광섬유 피드 리트로마운트형 분광계 AN OPTICAL FIBER FEED LITTROW-MOUNTED SPECTROMETER

배지훈¹, 송재원^{1*}, 윤태석²

¹경북대학교 IT대학 전자공학부, ²경북대학교 자연과학대학 천문대기학과

J. -H. BAE¹, J. -W. SONG¹, AND T. S. YOON²

¹School of Electronic Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

E-mail: jwsong@knu.ac.kr

²Department of Astronomy & Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Received March 12, 2012; Accepted July 13, 2012)

ABSTRACT

A low-dispersion fiber feed Littrow-mounted grating spectrometer for education was designed and fabricated. The dispersion element is a reflective type blazed grating Edmundoptics NT 46-075 (spatial frequency 600 lines/mm, dimension 30 mm × 30 mm, blazed angle 8.6 degree). The optical fiber coupler module for optical guiding from telescope to spectrometer is composed of a multi-mode FC connector - FC connector optical fiber patch cord (core/cladding diameter 50 μm/125 μm) and two 1.25" throw-tube couplers. The lens for collimating and imaging is a general purpose focal length 50 mm camera lens (f/1.8). The device for optical path control is a rectangular prism (size 25 mm × 25 mm). The imaging camera sensor is a Meade DSI Pro 2 CCD sensor (black and white, 752 x 582 pixels and pixel size 8.3 μm × 8.6 μm). Softwares for data logging and analysis consist of Meade Autostar Suite, NIH imagej and Vernier Logger Pro 3. The wavelength coverage range of the spectrometer is 205 nm at central wavelength 550 nm. The wavelength resolution is 1.7 nm.

Key words: fiber-feed; Littrow-mounted; grating; spectrometer

1. 서론

본 논문에서는 천체관측용 저분산 회절격자 분광계를 광섬유 피드 리트로마운트형 회절격자로 설계하고 구현한다. 망원경과 분광계의 원활한 광결합 및 광전송을 위해서 광섬유를 사용한다(Ramsey, 1981). 즉 광섬유로 피딩(feeding)을 한다. 그리고 리트로마운트형¹ 구조는 분광계 회절격자에 평행광을 만들어 입사시키기 위한 콜리메이터 렌즈 기능과 분산광 카메라 결상을 위한 카메라 렌즈 기능을 1개 렌즈로 겸용하여 광학계를 간단하게 하는 장점이 있다.

본 분광계는 교육용으로 저렴하게 구현하는 것을 목표로 한다.

2. 리트로마운트형 분광계 구성요소 및 구조

본 저분산용 리트로마운트형 분광계는 공간주파수 600 라인/mm 반사형 회절격자를 사용한다. 가시광선 중간 파장인 550 nm에서 되돌아 나오게 설계하였다. 그러므로 회절격자에 입사시킬 입사각 및 회절각 θ 는 1차 회절차수에서 다음 리트로마운트 회절 관계식 (1)에서 계산하였다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (1)$$

이 식에 파장 $\lambda = 550$ nm, 격자주기 $d = \frac{1}{600}$ [mm]를 대입하여 원하는 입사각 및 회절각 $\theta = 9.50^\circ$ 를 얻었다. 이 각도로 회절격자를 입사광에 대하여 경사지게 설치한다.

본 분광계에 사용한 구성요소의 규격을 표 1에 나타내었으며, 그림 1은 광섬유 피드 리트로마운트형 분광계 구조도를 보여 준다. 분산소자로는 Edmundoptics 사 반사형 브레이즈드 회절격자 ‘NT 46-075’²(공간주파수 600 라인/mm, 크기 30 mm × 30 mm, 브레이즈각 8.6°)

* 교신저자.

¹ <http://home.freeuk.com/m.gavin/newspecold.html>.

표 1. 분광계 구성요소 규격

Item	Description
Optical Fiber Coupler Module	Multimode Fiber Core/Cladding Diameter 50 μm /125 μm Numerical Aperture(NA) 0.2(f/2.45) 2 m FC-FC Optical Fiber Patch-cord 1.25" Telescope Throw-tube/Spectrometer Coupler 2ea
Prism	Rectangular 45° - 45° BK7 Size 25 mm $\times$ 25 mm
Lens	Canon EF 50 mm f/1.8 II Focal Length 50 mm f/1.8 General Purpose Camera Lens
Grating	Edmundoptics NT 46-075 or Y46-075 Spatial Frequency 600 line/mm Reflective Type Size 30 mm $\times$ 30 mm Braze Angle 8.6° Littrow-mounted Diffraction angle 9.5° at wavelength 550 nm Diffraction Efficiency $\sim$ 75% at wavelength 550 nm
Camera Sensor	Meade DSI Pro2 Pixels 752 $\times$ 582 Pixel Size 8.3 μm $\times$ 8.6 μm USB Interface
Software	Meade Autostar Suite NIH imagej Vernier Logger Pro 3

그림 1. 광섬유 피드 리트로마운트형 분광계 구조도.

를 사용하였다. 이 회절격자의 회절효율은 파장 550 nm에서 약 75%이다. 망원경과 분광계간 광결합 및 전송용 광섬유 결합기 모듈은 코어지름/클래딩지름 50 μm /125 μm 멀티모드 FC(Ferrule Connector) 커넥터-FC 커넥터 광섬유 패치코드³와 광결합기 2개를 조합하여 사용하였다. 이 광섬유 패치코드의 길이는 2 m이다. 이 멀티모드 광섬유는 개구수(NA) 0.2이다. 이것은 f/2.45에

해당한다. FC 커넥터 당 결합손실은 0.3 dB이다. 콜리메이터와 카메라렌즈 겸용 렌즈로는 Canon 사 ‘EF 50 mm f/1.8 II’⁴(초점거리 50 mm, f/1.8) 범용 카메라렌즈를 사용했으며, 입사/출사 광경로 조정용으로 크기가 25 mm $\times$ 25 mm(45° - 45°)인 직각프리즘을 사용하였다. 스펙트럼 사진 기록용 카메라 센서로는 Meade 사 모델 ‘DSI Pro 2’⁵ 흑백용(픽셀 수 752 $\times$ 582, 픽셀크기 8.3 μm $\times$ 8.6 μm) 실리콘 PIN 광다이오드 CCD 센서를 사용하였다.

분광계의 구조와 작동은 다음과 같다. 망원경에서 모은 천체의 빛을 분광계에 보내기 위한 광섬유부(입출력 2개 광결합기 및 다중모드 FC-FC 광섬유 패치코드), 광경로 조정용 프리즘, 콜리메이터와 카메라렌즈 겸용 렌즈, 분산소자인 회절격자, 스펙트럼 사진 기록용 실리콘 PIN 광다이오드 CCD 센서로 구성되어 있다. 망원경 주 초점(prime focus)에 설치한 광결합기 1에서 천체 빛이 광섬유에 결합된다. 이 빛은 다중모드 FC-FC 광섬유 패치코드를 통하여 반대편 광결합기 2에 도달한다. 이 빛은 공기중으로 나오고 프리즘을 통하여 90° 꺾여 검

² <http://edmundoptics.com/>.

³ <http://www.fibermall.co.kr/home/ksoptonics/mall.php?cat=2505&q=view&uid=1989>.

⁴ http://www.canon-ci.co.kr/actions/ProductMainAction?cmd=view&product_code=LSAA640032.

⁵ <http://www.opticsplanet.net/meade-deep-sky-imager-pro-ii-mono.html>.

(a)

(b)

그림 2. 망원경과 분광계간 광결합/광전송용 광섬유 결합 모듈 사진. (a) 전체모습, (b) 망원경 1.25인치 드로튜브 광결합용 광섬유 결합기 1(왼쪽) 모습과 분광계 광결합용 광섬유 결합기 2(오른쪽) 모습.

용 렌즈로 나아간다. 렌즈를 거친 평행광은 반사형 회절격자에 입사한 뒤 분산 및 반사되어 나온다. 이 빛은 다시 검용 렌즈를 통해서 집속되고, 최종적으로 CCD 센서에 도달하여 결상된다. CCD 센서의 디지털 출력 전기신호는 PC로 전송된다. 검용 렌즈의 횡 방향 절반 부분은 콜리메이터 렌즈용으로 다른 절반 부분은 카메라 렌즈용으로 사용되는 것이다. 이상의 분광계 구성요소의 규격을 표 1에 정리하였다.

분광계의 광섬유 결합기 1을 망원경의 주 초점에 설치하고 원하는 천체의 빛이 광섬유에 제대로 입사되었는지를 확인하여야 한다.

그리고 비교광원은 실험실용 네온원소 방전관을 사용한다. 먼저 네온방전관 빛을 광섬유 결합기 1에 결합하고 스펙트럼을 기록하며, 그 다음에 광섬유 결합기 1을 망원경 주 초점으로 옮기고 천체의 빛을 결합하고 스펙트럼을 기록한다. 이 두 가지 스펙트럼을 서로 비교하여 천체 스펙트럼의 파장 축을 결정한다.

3. 분광계 제작

표 1과 그림 1에 언급한 분광계 구성요소를 고정하고 수용하기 위한 지그(zig)와 케이스를 설계하였다. 이들 고정지그의 재료는 알루미늄이고, 흑색 아노다이징(anodizing) 하였다. 회절격자 고정지그는 ‘ㄷ’자 모양이고 회절격자를 플라스틱 M3 볼트로 고정하게 하였다. 회절격자를 고정한 이 회절격자 지그를 케이스 바닥에 M5 볼트로 고정할 수 있게 하였다. 중심파장이 550 nm 되게, 할로겐램프 광원과 550 nm 대역통과 필터를 이용하여 회절격자의 각도를 조정하고(앞에서 언급한 회절 각 $\theta = 9.5^\circ$) 고정하였다(중심 파장은 550 nm로 고정하고 조정은 하지 않음). 렌즈고정 지그는 받침 있는 고리 모양으로 케이스 바닥에 고정할 수 있는 구조이

다. CCD 카메라 고정지그는 ‘ㄴ’자 모양이고 케이스 바닥에 고정할 수 있는 구조이고, 광경로 방향으로 위치조정이 가능하게 고정 볼트용 구멍이 슬롯형이다. 프리즘 고정지그는 ‘ㄷ’자 모양으로 케이스 바닥에 고정할 수 있는 구조이다.

분광계 케이스의 재료는 알루미늄이며 판의 두께는 6 mm이고 흑색 아노다이징 하였다. 이렇게 설계/제작한 부품으로 케이스를 조립하였으며 그 크기는 190 mm × 180 mm × 120 mm이다.

그림 2는 망원경과 분광계간의 광결합/광전송용 광섬유 결합기 모듈(2개 광섬유 결합기 및 다중모드 FC-FC 광섬유 패치코드)의 사진을 보여준다. 그림 2(a)는 전체 외관을, 그림 2(b)는 망원경 1.25인치 드로튜브 광결합용 광섬유 결합기 1(왼쪽) 모습과 분광계 광결합용 광섬유 결합기 2(오른쪽) 모습을 보여준다. 그림에서 범용 FC-FC 멀티모드 광섬유 패치코드와 자체 제작한 지름 1.25인치 광결합기 2개를 볼 수 있다. 각 광섬유 결합기는 FC 광 패치코드 한쪽 끝의 FC 슛 커넥터, 고정용 FC 암 커넥터 및 외경 1.25인치의 원통형 황동 지그로 구성되어 있다.

그림 3은 이렇게 제작/구성한 분광계의 실물사진을 보여준다. 그림 3(a)는 전체 외관을, 그림 3(b)는 내부를, 그리고 그림 3(c)는 내부 상세 모습을 보여준다. 그림에서 광섬유 결합기 모듈, 본체 및 USB 케이블을 볼 수 있다.

전체 조립 완성한 분광계의 무게는 3.6 kg이다. 구성요소의 비용은 110만원, 지그 및 케이스 제작비는 40만원으로 총 비용은 150만원이었다.

4. 스펙트럼 사진 촬영, 데이터 수집 및 분석용 소프트웨어

CCD 카메라로 스펙트럼을 촬영하기 위한 소프트웨어

(a)

(b)

(c)

그림 3. 광섬유 피드 리트로마운트형 분광계 사진.
(a) 전체모습, (b) 내부모습, (c) 내부 상세 모습.

로는 CCD 카메라 구매 시 같이 들어온 Meade 사 ‘Autostar Suite’⁶를 사용하였다. 그림 4는 스펙트럼 사진 촬영 중인 컴퓨터 화면을 보여 준다. 노출시간, 게인, 오프셋 등의 조정기능이 있다. 스펙트럼 사진의 파일형식은 JPEG나 FITS이다.

Autostar Suite에서 저장한 스펙트럼 사진 파일로부터 스펙트럼 데이터를 추출하기 위해 NIH(National Institutes of Health)의 ‘imagej’ 소프트웨어⁷를 사용하였다. 스펙트럼 사진 파일을 불러 오고 난 뒤, 스펙트럼 사진에 샘플링 창을 적절히 설치하고 스펙트럼의 광량 대 픽셀번호 데이터를 추출하고 저장한다. 그림 5는 스펙트럼 데이터를 추출 중인 컴퓨터 화면을 보여 준다. 그림에서 보면 스펙트럼 사진의 가로 스펙트럼 휘선에 샘플링 창을 설정하고 스펙트럼 데이터를 추출한 것을 알 수 있다. 그래프 창에 스펙트럼의 광량 대 픽셀번호 그래프를 보여 준다. 이 그래프의 데이터를 텍스트 파일(*.txt)로 저장한다.

imagej에서 저장한 스펙트럼의 광량 대 픽셀번호 데이터로부터 스펙트럼 그래프 데이터를 구하기 위해서 Vernier 사의 ‘Logger Pro 3’ 소프트웨어⁸를 사용하였다. 스펙트럼 모양에서 이미 알고 있는 파장의 픽셀번호 2개 값을 이용하여 픽셀번호를 파장 값으로 1:1로 대응시킨다. 즉 스펙트럼의 광량 대 픽셀번호 데이터를 스펙트럼의 광량 대 파장 데이터로 변환한다. 최종적으로 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프를 구한다.

5. 분광계 특성 측정 및 분석

이렇게 구성한 광섬유 피드 리트로마운트형 분광계의 특성을 측정하고 분석하였다. 우선 시험광원으로 할로겐램프를 사용하였다. 할로겐램프와 광섬유 결합기 1을 서로 마주 보게 각각 스탠드에 고정하고 램프 빛을 결합하여 분광계에 입사시킨 뒤 연속 스펙트럼의 가로 휘선이 나오는 것을 확인하였다. 그리고 앞에서 언급하였듯이 분광계 중심 파장을 맞추기 위해서, 할로겐램프 광원의 출력을, 통과 중심 파장 550 nm인 헤파대역 투과 필터에 통과시키고 난 뒤 분광계 광섬유 결합기 1에 입사시켰다. 이 550 nm파장에 해당하는 밝은 점이 스펙트럼 사진의 파장 축 중앙에 오도록 회절격자의 각도를 조정하고 고정하였다. 할로겐램프의 연속 스펙트럼을 사진 촬영하고 그 스펙트럼 데이터 추출 등을 수행하여 분광계의 기본 동작을 확인하였다.

그 다음 시험광원으로 네온원소 스펙트럼이 나오는

⁶ http://www.meade.com/manuals/TelescopeManuals/LPI_Imager/AutostarSuiteManual.pdf.

⁷ <http://rsbweb.nih.gov/ij/>.

⁸ <http://www.vernier.com/products/software/lp/>.

그림 4. Meade 사 Autostar Sute 소프트웨어를 사용한 스펙트럼 사진 촬영 컴퓨터 화면.

그림 5. NIH imagej 소프트웨어를 사용한 스펙트럼 데이터 추출 컴퓨터 화면.

네온방전관⁹을 사용하여 측정 및 분석을 하였다. 그림 6은 네온방전관 스펙트럼 사진과 분석한 결과를 보여 준다. 그림 6(a)는 네온원소의 발광스펙트럼 사진을, 그림 6(b)는 Logger Pro 3로 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프를 구한 것을 보여준다. 스펙트럼 사진에서 보면, 네온의 불연속 발광 스펙트럼이 보인다. 네온원소 발광선의 파장 값을 이미 알고 있으므로, 그 가운데 양 끝의 2개 기준 파장 값을 선택하고 해당 픽셀번호로부터 픽셀번호를 파장 값으로 1:1로 대응시켰다. 그 결과로 스펙트럼의 광량 대 픽셀번호 그래프를 구하였다. 앞에서 미리 선택한 2개의 기준 파장 값을 그래프에서 확인한 후, 나머지 다른 발광선의 파장 값을 문헌 값과 비교하여 일치하는 것을 확인하였다.

본 분광계의 파장 측정 범위는 중심파장 550 nm에서 205 nm(파장 447.5 nm ~ 652.5 nm)이었고 해상도는 1.7 nm이었다. 일반적으로 파장 해상도는 CCD 광센서

표 2. 광섬유 피드 리트로형 분광계 규격

항목	규격
중심파장	550 nm
파장 범위	205 nm(447.5 nm ~ 652.5 nm)
파장 해상도	1.7 nm(R = 326)
케이스	두께 6 mm 알루미늄 직육면체 상자
크기	190 mm × 180 mm × 120 mm
무게	3.6 kg
비용	1,500,000원

픽셀 크기로 결정된다. 그러나 본 분광계에서는 광섬유의 코어 크기가 50 μm 로 센서의 가로픽셀 크기인 8.3 μm 보다 크다. 그러므로 파장 해상도는 광섬유 코어 크기로 결정된다. 표 2에 본 분광계의 규격을 정리하였다.

그 다음 본 분광계로 실제 천체인 태양의 스펙트럼을 측정하였다. 태양은 워낙 밝으므로 망원경을 사용하지 않고 스탠트에 광섬유 결합기 1을 고정/조정하여 태양광을 결합하였다. 이렇게 태양의 스펙트럼을 측정/분석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)에 태양 스펙트럼 사진을, 그림 7(b)에는 Logger Pro 3로 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프와 프라운호퍼선을 구한 것을 나타내었다. 스펙트럼 사진과 그래프에서, 태양의 열복사 연속 스펙트럼과 프라운호퍼선이 보인다. 프라운호퍼 C, D, E, b, F선이 뚜렷하게 검출된 것을 보여준다. 이들 태양 스펙트럼의 프라운호퍼선 파장 값을 문헌 값과 비교하여 일치하는 것을 확인하였다.

지금까지 언급한 할로젠램프, 네온방전관 및 태양광원은 크기도 크고 밝기 때문에 광섬유 결합기에 광결합 하는 데 별 문제가 없었다. 그러나 별과 같이 크기가 작고 어두운 천체는 광섬유 결합기에 광결합 하는 데 어려운 점이 있다. 효과적인 결합과 모니터링을 위해서는 슬릿모니터가 있어야 하지만 본 논문에서 아직 준비하지 못했다. 그래서 밝은 별을 관측대상으로 망원경을 조준하고, 망원경 주 초점에 스크린을 설치하여 중앙에 해당별의 결상을 확인한 뒤, 광섬유 결합기 1을 스크린 위치에 설치하여 광결합을 하였다. 이 방법으로 측정한 밝은 별 베가의 스펙트럼과 분석을 그림 8에 나타내었다(김준호, 2012). 사용한 망원경은 구경 D310 mm, f/5.6 뉴턴식이고, 노출시간 40초, 3장 합성으로 얻은 스펙트럼 사진이다. 아래쪽에 베가의 스펙트럼 사진을 보여 주며, 위쪽에는 이 사진을 분석하여 그린 스펙트럼 그래프와 프라운호퍼선을 동정한 것을 보여준다. 수소 흡수선 $H\beta$ 와 $H\gamma$ 가 뚜렷하게 검출된 것을 볼 수 있다. 이 수소 흡수선의 파장 값을 문헌 값과 비교하여 일치하는 것을 확인하였다.

본 분광계의 광결합 효율은 아직 직접 측정해보지

⁹ http://www.pasco.com/prodCatalog/SE/SE-9467_spectral-tube-neon/.

(a)

(b)

그림 6. 네온방전관 스펙트럼. (a) 스펙트럼 사진, (b) 스펙트럼 그래프(Vernier 사 Logger Pro 3 컴퓨터 분석 화면).

못했다. 광섬유의 개구수가 $0.2(f/2.45)$ 로 망원경 주경의 $f/5.6$ 에 비하여 작기 때문에 개구수 불일치에 의한 손실은 없어 보인다. 그러나 광섬유 코어의 직경이 $50\ \mu\text{m}$ 이므로 망원경 주 초점에 생긴 천체의 결상 크기가 이 광섬유 직경보다 크면 결합 손실이 생긴다. 광섬유 커넥터 입사와 출사에 각각 $0.3\ \text{dB}$ 의 손실이 있다. 광섬유 전송 손실은 단거리이기 때문에 매우 작다. 분광계 내부에서는 직각프리즘(2면 약 8% 손실), 렌즈(2면 거침, 약 10%), 회절격자(회절효율 75%, 손실 25%)를 거치므로 추가적인 손실이 발생한다. 전체적인 추정 손실은 약 60%이다.

(a)

(b)

그림 7. 태양 스펙트럼. (a) 스펙트럼 사진, (b) 스펙트럼 그래프 및 프라운호퍼선. 망원경 사용하지 않고 광섬유 결합기만 사용하여 촬영.

6. 결론

천체관측 교육용 저분산 분광계를 광섬유 피드 리트로 마운트형으로 설계하고 구현하였다. 분산소자로는 Edmundoptics 사 반사형 브레이즈드 회절격자(공간주파수 600 라인/mm, 크기 $30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$, 브레이즈 각 8.6°)를 사용하였으며, 망원경과 분광계간 광결합 및 광전송용 광섬유 결합기 모듈은 코어지름/클래딩지름 $50\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 멀티모드 FC-FC 광섬유 패치코드와 직경 1.25인치인 광섬유 광결합기를 사용하였다. 콜리메이터와 카메라렌즈 겸용 렌즈로는 초점거리 50 mm, $f/1.8$ 범용 카메라렌즈를 사용했으며, 입사광 경로 조정용으로 크기 $25\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$ 인 직각프리즘을 사용하였다.

출업논문

Ramsey I. W., et al., 1981, Telescope Performance of a Fiber Coupled Spectrograph, Bull. American Astron. Soc., 12, 836(A)

그림 8. 베가 스펙트럼 사진(아래) 및 그래프(위). D310 mm, f/5.6 뉴턴식 반사망원경, 노출시간 40초, 3장 합성(김준호, 2012).

스펙트럼 사진 기록용 카메라 센서로는 Meade 사 모델 DSI Pro 2 흑백용(픽셀 수 752×582 , 픽셀크기 $8.3 \mu\text{m} \times 8.6 \mu\text{m}$) 실리콘 PIN 광다이오드 CCD 센서를 사용하였다. 스펙트럼 사진 기록용 소프트웨어로는 Meade 사 Autostar Suite를 사용하였으며, 스펙트럼 분석용 소프트웨어로는 NIH imagej와 Vernier 사 Logger Pro 3를 사용하였다.

설계 및 구현결과, 가시광선 중앙영역(중심파장 550 nm)에서 측정 파장 범위 205 nm, 파장 해상도 1.7 nm($R = 326$)를 얻었다. 회절격자 설치각도 조정 및 확인을 할로겐램프와 협대역 투과필터를 사용하여 하였다. 그리고 파장 교정을 위한 기준광원으로 네온방전관을 사용하였다. 이렇게 준비한 본 분광계로 망원경을 사용하지 않고 태양 스펙트럼을 기록하고 분석하여 태양의 열복사 연속 스펙트럼과 프라운호퍼선을 확인하였다. 그리고 본 분광계를 구경 D310 mm, f/5.6 뉴턴식 반사망원경에 부착하고, 베가의 스펙트럼을 기록하고 분석하여 수소 흡수선을 확인하였다.

본 분광계는 저분산 교육용으로 설계 및 구현한 것으로, 슬릿 모니터 부분을 개선하면 교육현장에서 여러 가지 별의 분광형 분류 등에 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 경북대학교 IT융복합글로벌인재양성센터의 지원으로 이뤄졌습니다.

참고 문헌

김준호, 2012, 소형 분광계를 이용한 밝은 별의 분광선 관측, 경북대학교 천문대기과학과 2012학년도 학부