

1.6 m 신태양망원경용 고속영상태양분광기 개발 DEVELOPMENT OF THE FAST IMAGING SOLAR SPECTROGRAPH FOR 1.6 m NEW SOLAR TELESCOPE

나자경¹, 채종철², 박영득¹, 박형민^{1,3}, 장비호¹, 안광수^{2,4}, 양희수²,
조경석¹, 김연한¹, 김광동¹, Wenda Cao⁴, Nicholas Gorcex⁴, Philip. R. Goode⁴

¹한국천문연구원 ²서울대학교 ³충남대학교

⁴Big Bear Solar Observatory, New Jersey Institute of Technology, USA

JAKYOUNG NAH¹, JONGCHUL CHAE², YOUNG-DEUK PARK¹, HYUNG-MIN PARK^{1,3}, BI-HO JANG¹, KWANGSU
AHN^{2,4}, HEESU YANG², KYUNG-SUK CHO¹, YEON-HAN KIM¹, KWANG-DONG KIM¹, WENDA CAO⁴,
NICOLAS GORCEIX⁴, AND PHILIP. R. GOODE⁴

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

³Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764 Korea

⁴Big Bear Solar Observatory, New Jersey Institute of Technology, USA

E-mail: jknah@kasi.re.kr

(Received November 22, 2010; Accepted December 28, 2010)

ABSTRACT

KASI and Seoul National University developed the Fast Imaging Solar Spectrograph (FISS) as one of major scientific instruments for the 1.6 m New Solar Telescope (NST) and installed it in the Coudé room of the NST at Big Bear Solar Observatory (BBSO) in May, 2010. The major objective of the FISS is to study the fine-scale structures and dynamics of plasma in the photosphere and chromosphere. To achieve it, the FISS is required to take data with a spectral resolution higher than 10^5 at the spectrograph mode and a temporal resolution less than 10 seconds at the imaging mode. The FISS is a spectrograph using Echelle grating and has characteristics that can observe dual bands ($H\alpha$ and CaII 8542) simultaneously and perform fast imaging using fast raster scan and two fast CCD cameras. In this paper, we introduce briefly the whole process of FISS development from the requirement analysis to the first observations.

key words: instrumentation; spectrograph; spectrum; chromosphere

1. 서론

한국천문연구원(KASI)과 서울대학교는 미국 NJIT(New Jersey Institute of Technology)의 빅베어 태양 천문대(BBSO, Big Bear Solar Observatory) 1.6 m 신태양망원경(이하 NST, New Solar Telescope) 개발 사업에 참여하고 있다(Goode et al., 2003). NST 이전에는 1 m SST(Swedish Solar Telescope; Scharmer et al., 2002)가 가장 큰 구경의 태양망원경이었으나 1.6 m의 구경을 갖는 NST가 세계 최대의 태양망원경이 되었다. NST는 2008년 말에 설치가 끝났으며, 2009년 상반기부터 Nasmyth 벤치에 장착된 필터를 이용한 초기 관측을 수

행하였다. 본격적인 NST 관측은 쿠데실에 설치되는 가시광영상벡터자력계(이하 VIM, Visible light Imaging vector Magnetograph)와 적외선영상벡터자력계(이하 IRIM, Infrared Imaging vector Magnetograph), 그리고 고속영상태양분광기(이하 FISS, Fast Imaging Solar Spectrograph)를 이용하여 이루어진다. NST의 VIM과 IRIM, 그리고 NST와 경쟁관계에 있는 1 m SST의 주 관측기기인 CRIP(Crisp Imaging Spectro-polarimeter)는 패브리-페로(Fabry-Perot) 기반이다(Ortiz et al., 2010). 패브리-페로 기반의 기기들은 영상능력이 뛰어나나 자유스펙트럼영역(Free Spectral Range, FSR)이 크지 않고, 스펙트럼이

동시 관측이 아니라는 단점이 있다. 따라서 선퍼짐과 편이량이 작은 광구의 분광선들을 관측하기에는 적합하지만, $H\alpha$ 나 HeI 선과 같이 선퍼짐과 편이량이 큰 채층 분광선 연구에는 적합하지 않다. 이와 같은 이유로서 홍염, 플레어, 태양 채층의 구조와 동역학을 연구하기 위한 회절격자 기반의 관측기기가 필요하였다. FISS는 회절격자 기반의 태양관측용 영상분광기로 한국천문연구원과 서울대가 공동으로 개발하여 2010년 5월에 빅베어 천문대에 설치되었다.

FISS는 Echelle 회절격자를 사용하며, 두 파장에서 동시에 영상분광관측을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 고속 영상스캐너와 고속 CCD 카메라를 이용하여 빠른 분광영상관측을 수행한다. FISS는 NST의 적응광학계로부터 나오는 태양광을 입력받기 때문에 고품질의 분광영상을 관측할 수 있다.

이 논문에서는 FISS 개발을 위해 요구되는 성능요구사항에 대한 분석, 광학 및 광기계 설계, 그리고 FISS의 주요 구성품들인 비축포물경, 회절격자, 슬릿, 영상스캐너 등의 제작에 대해 간략히 설명하고, NST 쿠데실 설치 및 설치 후에 수행된 FISS를 이용한 첫 분광영상 관측결과를 소개한다.

2. 성능요구사항

FISS는 동시에 두 파장대를 기록할 뿐만 아니라 매우 빠르게 분광영상관측을 수행한다. 이를 위해 고속 영상스캐너와 두 개의 고속 CCD 카메라가 사용된다. 우리가 기대하는 FISS의 성능은 다음과 같으며, 표 1은 요구되는 성능사항을 관측운동 방식에 따라 간략히 정리한 것이다.

2.1. 관측대상

FISS 관측 파장 영역

FISS는 대부분의 경우에 $H\alpha(6563 \text{ \AA})$ 와 $CaII(8542 \text{ \AA})$ 를 동시에 관측하고(dual channel mode), 때로는 회절격자의 회전을 통해 입사각을 조절함으로써 $HeI(10830 \text{ \AA})$ 이나 $FeI(6302 \text{ \AA})$ 등을 관측할 수 있다(single channel mode).

FOV(Field of View)

FOV는 $100'' \times 100''$ 보다 커야 한다. 현재, FISS의 FOV는 $60'' \times 40''$ 로서 사용되는 CCD 카메라의 센서 크기 한계로 인해 제한된다. 차후, 더 큰 화소 수를 갖는 카메라를 활용함으로써 FOV는 두 배까지 확장될 수 있다.

입력빔에 대한 요구조건

FISS로 입력되는 빔은 F/26의 텔레센트릭(telecentric) 구

표 1. FISS 성능요구사항

Parameter	Variable	Spectrograph mode	Imaging mode
Signal-to-noise ratio	$N/\delta N$	$> 10^2$	$> 10^2$
Spectral resolution power	$\lambda/\delta\lambda$	$> 10^5$	$> 3.4 \times 10^4$
Spatial resolution across the slit	δx	$< 0.2''$	$< 0.2''$
Spatial resolution along the slit	δy	$< 0.2''$	$< 0.2''$
Temporal resolution	δt	$\leq 60 \text{ s}$	$\leq 10 \text{ s}$

성을 가져야 한다. 즉, F/26 빔의 초점은 슬릿 면에 위치해야 하며, 빔을 이루는 모든 주광선(chief ray)은 광축에 나란히 입사되어야 한다. 이를 위해 적응광학계로부터 나오는 빔은 F/26의 텔레센트릭 광학구성을 갖도록 구성되어야 한다.

신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio)

영상과 분광 윤곽에 존재하는 희미한 특징들을 관측하기 위해서는 신호 대 잡음비가 10^2 보다 커야 한다. 광잡음이 지배적인 경우, 카운트 되는 전자 수는 10^4 개 이상이어야 한다.

2.2. 분광분해능(Spectral Resolution)

빅베어 태양천문대에서 가시광과 근적외선 영역에서 $H\alpha$ 와 패브리-페로 에탈론과 같은 협대역 필터들을 사용하고 있다. FISS의 분광분해능($R = \lambda/\delta\lambda$)은 이 필터들의 분해능보다 좋아야 하고, 분광선의 도플러 선퍼짐을 분해하기 위해 필요한 것보다 좋아야 한다.

가시광(6300 \AA 근처)와 근적외선($1.5 \mu\text{m}$ 근처)에서 사용되는 패브리-페로 에탈론들은 FWHM(Full Width Half Maximum, 반치폭)이 각각 72 m\AA 과 141 m\AA 이며, 이에 해당되는 분광분해능은 각각 $R_F = 8.7 \times 10^4$ 과 $R_F = 1.1 \times 10^5$ 이다.

도플러 선퍼짐에 의한 선모양을 분해하기 위해 요구되는 분해능은 다음과 같다.

$$R_D = c \left(1.66 \sqrt{\frac{2kT}{\mu M_H} + \xi^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

여기서, 채층의 $T = 6,000 \text{ K}$ 이고 $\xi = 1.5 \text{ km/s}$ 인 $FeI(\mu = 56)$ 선에 대해, $R_D = 9.0 \times 10^4$, $T = 8,000 \text{ K}$ 이고 $\xi = 5 \text{ km/s}$ 인 $CaII(\mu = 40)$ 에 대해 $R_D = 3.4 \times 10^4$, $T = 8,000 \text{ K}$ 이고 $\xi = 5 \text{ km/s}$ 인 $H\alpha(\mu = 1)$ 에 대해 $R_D = 1.4 \times 10^4$, $T = 8,000 \text{ K}$ 이고 $\xi = 5 \text{ km/s}$ 인 $HeI(\mu = 4)$ 에 대해 $R_D = 2.4 \times 10^4$ 이다. 그러므로 요구되는 분해능은

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} > 1 \times 10^5$$

이어야 한다. 이와 같은 분광분해능을 얻도록 FISS를 운용하는 방식을 우리는 분광모드라고 부르겠다. 이 모드에서는 H α 파장에서 $\delta\lambda = 0.066 \text{ m\AA}$ 을 얻게 된다. 반면에 아래와 같은 덜 엄격한 분해능 조건

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} > 3.4 \times 10^4$$

을 만족하도록 분광 분해능을 떨어뜨리는 대신, 주사(scan)를 신속하게 수행함으로써 영상 능력을 향상하는 방식으로 기기를 운용할 수도 있다. 우리는 이런 운용 방식을 영상모드로 부르겠다. 이 모드에서는 H α 파장에서 $\delta\lambda = 0.19 \text{ m\AA}$ 을 얻게 된다.

2.3. 공간분해능(Spatial Resolution)

NST의 회절한계는 H α 와 CaII 선에서 각각 0.09"와 0.11"이다. 추후 HeI과 같은 보다 긴 파장까지 고려할 경우, 요구되는 공간 분해능은 슬릿을 가로지르는 방향, $\delta x < 0.2$ "와 슬릿에 나란한 방향, $\delta y < 0.2$ " 이어야 한다.

2.4. 시간분해능(Temporal Resolution)

높은 분광분해능과 긴 노출이 요구되는 분광관측 모드에서는 1 분 이내로 관측을 수행하고, 낮은 분광분해능과 짧은 노출을 하게 되는 영상관측 모드에서는 10초 이내의 시간분해능으로 관측을 한다.

3. FISS 설계 개요

FISS의 운용 방식은 높은 분광분해능을 얻기 위한 분광모드와 빠른 주사를 하기 위한 영상모드로 구분된다. 두 관측모드 모두 분광영상관측 기능을 수행하지만, 영상모드로 관측을 수행할 경우에는 CCD 카메라의 화소 합치기(pixels binning) 기능을 써서 분광해상도를 낮추는 대신 영상스캐너의 주사속도를 빠르게 함으로써 신속하게 영상관측이 이루어진다.

3.1. 설계요소

슬릿

슬릿의 폭은 $16 \mu\text{m}(0.096")$ 이고 높이는 $10 \text{ mm}(60")$ 이다.

표 2. FISS의 설계요소

Parameter	Spectrograph mode	Imaging mode
F-ratio of the incident beam	26	26
Focal length of the incident beam	41.6 m	41.6 m
Slit width	16 μm	16 μm
Slit height	10 mm	10 mm
Step size	16 μm	drifting
Stepping rate	$> 10 \text{ s}^{-1}$	120 s^{-1}
Collimator/Imager focal length	1.5 m	1.5 m
Grating groove density	79 mm^{-1}	79 mm^{-1}
Grating blaze angle	63°	63°
Grating incidence angle	62.8°	62.8°
Camera pixel size	$16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$	$64 \mu\text{m}(4 \text{ pixels}) \times 16 \mu\text{m}$
Camera format	512×512	128×512
Camera quantum efficiency	0.55 - 0.90	0.55 - 0.90
Camera frame rate (maximum)	35 fps	526 fps

영상스캐너

스캐너는 두 가지 주사방식, 즉 걸음방식(step mode)과 표류방식(drift mode)으로 운용된다. 걸음방식에서는 한 걸음 영상을 이동한 후 카메라 노출이 이루어지고, 그 다음 걸음으로 이동한다. 주사를 위한 걸음간격은 슬릿폭($16 \mu\text{m}$)과 같도록 설정된다. 걸음방식에서 걸음속도(step rate)는 스캐너의 걸음시간 및 카메라의 노출 그리고 제어에 소요되는 총시간에 의해 결정된다. 표류방식은 영상모드에서 사용되며, 멈춤 없이 연속적으로 영상을 이동시킨다. 표류속도가 너무 빠르면 노출시간동안 관측되는 영역의 유효폭이 슬릿폭보다 커져 슬릿을 가로지르는 방향의 공간분해능이 저하될 우려가 있다. 그러나 각 노출시간동안의 이동 거리가 슬릿폭보다 작으면 공간분해능의 저하는 무시할 수 있다. 실제 관측을 위해 표류방식에서 노출시간동안의 이동거리가 슬릿폭의 반이 되도록 설정하였다. 표류방식에서 이동속도는 카메라의 읽기속도(frame rate)에 따라 결정된다.

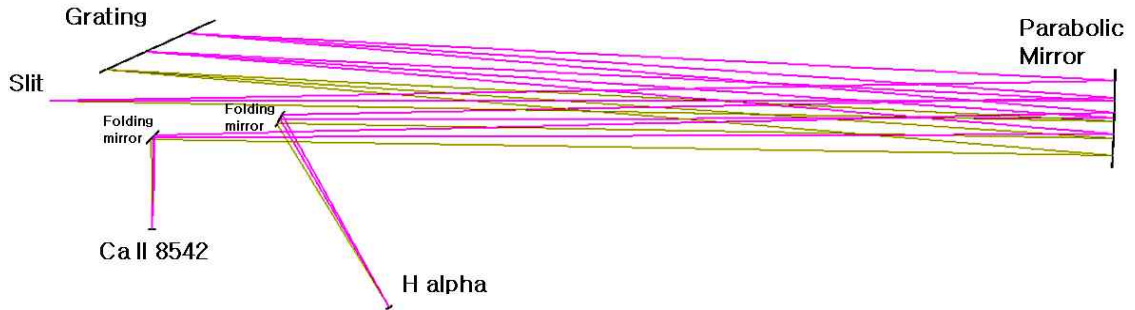


그림 1. FISS의 광학설계 도면.

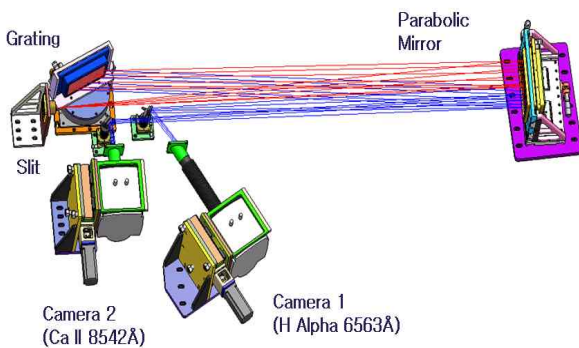


그림 2. 설계된 FISS의 광학마운트 통합설치 도면.

비축포물경

분광기에서 시준(collimation) 및 결상(imaging)은 하나의 비축포물경을 사용해서 이루어진다. 이 거울의 초점거리는 1.5 m이다.

회절격자

회절격자는 격자밀도(groove density) 79/mm와 63°의 블레이즈 각(blaze angle)을 갖는 Richardson Lab 사의 제품(401E Echelle)을 사용한다. H α 와 CaII 그리고 HeI 근적외선 선 관측을 위해 차수는 각각 34, 26, 21을 이용한다. 회절격자 입사각은 Littrow 구성에 가깝도록 하기 위해 62.5°로 설정하였다.

카메라

Andor Technology 사에서 제작한 두 대의 EM CCD(H α 용은 back-illuminated 방식, CaII 적외선은 front illuminated 방식) 카메라를 사용한다. 카메라의 화소 수는 512 × 512, 화소 크기는 16 μ m × 16 μ m이며, 양자효율은 H α 에서 90%, CaII(8542 Å)에서 55% 이다.

표 2는 FISS 구현을 위한 관측모드별 분광기 설계요소들을 요약한 것이다.

3.2. 광학 및 광기계 설계

그림 1은 설계요소들을 토대로 설계한 FISS의 광학설계도면이다. FISS는 입사각과 출사각이 거의 같은 Littrow 방식으로 설계되었으며, 하나의 포물경이 시준기와 결상기의 역할을 한다(James, 2007). 포물경 이후, 분광된 빛은 두 개의 작은 거울을 사용해 H α (6563 Å)과 CaII 적외선(8542 Å)으로 분리되며, 파장분리 이후에는 차수 분리 필터를 사용해서 내부 산란에 의해 발생한 빛들을 차단함과 동시에, 원하지 않는 차수의 빛을 제한한다.

이 기기는 주로 두 파장대 즉 H α (6563 Å)과 CaII 적외선(8542 Å)을 동시에 관측하는 것을 주목적으로 개발되었지만, 한 파장대만을 관측할 경우에는 3500 Å에서 16000 Å에 속하는 임의의 선들을 관측할 수 있다.

그림 2는 최종 설계된 광학마운트들에 대한 통합구성도면을 나타낸 것이다. 광학마운트들은 광학정렬의 용이성을 위해 비축포물경은 5축, 회절격자 마운트는 회전을 포함하여 4축 자유도를 갖는다. 광기계 설계시, FISS가 설치될 곳은 NST가 설치된 바로 아래층 쿠데실이며, 설치 공간이 협소하기 때문에 FISS는 수직 광학 테이블에 설치되게 된다. 따라서 FISS 광학마운트들은 이를 고려하여 수직 테이블 환경에서 스트레스가 최소화되도록 설계, 제작되었다(Yoder, 2006).

4. 분광기 구성요소 제작

4.1. 비축포물경

비축포물경은 FISS의 주요부품으로서 시준과 결상의 역할을 한다. 표 3은 비축포물경의 제작 사양이다. 비축포물경은 직경 300 mm 포물경의 일부분을 160 × 100 × 50 mm의 크기로 잘라 만든다. 포물경의 재질로서 매우 낮은 열팽창률(선형 열팽창계수: 0.0 ± 0.6 × 10⁻⁷/K, from 213 K to 333 K)을 갖는 astrosital을 사용했다. 광



그림 3. 비축포물경의 가공 정밀도 검사 장면.

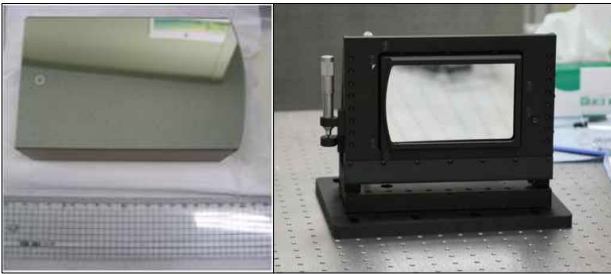


그림 4. 제작된 비축포물경(왼쪽)과 5축 마운트에 비축 포물경을 설치한 모습(오른쪽).



그림 5. Echelle 회절격자가 장착된 회절격자 마운트. 회절격자에서 실제 필요한 크기는 전체 길이의 2/3 정도로 크기조절로 인한 회절격자 손상을 고려하여 구입한 전체 크기를 제작된 마운트에 설치하였다.

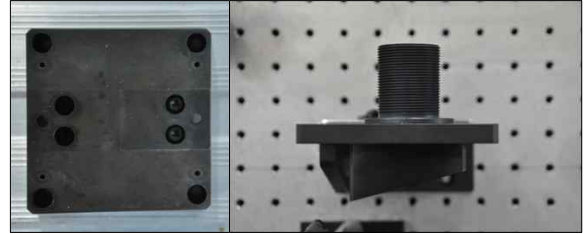


그림 6. 제작된 슬릿(왼쪽)과 슬릿마운트에 설치된 슬릿(오른쪽). 슬릿의 폭은 CCD 화소 크기와 같은 16 μm 로 조절하였다.

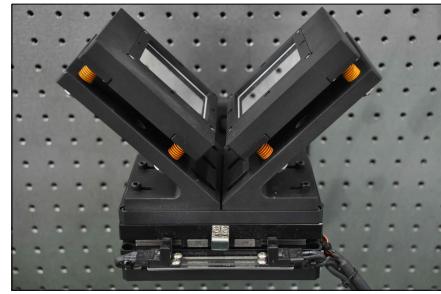


그림 7. 고속 영상스캐너.

확정렬이 용이하게 포물경의 중심에 직경 5 mm의 작은 원을 표시하였다.

포물경의 제작은 한국표준연구원에서 이루어졌다. 그림 3은 포물경의 가공정밀도를 측정하는 모습이다. 제작된 포물경은 $\pm 0.1\%$ 의 곡률반경 오차를 가지며 형상오차의 RMS 값은 $1/40\lambda$ 이하 이다. 그림 3은 원반으로부터 잘라진 비축포물경에 대해 가공정밀도를 측정할 결과이다. 그림 4는 마운트에 비축포물경을 설치한 모습으로 5축(높이, 측면, 경면 piston 및 2축 기울기) 조정이 가능하도록 비축포물경 마운트를 제작하였다.

4.2. 회절격자 및 슬릿

FISS는 분광을 위해 Echelle 회절격자를 사용한다. 이 회절격자는 Newport 사 제품(53025ZD01-401E)으로 회절격자의 사양은 표 4와 같다. 구입된 회절격자는 PV(Peak to Valley) 0.124λ 의 광학성능을 갖는다. 마운트된 회절격자는 미세 각조정이 가능하도록 직접구동방식인 DD(Direct Drive) 모터 위에 그림 5와 같이 장착된다. 또 모터구동을 통해 약 5초각의 각 분해능으로 입사빔에 대한 각제어가 가능하다.

그림 6은 FISS용으로 제작된 슬릿이다. 슬릿은 10 mm의 높이와 16 μm 의 폭을 가지며 슬릿의 위치는 FISS 구성품에 대한 통합 설치시, 설치의 기준 좌표가 된다.

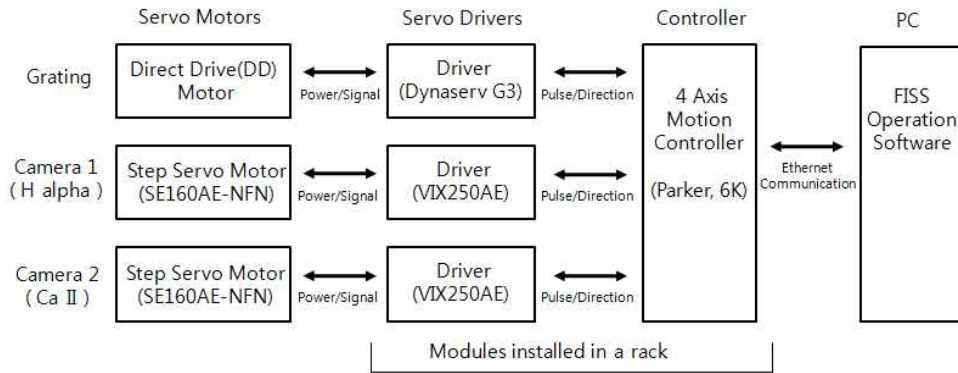


그림 8. FISS 구동부 제어 구성.

표 3. FISS용 비축포물경의 사양

Item	Specification
Diameter	300 mm
Radius of Curvature	- 3,000 mm
Surface figure error (RMS)	< 1/40λ
Roughness	< 1 nm
Conic constant	-1 (parabola)
Material	Astrosital
Coating	Protected Aluminum

표 4. FISS용 Echelle 회절격자 사양

Item	Specification
Size	110 × 220 × 30 mm
Blaze angle	63 degree
Groove	79 / mm
Coating	MgF2 on Al
Material	Schott Zerodur

4.3. 영상스캐너

FISS는 슬릿 주사방식을 이용하여 분광영상을 얻는다. FISS에서는 두 개의 평면거울을 비스듬히 마주보게 하는 방법을 사용해 스캐너를 설계하였다. 이 경우에는 스캐너의 위치가 동공(pupil)의 위치에 영향을 받지 않고 2개의 거울만을 사용하기 때문에 3개의 거울을 사용하는 영상 스캐닝 방법보다 효율적이다.

슬릿에 결상된 영상은 영상스캐너가 Δx의 거리를 이동하게 되면, 2Δx만큼 이동하게 된다. 또한 스캐너



그림 9. FISS 구동부의 모터 드라이브들과 구동 컨트롤러. 드라이브들과 컨트롤러는 하나의 랙 안에 모두 장착된다.

의 이동에 상관없이 텔레센트릭 조건을 만족하는 주광선은 분광기의 슬릿에 수직하게 입사하며, 초점은 슬릿에 고정되기 때문에 동일한 영상품질을 유지할 수 있다.

스캐너 구동장치로서 정밀한 선형 운동을 위해 리니어 모터를 사용하며, 모터는 Justek사에서 제작한 JSAH 시리즈 제품을 선택하였다. 모터의 이동범위는 60 mm, 엔코더의 분해능은 0.1 μm, 최대 하중은 5 kg이다. 모터의 운동제적은 모션 컨트롤 보드에 의해 빠르게 제어된다. 모션 컨트롤 보드는 Deltatau사의 PMAC-mini를 사용하였으며, 이 보드는 2축 동시제어가 가능하고 -10 V ~ +10 V 사이의 아날로그 신호를 출력한다. 영상스캐너 마운트 제작은 평면거울의 2축 기울기 조정의 편의성과 경량화를 고려해서 제작하였다. 그림 7은 제작된 고속 영상스캐너이다.

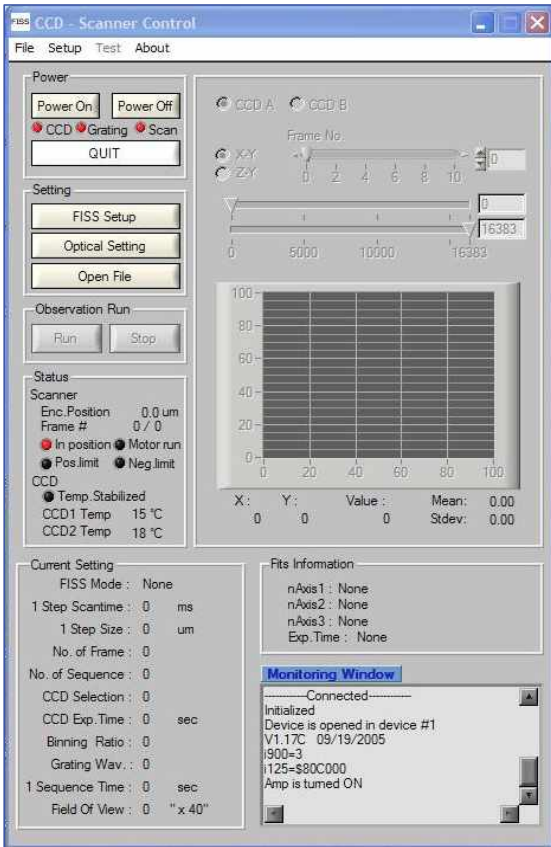


그림 10. FISS 운용 프로그램. FISS 운용 프로그램은 National Instrument 사의 C 언어 기반의 개발툴인 LabWindows® CVI를 이용하여 개발하였다.

4.4. 구동부 및 FISS 운용 프로그램

영상스캐너를 제외한 분광기 운용에 필요한 제어항목은 회절격자 회전 및 두 대의 CCD 카메라에 대한 초점 조절이며, 모두 1 축 구동만을 요구한다. 그림 8은 회절격자와 카메라들의 구동에 대한 제어구성을 나타낸다, 구동 드라이버와 컨트롤러는 그림 9와 같이 하나의 유닛에 모두 장착된다.

FISS 운용 프로그램은 National Instrument 사의 C언어 기반의 개발 도구인 LabWindows® CVI 를 이용하여 개발하였으며, 이 운용 프로그램을 통해 영상스캐너, 회절격자, CCD 관측 카메라의 모션 및 영상획득을 위한 카메라 제어 등이 모두 이루어진다. FISS가 관측한 데이터는 FITS 파일형식으로 저장된다. 그림 10은 FISS 운용 프로그램의 사용자 인터페이스를 나타낸다.

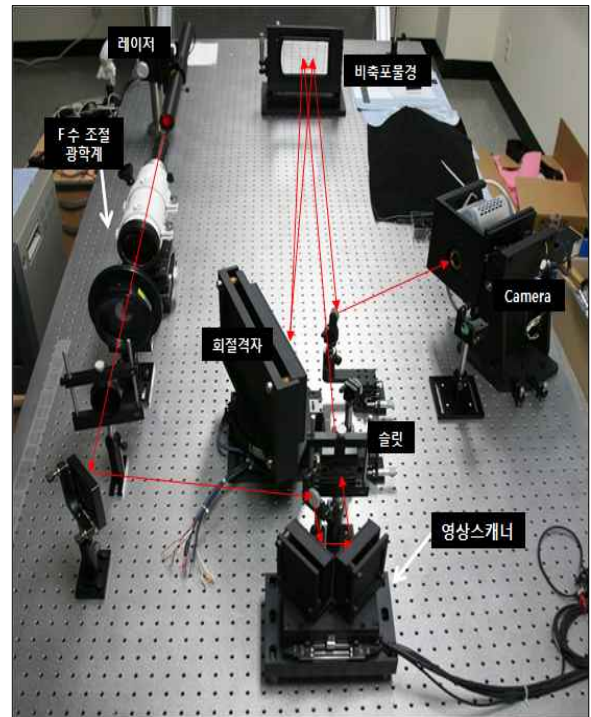


그림 11. 수평 광학테이블에 설치된 FISS. 실선은 레이저빔의 광경로를 나타내며, 레이저로부터 나온 빔은 F수 조절장치를 이용하여 F/26의 구경 대 초점비를 갖는 빔으로 만들어진 후, 영상스캐너를 거쳐 슬릿에 수직하게 입사한다.

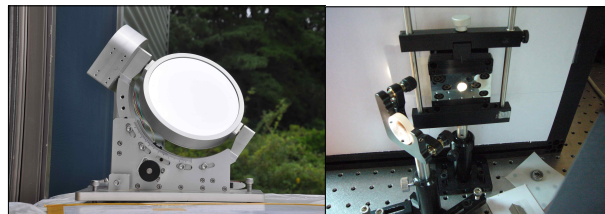


그림 12. 태양광을 이용한 FISS 동작 검증 준비. 왼쪽 그림은 실내에 위치한 FISS로 태양광을 유도하기 위한 실로스탯(coelostat)이고, 오른쪽 그림은 태양광 유도를 통해 FISS 슬릿면에 형성된 태양 영상이다.

5. 분광기 통합 설치 및 동작 검증

5.1. 분광기 통합 설치

각각의 FISS 구성품들에 대한 제작을 완료한 후, 수평 광학테이블에 구성품들을 통합 설치하였다. 그림 11은 실험실의 수평 광학테이블 상에 설치한 FISS를 보여주며, 실선은 광경로를 표시한 것이다.

633 nm HeNe 레이저를 이용하여 광학정렬을 수행한 후, 입사빔에 대한 입력조건인 F/26을 만들기 위해 조리



그림 13. 수직테이블에 설치한 FISS. 태양광 시험관측시, 분광기의 하우징은 먼지 및 외부 빛을 차단하기 위해 덮개 판들로 덮여진다.

개를 이용한 F수 조절광학계를 구성하였고, F/26의 빔은 슬릿에 결상된다. 슬릿을 통과한 빔은 비축포물경과 회절격자, 그리고 다시 비축포물경을 거쳐 CCD 카메라 센서 면에서 633 nm 레이저 파장에 해당하는 점영상으로 나타난다.

5.2. 시험관측

FISS가 정상적으로 동작하는 지를 점검하기 위해 실제 태양광을 FISS로 유도하여 시험관측을 실시하였다. 태양분광영상 시험관측을 위해 그림 12와 같이 태양광을 유도할 수 있는 실로סט을 구성하였으며(김연한 등, 2006), 빅베어 천문대의 쿠데실에 설치되는 것과 같은 조건으로 FISS 구성품들을 수직 광학테이블에 재설치하였다. 그림 13은 태양 시험관측을 위해 수직 광학테이블로 옮겨진 FISS의 모습이다. 테이블의 크기는 2,300 mm × 120 mm로서, 설치된 FISS 구성품들은 테이블 전체 공간을 차지한다. 입력광학계로서 초점거리 1,000 mm인 아크로메틱 렌즈를 이용하였으며, F수 조절을 위해 렌즈 앞에 조리개를 설치하여 구경 대 초점비가 26 이 되도록 하였다.

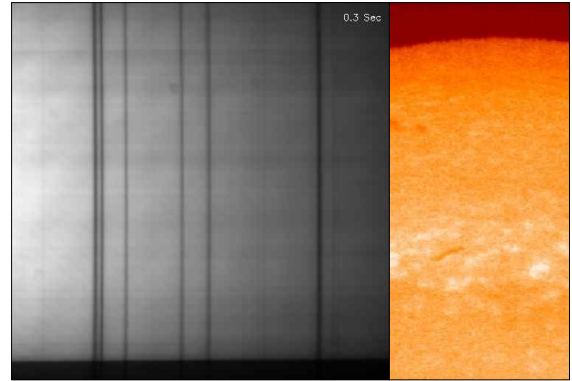


그림 14. FISS 동작 검증을 통해 얻어진 H α 파장 주변의 분광선들(왼쪽)과 H α 분광영상(오른쪽).

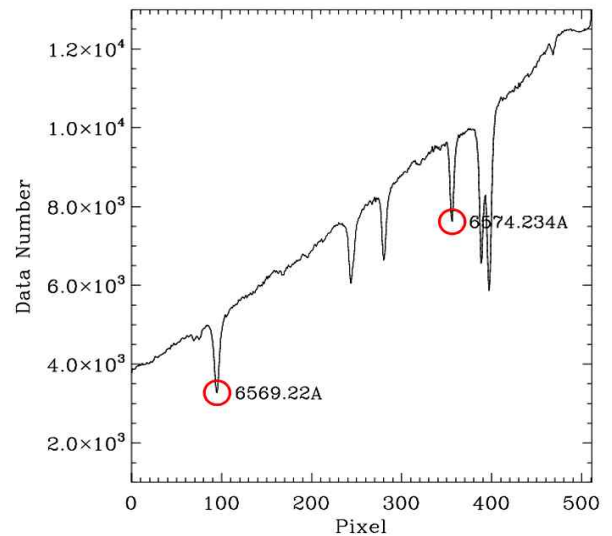


그림 15. FISS 태양광 시험관측을 통해 관측된 H α 파장 주변의 분광선들. 동그라미로 표시된 두 부분이 선형분산을 재기 위해 측정된 선들이며, H α 파장에 대해 선형분산을 측정해 본 결과, 1.2048 Å/mm로써 분광기를 설계하기 전에 예측했던 결과와 잘 일치한다.

H α 파장에 대한 분광영상을 관측하기 위해 영상스캐너에 연동시켰으며, 관측은 512 × 512 full frame으로 frame 당 노출시간은 30 ms, 걸음 당 이동시간은 100 ms, 이동간격은 10 μ m로 주사요소들을 설정하였다. 이와 같은 설정에서 100 프레임은 얻는 데 소요되는 주사시간은 10초이다. 관측한 결과는 그림 14와 같다. 그림 14에서 왼쪽 그림은 H α 파장 주변의 분광선들이고, 오른쪽은 H α 분광영상이다. 입력광학계가 초점거리 1,000 mm인 저가의 굴절렌즈임에도 필라멘트의 모습이 잘 관측되고 있어 영상스캐너를 이용한 FISS의 분광영상관

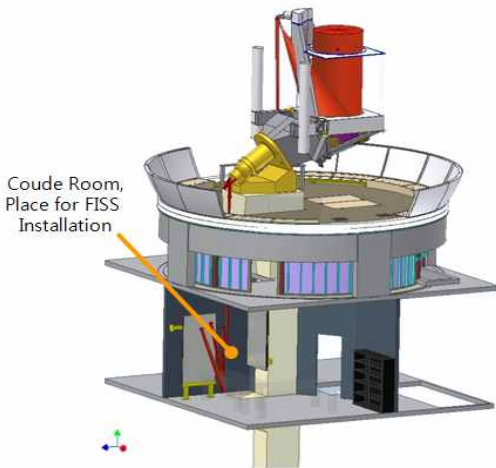


그림 16. 빅베어 태양 천문대 내의 FISS 설치 위치. FISS는 NST 망원경 쿠데실, 적응광학계 바로 벽면에 설치된다.

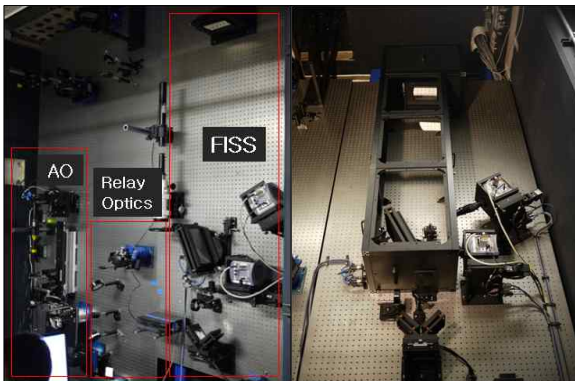


그림 17. 빅베어 태양천문대 쿠데실 벽면 수직광학 테이블에 설치된 FISS. 적응광학계(AO-76)는 FISS의 왼쪽 바로 옆에 위치한다(왼쪽 그림). 오른쪽 그림은 설치 완료된 FISS의 모습이다.

측이 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

시험 분광관측 데이터를 이용하여 $H\alpha$ 파장에 대한 선형분산을 측정하였다. 측정은 $H\alpha$ 파장에 가까운 무거운 원소인 철에서 나오는 분광선들을 대상으로 하였다. 무거운 원소에서 나오는 선의 경우, 태양광구 근처에서 선이 형성되며, 분광선의 퍼짐이 적다. 그림 15는 선형분산을 구하기 위해 관측한 분광영상에 대한 분광 선 모양이며 그림에서 동그라미로 표시된 두 부분이 선형분산을 재기위해 측정된 선들(6569.22 \AA , 6574.23 \AA)이다. 이 선들을 이용하여 구한 선형분산 1.2048 \AA/mm 로서, 실제 CCD의 한 화소

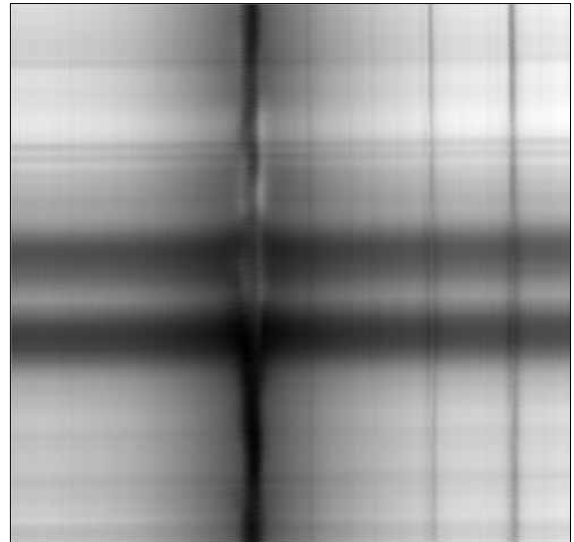


그림 18. FISS Spectrogram(CaII 8542, 2010년 5월 21일). 흑점을 포함한 활동영역을 관측한 것으로서, 몇몇 분광선에서 Zeeman splitting이 관측되고 있다.

에서 차지하는 파장의 크기는 19.27 m\AA/pixel , 영상 전체(CCD 센서 크기)에 대한 파장의 범위는 9.8 \AA 이다. 이 결과는 분광기를 설계하기 전에 예측했던 결과와 잘 일치한다. 여기서 구한 선형분산의 값은 $H\alpha$ 파장에서의 값이기 때문에 다른 파장에서는 다른 값을 가진다. CaII 8542에서는 전체 CCD 센서면에 대한 파장범위는 13 \AA 이다.

6. FISS 설치 및 관측

NST는 2009년 상반기에 망원경의 설치를 완료하여 첫 관측을 실시하였으며, 현재 관측기기들의 구성이 진행 중이다. 개발이 완료된 FISS는 2010년 5월에 빅베어 천문대로 옮겨져 설치되었다. FISS의 설치 장소는 NST가 설치되는 아래층 쿠데실이며(그림 16), 설치공간의 협소함으로 인해 벽면에 설치되었다(그림 17). NST로부터 집광된 빛은 아래층 쿠데실로 보내지며, 적응광학계(AO-76)를 거쳐 각각의 관측기기로 분배된다. 적응광학계와 FISS는 같은 벽면에 설치되며, FISS와 적응광학계 사이에 FISS로 입력되는 빛의 주광선이 슬릿에 수직하게 입사하도록 만들어주는 두 개의 렌즈로 구성된 릴레이 광학계가 위치한다. 그림 17은 벽면에 설치된 적응광학계와 릴레이 광학계, 그리고 FISS를 보여준다.

FISS 설치를 완료 후, 태양빛을 쿠데실로 유입시켜 시험관측을 실시하였다. 그림 18은 활동영역을 관측한

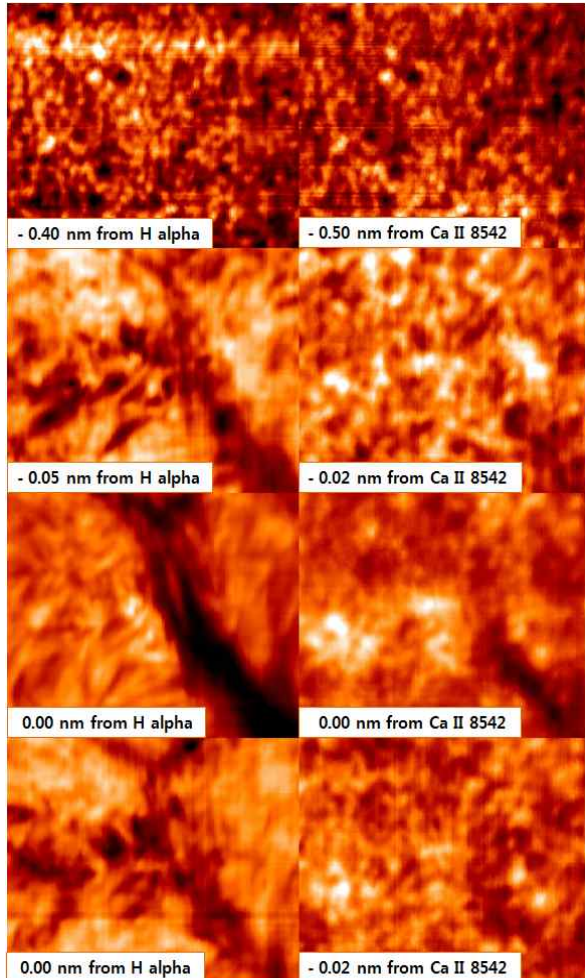


그림 19. H α 와 CaII 분광영상(2010년 6월17일).

CaII 8542 분광선이다. 흑점부분에서 Zeeman splitting이 관측되는 것을 볼 수 있다. 그림 18에서 보이는 일부 가로선들은 슬릿에 먼지가 끼여 나타난 것으로 먼지 방지를 위한 개선이 필요하다. NST의 적응광학계(AO-76)와 연계해서 H α 와 CaII 8542 분광관측을 수행하였다. 그림 19는 적응광학계의 도움을 받아 관측된 분광영상이다. 그림 상단의 두 영상(-0.4 nm from H α 와 -0.5 nm from CaII 8542)은 연속선(continuum)에 해당하는 곳으로 태양 쌀알무늬(granulation)가 보이며, H α 와 CaII 8542 중심선에서는 필라멘트가 잘 보인다.

7. 요약 및 토의

FISS는 두 파장을 동시에 관측할 수 있도록 설계된 이중대역 Echelle 분광기로, 빠른 영상 스캐닝을 위해 고속 스캐너를 활용하고 있다. 이러한 기능적 구성은 FISS가 높은 분광능력과 함께 빠른 결상능력을 갖도록

한다. FISS의 관측운용은 분광관측 모드와 영상관측 모드로 선택적 운용이 가능하며 관측의 특성에 맞게 효율적으로 운용할 수 있다.

FISS는 빅베어 태양천문대의 쿠데실에 설치되어 성공적으로 첫 관측을 수행하였다. FISS는 NST의 주 관측기기 중 하나로서 개발 목적인 홍염, 플레어, 태양 채층의 구조와 동역학 그리고 진화를 연구하는 데에 크게 기여할 것으로 기대한다.

현재, NST의 적응광학계는 76개의 구동기를 장착한 AO76 시스템으로 운용되고 있지만, 보다 많은 파면보정을 수행할 수 있도록 적응광학계에 대한 개선이 예정되어 있기 때문에 새로이 구성된 NST 적응광학계를 활용할 경우, FISS가 생산하게 될 관측 자료의 품질 또한 향상될 것으로 예상된다.

FISS를 이용한 첫 관측 이후 계획으로서, 자세한 정량적인 성능분석과 그 결과가 후속 논문에서 상세히 다루어질 예정이다. 또한 FISS 개발이 완료되었지만, 먼지에 의한 슬릿 오염이나, 릴레이 광학계 마운트의 정렬 자유도 부족 등의 개선점들이 있기 때문에 FISS의 기능 향상과 관측의 효율성을 위해 지속적인 보완이 이루어질 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF -2008-220-C00022)의 순수기초그룹지원 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김연한, 문용재, 조경석, 박영득, 최성환, 장비호, 김수진, 2006, 천문학논총, 21, 51
- Goode, P. R., Denker, C., Didkovsky, L. I, Kuhn, J. R., & Wang, H., 2003, JKAS, 36, 125
- James, J. F., 2007, Spectrograph Design Fundamentals (1st Ed.; Cambridge University Press: New York), p.78
- Ortiz, A. & Rouppe van der Voort, L. H. M., 2010, Astrophysics and Space Science Proc., p.150
- Scharmer, G. B., Bjelksjo, K., Korhonen, T., Lindberg, B., & Petterson, B., 2002, SPIE Proc., 4853-47
- Yoder, P. R., 2006, Opto-Mechanical System Design (3rd Ed.; CRC Press: Boca Raton), p.484