

## 가시광선용 그리즘의 제작과 성능시험 FABRICATION AND TEST OF AN OPTICAL GRISM

이동하<sup>1</sup>, 송재원<sup>1\*</sup>, 윤태석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 IT대학 전자공학부, <sup>2</sup>경북대학교 자연과학대학 천문대기과학과

D. -H. LEE<sup>1</sup>, J. -W. SONG<sup>1\*</sup>, AND T. S. YOON<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

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

E-mail: jwsong@knu.ac.kr

(Received June 16, 2013; Accepted October 15, 2013)

### ABSTRACT

An optical grism for education is fabricated and tested. It is composed of a transmission grating as dispersion element and a prism as diffraction angle compensation device. The transmission grating is Edmundoptics #49-584 (spatial frequency 600 lines/mm, dimension 50 mm × 50 mm). The prism is the fused silica type with angles (41.3°, -48.7°, -90°). The grism device is fabricated by bonding the transmission grating and the prism with an optical adhesive. The zig for assembling the grism, telescope and camera is composed of an aluminum tube, an aluminum disk ring and a T-ring camera adaptor. The fabricated optical grism spectrograph is tested in laboratory using Halogen lamp and Neon lamp with DSLR camera. And the grism assembled with reflector telescope is tested in a field using stellar light. The results show good agreements with design parameters. The wavelength coverage range of the grism is 250 nm at the un-deviated wavelength of 506 nm. The wavelength resolution is 0.11 nm/pixel.

*Key words:* grism: grating, prism; visible light

### 1. 서론

분산소자인 회절격자(grating)는 프리즘(prism)에 비하여 분산 선형성이 우수하기 때문에 천체 분광에 많이 쓰이고 있다(Merrill, 1931).

그리즘(grism)은 투과형 회절격자와 프리즘을 결합한 소자를 말하며(grating + prism = grism), 여기서 회절격자는 분산용으로 쓰이고 프리즘은 꺾임각 보상용으로 쓰인다(Bowen et al., 1973). 측정하고자 하는 광이 회절격자를 지나 분산된 뒤에는 광경로가 꺾이게 된다. 이 꺾임이 스펙트럼 기록용 카메라를 설치하는데 불편을 준다. 그러므로 원하는 중심파장에서 분산은 되면서 꺾임이 안 생기게 그리즘을 잘 설계하면 광경로 직진형 그리즘 분광기를 구현할 수 있다.

이러한 분광기에 설치된 스펙트럼 기록용 카메라는 그리즘을 분리하면 일반 사진 기록용으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 다른 장점으로는, 망원경의 주경을 지난 천체의 광은 평행광이 아니고 주 초점에 수렴하게 되는데 이 경로 상에 그리즘을 두면 그리즘을 지난 뒤 광 수렴이 완화되므로, 주경만으로도 스펙트럼 결상을

할 수 있다. 슬릿이 없이 그리즘 분광기를 사용하면 이미지에 있는 모든 천체의 스펙트럼을 기록할 수 있다. 즉, 여러 천체의 스펙트럼 사진을 구할 수 있다(Hearnshaw, 2009). 슬릿이 없는 그리즘 분광기는, 카메라의 한 화면에 있는 여러 천체에 대한 분광을 한 번에 할 수 있으므로, 특별한 분광 특성을 갖는 천체를 쉽게 구분하여 찾는 데 효과적이다(Uhehara et al., 2004).

이러한 이유로 인해 근래에는 그리즘 분광기가 많이 쓰이고 있다. 대표적인 예가 허블 우주망원경의 WFC3 그리즘 분광기와 유럽남방천문대의 EFOSC 그리즘 분광기이다.

본 논문에서는 가시광선 분광기 소자인 그리즘을 저렴하게 교육용으로 설계·제작하는 과정을 소개한다. 본 연구에서 제작된 그리즘 소자는 분산용 투과형 회절격자와 회절각 보상용 프리즘으로 구성되어 있다. 완성된 그리즘에 대해, 스펙트럼 기록용 카메라와 스펙트럼 분석용 PC 소프트웨어를 이용하여, 실험실 테스트뿐만 아니라 실제 천체관측을 통해 그 성능을 시험하고 평가하였다.

\* 교신저자.

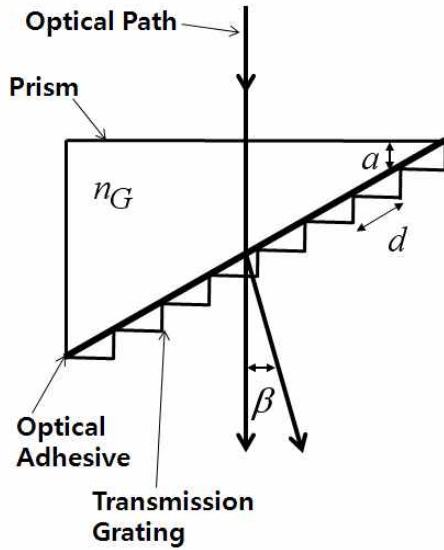


그림 1. 그리즘의 광학적인 기본 구조도와 광경로.

## 2. 그리즘 이론 및 설계

그리즘 분광기의 핵심소자인 그리즘의 작동원리와 그 기본 관계식에 대하여 기술한다. 그림 1은 그리즘의 광학적인 기본 구조도와 광경로를 나타낸다.

그리즘은 격자주기(피치)  $d$ 인 투과형 회절격자를 굴절률  $n_G$ , 쉐기각  $a$ 인 직각프리즘의 경사면에 결합한 구조로 되어 있다. 직각프리즘의 아래면에 수직으로 입사한 빛은 프리즘을 지난 뒤 프리즘의 두꺼운 쪽으로 꺾이게 되어 있다. 그리고, 투과형 회절격자를 빛이 지나면서 회절차수별로 회절되어 꺾이게 되어 있다. 분산이 일어나지 않는 0차 회절차수를 제외하고, 원하는 다른 1개 차수의 중심파장(비편향 파장)에서 회절에 의한 꺾임각과 프리즘에 의한 굴절각의 크기는 같고 부호가 반대로 되게 해서 서로 상쇄되게 한다. 즉, 최종 회절각  $\beta$ 가 0이 되게 한다. 수직으로 입사하는 광경로에 대한 직진분산 조건은 다음의 식(1)과 같다(Hearnshaw, 2009).

$$m\lambda = (n_G - 1) d \sin a \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 파장,  $m$ 은 회절차수,  $n_G$ 는 프리즘의 재질에 대한 굴절률을 나타내고,  $d$ 는 회절격자의 주기, 그리고  $a$ 는 프리즘의 쉐기각을 나타낸다. 이 관계식으로부터 회절 차수가  $m = +1$ 인 경우 분산  $D$ 를 구하면 식(2)와 같이 된다(Hearnshaw, 2009).

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{(n_G - 1) \tan a}{\lambda} \quad (2)$$

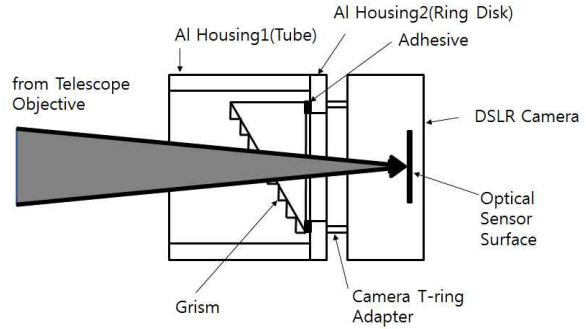


그림 2. 그리즘 하우징의 구조도 및 광경로.

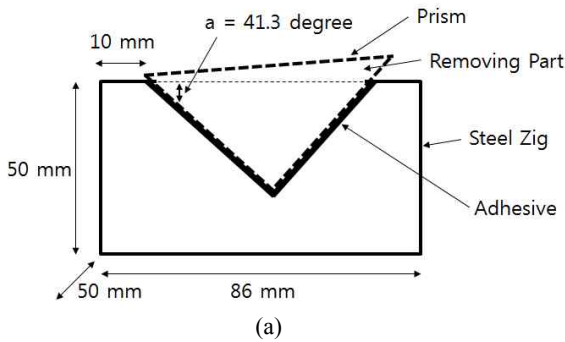
여기서 분산  $D$ 는 파장 변화에 따른 회절분산 각도의 변화를 뜻한다. 실제 분광기에서는 분산  $D$ 를 사용하지 않고, 그리즘에서 광센서까지 적당히 띄워서 광센서면의 횡방향 거리로 나타낸다. 특히, 디지털센서인 경우에는 픽셀단위별로 신호를 구분하여 검출·기록한다. 이를 고려한 그리즘 분광기의 파장해상도  $\Delta\lambda$ 는 다음의 식(3)과 같다.

$$\Delta\lambda = (D \times f)^{-1} \times l_{pixel} \quad (3)$$

여기서  $f$ 는 그리즘에서 광센서면까지 거리이고,  $l_{pixel}$ 은 광센서의 횡방향 즉, 분산방향의 픽셀 크기이다.

앞서 언급한 식(1) ~ (3)을 이용하여 그리즘을 설계하였다. 본 논문에서는 그리즘을 통과한 후 직진하는 빛의 중심파장 즉, 비편향 파장  $\lambda_{un}$ 을 가시광선의 중간 파장인  $550 \text{ nm}$ 로 선택하였다. 회절격자는  $600 \text{ 라인/mm}$  투과형 회절격자를 선택하였기 때문에 격자주기는  $d = \frac{1}{600} \text{ mm}$ 이다. 프리즘은 일반 유리를 고려하므로 굴절률이  $n_G = 1.5$ 이다. 그리즘에서 광센서면까지 거리  $f$ 는  $50 \text{ mm}$ (카메라 어댑터와 카메라 백포크스를 고려한 거리), 광센서의 횡방향 즉, 분산방향의 픽셀크기  $l_{pixel}$ 은  $4.3 \mu\text{m}$ (카메라 센서의 가로 크기 규격)을 선택하였다. 이들 값을 식(1) ~ (3)에 대입하여 프리즘에 대한 쉐기각  $a = 41.3^\circ$ , 분산값  $D = 7.99 \times 10^{-4} \text{ rad/nm}$ , 그리고 파장해상도  $\Delta\lambda = 0.11 \text{ nm/pixel}$ 인 설계값을 얻었다. 투과형 회절격자로 격자 공간주파수가  $600 \text{ 라인/mm}$ 이고 크기가  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 인 ‘Edmundoptics #49-584’를 선정하였다.

이상 설계한 그리즘을 망원경과 카메라에 부착하기 위한 고정지그 즉, 하우징을 설계하였다. 그림 2에 그리즘 분광소자의 하우징 구조도와 광경로를 나타내었다.



(a)

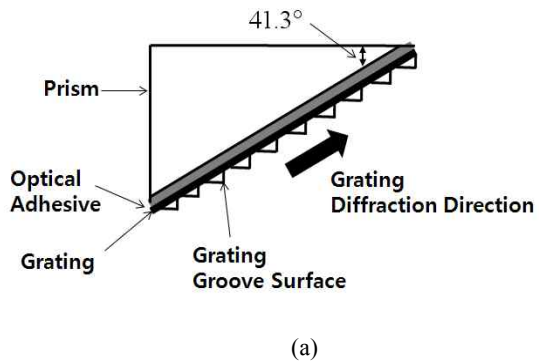


(b)

그림 3. (a) 프리즘을 연하기 위한 고정용 지그, 프리즘을 고정한 모양, 그리고 연마 제거 부위를 표시한 그림. (b) 프리즘 연마를 위한 고정용 지그의 실물사진.

전체구조를 보면 그리즘, 그리즘 고정용 디스크, 그리즘 보호용 튜브, 그리고 그리즘-카메라 부착용 T-링 어댑터와 카메라로 구성되어 있다. 광경로를 보면 망원경 주경으로부터 수렴하는 빛이 왼쪽에서 들어온다. 이 빛이 그리즘을 지나 분산되고(중심파장은 직진) 카메라의 센서면에 스펙트럼이 결상된다. 그리즘 광경로가 확보되게, 직경 48 mm의 원형 구멍이 뚫리고, 외경이 85 mm이고 두께가 4 mm인 알루미늄 디스크형 링에 회절격자가 없는 그리즘 면을 접착제로 고정한다. 그리고 그리즘을 보호하고 망원경에 고정하기 위하여 외경 85 mm, 내경 75 mm, 그리고 길이 80 mm의 알루미늄 튜브를 알루미늄 디스크에 고정한다. 이 디스크의 뒤쪽에는 카메라를 부착하기 위해서 카메라 T-링 어댑터를 고정한다.

표 1에 본 분광기 구성요소와 규격을 정리하여 나타내었다. 스펙트럼 사진을 기록하고 분석하기 위한 소프트웨어는 뒤에 언급하기로 한다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 프리즘과 회절격자를 접착하여 고정한 그리즘의 구성도. (b) 완성된 그리즘의 실물사진.

### 3. 그리즘 제작

앞에서 언급한 설계의 결과에 따라 분광기를 실제로 제작하였다. 먼저 그리즘 부품으로 각도가 (41.3°, -48.7°, -90°)이고, 크기가 50 mm × 50 mm인 프리즘을 제작하였다. 세 모서리 각도가 (45°, -45°, -90°)인 상용의 용융석영 직각프리즘(‘Edmundoptics F47-789’)을 사용하여 프리즘 빛면의 경사각 즉, 췌기각이 41.3°가 되게 연마하여 제작하였다(즉, 45°를 41.3°가 되게 하였다). 이 빛면 연마를 위해서 고정용 지그를 제작하였고, 41.3°각도에 대한 공차는 ±0.05°이다. 그림 3(a)에 각도가 (41.3°, -48.7°, -90°)인 프리즘을 연마하기 위한 고정용 지그와 프리즘을 고정한 모양, 그리고 연마 제거 부위를 나타내었다. 그림 3(b)는 프리즘 연마를 위한 고정용 지그의 실물사진을 보여준다. 지그의 재질은 스테인레스 강철이다. 지그의 두 경사면과 프리즘의 두 면을 일반 접착제로 고정한 후 순서대로 60번, 400번, 1,200번 연마사로 연마하여 프리즘 각도가 41.3° 그리고 -48.7°가 되게 하였다. 그 뒤에 산화세습으로 윤내기(polishing)를 하고 나서 프리즘을 지그에서 분리하였

다.

분리된 프리즘 빛면에 투과형 회절격자를 광학접착제('Norland NOA61')로 고정하였다. 그림 4(a)는 프리즘과 회절격자를 접착하여 고정한 그리즘의 구성도를 보여주며, 그림 4(b)는 완성된 그리즘의 실물사진을 보여준다. 프리즘과 회절격자를 접착할 때 주의할 점은 회절격자의 뒷면(골이 없는 면)을 접착해야 하며, 회절격자의 주 회절 방향(그림 4(a)의 회절격자 옆면에 나타난 화살표 방향)이 프리즘의 경사면 방향이면서  $41.3^\circ$  모서리로 향해야 한다는 것이다. NOA61 광학접착제는 점도가 높은 액체로 자외선 경화 접착제이다. 이 접착제가 회절격자 앞면에 닿지 않게 매우 주의해야 한다. 회절격자 앞면에 닿으면 회절격자의 골이 메워져 회절 분산 효과가 사라진다. 본 그리즘의 광학접착제 자외선 경화는 자외선 살균등으로 30분간 실행하였다.

다음 과정으로는 그리즘을 고정하기 위한 하우징 제작 및 조립이 있다. 앞에서 언급한대로 그리즘 고정용으로 알루미늄 디스크형 링을 제작하였다. 또 그리즘을 보호하고 망원경에 고정하기 위하여 알루미늄 튜브를 가공한 뒤, 알루미늄 디스크형 링에 고정하여 그릇 모양으로 만든다. 그리즘은 이 그릇 모양의 안쪽 디스크면에 일반 접착제로 고정한다. 이 그리즘 하우징의 디스크 뒤쪽에는 카메라를 부착하기 위한 카메라 T-링 어댑터를 고정한다. 광경로에 노출된 하우징 내부면은 산란 잡광을 줄이기 위하여 검은색으로 칠한다. 이렇게 구성한 그리즘과 그리즘 하우징 그리고 T-링 어댑터 및 카메라 즉, 분광모듈을 망원경 주 초점에 카메라 센서면이 오게 부착해야 한다. 이를 위해서, 하우징 알루미늄 튜브 바깥 부분에 고정용 고리를 3방향  $120^\circ$  간격으로 앞과 뒤 이중으로 설치한다. 이 6개의 고리에 스파이더(spider)를 걸어 망원경 어퍼케이지(upper cage) 링에 고정한다. 그림 5는 그리즘 하우징 및 망원경 어퍼케이지 모듈 사진으로, 카메라 쪽에서 그리즘 하우징 전체를 촬영한 것이다. 사진에서 보면 카메라 부착용 T-링이 전면에 보이며 그 구멍 속으로 그리즘의 뒷면이 보인다. 그리즘 모듈을 망원경에 정렬하는 방법은 다음과 같다. 6개 스파이더의 길이를 조정하여 망원경 광축 정렬을 한다. 카메라 초점 조정은 그리즘 고정용 디스크형 링과 스파이더로 고정된 알루미늄 튜브 간 간격을 고정 볼트의 길이를 조정하여 실행한다.

이렇게 전체를 조립해서 완성한 그리즘 분광기의 크기는 직경이  $85\text{ mm}$ 이고 길이가  $85\text{ mm}$ 인 원통형이며, 무게는  $1.1\text{ kg}$ 이다. 그리즘 분광기의 구성요소 비용은 60만원(카메라 제외)이고 연마제 및 지그 제작비는 20만원으로 총 비용은 80만원이었다.



그림 5. 그리즘 하우징 및 망원경 어퍼케이지 모듈 사진.

## 4. 실험실 시험

### 4.1. 광학계와 장치

스펙트럼 기록용 카메라로는 일반 컬러 DSLR인 Canon사의 'EOS 550D'를 사용하였다. 카메라에 내장된 소프트웨어를 이용하여 스펙트럼 사진을 촬영하였다. 스펙트럼 촬영 시 주의할 점은 수동모드(M모드) 촬영으로 iso 값과 노출시간 등을 자유롭게 조절할 수 있게 하는 것이다.

Canon사의 EOS 550D 카메라에 저장한 스펙트럼 사진 파일로부터 데이터를 추출하여 스펙트럼 그래프를 얻는다(배지훈 등, 2012 참조). 데이터 추출을 위해 NIH(National Institutes of Health)의 'imagej' 소프트웨어를 사용하였다. imagej에서 사진 파일을 불러 오고 난 뒤, 사진에서 분석 대상의 한 천체 부분에 샘플링 창을 적절히 설치하고, 광량 대 픽셀번호 데이터를 추출한 후 저장한다. 그림 6은 스펙트럼 데이터를 추출하고 있는 컴퓨터 화면을 보여준다. 그림에서 보면 사진의 가로 휘선에 샘플링 창을 설정하고 스펙트럼 데이터를 추출하는 것을 볼 수 있다. 그래프 창에는 스펙트럼의 광량 대 픽셀번호 그래프가 나타난다. 이 그래프 데이터를 텍스트 파일(\*.dat)로 저장한다. 사진에서 여러 천체의 스펙트럼을 분석하기 위해서는, 샘플링 창을 설정한 후 광량 대 픽셀번호 데이터를 추출하여 텍스트 파일로 저장하는 일련의 과정을 여러 번 반복해야만 한다.

imagej에서 저장된 광량 대 픽셀번호 데이터로부터 스펙트럼 그래프에 필요한 데이터를 추출하기 위해서 Vernier(Vernier Software & Technology)사의 'Logger Pro 3' 소프트웨어를 사용하였다. 스펙트럼 모양에서 이미 알고 있는 파장(예를 들면, 수소의  $H\alpha\ 656.3\text{ nm}$ 와  $H\gamma\ 434.0\text{ nm}$ )에 대한 2개의 픽셀번호 값을 이용하여 픽셀번호를 파장값으로 1:1 대응시킨다. 즉, 스펙트럼의

표 1. 가시광선 그리즘 분광기의 구성요소와 규격

Item	Description
Grism part1 - Grating	Edmundoptics #49-584 Spatial Frequency 600 lines/mm Transmission Type Size 50 mm × 50 mm
Grism part2 - Prism	Rectangular 41.3°, -48.7°, -90° (apex angle $a = 41.3^\circ$ ) Size 50 mm × 50 mm (Edmundoptics F47-789 right angle prism modified)
Housing	Aluminum Disk Ring Aluminum Tube Canon camera T-ring adaptor
Software	NIH imagej Vernier Logger Pro 3

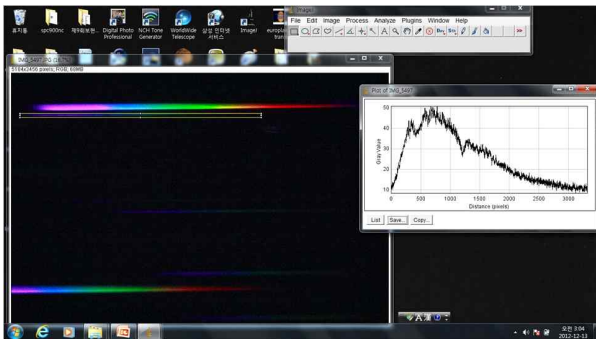


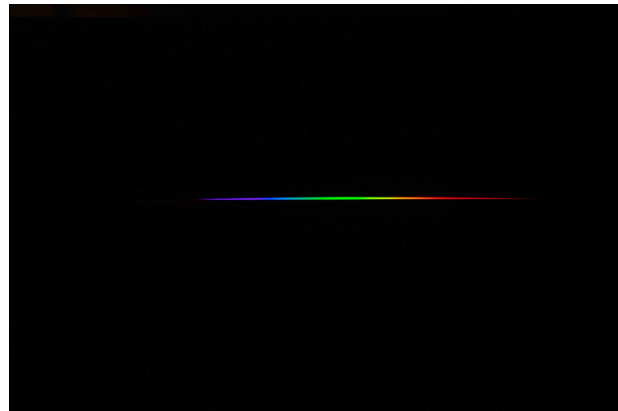
그림 6. NIH의 imagej 소프트웨어를 사용하여 스펙트럼 데이터를 추출중인 컴퓨터 화면.

광량 대 픽셀번호 데이터를 스펙트럼의 광량 대 파장 데이터로 변환하여 최종적으로 스펙트럼 그래프를 구한다.

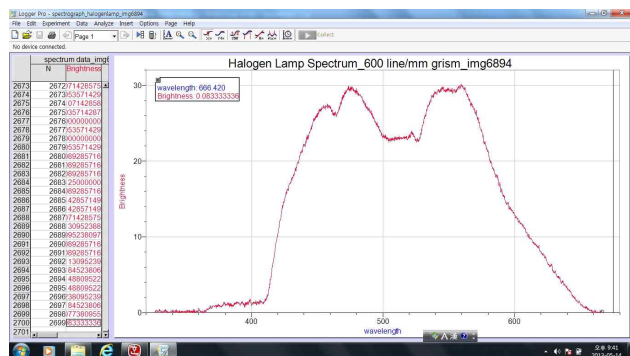
이러한 데이터 처리과정을 통해 본 연구에서 설계·제작된 그리즘 분광소자의 특성을 파악하고 분석하였다. 그리즘 만으로는 결상 기능이 없으므로 카메라에 초점거리가 50 mm인 일반 카메라 렌즈를 부착하고 렌즈 앞부분에 그리즘 하우징을 고정하여 스펙트럼을 촬영하였다. 카메라 렌즈의 필터 부분에 그리즘 하우징이 부착된 구조이다. 이 구조로 그리즘이 바로 대물 회절격자 기능을 하게 된다.

4.2. 할로겐램프 시험 결과

시험광원으로 12V, 55W 할로겐램프를 사용하였다. 할로겐램프의 연속 스펙트럼을 촬영하고 그 스펙트럼 그래프를 그렸다. 그림 7에 할로겐램프로 얻은 스펙트럼 사진과 그 스펙트럼 그래프를 보여 준다. 그림 7(a)에는 할로겐램프의 연속 스펙트럼 사진을, 그림 7(b)에는



(a)



(b)

그림 7. 할로겐램프의 스펙트럼 사진과 스펙트럼 그래프. (a) 스펙트럼 사진(iso 100, 노출시간 1/4,000 초). (b) Vernier 사 Logger Pro 3로 분석한 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프(그리즘을 대물 회절격자로 사용하고, 초점거리가 50 mm인 카메라 렌즈를 사용).

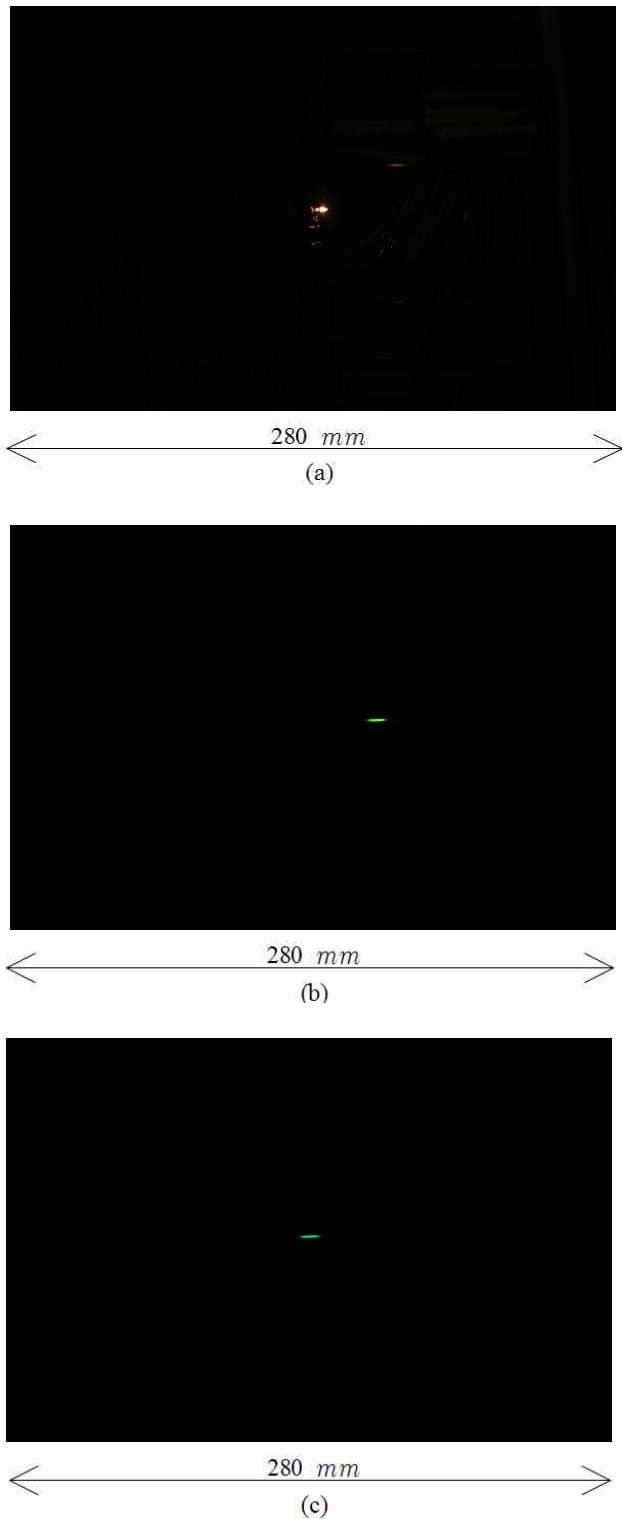


그림 8. 비편향 파장을 확인하기 위한 할로겐램프의 일반 사진과 대역통과 스펙트럼 사진의 비교. (a) 할로겐램프 일반 사진(iso 100, 노출시간 1/4,000 초). (b) 550 nm 대역통과 필터 및 그리즘을 사용한 대역

통과 스펙트럼(iso 100, 노출시간 1/4,000 초). (c) 500 nm 대역통과 필터 및 그리즘을 사용한 대역통과 스펙트럼(iso 100, 노출시간 1/4,000 초; 그리즘을 대물회절격자로 사용하고 초점거리가 50 mm인 카메라 렌즈를 사용).

Logger Pro 3로 구한 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프를 나타내었다. 스펙트럼 사진과 스펙트럼 그래프가 분명하게 잘 기록 되고 분석 된 것을 보여 준다. 스펙트럼 그래프에서 3개의 봉우리가 있는 것은 Canon 사 EOS 550D DSLR 카메라에 내장된 RGB 베이어 색 필터의 투과 스펙트럼 특성 때문이다.

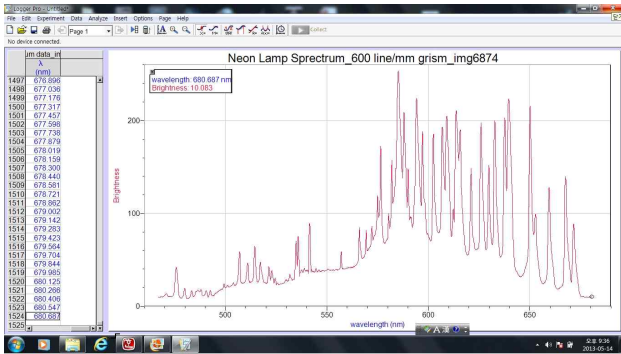
다음은 그리즘을 통과한 후 꺾이지 않는 비편향 파장  $\lambda_{un}$ 을 측정하였다. 그 방법은 다음과 같다. 먼저 할로겐램프와 그리즘이 없는 상태에서 카메라(결상용 렌즈 부착 상태)를 고정 설치하고 할로겐램프의 일반 사진을 기록한다. 그 다음에 램프와 카메라를 그 위치에 유지한 상태에서, 카메라 렌즈 앞에 그리즘과 비편향 파장대역 통과 필터를 겹쳐 설치하고 스펙트럼 사진을 촬영하였다. 가시광선 중간파장인 550 nm(앞에서 설계한 비편향 파장)만 통과 시키는 대역통과 필터를 사용하여 스펙트럼 사진을 촬영하였다. 일반 사진과 대역통과 스펙트럼 사진을 비교하여, 램프의 위치와 대역통과 스펙트럼의 위치가 일치하면 해당 파장이 비편향 파장을 확인 할 수 있다.

이 방법으로 촬영한 사진을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 할로겐램프의 일반 사진이고, 그림 8(b)는 550 nm 대역통과 스펙트럼 사진, 그리고 그림 8(c)는 500 nm 대역통과 스펙트럼 사진이다. 일반 사진과 550 nm 대역통과 사진을 비교해 보면, 램프의 원래 위치에 비하여 스펙트럼 위치가 장파장 쪽(사진에서 오른쪽 방향)으로 이동한 것을 볼 수 있다. 즉, 설계한 550 nm가 비편향 파장이 아님을 알 수 있다. 이러한 파장 불일치의 가장 큰 원인은 설계에서 고려한 프리즘 재료의 굴절률과 실제 제작에 사용한 프리즘 재료의 굴절률 사이의 차이에 기인한다. 즉, 설계에는 일반 유리의 굴절률인 1.5를 반영하였으나, 용융석영의 실제 굴절률은 1.46이었다. 프리즘의 굴절률을  $n = 1.46$ 로 수정하고 프리즘의 쉐기각인  $a = 41.3^\circ$ 를 사용하여 중심파장을 다시 계산하면  $\lambda_{un} = 506 \text{ nm}$ 가 된다. 이를 확인하기 위해서 500 nm 통과대역 필터를 사용하여 다시 촬영하였다. 그 스펙트럼 사진이 그림 8(c)이다. 이 500 nm 대역통과 스펙트럼 사진에서 보면 약간 단파장 쪽(사진에서 왼쪽 방향)으로 약간 벗어나 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 다시 계산한 비편향 파장이 506 nm인 것을 확인 할 수 있다. 중심파장의 불일치에 대한 다른 원인으로는 프리즘의 경사각 공차, 조립/정렬 과정의 분당 공



280 mm

(a)



(b)

그림 9. 네온방전관 스펙트럼. (a) 스펙트럼 사진(iso 400, 노출시간 1/25 초). (b) 스펙트럼 그래프(그리즘을 대물 회절격자로 사용하고 초점거리가 50 mm인 카메라 렌즈를 사용).

차, centering 공차 등이 있을 수 있다. 그러나 이들의 영향은 프리즘 재질의 굴절률 차이에 의한 중심파장 불일치 정도에 비해 상대적으로 작을 것으로 판단된다.

### 4.3. 네온램프 시험 결과

다른 시험광원으로, 네온방전관을 사용하여 스펙트럼을 측정하고 분석 하였다. 그림 9는 네온방전관 스펙트럼 사진과 분석한 스펙트럼 그래프 결과를 보여 준다. 그림 9(a)는 네온원소의 발광스펙트럼 사진을, 그림 9(b)는 Logger Pro 3로 분석한 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프를 보여준다. 그리즘은 앞의 할로겐램프 스펙트럼 사진을 촬영할 때처럼 대물 회절격자를 사용하였고, 초점거리가 50 mm인 카메라 렌즈를 사용하여 스펙트럼을 촬영하였다. 스펙트럼 사진에서 보면, 네온의 불연속

표 2. 가시광선 그리즘 분광기의 규격

항목	규격
비편향 파장	506 nm
파장범위	250 nm (410 nm ~ 660 nm)
파장해상도	0.11 nm/pixel (R = 4,600)
하우징	알루미늄 튜브, 알루미늄 링 형 디스크, 카메라 T-링 어댑터로 구성
크기	φ 85 mm × 85 mm
무게	1.1 kg
비용	800,000원

발광 스펙트럼이 보인다. 네온원소에 대한 발광선의 파장값을 이미 알고 있으므로, 그 중 양 끝의 2개 기준 파장값(585.2 nm와 671.7 nm)을 선택하고 해당 픽셀번호로부터 픽셀번호를 파장값으로 1:1로 대응시켰다. 그 결과를 이용하여 스펙트럼의 광량 대 파장 그래프를 구하였다. 앞에서 미리 선택한 2개의 기준 파장값을 그래프에서 확인한 후, 나머지 다른 발광선의 파장값을 문헌값과 비교하여 일치하는 것을 확인하였다.

이상의 시험광원에 대한 스펙트럼 촬영 및 분석 결과로 볼 때 본 그리즘 분광소자가 잘 작동하는 것을 알 수 있었다.

본 분광기의 파장 측정 범위는 비편향 파장 506 nm에서 250 nm(파장 410 nm ~ 660 nm)이었고 해상도는 0.11 nm/pixel 이었다. 표 2에 본 분광기의 규격을 정리하였다.

## 5. 천체관측 시험

### 5.1. 광학계와 장치

본 연구에서 설계·제작한 그리즘 분광기로 아래와 같이 천체의 스펙트럼 사진을 촬영하고 분석하였다. 천체의 실제 스펙트럼 촬영을 위해 앞에서 언급한 그림 5의 망원경 어퍼케이지 그리즘 모듈을 뉴턴식 반사 망원경/경위대에 장착하였다. 사용된 망원경의 주경은 Hubbleoptics 사의 샌드위치 미러이며, 구경 18인치(457 mm)에 초점거리가 2,100 mm인 포물면경이다.

### 5.2. 플레이아데스성단의 스펙트럼 촬영 결과

그림 10에 뉴턴식 반사 망원경에 그리즘 분광모듈을 장착하고 촬영한 플레이아데스성단의 스펙트럼 사진을 나타내었다(iso 6,400, 노출시간 1초). 그림에서 보는 것과 같이 여러 천체의 스펙트럼이 찍혀 있는 것을 확인할 수 있다. 슬릿이 없이 촬영한 스펙트럼 사진으로 매우 밝게 기록되어 있다.

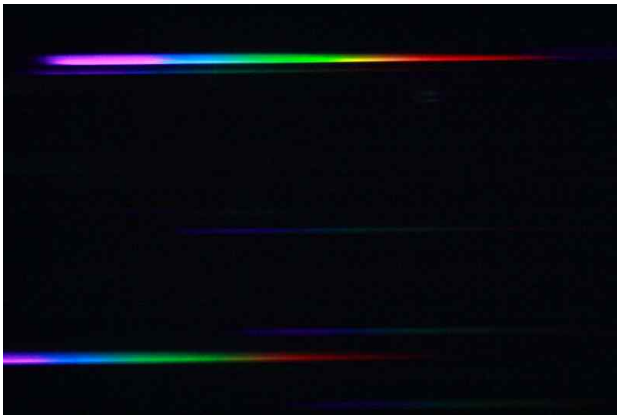


그림 10. 뉴턴식 반사 망원경에 그리즘 분광모듈을 장착하고 촬영한 플레이아데스성단의 천체 스펙트럼 사진(iso 6,400, 노출시간 1초).

그림 10의 여러 천체 스펙트럼 사진에서 원하는 한 항성의 스펙트럼 그래프를 얻었다. 즉, NIH imagej를 이용하여 그래프 기초 데이터(광량 대 픽셀번호 데이터)를 추출하고, 이 데이터를 Logger Pro 3로 옮겨서 광량 대 파장 그래프 즉, 스펙트럼 그래프를 얻었다. 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 스펙트럼 그래프에서 보면 흡수선이 몇 군데 나타나 있다.

제작된 그리즘 분광소자는 광경로 상에서 직각프리즘(1면 손실률 약 4%)과 회절격자(회절효율 58%, 손실률 42%)를 거치므로, 분광기의 전체적인 추정 손실률은 약 46%이다. 슬릿이 없고 입사광이 거처야 하는 광학소자가 매우 적으므로 기존의 다른 분광기에 비하여 손실률이 적은 편이다.

## 6. 결론

교육용 가시광선 그리즘 분광소자를 저렴하게 설계하고 구현하였다. 분산소자로는 Edmundoptics 사 투과형 회절격자(공간주파수 600 라인/mm, 크기 50 mm × 50 mm)를 사용하였으며, 꺾임각 보상용으로 각도가 (41.3°, -48.7°, -90°) 그리고 크기가 50 mm × 50 mm인 프리즘을 설계·제작하였다. 이 두 소자를 결합하여 비편향 파장이 506 nm인 그리즘을 구현하였다. 그리즘 하우징으로 알루미늄 디스크형 링, 알루미늄 튜브 및 카메라 T-링을 조합하여 구성하였다. 스펙트럼 사진 기록용 카메라는 Canon 사 EOS 550D DSLR를 사용하였다. 스펙트럼 분석용 소프트웨어로는 NIH imagej와 Vernier 사 Logger Pro 3를 사용하였다.

설계 및 구현결과, 비편향 파장 506 nm에서 파장범위 250 nm(410 nm ~ 660 nm)와 파장해상도 0.11 nm

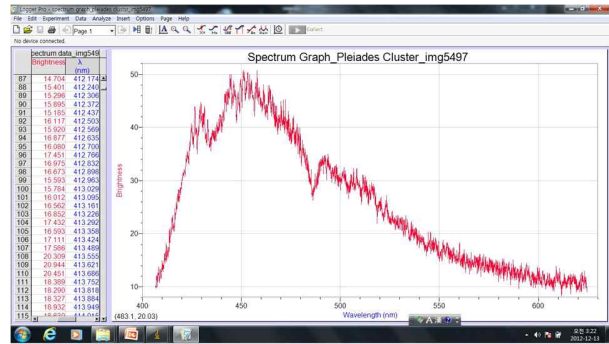


그림 11. 플레이아데스성단의 여러 천체 스펙트럼 중 한 항성의 스펙트럼 그래프(그림 10의 여러 천체 스펙트럼 중 위에서 두 번째 어두운 항성 스펙트럼을 분석한 것임).

/pixel(R = 4,600)를 얻었다. 제작된 그리즘 분광소자를 구경 457 mm, f/4.6인 반사 망원경 주 초점에 부착하여 플레이아데스성단의 여러 항성 스펙트럼을 촬영하고 분석하였다.

본 그리즘 분광소자는 교육용으로 설계하고 구현한 것으로, 일선 교육현장에서 어두운 천체의 스펙트럼을 촬영하고 분석하여, 항성의 분광형을 이해하는 학습 등에 활용할 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- 배지훈, 송재원, 윤태석, 2012, 광섬유 피드 리트로 마운트형 분광계, 천문학논총, 27, 87
- Bowen, I. S. & Vaughan, A. H. Jr., 1973, "Nonobjective Gratings", PASP, 85, 174
- Hearnshaw, J., 2009, Astronomical Spectrographs and Their History, Cambridge University Press
- Merrill, P. W., 1931, A Plane-Grating Spectrograph for the Red and Infra-Red Regions of Stellar Spectra, ApJ, 74, 188
- Uehara, M., Nagashima, C., Sugitani, K., Watanabe, M., Sato, S., Nagata, T., Tamura, M., Ebizuka, N., Pickles, A. J., Hodapp, K. W., Itoh, Y., Nagano, M., & Ogura, K., 2004, Development of the Wide Field Grism Spectrograph 2, Proc. SPIE 5492, 661