Station," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 35, No. 4, December 2018, pp. 253~261.

11) Nah, J. K., et al, "Development of Optical System for ARGO-M," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 30, No. 1, February 2013, pp. 49~58.

12) National Aeronautics and Space Administration, "USA Space Debris Environment, Operation and Policy Updates," *Presentation to the 48th Session of the Scientific and Technical Subcommittee Committee on the Peaceful Uses of Outer Space United Nations COPUOS*, 7-18 February 2011.

13) Choi, J., et al, "Analysis of the angle-only orbit determination for optical tracking strategy of Korea GEO satellite, COMS," *Advances in Space Research*, Vol. 56, No. 15, September 2015, pp. 1056~1066.

14) Lim, H. C., Seo, Y. K., Nah, J. K., and Bang, S. C., "Tracking Capability Analysis of ARGO-M Satellite Laser Ranging System for STSAT-2 and KOMPSAT-5," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 27, No. 3, August 2010, pp. 245~252.