J. Space Technol. Appl. 4(2), 169-183 (2024)
https://doi.org/10.52912/jsta.2024.4.2.169

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

기술논문

거창 인공위성 레이저 추적을 위한 운영 시스템 개발

성기평†, 임형철, 최만수, 유성열

한국천문연구원

Development of Operation System for Satellite Laser Ranging on Geochang Station

Ki-Pyoung Sung†, Hyung-Chul Lim, Man-Soo Choi, Sung-Yeol Yu

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

Received: April 12, 2024
Revised: April 28, 2024
Accepted: April 29, 2024

†**Corresponding author :**
Ki-Pyoung Sung
Tel: +82-42-865-2079
E-mail: kpsung@kasi.re.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

Ki-Pyoung Sung:
https://orcid.org/0000-0003-2639-4127
Hyung-Chul Lim
https://orcid.org/0000-0001-5266-1335
Man-Soo Choi
https://orcid.org/0000-0003-2019-3615
Sung-Yeol Yu
https://orcid.org/0000-0002-9571-1985

요 약

한국천문연구원은 인공위성 정밀 궤도 결정, 우주 감시, 우주 측지 등 과학 연구 및 국가적 우주 미션을 수행하기 위해 거창 SLR(satellite laser ranging) 시스템을 개발하였다. 시스템을 구성하는 여러 서브시스템 중 하나인 운영 시스템은 다른 서브시스템을 제어하고 관측 알고리즘을 기반으로 수동 및 자동 관측 모드를 제공하여, 지상에서 인공위성까지의 거리를 계산하는 소프트웨어로써 네트워크 기반의 서버와 클라이언트 방식으로 개발되었다. 본 연구에서는 운영 시스템의 요구사항을 분석하고, 서버 및 클라이언트 통신을 위한 개발환경, 소프트웨어 구조 및 관측 알고리즘을 기술한다. 그리고 개발된 운영 시스템을 이용하여 지상보정 및 측지 전용 인공위성 STARLETTE에 대한 레이저 추적을 통해 취득한 관측 데이터를 처리하여 ILRS(international laser ranging service) 국제기구에서 배포한 전 세계 SLR 관측소와 거리측정 정밀도를 비교 분석하였다.

Abstract

Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) developed the Geochang satellite laser ranging (SLR) system for the scientific research on the space geodesy as well as for the national space missions including precise orbit determination and space surveillance. The operation system was developed based on the server-client communication structure, which controls the SLR subsystems, provides manual and automatic observation modes based on the observation algorithm, generates the range data between satellites and SLR stations, and carry out the post-processing to remove noises. In this study, we analyzed the requirements of operation system, and presented the development environments, the software structure and the observation algorithm, for the server-client communications. We also obtained laser ranging data for the ground target and the space geodetic satellite, and then analyzed the ranging precision between the Geochang SLR station and the International Laser Ranging Service (ILRS) network stations, in order to verify the operation system.

핵심어: 인공위성 레이저 추적 시스템, 거창 다목적 관측소, SLR(satellite laser ranging) 운영 소프트웨어

Keywords: satellite laser ranging system, Geochang Multiple Function Observatory, satellite laser ranging (SLR) operation software

1. 서론

인공위성 레이저 추적(satellite laser ranging, SLR) 시스템은 지구 궤도를 순회하고 있는 인공위성 중 레이저 반사경(laser retro-reflector array, LRA)이 장착된 인공위성을 대상으로 미리 예측된 궤도 정보 CPF(consolidated prediction format) 또는 TLE(two line element)를 이용하여 지상에서 인공위성까지의 거리를 센티미터(cm) 수준으로 정밀하게 측정하는 시스템이다. 지상에서 극초단파 펄스 레이저 발사 시간과 인공위성에 장착된 LRA로부터 반사되어 되돌아온 레이저의 도착 시간을 측정하여 비행시간(time of flight, TOF)을 계산하고 이를 바탕으로 지상에서 인공위성까지의 거리를 산출하는 방식이다[1].

인공위성의 거리 데이터를 제공하는 시스템 중 SLR 시스템은 현존하는 가장 정밀한 거리 측정 데이터를 ILRS 국제기구에 제공하여 전 세계로 배포하고 있으며, 이는 인공위성 정밀 궤도 결정, 우주 측지, 지구 과학, 기초 물리학 등 다양한 연구 데이터로 활용되고 있다. 또한, SLR 시스템은 지구 궤도에 있는 지구 관측 인공위성 또는 항법 인공위성 시스템(global navigation satellite system)의 위치와 궤도 검증 및 보정에도 사용된다[2].

국내에서는 과학기술위성 2호(STSAT-2)와 다목적실용위성 5호(KOMPSAT-5)가 LRA를 장착하여 지구 궤도를 순회하고 있으며, 2020년 2월에는 해양 및 환경 관측을 위한 정지궤도복합위성 2B호(GEO-KOMPSAT-2B)가 84개의 CCR(corner cube retroreflector)로 구성된 LRA가 장착되어 발사되었다. 또한, 2035년까지 LRA를 장착한 한국형 위성항법시스템(Korea Positioning System, KPS) 8기가 개발 및 발사 계획 중에 있다.

지구 궤도에 진입한 인공위성의 연료는 임무 수행과 궤도 유지를 위해 대부분 사용되기 때문에 장기적인 임무를 수행하기 위해서는 연료 관리가 필수적이다. 인공위성 궤도의 기울기, 경도, 편심이 시간에 따라서 표류하게 되는 다양한 섭동 현상 때문에 주기적으로 궤도 수정 및 자세를 유지하기 위한 기동을 수행해야 한다. 그러기 위해서는 먼저 인공위성의 정확한 위치를 파악하는 것이 매우 중요하다. SLR 시스템을 통해 얻은 거리 데이터는 마이크로파 측정(microwave measurement)을 통해 얻은 거리 데이터에 비해 정밀하기 때문에 SLR 관측소에서 관측된 데이터를 특정 기간 동안 연속적으로 제공하면 마이크로파 측정보다 더욱 정밀한 정밀 궤도 결정(precise orbit determination)을 산출할 수 있어 인공위성 운영 수명 단축을 최소화할 수 있다[3,4].

전 세계적으로 ILRS에 등록된 SLR 관측 대상 인공위성은 2024년 5월 기준으로 127개이며, LAGEOS, STARLETTE과 같은 측지 전용 인공위성을 포함하여 러시아의 GLONASS, 일본의 QZSS(quasi-zenith satellite system), 유럽 연합의 GALILEO, 중국의 BEIDOU, COMPASS 등 GEO(geostationary orbit) 인공위성들이 다수 포함되어 있다. 2024년 5월 기준 2025년까지 ILRS에 공식적으로 추적을 위한 등록 및 승인된 인공위성은 7개이며, 2032년까지 계획 중에 있는 인공위성은 16개이다[5]. 또한, SLR 관측소도 이미 전 세계적으로 44개의 관측소가 있는데도 불구하고 SLR 시스템의 수요도 점진적으로 증가하고 있는 추세이다.

ILRS 국제기구에 등록된 국내 SLR 시스템은 총 2기로, 세종 SLR 시스템과 거창 SLR 시스템이다. 세종 SLR 시스템의 경우 2014년 시험 운영을 통해 산출된 관측 데이터를 ILRS 국제기구에 제공하였고, 검증 절차에 따라 검증된 관측소(validated station)로 승인되었다[6]. 거

창 SLR 시스템은 현재 시험 관측 중에 있으며, 시험 관측에서 축적된 데이터를 ILRS 국제기구에 제공하여 2025년까지 검증된 관측소로 승인받는 것을 목표로 진행 중에 있다.

거창 SLR 시스템을 위한 서브시스템은 추적 마운트, 레이저 시스템, 광학 시스템, 전자 시스템, 돔 시스템, 운영 시스템으로 구성되어 있다. 그중 본 논문에서는 운영 시스템에 대해 다룬다. 운영 시스템은 인공위성 레이저 관측에 필요한 서브시스템을 제어하고 데이터를 종합하여 판단한 후 그 결과를 관측 절차에 반영하며, 관측을 통해 획득한 인공위성의 거리 데이터를 통합 처리, 저장, 전송하는 시스템이다.

본 논문에서는 운영 시스템 요구사항과 개발 환경, 소프트웨어 구조와 인공위성 레이저 관측 절차를 기술하였다. 마지막으로 거창 SLR 운영 시스템을 통해 취득한 시험 관측 데이터와 ILRS에서 배포한 전 세계 SLR 평균 거리측정 정밀도를 비교한 결과를 제시하였다.

2. 시스템 요구사항

2000년대 이후로 SLR 기술의 연구 추세는 운영비용 절감, 거리 측정 정밀도 향상, 자동화 기술, Eye Safety 레이저 사용이다. 그중 많은 관측소에서 거리 측정 정밀도와 리턴율(return rate)을 개선하기 위해 많은 연구를 진행해 왔다[7]. 최근에는 이러한 연구와 더불어 시스템 운영비용 절감을 위한 자동화 기술을 개발하고 적용하는 관측소가 증가하고 있다. 관측 스케줄링, 궤도 예측과 같은 SLR 운영의 기본적인 기능은 일부 자동화가 되어 있다. 이러한 자동화 기능을 이용한 결과는 생산성 및 신뢰성 향상, 인력 감소로 발생되는 비용 절감, 높은 수준의 안전성을 유지하기 위해서이다. 그중 많은 SLR 관측소에서는 일정 수준으로 자동화를 통합하는 과정을 통해 운영비용을 절감하고 있다. 예를 들어 1990년대에 NASA MOBLAS 관측소는 일부 자동화를 통해 인력을 4명에서 1명으로 줄여 운영비용을 절감하였지만, 운영 효율성은 더욱 증가되었다[8]. 끊임없는 자동화 연구와 개발 끝에 스위스 zimmerwald, 호주 Mt. stromlo 관측소에서는 높은 수준의 자동 운영 시스템(full automated operation system)을 운영하고 있으며, 최근에도 독일 SOS-W(satellite observing system-wettzell), 미국 NASA SGSLR(space geodesy satellite laser ranging), 러시아 토치카(tochka)와 같이 자동 운영 시스템을 개발하고 적용하는 사례가 증가하고 있다[9,10].

거창 SLR 운영 시스템을 구성하는 하드웨어 인터페이스, 소프트웨어 통신, 데이터 실시간 처리, 데이터 실시간 모니터링 등 많은 프로세스 처리로 인한 시스템 부하를 최소화하여 발생할 수 있는 문제를 사전에 방지하기 위해 네트워크 기반의 다중 분산 컴퓨터 처리 방식으로 구성하였다. 또한, SLR 기술의 연구 추세에 따라 운영자에 의해 서브시스템을 제어하고 관측 절차에 따라 수동적으로 운영하는 수동 관측 모드와 운영자의 제어 없이 각종 센서 정보와 서브시스템의 상태를 모니터링하고 관측 알고리즘에 따라 자동적으로 운영하는 자동 관측 모드를 지원해야 한다. 자동 관측 모드를 위해서는 서브시스템의 상태 정보, 각종 센서 정보를 실시간 수집하여 관측 알고리즘에 반영되어야 하며, 다양한 예외 상황 발생 시 상황에 따라 대기 또는 정지할 수 시스템이 요구된다.

3. 개발환경

3.1 하드웨어 개발 환경

운영 시스템의 하드웨어는 총 5대의 다중 분산 컴퓨터 형태로 구성되어 있다. 분산 컴퓨터의 장점은 시스템 간의 영향이 적어 유지보수가 용이하고 분산화로 인한 네트워크 트래픽(traffic)을 줄일 수 있어 부하의 균형을 맞출 수 있다. 분산된 운영 컴퓨터는 서브시스템, 감시 카메라, GPS(global positioning system) 등 다양한 서브 하드웨어 구동을 위한 인터페이스 제공과 알고리즘이 포함된 구동 소프트웨어를 지원하는 역할을 한다. Fig. 1은 운영 시스템의 하드웨어와 소프트웨어 구성 다이어그램을 나타내며, 각 컴퓨터에 설치된 서버와 서브 하드웨어와의 연결 정보를 나타내고 있다. 운영 시스템의 컴퓨터는 돔/망원경 컴퓨터, 운영자 컴퓨터, 레이저/시각 컴퓨터, 사이트 제어 컴퓨터, SLR/AO 컴퓨터로 소프트웨어 연관성과 하드웨어 인터페이스에 따라 구분되며, 그 중 자동 관측 모드에 활용되는 서버는 노란색 박스로 별도 표시하였다. 운영 시스템은 호스트와 직접 통신을 위한 직렬 통신(serial communication), CAN(controller area network) 통신을 일부 지원하지만 대부분 이더넷(ethernet) 통신 방식으로 구성되어 있다. 이는 양방향성 방식의 데이터 전송과 통신의 신뢰성, 다수 연결의 동시적 처리가 가능한 다중 처리 기능을 위해서이다. 이러한 방식으로 인해 각 컴퓨터는 고유의 논리 주소를 바탕으로 외부 장치와의 데이터 전송 및 제어 명령에 활용할 수 있다.

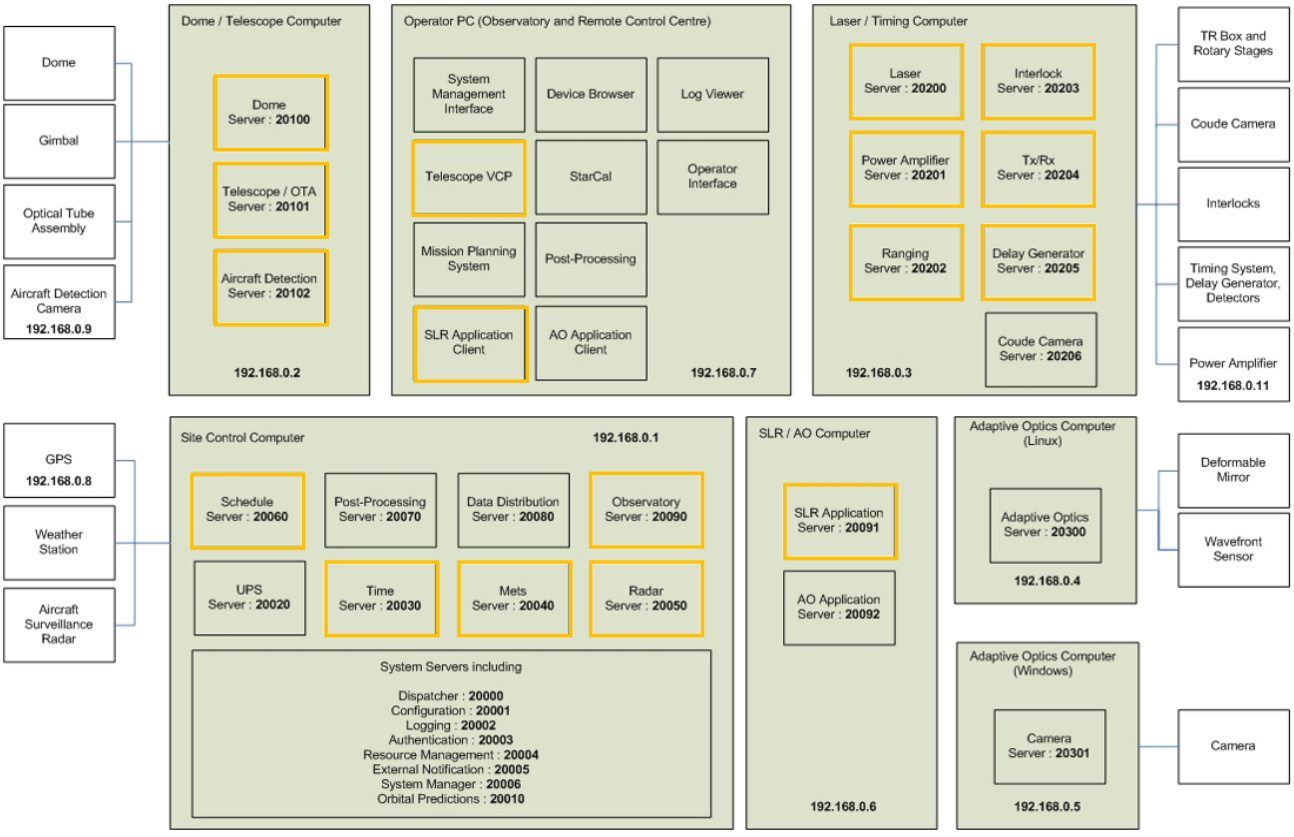

Fig. 1. Configuration diagram of hardware and software in operation system. UPS , uninterruptible power supply; SLR, satellite laser ranging; GPS, global positioning system; OTA, optical tube assembly, Mets, meteorological data; VCP, virtual control panel.

3.2 소프트웨어 개발 환경

거창 SLR 운영 소프트웨어는 한국천문연구원과 호주 EOSSS(Electro Optics Systems Space Systems)사의 공동 개발로 진행되었다. 독자적으로 개발된 서브시스템의 하드웨어에 대한 제어, 그와 관련된 인터페이스 등 서로 간의 연관성이 적은 서버와 핵심 알고리즘에 대해서는 소스코드 제공이 아닌 라이브러리 형태로 상호 간의 협력이 진행되었다. 개발 도구는 C++ 프로그래밍 언어와 비주얼 스튜디오(visual studio)을 사용하여 컴파일러(compiler)가 호환되도록 개발 환경을 구축하였다.

소프트웨어 개발 방법론에는 폭포수, 프로토타입, 프로세스 지향, 데이터 지향, 객체지향, 나선형 등 다양한 개발 방법론이 있다. 거창 운영 시스템의 소프트웨어는 공동 개발 환경 및 효율성을 고려하여 CBD(component based development) 방법론을 채택하여 개발되었다. CBD 방법론은 독립적인 기능을 수행하는 컴포넌트 기반으로 설계하여 유용성, 확장성, 유지보수 용이성, 재사용성을 높인 방법론이다. 개발된 운영소프트웨어는 약 40개의 컴포넌트로 구성되어 협업이 가능한 최소한의 단위까지 구분하였고, 필요에 따라 컴포넌트를 연결해서 사용할 수 있도록 하였다. 거창 운영 시스템에서는 컴포넌트를 서버로 정의하였다. 결국, 시스템 규모가 크고 복잡한 구조를 가지는 소프트웨어를 각 기능별 서버로 설계하여 상호 간 독립적으로 개발이 가능하여 소프트웨어 개발 시간 단축과 서버를 이용한 시스템 통합이 용이하게 설계하였다.

4. 소프트웨어 구조 및 관측 알고리즘 절차

소프트웨어 구조 패턴에는 계층화 패턴(layered pattern), 브로커 패턴(broker pattern), 모델 뷰 컨트롤 패턴(model view controller pattern), 파이프 필터 패턴(pipe and filter pattern) 등 특정한 규칙과 템플릿의 집합으로써 일관성을 높이고 코드를 개선하거나 원활한 유지 보수를 위한 목적으로 적용된다. 거창 운영 소프트웨어는 다수 분산된 서브시스템과 하드웨어 자원을 공유하고자 서버 및 클라이언트 패턴(server & client pattern) 구조로 설계되었다. 운영 소프트웨어를 이루고 있는 다수의 서버가 IP 주소 및 포트 번호와 같은 네트워크 정보를 통해 ethernet이 연결된 다른 서버에 데이터를 제공하거나 제공받을 수 있다. 즉, 하나의 서버는 데이터를 제공하는 서버 또는 데이터를 제공받는 클라이언트가 되어 다른 서버와의 데이터를 공유할 수 있다. 이렇게 ethernet 방식을 통해 다른 서버에 접근하기 위해서는 데이터를 공유하고자 하는 서버 정보를 사전에 미리 알고 있어야 한다. 운영 시스템에서 이러한 네트워크 서비스를 제공하는 서버가 dispatcher이다. Dispatcher는 운영 시스템의 모든 컴퓨터에 설치되어야 하며, 백그라운드(background) 프로세스 방식으로 동작되어 항상 모든 서버가 접근이 가능하다. Dispatcher처럼 모든 서버가 활용하는 특정 응용 서비스를 핵심 서비스(core services)라 하고, 서브시스템의 데이터를 이용하여 관측 알고리즘을 처리하는 서버를 핵심 서버(core servers)라고 한다. 핵심 서비스는 운영 컴퓨터에 설치된 서버를 지원하는 서비스로 dispatcher, machine manager가 있다. Machine manager는 서버 구동을 제어하고, 운영 컴퓨터에 WOL(wake on lan) magic packet을 이용하여 원격 관측 모드를 지원한다. 핵심 서버는 SLR application 서버와 observatory 서버로 이루어져 있고, 핵심 서비스와 핵심 서버에 대한 설명은 4.1-4.4에서 기술한다.

거창 운영 소프트웨어에서는 서버 또는 클라이언트와의 통신을 위해 Fig. 2와 같은 절차가 요구된다. 이때 서버들 간의 내부 통신은 DML(device meta language)을 기반으로 하며, 소켓 통신을 통해 이루어진다. Fig. 2에 따른 내부 통신 절차는 다음과 같다. ① 데이터를 요청하고자 하는 서버는 dispatcher에게 클라이언트의 네트워크 정보를 요청한다. ② Dispatcher는 authentication 서버를 통해 접근 권한을 확인 후 ③ Configuration 서버로부터 클라이언트 네트워크 정보를 얻는다. ④ 이 정보는 요청한 서버에게 전달된다. ⑤ 이를 바탕으로 서버는 클라이언트에 연결을 요청하고 ⑥ 그에 대한 응답이 오면 ⑦ 명령을 전달한다. ⑧ 최종적으로 명령받은 내용에 대한 응답으로 통신을 마무리한다. 이 절차는 하나의 트랜잭션(transaction)을 의미하며, 운영 시스템 내 서버들 간 통신에만 사용된다. 하드웨어와의 통신은 구성된 인터페이스 방식에 따라 달라진다.

거창 SLR 관측 알고리즘은 준비 단계, 관측 단계, 데이터처리 단계를 거쳐 최종 산출물을 ILRS 국제기구에 제공한다. Fig. 3은 거창 SLR 운영 시스템의 소프트웨어 아키텍쳐(architecture)로 운영 시스템 관점에서의 서버와 서버들 간에 전송되는 데이터 및 관측 알고리즘을 나타내고 있다. 여기서, 회색은 핵심 서버를 의미하며 파란색은 핵심 서버를 제외한 서버를 나타내고 있다. 살구색은 서버와 별개로 독립적인 유틸리티(utility)를 의미하며, 녹색은 운영자를 위한 클라이언트 GUI(graphic user interface) 프로그램이다.

이러한 소프트웨어 아키텍쳐를 바탕으로 이전에 언급된 것과 같이 3단계를 통해 인공위성 관측 알고리즘을 수행한다. 첫 번째 준비 단계로 ① 한반도 상공을 지나가는 인공위성 중 반사경이 장착된 인공위성을 대상으로 ILRS 국제 데이터 센터 CDDIS(crustal dynamics data information system) 또는 EDC(EUROLAS data center)에 FTP(file transfer protocol)로 접속하여 미리 계산되어 공개된 인공위성의 좌표 정보 CPF 또는 TLE을 이용한 인공위성 위치를 예측한다. 이때 사용된 CPF 예측 정확도는 20 nsec 범위 내에는 90% 정도이며, 100 nsec

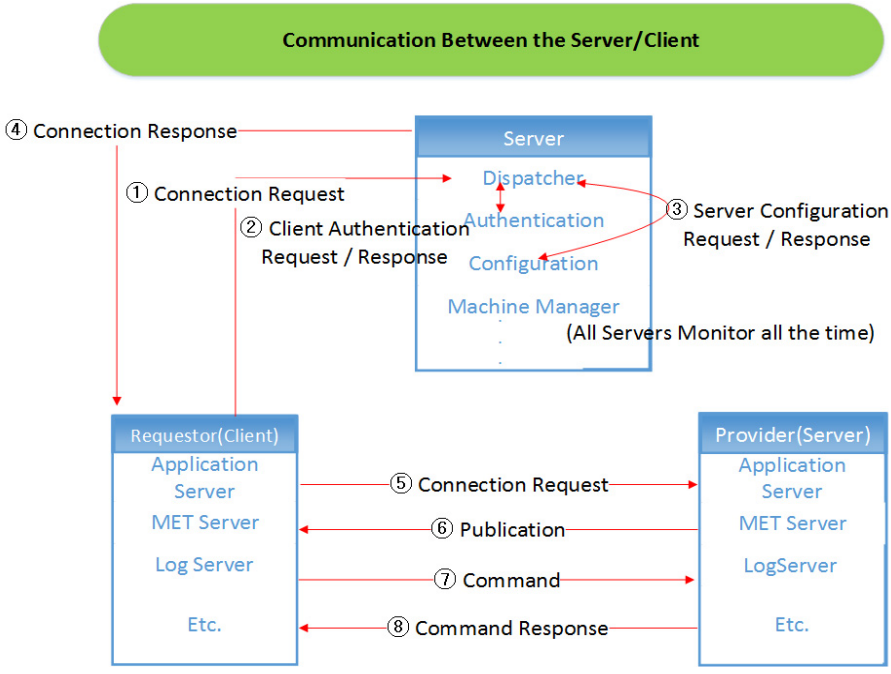

Fig. 2. Internal communication procedures between server and client.

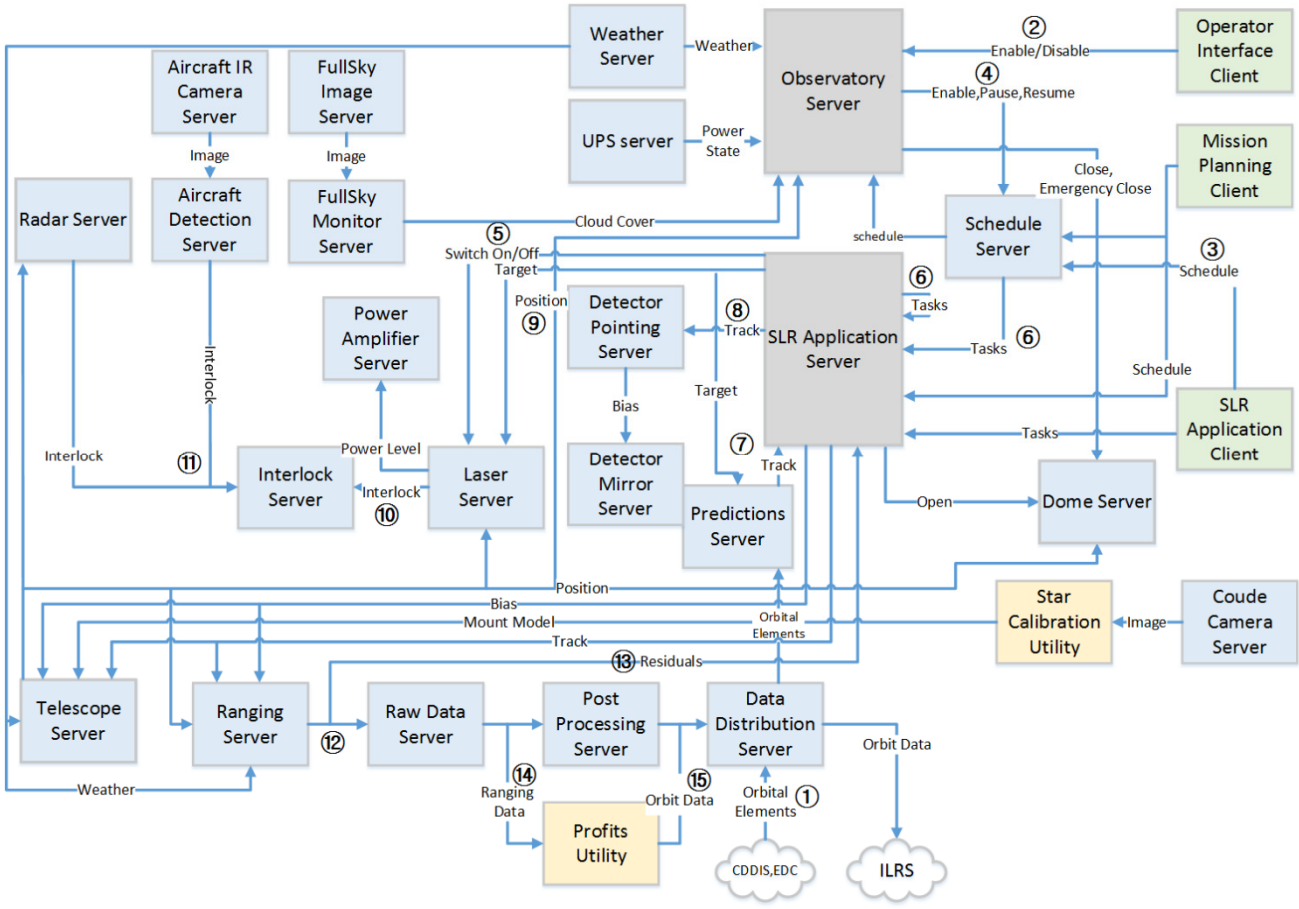

Fig. 3. Software architecture and observation procedure of operation system [3]. ILRS, international laser ranging service; UPS , Uninterruptible Power Supply; SLR, satellite laser ranging; IR, infrared ray.

범위 내에서는 99% 정확도를 갖는다[11]. ② 클라이언트 프로그램에서 각 서버를 점검한 정보를 바탕으로 동작 정보를 확인한다. 클라이언트 프로그램은 서버와의 관계, 준비 상황에 따라 각 서버의 동작 정보(enable 또는 disable)를 결정한다. 동작 정보의 enable은 시스템이 정상적으로 운영될 준비가 된 상태를 의미하고, disable 상태는 시스템이 정상적으로 운영할 준비가 되지 않은 상태를 말한다. 이러한 동작 정보는 다른 서버에 영향을 끼친다. 예를 들어, 광학 망원경을 제어하는 telescope 서버가 disable 상태라면 레이더를 제어하는 radar 서버는 enable되지 않는다. 이런 경우에는 telescope 서버가 enable 되어야 radar 서버도 enable 가능하다. 그 이유는 인공위성을 추적하기 위한 광학 망원경이 준비되어야 광학 망원경의 위치 정보와 동기화되어 운용되는 레이더 역시 준비가 가능하기 때문이다. ③, ④ 이러한 서버와의 관계들을 고려하여 서버 모두 enable 상태라면 운영자에 의해 생성된 관측 스케줄과 동작 정보를 schedule 서버에 전달된다. ⑤ 외부 센서로부터 얻은 날씨 정보와 적외선(infrared ray, IR) 카메라 정보를 바탕으로 관측 여부를 판단하여 광학 망원경과 미러를 보호하고 있는 돔과 미러 커버(mirror cover)를 개방한다. ⑥, ⑦ 다운받은 CPF을 바탕으로 UTC(universal time coordinate) 시간에 따른 방위각(azimuth)과 고도각(elevation)으로 이루어진 스케줄을 생성한다.

두 번째 관측 단계로 ⑧ 생성된 스케줄에 따른 시간과 위치 정보를 광학 망원경을 제어하는 telescope 서버로 전달하여 인공위성의 위치 추적과 동시에 인터로크(interlock) 상황을 확인한다. Interlock 상황이란 서브시스템의 오류, 운영자에 의한 시스템 제어, 날씨 문제로 인해 레이저 발진이 멈춰야 하는 상황을 말한다. 예를 들어 비를 감지하거나, 광학 망원경과 돔의 misalignment 상황이 감지되는 경우가 이에 해당된다. ⑨ Interlock 상황이 아니라면 레이저를 발진시킨다. ⑩, ⑪ 인공위성 추적 영역에 광학 망원경과 동기화된 레이더에 의해 비행체가 검출될 경우, 비행체 감시 카메라에 의해 검출된 비행체, 새, 구름 등이 검출되면 레이저만 자동으로 interlock 서버에 의해 일시적으로 레이저 발진을 멈추게 된다. 위험 요소가 모두 제거되면 레이저는 자동으로 발진된다. ⑫, ⑬ 사전에 계산된 인공위성의 예측 TOF와 실제 관측된 TOF의 잔차(residual)를 계산하고 그 결과를 저장한다.

세 번째 데이터 처리 단계로 ⑭, ⑮ 관측 residual 데이터를 이용하여 다항식 근사 보간법(polynomial fitting interpolation)과 제곱평균제곱근(root mean square, RMS) 바탕으로 노이즈를 제거한 최종 산출물을 생성한다.

4.1 Dispatcher

거창 SLR 관측을 위한 서버는 일반적으로 지정된 컴퓨터에 설치되어 운용되지만 운영의 유연성과 확장성을 높이기 위해 다른 컴퓨터로 서버의 이동, 추가, 삭제가 쉽게 가능하도록 설계되었다. 이러한 환경에서 서버가 실행되고 있는 위치를 네트워크를 통해 동적으로 기록하는 서비스가 dispatcher이다. 모든 서버와 클라이언트 어플리케이션은 DML 식별 규칙을 사용하면 dispatcher를 통해 다른 서버의 실행 위치를 알 수 있기에 각 서버들은 네트워크 위치를 알 필요가 없다. 따라서, 데이터 무결성(integrity)을 유지하고 서버의 변화(이동, 추가, 삭제)가 발생해도 자동으로 관리되어 자동 관측 모드에서도 용이하게 사용된다. 결국, dispatcher는 실행되는 서버의 위치를 동적으로 저장하고 접근하고자 하는 서버의 네트워크 정보를 전달하는 역할을 한다.

4.2 Machine Manager

여러 컴퓨터에서 운영되는 다중 분산 시스템으로 dispatcher와 동일하게 machine manager는 모든 제어 컴퓨터에 설치되는 핵심 서비스이다. 이 서비스는 해당 컴퓨터에 실행되고 있는 서버의 시작과 정지를 제어하며 수동 및 자동 관측 모드에서 핵심 서버로부터 명령을 전달받아 각 서버의 동작을 제어한다. 예를 들어 무정전 전원 정치(uninterruptible power supply, UPS)에 전압이 낮거나 용량 부족한 문제가 발생하면 UPS 서버에서 이를 감지하고 이 정보는 observatory 서버로 전달된다. 그러면 observatory 서버는 machine manager에게 모든 서버를 중단시키는 명령을 전달하여 운영되고 있는 모든 서비스가 정지된다. 또 다른 기능은 로컬 관측소가 아닌 원격 관측소에서 관측 시 사용된다. Machine manager는 원격 컴퓨터의 WOL magic packet을 UDP(user datagram protocol) 통신 방식을 통해 제어할 수 있다. 이것은 일반적인 원격 네트워크에서는 서브넷(sub-net) broadcasts를 사용하여 수행하는데 이 경우 magic packet이 관측소 라우터로 전송되어 운영 컴퓨터로 포트 포워드(port forward)가 가능하다. 따라서, 만약 정전으로 인해 시스템이 중단 후 전원

이 복구되면 원격 컴퓨터에서는 machine manager의 WOL 기능을 이용해 모든 운영 컴퓨터를 동작시킬 수 있어 원격 환경에서 유용하게 사용된다.

4.3 SLR Application 서버

운영 시스템에서 SLR application 서버는 광학 망원경을 제어하는 telescope 서버, 레이저를 제어하는 laser 서버, 돔을 제어하는 dome 서버, 레이더를 제어하는 radar 서버, IR 영상을 이용해 비행체를 탐지하는 aircraft detection 서버, 시간 측정기를 제어하는 timing 서버 등 SLR 관측과 밀접하게 관련된 서버를 제어하는 핵심 서버이자 인공위성으로부터의 반사된 신호 분석, 위성 추적, 스케줄 생성 등 자동 관측 모드와 관측 절차를 수행하는 서버이다. 자동 관측 모드에서는 레이저, 돔, 망원경과 같은 위험 요소가 큰 서브시스템으로부터 인명 피해가 발생하지 않도록 안전한 운영이 요구된다. 자동 관측 모드에서 SLR application 서버가 운영자에 의해 실행된 상태라면 이전에 언급한 관측 알고리즘 절차에 따라 자동으로 운용되기 때문에 이런 경우 위험 요소가 높은 서브시스템의 동작으로 인명 피해가 발생할 수 있다. 예를 들어 광학 망원경 부근에서 작업하는 엔지니어를 확인하지 못한 운영자에 의해 자동 관측이 진행될 경우 광학 망원경의 동작으로 인해 인명 피해가 발생할 수 있다. 따라서, 일시적 레이저를 멈출 수 있는 interlock 서버와 별개로 레이저를 포함한 광학 망원경, 돔 등 위험 요소가 존재하는 서버들로부터 정보를 제공받아 각 서버를 제어 및 관리하는 역할을 수행한다.

4.4 Observatory 서버

Observatory 서버는 시스템 상태를 모니터링, 관리하는 서버로써, 서브시스템 상태와 날씨 정보를 실시간으로 확인하여 관측 여부를 판단하는 서버이다. Camera 서버, UPS 서버, radar 서버, METs 서버, cloud sensor 서버, full sky monitor 서버로부터 데이터를 수집하여 그 결과를 SLR application 서버와 공유하고 운영자에게 정보를 제공한다. 만약 자동 관측 모드 작동 중에 비가 검출되면 observatory 서버는 즉시 자동 스케줄을 정지하고, 광학 장비를 보호하기 위해 미러 커버와 돔을 닫는다. 일반적인 제어는 SLR application 서버를 통해 제어되지만 관측 중에 발생한 긴급 상황에서는 별도의 긴급 제어 명령을 통해 돔, 망원경, 자동화 스케줄을 제어할 수 있다. 하지만 관측 중에 발생한 긴급 상황이 아니라면 독립적인 명령을 수행하지 않고 SLR application 서버에 의해 제어된다.

4.5 자동관측 및 예외상황

운영자의 관여 없이 자동 관측 모드를 위한 운영 시스템은 장비 보호와 인명 피해 방지를 위해 실시간 관측 가능 여부 판단이 중요하다. 이러한 판단에는 주로 날씨 정보와 지향 방향의 비행체 정보가 이용된다. 거창 SLR 운영 시스템에서 자동 관측 여부를 판단하기 위한 날씨 데이터는 총 4개의 센서로부터 획득한다. 온도, 습도, 압력, 비, 가시성, 이슬점, 풍속 및 풍향과 같은 날씨 정보를 수집하는 METs 센서, 상공의 카메라 영상을 수집하는 하늘 감시 카메라, 비를 감지하는 강우 센서, 구름을 감지하는 구름 센서로 구성되어 있다. 운영 시스템은 사전에 운영자에 의해 설정된 센서의 임계값(threshold)을 이용하여 관측 가능 여부를 판

단한다. 그 중 하늘 감시 카메라는 운영 시스템과 별도의 상용 이미지 프로그램에서 처리되어 수동 관측 모드에서만 사용된다. 모든 날씨 데이터는 observatory 서버로 데이터가 전달되고, observatory 서버는 각 센서로부터 획득한 데이터를 바탕으로 자동 관측 여부를 판단한다. 만약 강우 센서로부터 감지되면 observatory 서버는 즉시 긴급 상태로 전환되어 돔과 미러 커버를 즉시 닫고 비가 멈출 때까지 기다리며 지속적으로 센서 데이터를 모니터링하여 관측 가능 여부를 판단한다. 구름 센서는 주변 온도, 이슬점, 풍속, 습도, 하늘 밝기 정보를 제공하여 운영 시스템의 관측 시작과 중지 결정에 영향을 끼친다. 구름 센서의 주요 목적은 구름 여부를 모니터링하여 관측할 수 있는 범위를 결정하기 위함이다. 그 이유는 구름에 의해 레이저 에너지가 대부분 손실되기 때문에 관측 상공에 구름 커버리지(coverage)가 높으면 관측이 어렵기 때문이다[13].

거창 SLR 시스템의 자동 관측을 위한 날씨 데이터와 함께 관측 지향 방향의 비행체를 감시하는 비행체 감시 레이더와 카메라 영상도 활용된다. 비행체 감시 레이더는 광학 망원경과 지향방향을 동기화하여 관측 영역의 비행체를 감시하는 용도로 활용되며, 광학 망원경이 지향하는 방향에 위험 요소 즉, 비행체가 감지되거나 레이더와 위치 지향성이 동기화가 되지 않았을 경우에는 interlock 서버에서 레이저 발진을 일시정지 후 위험 요소가 제거되면 자동으로 레이저가 발진된다. 비행체 감시 카메라는 aircraft camera 서버에서 IR 이미지를 획득한 후 aircraft detection 서버를 통해 비행체 감지 여부를 판단한다. 비행체 또는 짙은 구름이 감지될 경우 레이더와 마찬가지로 interlock 서버를 통해 레이저가 제어된다.

자동 관측 모드 절차는 4절에서 언급한 관측 알고리즘 절차와 크게 다르지 않다. 다만, 수동 관측 모드의 경우 운영자에 의해 상황을 판단할 수 있지만 자동 관측 모드에서는 운영 시스템에서 상황 판단을 해야 하기 때문에 관측 예외 상황에 대한 절차가 필요하며, 이는 Fig. 4에 나타내고 있다. 자동 관측 모드에서 관측에 영향을 끼치는 가장 중요한 정보는 날씨 요소 중 비 여부, 풍속, 습도, 가시성, 이슬점 및 구름 여부이다. 이러한 날씨 요소가 사전에 운영자가 설정한 임계값을 초과하면 미러 커버와 돔을 닫고 광학 망원경을 초기 위치로 보낸 다음 대기하게 된다. 안전상에 이유 또는 기계에 중대한 문제가 발생한 경우에도 돔과 미러 커버를 닫고 관측 절차는 모두 중단된다. 날씨 요소로 인한 관측 중단은 대기 상태로 관측 중단 요소가 변화하면 다시 자동관측을 수행하지만, 시스템 문제로 인해 발생되는 관측 중단은 운영자의 개입이 필요하기에 자동관측 중지 상태가 된다. 관측 중지 및 레이저 발진이 중단되는 상황은 비행체 감지, 미러 커버 상태, 광학 망원경 관측 정지, 광학 망원경과 동기화되지 않은 돔과 레이더, 하드웨어 고장, 통신 장애에 따라 발생한다. 자동관측 예외 상황에 대해서는 Fig. 4에 상세히 나타내고 있다.

5. 시험 관측 데이터 결과

거창 SLR 시스템은 현재 시험 운영 중에 있으며, 개발된 운영 시스템을 이용한 거리 측정 데이터를 ILRS 국제기구에 배포된 전 세계 지상보정 및 측지 전용 인공인공 거리 측정 데이터와 비교하였다. 그 이유는 ILRS 국제기구에서 시스템 성능 기준은 지상보정과 LRA로 이루어진 측지 전용 인공위성에 대한 single-shot RMS로 결정하기 때문이다.

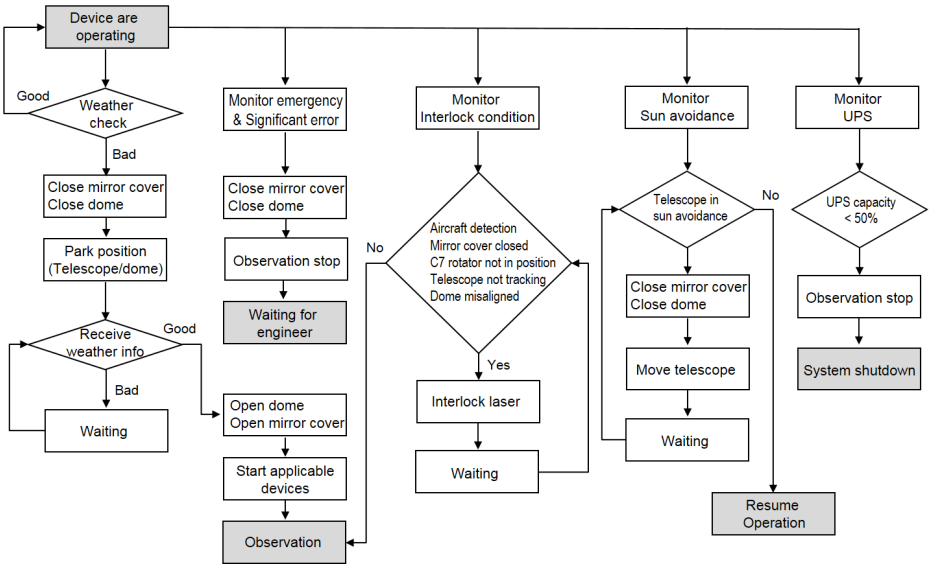

Fig. 4. Exception situation procedure for automatic operation [12]. UPS , uninterruptible power supply.

거창 SLR 시스템의 지상보정은 광학 망원경의 IVP(invariant virtual point)로부터 약 37 m 정도 떨어진 외곽에 1개의 CCR를 설치하고 레이저를 이용하여 IVP로부터 CCR까지의 거리를 측정하면 케이블 지연, 광 경로 및 시스템 신호 처리를 포함한 시스템 전체의 지연 시간을 추정할 수 있다. 이 추정값은 관측소에서 인공위성까지의 거리를 계산할 때 시스템 지연 시간으로 사용되며, 시스템 성능 지표로도 사용된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 거창 SLR 운영 시스템을 통해 획득한 지상보정 및 STARLETTE 인공위성의 관측 데이터로, x축은 시간, y축은 잔차를 의미한다. 여기서, 잔차는 시간에 따른 실제 관측된 TOF와 사전에 계산된 예측 TOF의 차로 짙은 점선이 관측 대상으로부터 반사된 신호를 의미하고, 그 외에는 노이즈 신호이다. 개발된 거창 SLR 운영 시스템을 이용한 거리 측정 데이터를 분석한 결과 지상보정 거리 측정 정밀도는 3.1 mm, STARLETTE 인공위성의 거리 측정 정밀도는 10.3 mm 수준이다. 분석된 거리 측정 데이터의 객관적 판단을 위해 전 세계 SLR 시스템의 지상보정 및 STARLETTE 인공위성의 거리 측정 정밀도를 분석하였으며, 이는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내고 있다. 2023년 4월부터 2024년 3월 기준으로 전 세계 지상보정 거리 측정 정밀도 평균 RMS은 8.7 mm, STARLETTE 인공위성은 12.5 mm이다. 거창 SLR 운영

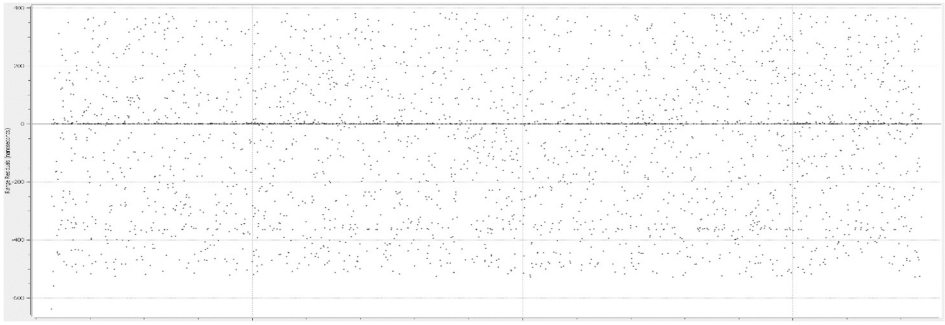

Fig. 5. Residual result of ground calibration. x: time, y: residual (nanosecond).

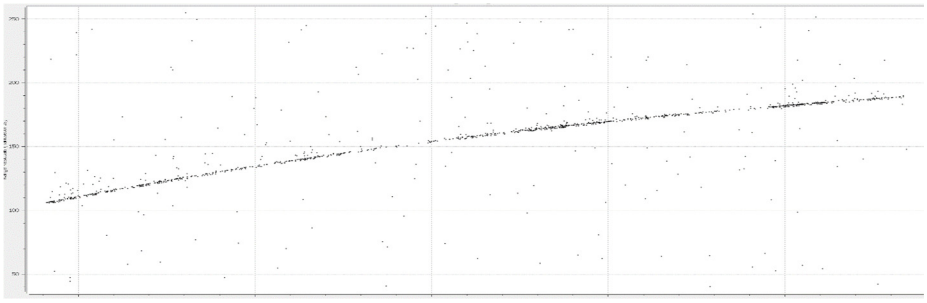

Fig. 6. Residual result of starlette satellite. x: time, y: residual (nanosecond).

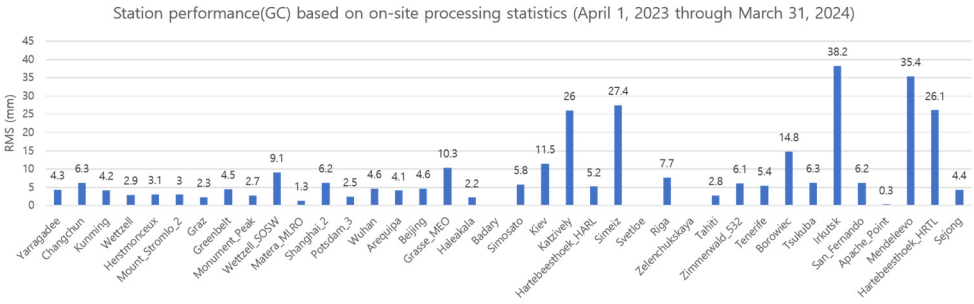

Fig. 7. GC performance based on on-site processing statistics (April 1, 2023 through March 31, 2024). GC, ground calibration; RMS, root mean square.

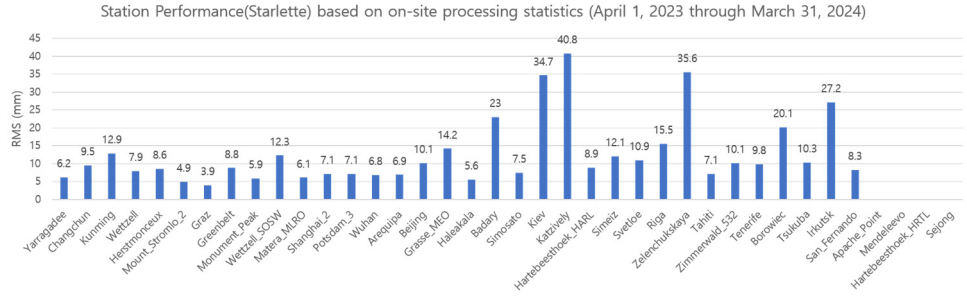

Fig. 8. STARLETTE performance based on on-site processing statistics (April 1, 2023 through March 31, 2024). RMS, root mean square.

시스템을 이용한 지상보정 및 STARLETTE 인공위성 거리 측정 정밀도는 전 세계 평균 거리 측정 정밀도보다 정밀한 수준으로 확인되었다. 지상보정의 경우 ILRS 국제기구에 데이터를 제공한 38개 관측소 중 10번째로 정밀한 결과이지만, STARLETTE 인공위성 거리 측정 정밀도 결과는 22번째의 정밀도를 보이고 있다. 이는 레이저, 광학계, 전자계에 기인하기 때문에 레이저 출력 개선, 광축 미세 정렬, 광학 클리닝 등 시스템 개선 작업을 통해 거리 측정 정밀도를 높일 계획이다.

6. 결론

한국천문연구원은 과학 연구 및 국가적 우주 미션을 수행하기 위해 거창 SLR 시스템 개발하였으며, 현재 시험 운영을 진행해오고 있다. 본 연구는 거창 SLR 시스템 중 운영 시스템 개발

내용에 대해 기술하였다. 운영 시스템은 네트워크 기반의 서버와 클라이언트 구조로 개발되었다. 운영 시스템을 구성하는 약 40여 개 서버 중 핵심 서비스와 서버를 중심으로 운용되며, 수동 및 자동 관측 모드를 지원한다. 자동 관측 모드에서는 수동 관측 모드와 달리 운영자가 관여하지 않기 때문에 각종 센서 정보에 의한 예외 상황 발생 시 시스템이 자동 관측 여부를 판단할 수 있도록 개발되었다.

개발된 운영 시스템을 이용한 거리 측정 정밀도와 ILRS 국제기구에서 배포한 지상보정 및 STARLETTE 인공위성의 거리 측정 정밀도를 비교하였다. 거창 SLR 시스템의 관측 정밀도는 ILRS 국제기구에서 배포한 전 세계 데이터의 평균 정밀도 대비 정밀한 수준이지만, 시스템 개선 및 시험 운영을 통해 관측 거리 측정 정밀도 개선과 ILRS 국제기구에 검증된 관측소로 승인받을 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국천문연구원 주요 사업 “우주물체 관측인프라 통합운영” 사업의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Sung KP, Choi EJ, Lim HC, Jung CG, Kim IY, et al., Development of operation software for high repetition rate satellite laser ranging, J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. Res. 44, 1103-1111 (2016). https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.12.1103
2. Urschl C, Gurtner W, Hugentobler U, Schaer S, Beutler G, Validation of GNSS orbits using SLR observations, Adv. Space Res. 36, 412-417 (2005). https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.021
3. 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
4. Oh H, Park E, Lim HC, Lee SR, Choi JD, Orbit determination of high-earth-orbit satellites by satellite laser ranging, J. Astron. Space Sci. 34, 271-279 (2017). https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.4.271
5. International Laser Ranging Service [ILRS], List of future missions (2024) [Internet], viewed 2024 May 01, available from: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_ missions/future_missions/index.html
6. Choi EJ, Bang SC, Sung KP, Lim HC, Jang CG, et al., Design and development of high-repetition rate satellite laser ranging system, J. Astron. Space Sci. 32, 209-219 (2015). https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.3.209
7. Degnan JJ, Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review, Contrib. Space Geodesy Geodyn. Res. 25, 133-162 (1993). https://doi.org/10.1029/GD025

8. Wilkinson M, Schreiber U, Procházka I, Moore C, Degnan JJ, et al., The next generation of satellite laser ranging systems, J. Geod. 93, 2227-2247 (2018). https://doi.org/10.1007/s00190-018-1196-1
9. Riepl S, Müller H, Mähler S, Eckl J, Klügel T, et al., Operating two SLR systems at the Geodetic Observatory Wettzell: from local survey to space ties, J. Geod. 93, 2379-2387 (2019). https://doi.org/10.1007/s00190-019-01243-z
10. Mcgarry JF, Hoffman ED, Degnan JJ, Cheek JW, Clarke CB, et al., NASA's satellite laser ranging systems for the twenty-first century, J. Geod. 93, 2249-2262 (2018). https://doi.org/10.1007/s00190-018-1191-6
11. Ricklefs R, Consolidated laser prediction and data formats: supporting new technology, Proceedings of the International Workshop on Laser Ranging Conference, Austin, TX, 15-20 Oct 2006.
12. Lim H, Choi M, Park E, Yu S, Seong K, et al., The new Korean SLR system and its automatic operation, Proceedings of the International Workshop on Laser Ranging Technical Workshop, Riga, Latvia, 2-5 Oct 2017.
13. Choi MS, Lim HC, Choi EJ, Park ES, Yu SY, et al., Performance analysis of the first Korean satellite laser ranging system, J. Astron. Space Sci. 31 225-233 (2014). https://doi.org/10.5140/JASS.2014.31.3.225

Author Information

성 기 평 kpsung@kasi.re.kr

충남대학교에서 석사학위 취득 후 2018년부터 한국천문연구원에서 우주위험감시센터에서 근무하고 있다. 세종 및 거창 인공위성 레이저 시스템 개발 업무를 수행하였으며, 현재에는 우주물체 레이저 추적 시스템, 우주 광통신 및 국방 관련 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.

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.

유 성 열 syyu@kasi.re.kr

충남대학교 천문우주학과에서 우주과학 석사학위를 취득했다. 2018년부터 한국천문연구원에서 인공위성 레이저 추적 시스템의 광학계 연구를 수행하고 있으며, 현재 거창 인공위성 레이저 관측소와 세종 인공위성 레이저 관측소의 광학계 운영 및 연구업무를 수행하고 있다.