PUBLICATIONS OF THE KOREAN ASTRONOMICAL SOCIETY
18: 61 ~ 67, 2003

# 태양 중분산 분광 망원경 개발
# DEVELOPMEMT OF MID-RESOLUTION SOLAR SPECTROSCOPIC SYSTEM

박영득, 조경석, 문용재, 장비호, 김수진, 김연한
한국천문연구원

Y.-D. PARK, K.-S. CHO, Y.-J. MOON, B.-H. JANG, S.-J. KIM, Y.-H. KIM
Korea Astronomy Observatory

*(Received: November 23, 2003, Accepted: December 19, 2003)*

**ABSTRACT**

In 2002, a new solar spectroscopic system with the Coelostat type has been installed at Korea Astronomical Observatory. It was designed to observe solar spectra in the range from 3000 to 8000Å with the spectral resolution of 1Å/mm. The system is composed of a 40cm diameter Coelostat with 9m focal length, spectroscopic system with 600groove/mm grating, and a 1K x 1K CCD detector. By developing observational softwares for this system, we have successfully observed solar Hα spectra. In this paper, we introduce its observational system including optics, controllers, and the CCD detector as well as the development of telescope control and observational softwares.

*Key words* : solar spectroscopy, solar spectrum, Coelostat

## 1. 서론

국내의 태양연구 현황은 70년대에 20cm 굴절망원경이 도입되어 흑점관측을 시작한 이래로 큰 변화 없이 한동안 이어져 왔다. 주로 외국의 관측 장비나 자료를 이용하여 연구가 이루어져 왔기 때문에 국내의 태양 연구자들에게 태양 관측 장비의 요구가 절실하였다. 마침내 90년대 초에 태양 플레어 망원경을 도입하여 95년 설치 완료함으로써 국내에서도 본격적으로 태양관측연구가 이루어지게 되었다. 보현산에 설치된 태양플레어 망원경은 이후 관측기술의 축적과 태양 활동영역의 연구에 크게 기여하였다. 태양 플레어 망원경에는 3개의 리오필터가 장착되어 있는데 이들 필터의 투과 특성은 온도변화에 민감하다. 현재 나름대로 필터 온도안정화를 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있지만 필터의 온도에 따른 투과특성을 알아보는 것은 정확한 관측을 위해 필수적이다. 그러나 필터의 투과특성을 알아내기 위해서는 고 분산의 분광관측 시스템이 갖추어져 있어야 한다. 또한 태양플레어 망원경은 플레어가 일어나는 지역에 대한 필터 관측을 통하여 플레어가 일어날 때의 물질의 운동이나 자기장의 변화를 관측하는 것을 주목적으로 하고 있다. 그러므로 플레어 발생영역의 정량적인 물리량을 결정하기 위해서는 또한 분광관측이 요구된다.

태양의 분광관측시스템 개발은 보현산 태양플레어 망원경에 장착되어 운용되고 있는 리오필터들의 반응함수 측정과 태양활동 영역의 분광관측연구를 위하여 시작되었다. 2002년 11월 마침내 1Å/mm의 분산을 갖는 Coelostat type의 태양 중분산 분광망원경이 순수 국내기술로 설계 및 제작, 설치 완료되었다.

설계 및 제작과 설치의 전 과정에 대해서는 이미 여러 차례 한국천문연구원의 기관고유사업 보고서에 기술(2000년, 2001년, 2002년 보고서)하였으므로, 여기에서는 시스템구성을 간략히 요약 제시하고 주로 콘트롤러 및 구동프로그램의 제작에 관해 기술하고자 한다.

## 2. 시스템 구성

태양 중분산 분광망원경은 일반적으로 태양관측에 적용하는 굴절망원경의 방식을 따르지 않고 Coelostat type의 반사망원경으로 설계하였다. Coelostat type의 망원경은 가격은 저렴하나 긴 초점거리의 망원경을 제작하기가 수월하기 때문에 원하는 분해능을 충분히 쉽게 달성할 수 있다는 장점이 있다.

전체 시스템은 우선 태양 빛을 관측실로 끌어들이는 Coelostat 부분과 관측실에 있는 분광 시스템인 Objective Mirror, Slit, Collimator Mirror, Grating, Camera Mirror 와 다수의 평면경들을 포함하는 광학계 부분 그리고 마지막에 분광 영상을 얻는 검출기(CCD) 부분으로 이루어져 있

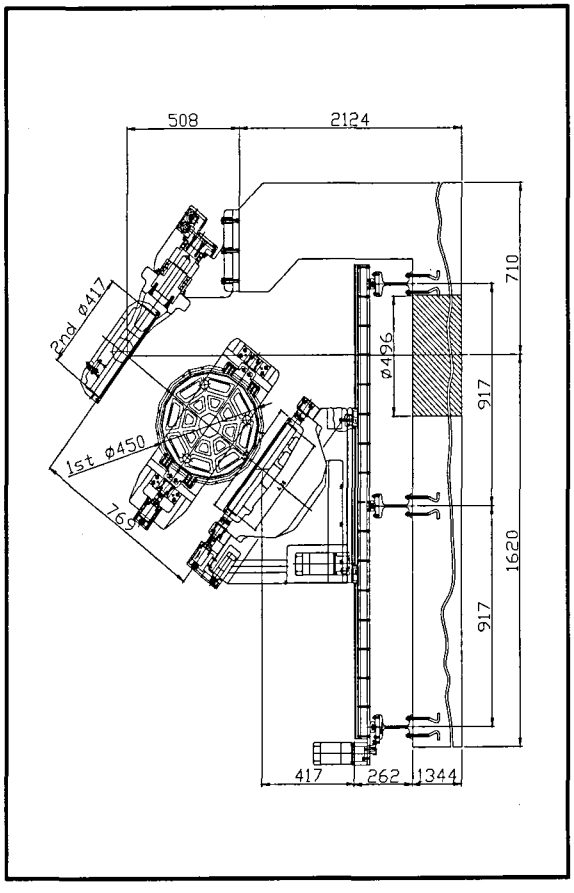


그림 1a. Coelostat 망원경 구성도

다.

### 2.1. *Coelostat*

Coelostat은 특정 지점에 태양 빛을 계속 비출 수 있도록 해주는 역할만하므로 Coelostat의 마운트에 장착되는 두 개의 거울은 모두 평면경을 쓴다. 그 대신 강한 태양열을 장시간 받으므로 열팽창 계수가 낮은 재질을 쓰고 적외선 영역의 광이 반사되지 않도록 하여 분광실 내부의 광학계가 태양열 때문에 오차를 유발하지 않도록 해야 한다. 공간 배치상 Coelostat을 2층에 두고 태양광을 수직방향으로 유도한 다음 45도의 경사를 가진 평면경을 사용하여 1층에서 수평방향으로 광행로를 바꾸게 하였다. 이 과정에서 직경이 450mm 내외의 평면경이 3개 필요하며 재료는 지금까지 열팽창 계수가 가장 낮은 광학 재료로 알려져 있는 Zerodur를 사용하였으며 각 평면경은 거울이 태양열에 의하여 가열되는 것을 막기 위하여 자외선과 적외선 부분을 차단하고 3000Å~8000Å 영역의 빛만 반사시키는 특수코팅을 하였다. 그림 1-a와 b는 Coelostat의 설계도와 설치된 후의 모습이다.

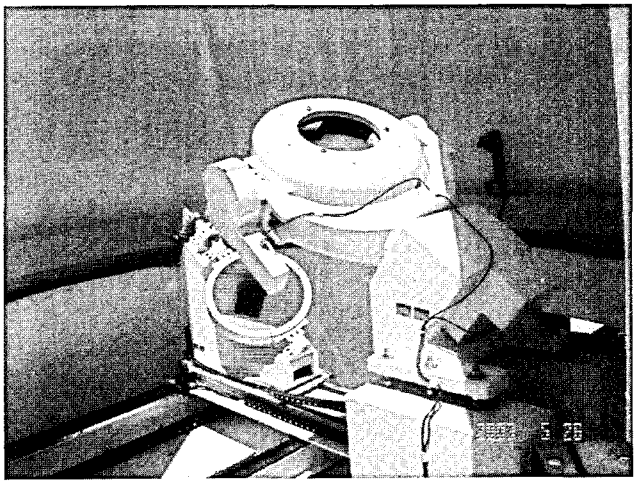

그림 1b. 설치된 Coelostat의 모습

### 2.2. 광학계

분광실과 주변 광학 시스템의 배치는 그림 2-a, b, c 와 같으며 여러 차례의 시뮬레이션 결과 최적의 방법으로 판단하였다. 그림 2-a의 fm1, 2는 각각 평면 반사경으로 Newtonian 방식을 채택하였기 때문에 가운데 구멍이 있다. 그림 2-b의 D1은 450mm직경의 Zerodur 평면경으로 수직방향으로 들어오는 태양광을 수평방향으로 유도하는 평면경이다. FL1, 2, 3은 모두 광행로를 바꾸기 위한 평면경으로 분광 분해능에 크게 영향을 미치지는 않는다. 광학계 설계는 기본적으로 구경 300 mm 이고 초점거리가 9000 mm인 망원경에서 보현산의 태양플레어 망원경에 설치된 리오필터의 투과폭인 0.125Å을 충분히 분해하여 필터의 투과곡선을 만들 수 있도록 설계하였다. 관측파장의 범위는 앞에서 말한대로 3000Å ~ 8000Å까지이며 주 관측 영역은 6200Å ~ 6600Å으로 $H\alpha$선과 태양플레어망원경의 VMG (Vector Magneto- graph) 와 LMG (Longitudinal Magnetograph) 의 관측파장을 중심으로 그 주변 파장의 관측을 가능하게 하였다. 기본적으로 관측가능 파장범위는 모든 가시광 영역이 해당되지만 Grating을 많이 회전시키지 않고 관측할 수 있는 파장 영역의 범위는 300~400Å 정도로 제한된다.

설계과정에서 광량의 손실을 최소화하고 구면경에서 광행로의 사각(斜角)을 최소화하여 분해능의 효율성을 높이도록 하였으며 태양은 광량이 별과 비교할 때 충분히 강하기 때문에 분해능과 광량의 문제가 동시에 발생할 경우에는 분해능을 우선적으로 고려하였다.

설계에서 계산된 분광 분해능은 f/30, 300mm의 수차

표 1. 태양 중분산 분광망원경 규격

| 품명 | 규격 | 비고 |
|---|---|---|
| 망원경 type | Coelostat | |
| 분광기 type | Newtonian | |
| 1st Mirror | Ψ=438mm, 평면경, 유효구경 420mm<br>cooling mirror (cut off at 800nm)<br>Material : zerodur λ/10 | |
| 2nd Mirror | Ψ=417mm, 평면경, 유효구경 400mm<br>cooling mirror (cut off at 800nm)<br>Material : zerodur λ/10 | |
| 반사경 | Ψ=470mm, 평면경, 유효구경 450mm<br>cooling mirror (cut off at 800nm)<br>Material : zerodur λ/10 | |
| Image reflect Mirror(2) | Ψ=30cm, 평면경, Pyrex λ/10 | |
| Main Mirror | Ψ=310mm, 유효구경 300mm f/30,<br>구면경 , Pyrex | |
| Collimator mirror | Ψ = 160 mm, 유효구경 150mm f/30,<br>구면경, Pyrex | |
| Camera mirror | Ψ = 200 mm, 유효구경 190mm, Pyrex,<br>R=-9000mm, λ/10 | |
| Folding mirror 2 | Camera Mirror-grating, 외경 200 mm, 유효구경 180mm,<br>Pyrex 중심 hall 직경 : 30 mm (CCD-fm2 = 500mm), λ/10 | |
| Grating | 600g/mm, 154 X 206 X 30 mm, BK7 3rd order | |
| Slit | L =>1~5 cm, W = 5 ~ 1000 μm, 전동식 | |
| Digital CCD camera | pixel size = 9 X 9μm, Kodak chip<br>1K X 1K, 16bit, B/W | |
| Image CCD camera | Analogue type, Direct monitor | |
| Image and Slit Monitor | 15 inch high resolution monitor | |
| Folding mirror 1 | Collimator-grating, 외경 170 mm, 유효구경 160mm, Pyrex<br>중심 hall 직경 : 26 mm (slit-fm1 = 500mm), λ/10 | |

가 보정된 구면경을 사용하고 1K CCD카메라를 사용할 경우 0.001Å/pixel (1Å/mm)이며 태양면에 대한 공간 분해능은 최고 0.2 arcsec (약 150 Km) 이다. 그러나 시스템과 시상에 의한 오차가 있으므로 이 정도의 분광 분해능을 기대하기는 어렵다. 특히 장비를 설치하는 지역이 대전 본원이므로 도시의 공해 때문에 Seeing에 의한 기본적인 공간 분해능은 5 arcsec 이상 될 것으로 본다.

광학 설계를 바탕으로 망원경의 규격을 결정하였으며 결정된 규격은 표 1에 주어져 있다. 망원경의 마운트 및 광학계의 마운트는 국내의 제작사 (Tele Optics)에 의뢰하여 제작하였으며 조절은 자동과 수동 조절이 각각 가능하도록 제작하였다. Grating은 하나를 제작할 경우 제작단가가 너무 높기 때문에 상용제품을 선택하였다. 여러 분광선을 관측할 수 있도록 관측하는 파장의 변환을 위하여 Grating의 Mount에 micro-Motor를 부착하여 Grating 전체를 회전하는 방법을 고안하였다. Grating은 표 1에서도 서술하였듯이 600 groove/mm로 groove의 각은 34°기울어져 있다. 우리는 원하는 분해능을 얻기 위하여 3차 (3rd order)의 스펙트럼을 관측한다.

### 2.3. *Detector*

CCD 카메라는 Chip의 파장별 감도가 우리가 관측하고자 하는 6000~7000Å에서 가장 좋은 (그림 3) SBIG사의 ST-8E Digital 카메라를 채택하였다. 표 2는 ST-8E Digital 카메라의 규격이며 태양의 $H\alpha$선 관측시 노출시간은 보통 1/10초로 본 CCD 카메라가 허용하는 가장 짧은 노출시간에 해당한다.

### 3. 콘트롤러 제작

Coelostat을 구동하기 위해 주경과 부경에 붙어있는 구동 모터들과 주경 Translator의 구동을 위한 모터들을 제어하기 위한 구동 회로를 구성하여 콘트롤러를 만들어 돔 내에 설치하였다. 콘트롤러로의 신호입력은 구동컴퓨터와 돔에 놓인 핸드 패들에서 모두 가능하다.

콘트롤러는 우선, Coelostat의 주경 Translator의 동서남북으로의 구동부분, 부경의 동서남북방향 회전, 주·부경의 리미트 스위치 구동부분, 그리고 주경의 태양추적모터 구동부분으로 이루어져 있다. 주경의 Translator 구동에는 1550rpm의 AC 모터 (Model: S9R90GBH-2S12)를 그리고 부경의 회전에는 DC 모터 (Model: Maxon A-max 32)를 사용하였다. A-max DC 모터의 회전속도는 부하가 없을때 최대 6000rpm까지 가능하나 DC 모터 콘트롤러를 사용하여 회전속도의 정밀 조정이 가능하도록 하였다. 실제로는 초당 2도의 최대 회전속도가 가능하다.

태양추적모터는 스태핑 모터 (Model: Compumotor OS22A)를 사용하였으며 회전속도는 가변이므로 프로그램을 통해 다양한 회전속도를 달성할 수 있다. 콘트롤러 각 부분의 회로도는 한국 천문연구원 2002년도 기관고유사업 보고서에 수록되어 있다.

관측실과 암실에 있는 광학계들 중에서 평면경을 제외한 Objective Mirror와 Collimator Mirror 그리고 Camera Mirror에는 전. 후진이 가능하도록 하는 DC 모터 (Model: CJ-DR42B-3-N50-100)가 붙어 있다. 분당 7.5cm의 속도로 Mirror를 이동시킬 수 있다. 그리고 Grating 마운트에는 Grating을 회전시켜 CCD로 들어가는 분광선의 파장을 변화시킬 수 있도록 위에 기술한 태양추적모터와 동일한 모델의 스태핑 모터가 붙어 있다. 이 경우에는 Rotation Stage (Newport Model 472)가 결합되어 있어서 스태핑 모터에 의한 수직방향의 회전을 수평방향의 회전으로 전환시켜 스태핑 모터의 회전에 따라 Grating이 회전하게 되어있다. 따라서 1층에도 이들을 구동시키기 위한 콘트롤러가 필요하므로 별도로 제작하여 암실내부의 벽에 설치하였다. 그리고 이들의 작동을 위하여 입력신호 선을 관측실로 늘여서 별개의 콘트롤 박스를 두어 필요시에 조작할 수 있도록 하였다. 이 콘트롤 박스에서는 3개의 구면경을 전.후진 시키는 DC 모터를 구동하며 Grating을 회전시키는 스태핑 모터는 구동프로그램에서 조작이 가능하도록 하였다.

### 4. 구동소프트웨어 제작

태양 중분산 분광망원경을 가동하기 위해서는 우선, 망원경을 구동하는 프로그램과 스펙트럼 영상을 획득하기 위한 관측프로그램이 필요하다.

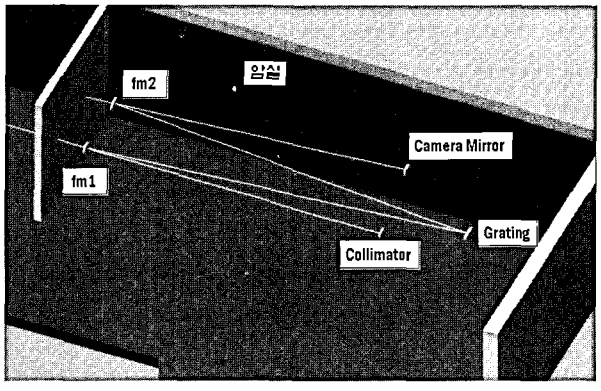


**그림 2a.** 분광실 내부의 광학계 배치도

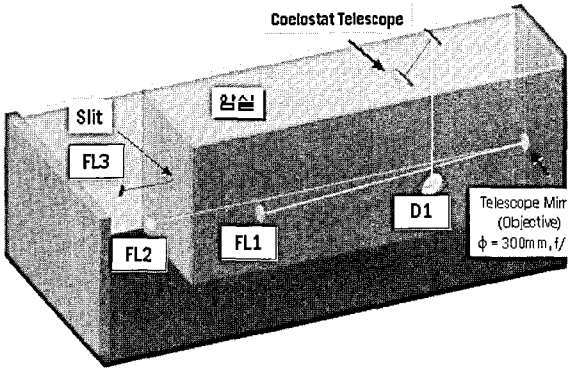


**그림 2b.** 분광실 외부의 광학계 배치도

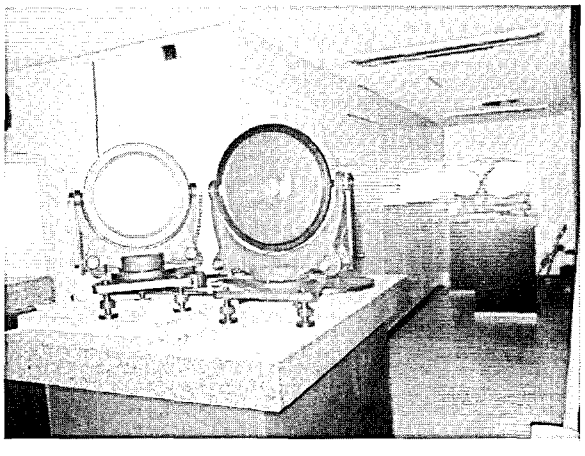

**그림 2c.** 설치된 후의 광학계 모습

#### *4.1. Coelostat* 망원경 구동 소프트웨어

망원경 구동 프로그램은 이미 개발되어 있는 스태핑 모터 콘트롤러 테스트 프로그램 (천문연구원 기술보고서 "스태핑 모터 콘트롤러 STEP4 개발", 1999)에 일부기능을

표 2. Digital 카메라의 규격

| 구성 | 특성 및 내용 |
|---|---|
| CCD | Kodak KAF-1602E + TI TC-211 |
| Pixel Array | 1530x1020 pixels, 13.8x9.2 mm |
| Total Pixels | 1,500,000 |
| Pixel Size | 9 x 9 microns |
| Full Well Capacity ABG | ~50,000 e- |
| Full Well Capacity NABG | ~100,000 e- |
| Dark Current | 1e |
| Antiblooming | Standard (non ABG as option) |

추가하고 수정하여 제작하였다. 프로그램은 주경의 태양 추적에 사용되는 스테핑 모터와 Grating을 회전시키는 스테핑 모터 그리고 주경 Translator를 움직이는 AC 모터 2개 그리고 부경을 회전시키는 DC 모터 2개 등 모두 6개의 모터를 제어하여 망원경을 구동하게 된다. 콘트롤러와 관측 컴퓨터 사이의 통신은 시리얼 포트를 거쳐서 이루어지게 되어 있다. 망원경의 구동은 먼저 관측하기 전에 그날의 태양위치에 따라 망원경의 초기상태를 수동으로 맞춰준 후에 태양을 자동 추적하도록 하는 방식을 취하고 있다. 수동조작 부분이 많아 매우 번거로운 상황이지만 이것은 망원경의 구조상 불가피하다 하겠다.

망원경 구동 프로그램에서는 다음의 기능들을 구현하였다.

i) 주경의 동서남북 방향 이동: 모터의 회전속도는 부하가 없을 때 최대 1550rpm으로 실제로는 초당 2.5cm의 속도로 이동시킬 수 있다.

ii) 부경의 동서남북 방향 회전: 빠르고 (2°/초) 느린 (15′/초) 두 가지 다른 속도로 구동이 가능하다.

iii) 주경의 태양추적 모터 구동: 기본적으로 태양 일주운동의 절반속도(7.5″/초)로 설정되어 있으며 구동 프로그램에서는 그 외에 기본속도의 10배, 20배, 40배의 다른 속도를 선택할 수 있게 되어 있어서 필요에 따라 주경을 빠르게 임의의 위치로 구동할 수 있도록 되어 있다.

iv) Grating 회전: 초당 1/1000도의 속도로 회전할 수 있다. 회전하는 범위는 조절이 가능하나 속도는 조절이 불가능하다.

상기 기능 중 i), ii), iii)의 기능들은 돔에 비치한 핸드 패들에서도 작동 가능하다.

그림 4의 구동프로그램 실행 윈도우에서 하단에 있는 버튼들이 망원경 구동에 사용되는 기능들을 갖추고 있다. 주경 Translator와 부경을 움직이는 버튼과 주경의 태양추

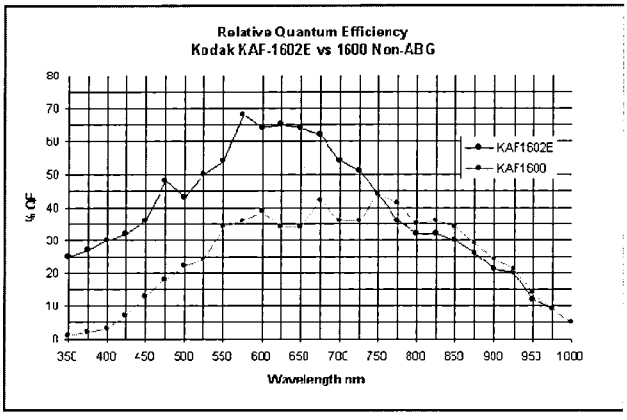


그림 3. SBIG 사의 CCD Digital 카메라 ST-8E에 채용된 코닥 KAF1602E Chip의 파장별 감도 곡선. 6000~6500 Å에서 가장 좋은 효율성을 보인다.

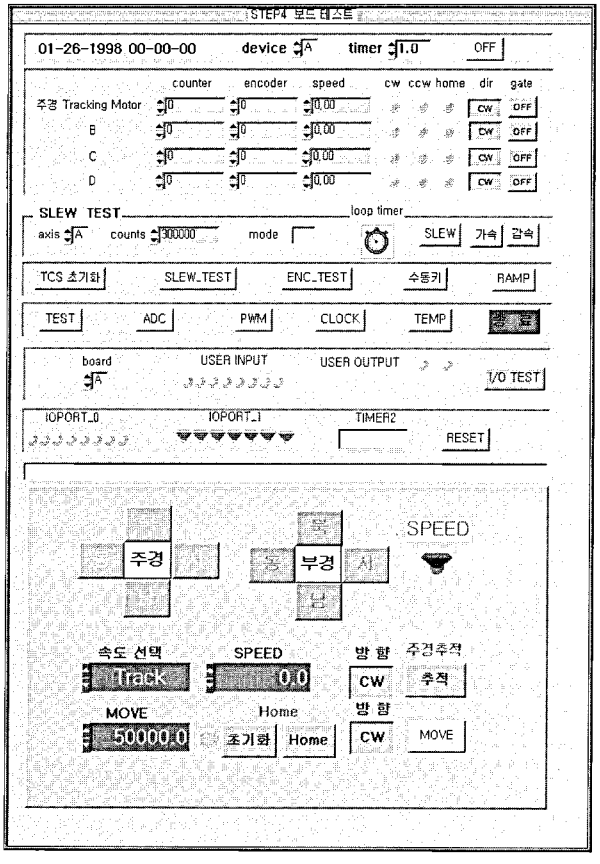


그림 4. Coelostat 망원경의 구동 프로그램의 실행 윈도우. 주.부경의 동서 남북 방향으로의 구동과 속도 조절, Tracking Motor의 제어 그리고 Grating의 회전을 제어하는 기능을 갖추고 있다. 윈도우의 하단에 있는 버튼들로 조작된다.

적 그리고 Grating의 회전을 담당하는 버튼들이 나타나 있다. "SPEED" 버튼은 부경의 회전속도를 조절하는 버튼이다. 부경의 회전속도는 빠르고 느린 두 경우가 가능한데, 빠른 경우에는 초당 2도 그리고 느린 경우에는 초당 1/4도의 회전이 가능하다.

### *4.2. CCD 관측 소프트웨어*

분광관측에 있어서는 얻어진 분광선 영상에서 선 윤곽을 바로 확인하는 것이 여러모로 편리하므로 카메라와 같이 제공된 카메라 구동 프로그램은 사용하기가 불편하다. CCD의 관측 S/W는 김승리 등(2001)이 개발한 소백산 천문대 2K CCD 카메라용 관측 프로그램의 일부를 태양 중분산 분광 망원경에 맞게 수정하였다. 현재 수정 보완된 구동 프로그램이 갖추고 있는 기능으로는 카메라에서 이미지를 획득하는 기능, 행 방향 또는 열 방향으로의 선 윤곽 (Line Profile) 을 얻는 기능. 그리고 화면에 나타나는 영상의 색상을 조작하는 기능 등이다. 이미지는 자료처리가 용이한 FITS 형식을 택하였다. 그림 5-a는 CCD 관측 소프트웨어의 실행 윈도우와 각 메뉴를 보여준다. **File** 메뉴는 **Open**, **Print**, **Exit** Sub-menu로 이루어져 있다. **Open** 메뉴는 파일을 여는 기능이며 **Print**는 열린 파일을 인쇄하는 기능 그리고 **Exit**는 프로그램을 종료하는 기능이다. **Image** 메뉴는 **Acquire**, **EditColor**, **ImageExam**, **ColumnRow**, **Column**, 그리고 **Row** Sub-menu로 구성된다. **Acquire** 메뉴는 CCD 카메라와 통신하여 영상을 얻는 기능을 한다.

**EditColor**는 스크린에 보이는 영상의 Color를 Scaling 하는 기능을 가지고 있다. 설정하게 되는 최대 값과 최소 값 사이에 있는 pixel 값들을 256단계로 조정하여 보여준다. 그리고 **ImageExam**은 전체 (1530 x 1020)크기의 영상을 (160 x 160) 크기의 작은 윈도우에 나타내어 영상을 검사하는 기능을 가지고 있다. **ColumnRow**, **Column**, **Row** 등은 영상에서 커서가 놓여진 위치의 행 방향 또는 열 방향으로의 밝기 Profile을 나타내주는 기능을 한다. 그림 5-b는 그중 **ColumnRow** 메뉴의 실행화면으로 그림 5-a에 나타낸 Hα 6562.8Å 선의 Profile을 보여준다.

우선적으로 필요한 기능들을 위주로 구동 프로그램을 만들어 시험을 마쳤으며 앞으로 지속적으로 관측을 수행하면서 필요한 기능들을 개선 보완해 나갈 예정이다. 태양 중분산 분광망원경을 제작 설치 완료함으로써 태양분광관측을 상시 수행할 수 있는 기반을 마련하였으나 지속적인 시험관측을 실시하여 기기의 정량적인 성능평가가 있어야 할 것이다. 아울러 관측 프로그램의 기능을 지속적으로 개선 보완해 나가야 할 것이다.

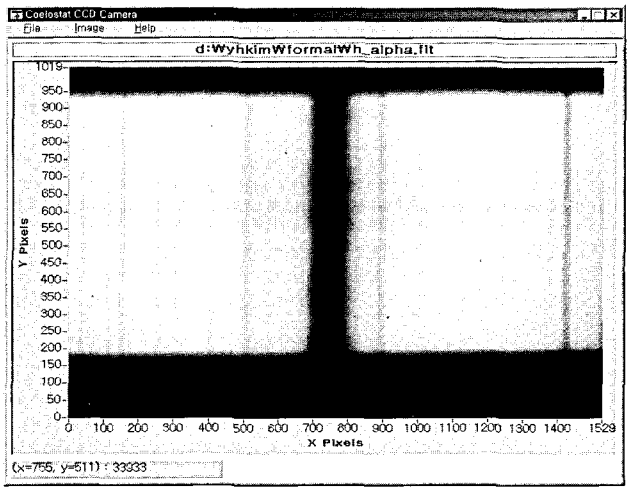


**그림 5a.** 태양 중분산 분광망원경 CCD 구동프로그램의 메인 실행화면. 보이는 분광선은 수소의 발머 흡수선 6563 Å 선이다.

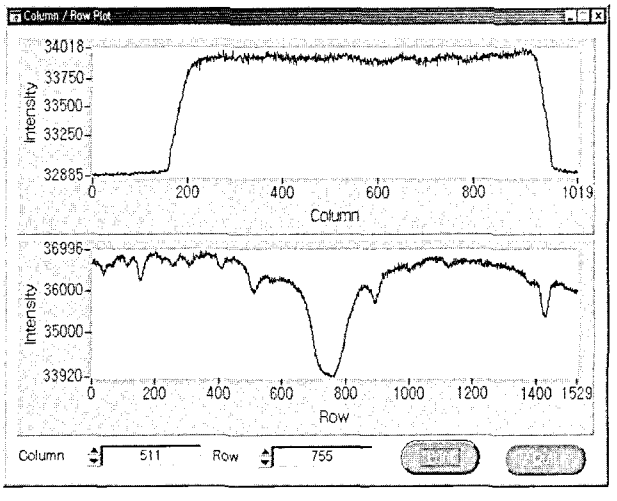


**그림 5b. ColumnRow** 메뉴를 실행한 화면. 위는 열 방향 Profile을, 아래의 행 방향의 Profile을 나타낸다. 그림 5a에 보인 수소의 발머 흡수선의 Profile.

## 5. 결론

태양 중분산 분광망원경을 설치 완료함으로써 상시적으로 태양의 분광관측을 수행할 수 있는 기반을 마련하였으며 태양 흑점과 필라맨트 등 태양활동영역의 물리 인자를 얻는 기본 관측 자료의 획득이 가능하게 되었다. 그리고 그 동안 수행하지 못한 보현산 천문대의 태양플레어망원경에 부착된 리오필터의 투과 파장의 조절 도 가능하게 되었다. 태양 중분산 분광망원경은 국내 최초의

태양 분광 관측용 망원경이라는 점에서 국내의 태양물리학 발전에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 순전히 우리의 기술과 노력으로 성공적으로 만들어진 시스템이라는데 큰 의미가 있다 하겠다. 앞으로 지속적인 시험관측을 통해 기기의 정량적인 성능평가를 하고 지속적인 시스템 개선에 노력할 예정이다.

## 참고문헌

김승리, 경재만, 권순길, 윤혁재, 소백산천문대 2K CCD 카메라용 관측프로그램 개발, 천문학논총, 2001, Vol 16, P37.

심경진 외, 2000, 기관고유사업 보고서 "보현산천문대 천체관측 연구 및 운영", p63-p73

심경진 외, 2001, 기관고유사업 보고서 "보현산천문대 천체관측 연구 및 운영", p129-p138

한인우, 남욱원, 장비호, 1999, 한국천문연구원 기술보고서 "스태핑 모터 콘트롤러 STEP4 개발"

한원용 외, 2002, 기관고유사업 보고서 "우주과학 기반연구", p174-p194