

연구논문

창의 천문기기 개발 및 관측 교육 프로그램: 소형 분광기 개발

양희수[†], 정종균

한국천문연구원

Creative Education Program of Astronomical Instrument Design and Observation: Development of the Small Spectrograph

Heesu Yang[†], Jong-Kyun Chung

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea



Received: April 12, 2024

Revised: April 29, 2024

Accepted: April 30, 2024

[†]Corresponding author :

Heesu Yang

Tel : +82-42-869-5910

E-mail : hsyang@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

Heesu Yang

<https://orcid.org/0000-0001-5455-2546>

Jong-Kyun Chung

<https://orcid.org/0000-0003-4493-8378>

요약

현대 천문학에서의 대형 기기 개발은 많은 자원과 인력이 소모되기 때문에 시스템 엔지니어링 및 프로젝트 관리 능력은 현장에서 필수적인 역량이다. 우리는 관측 가능한 실습용 분광기를 제작하고 관측하여 시스템 엔지니어링 경험을 쌓을 수 있는 학부 교육프로그램을 제안한다. 한국천문연구원의 우주인력양성사업의 일환으로 충남대에서 진행된 파일럿 프로그램은 '창의천문기기 개발 및 관측'이라는 가칭으로 총 24명의 학생들이 수강하였으며, 5개 조에서 분광기를 만들어 태양, 달, 별 등의 스펙트럼을 측정하고 연구를 진행하였다. 학생들의 기기 개발과정은 수차례의 리뷰회의를 통하여 가이드 되었으며 개발과정과 문서화된 결과를 통해 성적을 배분하였다. 기기개발 학생들은 이 기회를 통해 시스템 엔지니어링의 기본 원리뿐 아니라 프로젝트 매니지먼트, 광학설계, 기계설계 등에 대해 전반적으로 익힐 수 있었다.

Abstract

The abilities of system engineering and project management (PM) are essential in the development of large instrumentations in modern astronomy. We propose a novel undergraduate educational program that allows students to gain experience in system engineering and PM by making a practical small spectrograph along with its test observation. A pilot program titled "Creative Astronomical Instrument Development and Observation" was conducted in Chungnam National University, as a part of the Space Expert Training Program of Ministry of Science and ICT during the Fall semester of 2023. After five teams were organized from 24 participating students, each team manufactured a spectrograph and observed spectra of the Sun, Moon, or planets with it. The development process was guided by several reviews, and students were evaluated based on the outcomes of their development processes and documentation. Through this program, students acquired fundamental principles of systems engineering and PM, as well as optical and mechanical engineering skills.

핵심어 : 시스템 엔지니어링, 프로젝트 관리, 분광기

Keywords : system engineering, project management, spectrograph

1. 서론

우주과학 및 천문학 분야에서의 대형 기기 개발 과정은 이론적인 장비를 현실화하고 주어진 자원을 효율적으로 활용할 수 있도록 시스템 엔지니어링(system engineering, SE)과 프로젝트 매니지먼트(project management, PM) 등 산업공학적 기술이 필수적이다[1-3]. 하지만 국내 천문학 연구 개발자들의 성장 루트는 이과계열에서 순수 천문학에 대한 경험만을 쌓고 대학원 과정 중 프로젝트에 참여하며 공학적인 툴의 용어를 익히는 수준의 경험을 한 후 대학이나 연구소에서 프로젝트를 이끄는 경우가 대다수다. 과학 목적이 분명한 천문학 분야에서 관련 연구자의 주도적인 참여는 필수적이지만 대형 프로젝트의 경우, 산업공학에 대한 이해가 부족한 상황에서의 프로젝트 진행은 인력과 비용 측면에서의 비용적인 낭비와 프로젝트 실패 가능성을 높인다. 또한 프로젝트의 주 참여자인 학부생, 대학원생은 시스템 엔지니어링의 낮은 이해도로 인해 시스템 엔지니어링과 프로젝트 관리 요소들이 성공적 과제 진행 도구가 아닌 추가적 업무 부담으로 다가온다.

연구개발사업에서 시스템 엔지니어링 체계에 대한 낮은 이해도로 인한 프로젝트 위험요소는 근본적으로 학부 과정에서부터 시스템 엔지니어링에 대한 체계적 교육으로 극복될 수 있다. 우리는 본 논문을 통해 한국천문연구원(이하 천문연)의 '우주분야 전문인력양성사업'의 일환으로 충남대학교 천문우주과학과 학부 3학년을 중심으로 진행한 시스템 엔지니어링 및 기기 개발 교육 프로그램을 소개하고 그 과정을 통해서 얻게 된 교훈(lesson learned)을 기술하고자 한다. 2장에서 교육 프로그램의 개요를 소개하고, 3장에서는 실제 현장 교육 진행 내용을 서술한다. 마지막 4장에서 교육 프로그램을 평가하고, 개선할 점과 다양하고 새로운 교육 아이디어를 제시한다.

2. 교육 프로그램의 개요

본 논문에서는 2023년 2학기에 충남대학교 학부과정 수업으로 '우주분야 전문인력양성사업'의 일환으로 수행된 "창의 천문기기 개발 및 관측(부제) 수업의 과정 및 결과에 대해 기술한다. 이 수업은 천문학 연구현장에서 흔히 사용하는 소형 분광기를 조별로 각각 개발하며 시스템 엔지니어링 및 프로젝트 매니지먼트 요소의 경험을 갖게 하는데 그 목적이 있다. 아래는 본 교과과정의 수업 목표이다.

수업목표

- 연구 주제를 발굴하고 연구주제를 탐구하기 위한 천문관측기기(다양한 스펙의 분광기)를 직접 제작하여 관측 / 데이터를 처리하며 프로젝트 기획/운영/광학설계/기계설계/조립과 시험/데이터 처리를 경험한다.
- 광학 / 기계에 대한 기초적인 지식을 습득하고 기초적 설계 및 제작을 할 수 있다.

수업 목표에 제시된 바와 같이 실제 현장에서 관측기기를 제작하기 위해서는 과학적 동기뿐 아니라 프로젝트 관리, 광학, 기계, 조립 및 시험, 데이터 처리에 대한 광범위한 지식이 필요하다. 이 모든 과정을 차근차근 교육하기 위해서는 한 학기 이상의 많은 시간이 필요하다.

이러한 이유로 우리의 교육 프로그램에 학생이 스스로 학습할 수 있는 능력을 배양하는데 그 초점을 두었다. 우리는 파이썬(python)이나 옵틱 스튜디오(optic studio), 인벤터(inventor) 등과 같은 도구에 대한 교육을 별도로 진행하지 않고 샘플 코드, 샘플 디자인과 함께 MOOC(massive open online course)와 같은 온라인 강의에 대한 정보를 제공한 후 이를 통해 학생들은 샘플 코드나 디자인을 이해하고 모사 혹은 수정하기 위해 다양한 오픈소스를 통해 자기주도적으로 학습하도록 하였다. 수업 중 제공된 광학 디자인과 기계 디자인을 학생들이 변경하지 않아도 프로젝트 수행이 가능할 수준의 완성도를 가지고 있지만 각 조의 과학적 목적(scientific objective)에 맞게 스스로 수정하도록 지도하였다.

실습 수업은 일반 수업과는 다르게 예산과 기간, 시설이라는 제약사항이 있는데 학생들은 이러한 제약사항을 고려하여 연구주제를 선정한다. 강사는 기계에 대한 확실한 이해와 모든 프로세스에 대한 이해를 바탕으로 학생들이 적절한 연구주제를 선정하도록 지도한다.

2023년 가을학기의 수업은 분광기 개발을 목표로 하였다. 학생들에게 샘플로 제시된 분광기 및 HQ(high quality) 카메라의 세부 성능 및 형태는 Table 1, Fig. 1과 같다. 분광기는 상용 렌즈, 상용 회절격자, 라즈베리 파이(raspberry Pi) 및 라즈베리 파이 전용 HQ 카메라를 이용해 제작하며 슬릿은 25 mm 크기의 거울면에 칼날로 그어 직접 제작한다. HQ 카메라는 일반 칼라 CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 센서를 사용하여 12비트의 데이터를 획득할 수 있으며, 적외선 필터를 쉽게 제거할 수 있어 근적외선 영역까지도 관측이 가능하다. 일반적인 실리콘 베이스의 CMOS 센서의 감광능력을 고려하면 1 μm 대역에서도 G밴드의 500 nm 대역 대비 5% 이상의 감광능력(spectral sensitivity)을 보여줄 것으로 기대할 수 있다. 라즈베리 파이와 HQ 카메라는 노출시간과 이득(gain) 등을 세밀하게 제어 가능하며 보통의 CMOS 센서의 회로 수준부터 구현되어 있으나 천문관측에서는 불필요한 센서

Table 1. The specification of the spectrograph.

Parameter	Value
Slit width	10–50 μm
Focal length of the collimator / imager	100 mm
Groove of diffraction grating	300–2,400
Resolving power R	250–2,000
Wavelength coverage	200 nm for 300 groove diffraction grating
HQ camera	
Sensor	Sony IMX477
Format	4,056 \times 3,040
Pixel size	1.55 μm \times 1.55 μm
Sensor size	6.287 mm \times 4.712 mm (7.9 mm diagonal)
Maximum exposure time	670.74 seconds
Shutter	Rolling shutter

HQ, high quality.

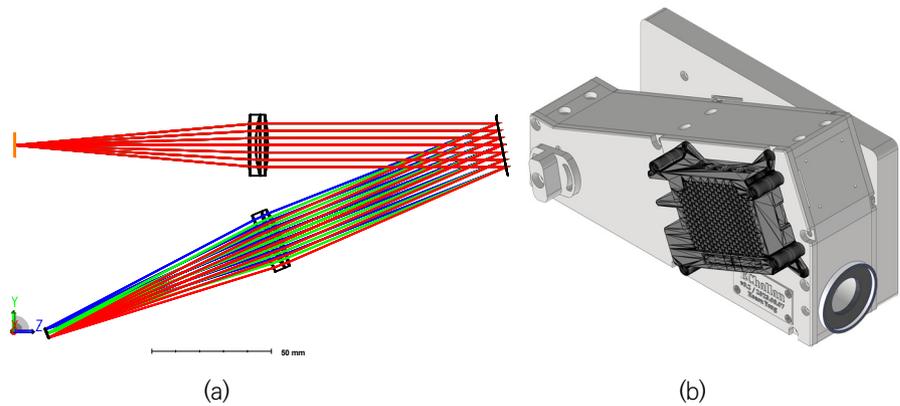


Fig. 1. Optical (a) and mechanical design (b) of the sample spectrograph.

자동 보정(auto correction) 기능도 수동으로 제어가 가능하다. 분광기의 렌즈 등의 결합을 위한 배플(baffle) 등을 제외한 기계부는 3D 프린터를 이용해 학생들이 직접 출력하여 조립한다.

HQ 카메라는 고속 촬영이 가능하기 때문에 드리프트 스캔 방식(drift scanning method)으로 영상분광 자료를 획득할 수 있다. 드리프트 스캔은 정지된 마운트 위에 고정된 망원경과 분광기 시스템에서 지구 자전에 의해 슬릿 앞으로 일정한 속도로 지나가는 관측대상을 고속으로 촬영한 후 영상으로 재조합하는 관측방식이다. 라즈베리 파이의 HQ 카메라의 경우, 내부 SD카드 저장이 아닌 USB3.0포트를 이용한 외장 저장장치를 이용할 경우, 풀프레임 12비트 데이터 기준 초당 최대 5장이 저장할 수 있고, 2x2 픽셀 비닝(pixel binning)인 경우 40장 내외의 분광영상이 저장 가능하다.

라즈베리 파이 HQ 카메라는 라이브러리가 공개되어 있고 커맨드 수준의 제어 실행파일도 공개되어 있다. 하지만 학생들은 하드웨어 제어를 처음 접하기 때문에 강사는 천문영상 표준 파일인 fits 형식으로 헤더와 데이터를 저장하는 클래스를 만들어 학생들에게 배포했다. 드리프트 스캐닝은 데이터를 raw 형식으로 저장되 강사는 데이터의 헤더를 저장하는 fits 파일과 raw 파일을 읽을 수 있는 코드를 제작해 학생들에게 제공했다.

3. 교육 결과

학생들은 자신들이 원하는 연구주제를 선정하여 개발과 관측을 진행하게 되는데 예산과 한 학기 수업 기간 등을 고려하여 연구주제를 제시하도록 하였다. 학생들에게는 4시간의 분광기 및 카메라에 대한 광학 이론 교육, 4시간의 시스템 엔지니어링, 프로젝트 관리에 대한 교육, 2시간 가량의 자료처리 교육을 하였으며 이후 필요에 따라 기타 교육을 수행하였고 조별 면담, 메일을 통해 좀 더 적극적인 개별 교육을 수행하였다(Table 2).

3.1 과학 목표 및 과학 요구사항

수업의 수강인원은 24명이었으며, 다섯 개의 조로 편성하여 진행하였다. 각 조는 4주차까지 조별로 연구주제를 구상하여 강사와의 면담을 통해 주제를 최종 선정하였다. 각 조는 학생

Table 2. Timetable of the 14-week education program.

Week	Lectures	Team activities
1st	System engineering Project management	
2nd	Optical design Mechanical design	Team building
3rd	Team building Science objectives / discussion	
4th		
5th		Private team discussion with lecturer
6th	Preliminary design review (PDR)	
7th		PDR AI report Decision on optical parts
8th		Private team discussion with lecturer
9th	Critical design review	
10th		CDR AI report 3D printing, assembly, alignment
11th	Observation readiness review	
12th		Observation
13th		
14th	Final presentation	
15th		

AI, action item; CDR, critical design review.

한 명씩 프로젝트 매니저(PM)의 역할을 수행하도록 하였다. 이러한 과정을 통해 다섯 개의 조가 제시한 연구 주제는 Table 3과 같다.

연구주제 선정 과정을 통해 강사는 학생들에게 '어떻게 연구주제를 선정하는가?'를 교육하였다. 과학임무에 적합한 기기 개발을 위해 제시되는 과학적 목표는 '왜 이 연구를 수행해야 하는가?'에 대해 학생들에게 비판적으로 끊임없이 질문을 던지게 하며 '알려진 사실'에 대한 관측이

Table 3. Science objectives of five teams

조	연구주제
wishflAre	태양의 H- α , H- β 영상에서 보이는 채층 구조물의 차이 분석
Kodal	달의 Reiner Gamma 지역의 1 μ m 흡수선 구조의 특성 분석
JSA514	목성의 대적반이 있을 때와 없을 때의 메탄선 차이
Dizle	목성의 영상분광 관측을 통한 분광특성 이해
Cluster	M45 산개성단의 분광을 통한 구성 별 분류

아닌 '새로운 사실의 탐구를 위한 관측'이 될 수 있도록 학생들을 지도하였다. 이 과정에서 학생들은 다양한 참고문헌을 찾아가며 연구주제를 선정한다. 예를 들면 wishflAre 조는 태양의 H- α 선 전면 관측은 많이 수행되어 왔으나 H- β 선은 거의 관측된 바가 없는데 학생들은 H- α 과 H- β 의 관측을 통해 관측 파장에 따른 태양의 홍염이나 필리그리 같은 구조물 차이를 분석하는 연구를 수행하고자 한다. 또한 Kodai 조는 달의 자기이상 지역의 분광특성을 조사하고자 하는데 지상에서의 영상분광 연구는 이전에 수행된 적이 없어 레이저 감마(reiner gamma, RG) 지역의 1 μm 흡수선 관측을 통해 그 특징을 확인해 보고자 한다.

3.2 시스템 설계 및 사전 설계 리뷰(System Design and Preliminary Design Review, PDR)

실제 기기개발 프로젝트에서 과학적 목표와 시스템 요구사항은 시스템 요구사항 리뷰(system requirement review, SRR)를 통하여 검증되는데 우리는 시간상 사전 설계 리뷰(preliminary design review, PDR)을 통해 함께 검증하였다. SRR/PDR 검토자는 실제 연구현장에서 일하고 있는 박사급 연구자들을 섭외하여 과학적 목표에 대한 검증을 실시하였다. 리뷰의 과정은 실제 연구현장에서 수행하는 PDR과 동일한 형식을 취했으며 실행항목(action item, AI)을 발굴하여 학생들 스스로 대응까지 하게 함으로써 학생들이 연구현장의 검증 과정을 경험할 수 있도록 했다.

과학적 요구사항과 시스템 요구사항으로부터 분광기 각 파트의 사양과 규격을 결정하기 위해서는 연구목적에 맞게 망원경, 분광기의 광학 설계 파라미터를 계산하고, 이를 각종 설계 소프트웨어를 적용한 설계 결과를 반영하여야 한다. 학생들은 광학 기초이론 교육 후에 망원경에 입사하는 관측대상의 광량 계산, 관측 영역(field of view), 분광성능(resolving power), 센서에 맺히는 분광범위(spectral range)를 계산한 후 연구 목표 달성에 적합한 결과인지를 확인한 후에 최종적으로 광학 부품 선정을 하게 된다. 이 모든 과정은 문서로 작성한 후 과학 임무 달성을 위한 요구사항을 PDR에 제시하여 검증을 받는다.

분광기의 광학 설계 및 기계부 설계는 설계전용 소프트웨어(Zemax, Inventor, Cartia 등)를 활용하도록 안내하였다. 설계 소프트웨어에 관한 직접 교육은 한 학기라는 시간 제약으로 실시하지 않고 관련 도서와 온라인 교육을 안내하여 습득하도록 하였다. 광학 디자인은 렌즈의 초점거리, 회절격자 그루브 수, 코팅 등을 변경할 수 있는 여지를 두어 학생들이 본인의 연구 주제에 맞게 변경이 가능하도록 지도하였다. 기계부 설계는 3D 프린팅 특성상 수축과 팽창이 크기 때문에 500 μm 공차를 고려하도록 사전에 공지하였으며 학생들은 여러 번의 시행착오를 거쳐 경험적으로 맞추었다.

분광기 제작에서 슬릿은 가장 섬세한 광학 부품이며 최종 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 실제 천문관측에서 사용하는 슬릿은 매우 고가이며 섬세한 조정과 조립이 요구되므로 학부생 실습용으로는 적합하지 않다. 본 수업에서는 학생들이 평면경에 얇은 칼날을 이용하여 슬릿을 제작하도록 하였다. 슬릿의 폭은 현실적으로 수 μm 수준으로는 제작할 수 없지만 학생들이 수작업으로 여러 차례 제작한 바로는 50 μm 이하로 제작이 가능하였다.

최종적으로 결정된 과학임무 요구사항에 따라 학생들은 레벨에 따른 시스템 요구사항, 업무 분업 구조(work breakdown structure, WBS), 위험요소 관리계획(risk management plan), 일정 및 업무분담 체계(role and responsibility, R&R)를 정리한다. Fig. 2는 wishflAre 조가 제시한 PDR 과정에서의 WBS다. 학생들은 이와 같은 문서 관리를 통해 협업 업무를 구체화하고 체계적인 기기개발을 훈련할 수 있다.

PDR 회의는 시스템 레벨의 광학/광기계/기계부 설계 및 조립과 시험 수행 경험을 갖고 있는 세 명의 연구자를 심사자로 포함하여 평가보다는 현장에서 발생할 수 있는 작업 자문의 역할을 수행하도록 하였다. 이를 통해 학생들은 스크류 체결 방법, 본딩 방법, 렌즈 고정, 초점 조절 방법 등 현장 경험 노하우를 PDR 회의를 통해 획득할 수 있었다.

PDR 회의에서 중요했던 요소 중 하나는 R & R이다. 실제 현장의 연구개발 사업일수록 다양한 전공의 연구자들이 협업이 무엇보다 중요하다. 학생들의 연구개발 협업 체계를 위해 1개조에 4-5명의 학생이 프로젝트 관리자(PM), 광학, 기계부, 소프트웨어, 관측 등의 업무 분배와 각각의 역할을 조별 회의를 통해 스스로 결정하도록 하였다.

강사는 체계적 프로젝트 진행을 위해 PDR 이후 각 조별로 1주일에 1회 작업일지(연구노트)를 작성하여 제출하도록 하였다. 또한 개발 과정에서 문제점을 발견하고 해결하는 과정에서 얻게 되는 교훈 보고서(lesson learned report)를 제출하도록 하였다. 이는 연구 현장에서 작성하고 있는 연구노트 작성 훈련에 목적이 있다.

3.3 상세 설계 리뷰(Critical Design Review, CDR) 및 제작

실제 관측장비 제작과정에서는 PDR 이후 엔지니어링 모델, 인증 모델을 개발하여 시스템 설계를 더 공고히 하는 과정을 갖는다. 학생들은 사전설계의 액션아이템(AI)을 반영하여 설계를 수정하고 3D프린팅을 해 가며 기계부 디자인을 개선하는 작업을 진행했다.

학생들은 수정한 설계도면을 바탕으로 상세 설계 리뷰(CDR) 회의를 진행하였다. CDR 회의

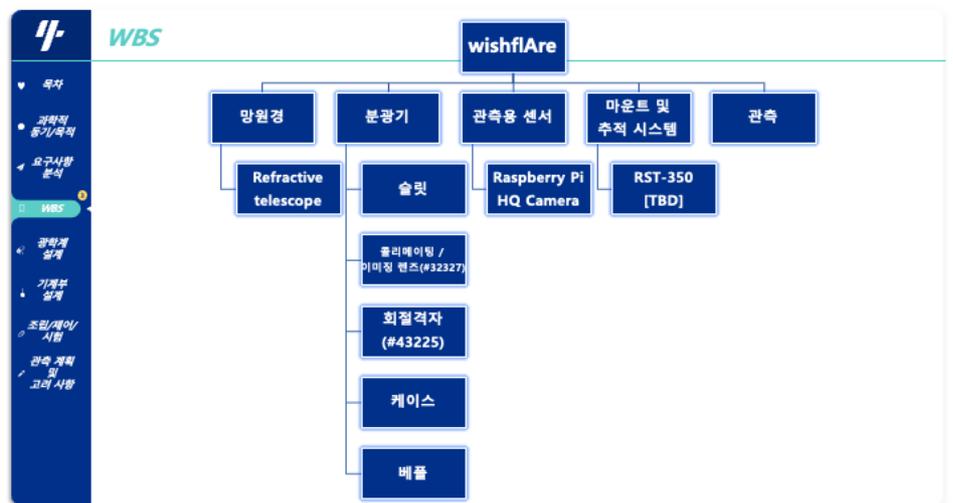


Fig. 2. Work break down (WBS) tree of the team wishflAre suggested in the preliminary design review (PDR). HQ, high quality; TBD, To be determined.

에서는 이미 기기 제작에 대한 방향성이 결정되었기 때문에 연구 주제 및 관측 설계의 전문가가 심사자로 참여하였다. 또한 다섯 개의 조 중 세 개의 조가 드리프트 스캐닝을 이용한 영상 분광 관측 주제를 갖고 있으므로 영상 분광 자료 처리 경험을 가지고 있는 연구자들을 심사자로 구성하였다. 심사자들은 학생들의 연구주제 적정성과 방향성을 평가하였으며 실제 관측 가능성과 관측 방법, 데이터 분석 방법 등에 대해 자문하였다. 기존의 기기제작뿐 아니라 데이터 전처리와 분석, 연구목표를 달성하기 위한 방법에 대한 노하우를 전달하였다.

CDR 회의에서 학생들에게 추가적으로 요구했던 사항은 상세 광학부 설계, 상세 기계부 설계뿐만 아니라 조립 및 정렬 계획, 데이터 전처리 계획, 그리고 관측 계획이다. 조립 및 정렬 계획은 기기에 대한 광학적 이해와 기계부에 대한 이해를 바탕으로 해야 하기 때문에, CDR 단계에서 가능하며 설계 시 조립 및 정렬을 염두하고 진행하여야 한다. 데이터 전처리 계획은 일정상 동시작업(concurrent process)을 유도하기 위해 학생들에게 제시하였다. 소프트웨어 및 데이터 전처리를 담당하는 학생은 광학/기계 설계 및 제작과 별개로 라즈베리 파이를 이용해 작업을 진행하였다.

달과 목성 같은 야간 관측 대상의 경우, 관측 가능 시간대의 제약이 있기 때문에 학생들의 학기말 일정을 고려하여 구체적인 일정별 관측 계획, 관측 필요 장비 리스트 등을 선제적으로 준비하였다.

학생들은 CDR 이후 AI를 반영한 후 제작에 들어가게 된다. Fig. 3은 학생들이 제작한 분광기의 예시를 보여주고 있다. 학생들은 CDR에서 준비한 조립 및 정렬방법을 염두하고 조립을 진행하며 소프트웨어를 담당하는 학생이 라즈베리 파이 카메라를 구동하며 정렬을 수행하였다.

강사가 샘플로 제시한 분광기의 기계부 디자인은 3D프린팅에 적당한 구조를 갖고 있으며 정렬 등을 고려하였으나 정렬 편의성은 고려하지 않은 수준의 디자인이었다. 학생들은 PDR 이후부터 다양한 아이디어를 제시하여 샘플 기계부 디자인에서는 반영이 안된 초점조정이 가능한 시스템을 만들거나 회절격자의 고정위치를 변경하는 등 관측 편의성과 조립성을 높이기 위해 기계부 디자인 개선을 위한 재설계를 실시하였다. 학생들이 적극적으로 찾아낸 이러한 재설계의 필요성은 설계도면만을 검토하면서 수정해 나가는 것이 아닌 반복적으로 3D 프린트를 출력하면서 제작해보는 과정을 통해 실험실에서 경험적으로 이루어졌다.

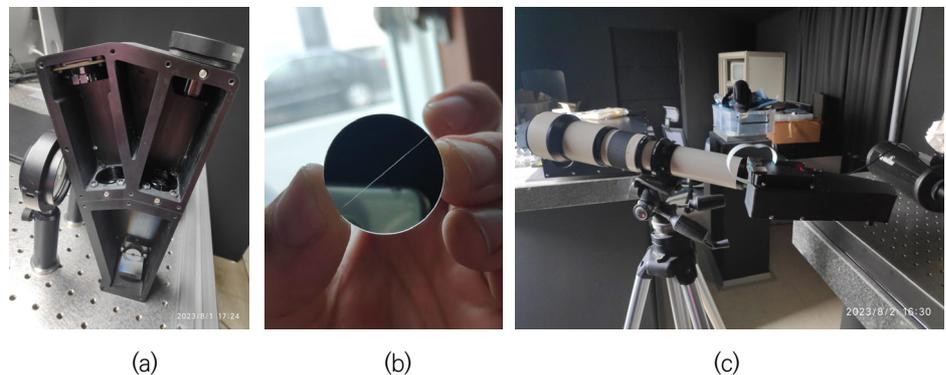


Fig. 3. Internal structure of the spectrograph (a), handmade slit (b) and the spectrograph installed at the backside of the telescope (c).

3.4 관측 준비 회의(Observation Readiness Review)

일반적 우주사업의 운영준비회의(operational readiness review)나 발사준비회의(flight readiness review)를 수행하지만 본 과제의 목적인 소형 망원경을 위한 관측준비회의(observation readiness review, ORR)을 준비하였다. ORR은 외부 심사자 없이 강사와 학생들이 내부회의를 통한 피드백으로 준비 상황을 점검하였다. 학생들은 데이터의 평탄화, 압전류 처리, 데이터 전처리, 영상분광 자료 처리 방법을 포함하여 발표를 준비하였다. 발표자료에는 수업 초기에 교육했던 각 광학계별 투과율 및 양자효율을 고려한 광량계산 및 노출시간 계산 결과를 반영하여 관측 계획을 좀 더 세심하게 세우도록 하였다. 학생들은 ORR전 시험 관측을 통해 알게 된 노출시간의 오차를 반영하여 실제 광학성능과 이론적 계산값의 차이를 보정한 값을 제시하였다. 또한, 학생들은 CDR에서 논의된 관측 필요 장비 리스트와 위험관리요소, 날씨까지 고려한 관측 일정 및 데이터 분석 일정을 구체적으로 제시하였다.

3.5 관측 및 데이터 처리

ORR을 마친 학생들은 본격적으로 관측을 수행한다. 태양이나 달의 경우 관측대상의 각 직경이 크고 태양 및 달의 전면과 배경 밝하늘 사이의 선명한 경계를 슬릿을 통해 확인이 가능하므로 망원경의 영상초점을 맞추는 것이 어렵지 않았다. 하지만 목성, 토성과 같은 점 광원은 슬릿조(slitjaw: 슬릿에 맺히는 관측대상의 위치를 확인할 수 있는 추가장비)나 컨텍스트 영상(context imager: 슬릿 앞에서 빔스플리터로 일부 광량을 따로 이미징하여 슬릿에 맺히는 관측대상의 위치를 확인할 수 있는 추가장비)이 없는 관측 시스템에서 슬릿에 관측 대상을 위치시키는 것은 매우 어렵기 때문에 옆면에서 슬릿에 맺힌 상을 확인할 수 있는 특수 배플을 제작해 활용하였다. 다수의 학생이 관측경험이 없고 망원경의 초점면에 대한 이해도가 부족했기 때문에 야간 현장에서 각 조마다 교육과 관측을 병행하여 진행했다(Fig. 4).

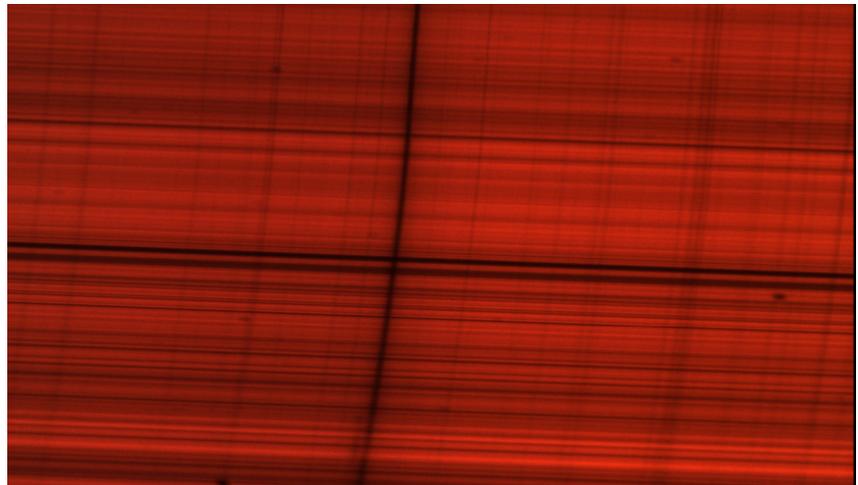


Fig. 4. Solar spectrum of the spectrograph. x-direction of the image is the direction of wavelength and y-direction is the that of slit. H alpha line is shown at the middle of the image as a vertical dark absorption. dark lines perpendicular to the spectrum represents the slit pattern, which is caused by imperfection of the slit.

플레이아데스 성단 및 성운을 목표로 했던 조의 경우, 실제 관측 대상이 슬릿으로는 보이지 않았고 마운트를 이용해 드리프트 스캐닝을 하더라도 별이 슬릿으로 입사하는 시간이 수 초 밖에 되지 않아 관측 결과를 얻을 수 없었다. 게다가 대상이 보이지 않았기 때문에 달을 맞추어 초점을 조정하면 망원경을 틀어 플레이아데스를 찍었기 때문에 관측에 어려움이 많았다.

보름달의 경우 달 전면의 스캔 시간은 약 2분 남짓이다. 목표는 40"의 각크기를 고려했을 때 약 2.7초면 목표 전체가 슬릿면을 통과한다. 한 슬릿 포지션 당 1초 노출을 줄 경우 달은 슬릿에 수직인 방향으로 120 프레임, 목표는 3 프레임을 촬영 가능하다. 우리는 좀 더 느린 스캔을 위해서 마운트의 느린 추적모드에 두고 드리프트 스캔 방식을 적용하였다. 예를 들어 0.25배의 속도로 대상을 추적할 때 달의 경우 약 480 프레임, 목표의 경우 약 10 프레임 정도의 해상도로 전면 스캔영상을 획득할 수 있었다.

모든 데이터처리는 파이썬 기반으로 하였으며 강사는 학생들에게 라즈베리 파이에서 12비트의 바이너리 raw 파일을 조합하여 3D 데이터 구조로 변환해주는 클래스를 만들어 제공했다.

Fig. 5는 태양이나 달과 같은 면광원(extended source) 데이터의 개략적인 데이터 처리 과정을 보여준다. 관측된 데이터는 바다 고르기(flat fielding), 암전류 보정(dark current), 슬릿 패턴 제거, 스캔방향 - 슬릿 방향 픽셀비율 보정이 필요하다. 암전류는 우리가 관측하는 비교적 짧은 노출시간에서 HQ 카메라의 CMOS 센서의 경우, 0에 가까워서 무시하였다. 바다 고르기는 시야가 넓은 망원경과 분광기의 플랫폼을 찍는 것은 거의 불가능하므로 태양의 경우 넓은 면적의 평균스펙트럼을 제거함으로써 일부 제거할 수 있었다. 하지만 달의 경우 달표면 모든 지점의 스펙트럼의 평균 밝기가 일정치 않아 제거가 어려웠으며 목표의 경우 일부 픽셀에만 빛이 입사되어 패턴을 제거가 불가능했다.

망원경의 회절격자가 슬릿 면이나 센서와 정확히 정렬되어 있지 않으면 Fig. 5(a)와 같이 분광방향이 센서의 수평축과 기울어져 기록된다. 이러한 기울기는 슬릿 패턴을 수평으로 맞추어 줌으로써 제거할 수 있다. 슬릿 패턴은 직접 제작한 슬릿의 한계로 일반 상용 분광기와 비교해 매우 강한 패턴이 남아 있다. Fig. 5(b)는 영상의 x축 방향으로의 평균값을 이용해 만든 슬릿 패턴이다. 이를 원 영상에서 나누어주면 (c)와 같이 각 슬릿 위치마다의 광량차를 제거해줄 수 있다. Fig. 5의 경우, 슬릿 패턴이 거의 완벽하게 제거되었으나 영상면의 상면만곡(curvature aberration)이나 왜곡(distortion aberration)때문에 일부 패턴이 남기도 한다. 슬릿 패턴을 제거하고 나면 Fig. 5(c)와 같이 세로방향 분광선이 또렷하게 보인다. 슬릿과 CMOS 센서가 완벽하게 정렬되어 있지 않는 데다 수차로 인해 사선이나 곡선으로 배치되어 있는데, 이를 적절한 다차함수로 피팅 후 수직으로 정렬하면 (d)와 같은 최종의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 드리프트 스캐닝을 통해 얻은 모든 영상을 동일한 방식으로 수정 후 특정 파장에서 잘라 재조합하면 (e)와 같은 특정파장에서의 영상을 만들 수 있다.

Fig. 6은 학생들이 수업 중 얻은 다양한 관측 결과를 보여준다. 태양, 달, 목표를 타겟으로 한 팀들은 관측을 성공적으로 수행하였고 성공 판정 기준(success criteria)로 제시하였던 목표를 달성할 수 있었다.

3.6 최종 발표

학생들은 학기의 마무리를 관측 보고회 발표와 패널평가로 마무리 하였다. 최종 발표는 본인의 기기 개발 및 관측 결과를 발표함으로써 학생들에게 성취감을 주기 위해 기획되었다.

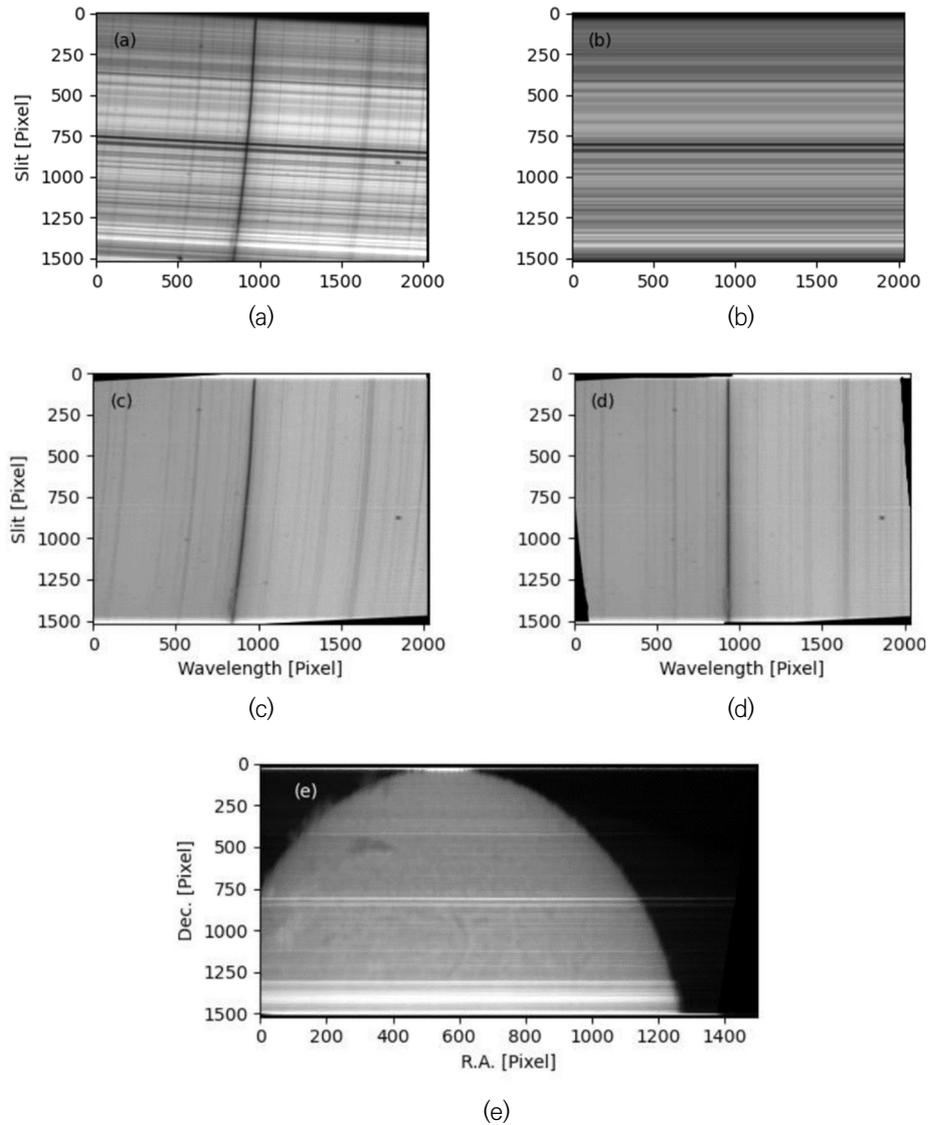


Fig. 5. Examples of data processing: (a) observed slit spectrum, (b) slit pattern extracted from the original image, (c) after subtraction of the slit pattern, (d) after correction of the bending of the spectrum, and (e) Half Sun at the center of the H α line reconstructed from the drift-scanned imaging-spectral data.

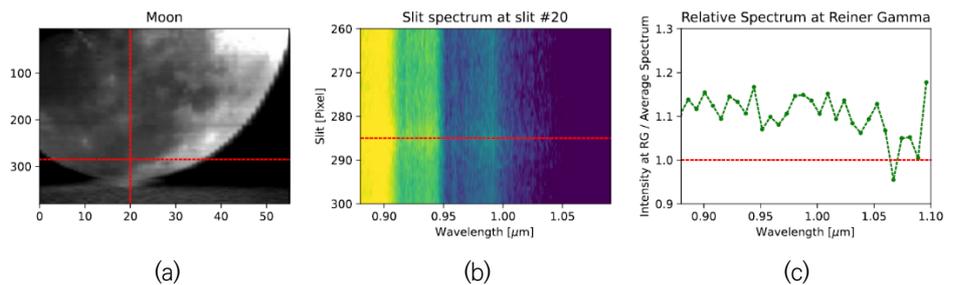


Fig. 6. Observational Results: (a–c) Moon, (d–f) Jupiter, and (g–i) Sun.

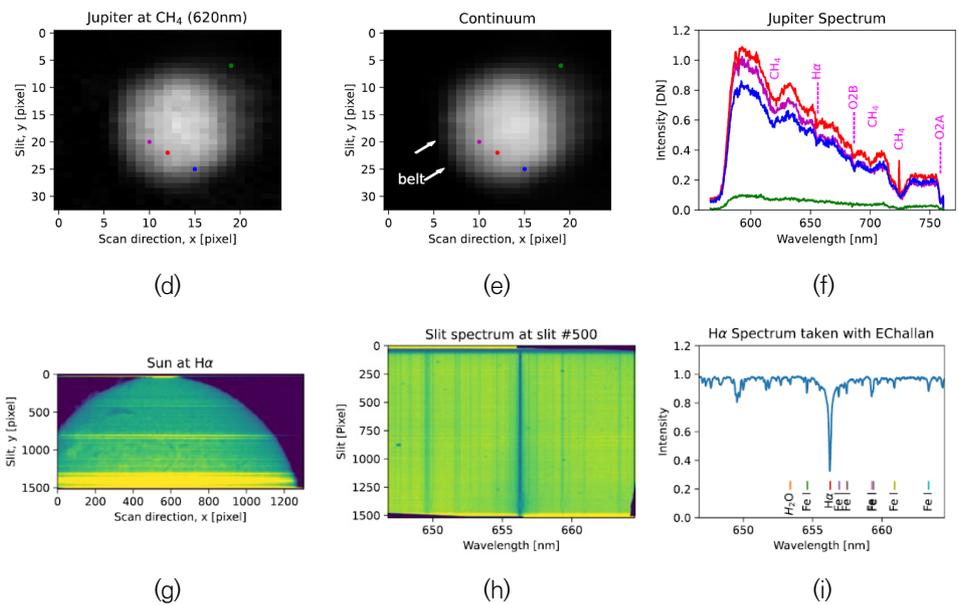


Fig. 6. (Continued)

과학적 목적과 시스템 엔지니어링에 대한 전반적인 내용, 개발 과정과 결과를 상세히 정리하여 20분 발표 평가를 하였으며 이전의 리뷰와 마찬가지로 여러 명의 리뷰패널에게 코멘트를 받았고, 정량화된 평가 점수를 받도록 기획하였다.

학기 시작 전 전체 프로그램 계획으로는 최종 보고서까지 완성하고자 하였으나 한 학기만으로 소화하기 힘든 여건 상 생략하였다.

Table 4에 지금까지 제시된 각 리뷰단계별로 학생들에게 요구했던 문서화 목록이다. PDR에서 생성한 문서 목록은 CDR과 ORR에서 구체화 되고 수정되어 최종 발표에서 완성분을 만들었다.

Table 4. Document list requested in each milestone

Milestone	Document list
Preliminary design review	Scientific objective
	Science requirement / system requirement
	Schedule
	Role and responsibilities
	Work break down
Critical design review	Risk management plan
	Optical design
	Mechanical design
	Assembly plan, alignment plan, test plan
	Observation plan
	Answers on the PDR action item
Part list for observation	

Table 4. (Continued)

Milestone	Document list
Observation readiness review	(Detailed) Part list for observation
	(Detailed) Observation plan
	Data processing plan
	Answers on the CDR action item
Final presentation	Science result

PDR, preliminary design review; CDR, critical design review.

4. 결론 및 발전 방향

천문학은 이학계열 대학생들에게 매우 매력적인 주제로 많은 학생들이 천문학 기기에 대한 뉴스를 접하고 천문학 기기를 개발하는 비전을 가지고 학문을 시작한다. 고전적인 천문학 커리큘럼에서는 수학과 물리 외 공학적인 요소들에 대한 교육을 받지 못한 채로 대학원 과정 및 박사후 연구원 과정에서 개발 현장에 진입한다. 우리가 진행한 “창의 천문기기 개발 및 관측” 수업은 이에 학생들에게 현장에서의 현실적인 기기개발의 전 과정을 실습하게 함으로써 관측기기의 설계 및 제작에 대한 기본 감각을 키우는데 목적이 있다.

이 수업은 공과대학에서 제공하는 시스템엔지니어링 및 프로젝트 관리 교육과 비교해 천문 관측기기라는 선택적 개발요소가 있기 때문에 공과대학의 수업에서 필요한 공학의 개념뿐 아니라 연구주제를 제시하기 위한 천문학에 대한 전반적 지식, 광학설계를 위한 광학 지식이 추가적으로 필요하다. 이러한 다양하고 복합적인 학문 요소를 활용해야 하는 수업 특성 상 고학년 중심의 전공 수업 형식, 혹은 대학원 과정의 수업으로 제공되어야 할 것으로 생각된다.

교과목 내용은 5주간의 시스템 엔지니어링, 광학, 기계 등 기본설계에 대한 교육을 진행하고, 3주간의 상세설계, 4주간의 제작 및 관측실습 과정이 주어진다. 1주일에 1회 3시간 강의를 진행하였으나 5주간의 초기 교육이 끝난 후에는 정규 수업이 아닌 조별 면담을 통해서 강의를 진행했다. 모든 과정은 천문관측기기 개발 과정에서 진행되는 마일스톤을 고려하여 진행했다.

강의 특성상 설계도구에 대한 교육은 진행할 시간이 부족하다. 옵틱스튜디오(optic studio)를 이용한 광학 설계, 인벤터(inventor), 카티아(cartia) 등을 이용한 기계부 설계, 라즈베리파이 카메라 등의 제어, 파이썬을 이용한 데이터 처리는 학생들에게 정규 교육으로 제공되지 않았으며, MOOC와 같은 오픈강의를 소개한 후 능동적으로 교육받도록 하였으며 많은 경우 강사와의 면담 및 메일을 통한 상담으로 해결하였다.

이 논문에서 소개한 수업은 분광기를 만드는 것을 목표로, 지금까지는 많이 시도되지 않은 드리프트 스캔이라는 방식을 통해 영상 분광 자료를 획득하여 연구까지 진행하였다. 드리프트 스캔 방법은 아직 실제 연구를 위한 관측에 활발하게 사용되지 않으나 정밀한 마운트 제어가 가능해지고 고속촬영이 가능한 CMOS 센서를 연구에 활용하기 시작하면서 앞으로 밝은 천체에 대해 다양하게 활용될 것으로 기대된다.

수업 진행 과정에서 미흡했던 점과 개선점을 다음과 같이 제시한다.

1. 관측 및 제작에 과중한 학생 및 강사의 업무

- a. 강의의 전 과정은 조교 없이 학생 및 강사 한사람에게 집중되어 진행되었다. 한 학기 안에 끝내야 하는 일정 상 학생들은 타 과목에 지장을 받을만큼 시간적인 어려움이 있었다. 강사 또한 조교가 없는 수업 구조 상 야간관측이나 야간 기기 제작을 직접 도와야 하는 상황을 마주할 수밖에 없었다.
- b. 학생들은 과중한 프로젝트 스케줄 상 학생들은 과중한 프로젝트 일정상 작업일지와 연계된 교훈 보고서 등을 제대로 남기지 못했다.
- c. 절대적으로 제작에 필요한 시간이 부족하기 때문에 두 학기 커리큘럼을 구성하거나 방학 연계 수업으로 진행하여 이러한 부담을 줄일 수 있을 것이다.

2. 효율적인 프로젝트 매니지먼트로 인한 학생 교육의 파편화

- a. 수업 중 각 조마다 PM을 배치하고 조원들이 업무를 배분하여 진행하게 되는데 광학 설계, 기계설계와 같은 부분은 일부학생만이 이해하고 일을 진행해 나가는 경우가 발생했다. 일부 학생의 경우 분광기의 원리를 이해하지 못한 상태로 수업을 마치기도 하였다. 이러한 문제를 해결하고자 초기 분광기 파라미터 산출을 개인별로 하도록 지도하였으나 매우 촉박한 일정 상 학생들에게 충분한 이해 없이 진행할 수밖에 없었다.
- b. 마찬가지로 시수를 늘리고 과제 등을 통해 교육을 좀 더 진행한다면 나아질 수 있을 것이다.

3. 비용적인 요소

- a. 광학부품, 기계부품, 라즈베리 파이와 카메라, 3D 프린터용 레진 등 많은 재료가 필요하며 많은 비용이 소요된다. 이러한 수업을 학과 내에서 진행하는 것은 비용상 어려울 수 있을 것이다. 이러한 프로그램은 현장에서의 실제적 접근이 중요하므로 시설과 예산에서 지원이 가능한 천문연과 같은 기관이 주기적으로 진행할 수 있다.
- b. 비용을 최소화하기 위해 슬릿을 학생들이 직접 유리에 칼집을 내어 제작하도록 했다. 하지만 슬릿의 폭이 일정치 않아 연구 주제에 따라서 어려움이 있었다. 더 나은 관측결과를 위해서는 슬릿을 구매해 사용하거나 레이저 각인 등으로 유리면에 슬릿을 정밀하게 제작하는 편이 나을 것이다.

4. 안전요소

- a. 드릴, 톱질, 레진 등을 사용하는 프로젝트 상 학생들이 다양한 위험에 노출될 수 밖에 없다. 이번 수업은 그러한 부분에 대해서 간과하여 진행하였으나, 이에 대한 구체적인 해결책을 찾아 개선해야할 것이다.

이번 수업에서 진행한 분광기의 제작은 광학과 기계부에 대한 이해가 있어야 하고, 데이터 처리과정도 복잡한 면이 있다. 이보다 좀 더 손쉬운 관측 및 개발 주제로 아래 몇 가지 주제를 제시한다. 각 프로그램 별로 필요로 하는 기술요소가 다르며 그에 따른 교육 내용이 달라질 수 있다.

1. 포토다이오드 및 아두이노를 이용한 낮시상 측정장비 제작

- a. 태양빛이 지표면까지 닿기까지 두꺼운 지구대기를 통과하며 굴절 및 산란에 의해서 진동하게 되는데 가시광 영역에서의 그 양은 태양광량의 약 $1e-7$ 정도이다. 이러한 진동은 포토다이오드를 이용해서 기록한 후 증폭 및 미분회로를 구성하여 추출해낼 수 있고 이를 시상값으로 변환할 수 있다. 학생들은 이 교과과정을 통해서 전자회로에 대한 이해를 할 수 있고 인공위성의 검출기의 원리를 이해할 수 있다.

2. 500 mm 카메라 렌즈와 HQ 카메라를 이용한 낮시상 측정장비

- a. 태양은 지구에서 보기에 완전한 구체로 그 경계면은 또렷한 원형이다. 이를 소형 망원경을 이용해서 밀리초 단위의 노출로 사진을 찍으면 대기 버블의 굴절효과에 의해 태양의 각 지점마다 원반으로부터 벗어난 형태를 보여준다. 태양 원반의 모든 방향으로 원형으로부터 벗어난 정도를 통계적으로 분석하면 낮 시상 정보를 획득할 수 있다. 카메라라는 이 논문에서 소개된 것과 같은 라즈베리 파이 카메라를 이용할 수 있으며, 카메라 렌즈를 이용하면 비용을 줄일 수 있다. 이 과정을 통하여 학생들은 라즈베리 파이 구동, 고속 촬영, 데이터 분석을 실습할 수 있다.

3. 4개의 포토다이오드와 아두이노를 이용한 태양센서 제작

- a. 인공위성에 사용하는 저해상도 태양센서는 포토다이오드를 이용해서 제작한다. 네 개의 포토다이오드를 적절한 각도로 배치한다면 태양의 위치를 추적하는 태양 센서를 제작할 수 있다. 미약한 아날로그 신호를 읽어내기 위해 증폭회로 구성을 해야 하며 네 개의 아날로그 채널을 기록하여 비교함으로써 태양의 궤도를 추적할 수 있을 것이다. 더불어 두개의 모터를 이용해 추적 시스템을 구축한다면 학생들은 시스템 제어에 대해서 이해할 수 있을 것이다.

4. 라즈베리 파이 카메라를 이용한 유성 궤도 추적

- a. 마찬가지로 라즈베리 파이 카메라에 전천 렌즈를 장착하면 전천 카메라를 손쉽게 만들 수 있다. 다른 지역에 설치된 전천 카메라를 이용하여 동시에 유성이나 인공위성을 같은 시간에 관측하면 궤적과 궤도를 예측할 수 있다. 이 과정을 통하여 학생들은 궤도역학을 실습해 볼 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2022M1A3C2078989).

References

1. 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>
2. NASA, Systems engineering handbook, NASA Langley Research Center Technical Report, NASA SP-2016-6105 (2016).
3. NASA, Space flight program and project management handbook, NASA Office of the Chief Engineer, NASA/SP-2014-3705 (2014).

Author Information

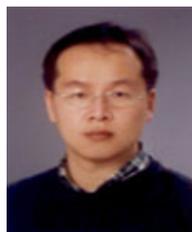
양 희 수 hsyang@kasi.re.kr



서울대학교 천문학과에서 2016년 이학박사 학위 취득 후, 2017년부터 한국천문연구원 에서 태양의 소규모 자기재연결 현상과 제트를 연구하고, 국제 우주정거장용 코로나그래프 에서 기계제어전자부, 필터휠어셈블리를 개발하였다. 현재 차세대 태양영상분광망원경

네트워크와 개기일식 관측용 영역적분분광기, 멀티슬릿 분광기 등을 개발하고 있다.

정 종 균 jkchung@kasi.re.kr



충남대학교 천문우주과학과에서 2005년 이 학박사 학위 취득 후, 2006년부터 한국천문연 구원에서 위성항법시스템 신호의 전리층 시 간지연과 페이딩 현상을 연구하고, 남극내륙 고원 무인우주탐사 플랫폼 모듈을 개발하여 운영 중에 있다. 현재 위성항법시스템 지상시

스템 개발과 우주측지기술을 이용한 기후변화 연구 등을 수행하고 있다.