

보현산천문대 고분산 편광 분광기 개념 설계¹⁾
CONCEPTUAL DESIGN STUDY OF THE BOES STOKESMETER

김강민¹, 한인우¹, S. PLACHINDA², G. VALYAVIN^{1,3}, 유계화⁴

¹한국천문연구원, ²우크라이나 크리미아천문대, ³러시아 SAO, ⁴이화여대 과학교육과
KANG-MIN KIM¹, INWOO HAN¹, S. PLACHINDA², G. VALYAVIN^{1,3}, AND KYE HWA YOO⁴

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

E-mail: kmkim@boao.re.kr

² Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea 98409, Ukraine

³ Special Astrophysical Observatory, Nizhnii Arkhyz, Karachai Cherkess Republic, 357147, Russia

⁴ Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

(Received November 10, 2005; Accepted November 25, 2005)

ABSTRACT

We plan to install the polarimetric optics in the AGU(acquisition and guiding unit) of the 1.8 m telescope at the BOAO(Bohyunsan Optical Astronomy Observatory). With this, the spectropolarimetric observations with the resolution of 45,000 and 60,000 in 4,000 to 8,000 Å range could be done by the BOES(BOao Echelle Spectrograph). If we use the precision radial velocity measurement capability of the BOES, the accuracy of the magnetic field intensity measurements with this new BOES stokesmeter will be much increased. We present here the design concept of the BOES stokesmeter. Some details on the optics, mechanical parts, fiber parts and the lab test procedures of this stokesmeter are explained.

Key words: astronomical instrumentation; spectropolarimeter

1. 서론

항성의 자기장 형태와 변화, 그리고 항성 주변 구조(circumstellar environment) 등은 항성의 구조와 진화 연구에 중요한 정보가 된다. 이들은 분광 관측으로부터 정보를 얻기 어렵고 90년대 중반부터 본격적으로 시작된 편광 분광 관측으로 알아낼 수 있다.

별빛이 편광되는 기작에는 Zeeman 효과, Synchrotron 복사, 산란 등이 있다. 자기장 세기에 비례하여 스펙트럼 선이 분리되는 Zeeman 효과는 자기장이 아주 센 경우가 아니면 고분산 분광 관측으로도 파장 분리를 측정하기 어렵다. 그러나 편광 관측에서는 보다 쉽게 분리할 수 있기에, 보다 약한 자기장 측정이 가능하다. 원형 편광(circular polarization) 측정으로부터는 시선방향의 자기장 세기를 알 수 있고, 선형 편광(linear polarization) 측정에서는 시선 방향의 수직성분 자기장 세기를 알 수 있

기 때문에, 이 둘을 같이 측정을 하면 전반적인(global) 자기장의 방향과 세기를 추정할 수 있다. 또한 천체 주변 물질에서의 산란광을 편광 관측하면 천체 주변 물질의 분포 등도 알 수 있다.

보현산 천문대에서는 1.8 m 망원경의 AGU(acquisition and guiding unit) 안에 편광기를 설치함으로써, BOES(BOao Echelle Spectrograph)로 고분산 편광 관측까지 가능하도록 할 예정이다.

일반적으로 선형 편광은 쿠데(Coudé)나 나시무스(Nasmyth) 같이 사경을 사용하는 초점에서는 측정이 불가능 하지만 보현산 천문대 1.8 m 망원경은 카세그레인 초점에서 고분산 및 중분산 분광과 영상 측광 관측이 가능하기 때문에, 고분산 및 중분산 분광과 영상으로 선형 편광과 원형 편광 측정이 모두 가능하다. 그러나 선형 편광 관측은 달이 없고, 날씨가 좋아야 하는데, 보현산의 날씨는 별로 좋지 못하고, 급변하는 경우가 자주 있어 선형 편광의 측정은 거의 어려울 것으로 추정된다. 따라서 보현산 천문대 편광기는 주로 BOES와 결합하여 고분산

1) 본 연구는 한국천문연구원의 기관고유사업(2005-1-310-01)

으로 원형 편광을 분광 관측하는데 사용될 예정이다. 특히 BOES는 시선 속도 측정 정밀성이 초속 4 m 정도로 뛰어나기 때문에, Zeeman 효과에 의한 선 분리에서 시선 속도 성분을 분리하면 보다 정밀한 자기장 측정이 가능할 것으로 기대한다. 현재 운용되고 있는 편광 분광기 중에서 요오드통으로 시선 속도를 정밀하게 분리해낼 수 있는 것은 없으며, BOES에서 처음으로 시도되는 것이다.

슬릿을 사용하는 일반 분광 편광기에서는 선형 편광 방향에 따라 격자의 반사율이 크게 차이가 나는 현상을 보완하기 위하여, 선형 편광을 원형 편광으로 바꿔주는 별도의 $\lambda/4$ 판(quarter wave plate)이 필요하다(Eversberg et al., 1998). 그러나 BOES를 이용한 편광 분광 관측에서는 광섬유를 통과하면서 선형 편광 성질을 잃어버리기 때문에 별도의 $\lambda/4$ 판이 필요하지 않은 장점도 있다.

여기에서는 보현산 천문대 편광기의 구조와 제작 개념, 설치 및 시험 방법 등의 계획을 제시하였다.

2장에서는 편광의 형태를 알 수 있는 스톡스 인자(Stokes parameter)에 대하여 정리하고, 3장에서는 보현산 천문대 편광기의 광학계의 특징과 개념에 대해 정리하였다. 4장에서는 기존 BOES의 광섬유와 광섬유 입출구 V자 홈을 편광기 사용에 맞게 개조하려는 계획을 정리하였다. 5장에서는 편광 광학계를 회전하거나 이동시키는 기계부의 개념을 정리하였다. 6장에서는 설치와 조정 방안을 제시하였고, 7장에서는 편광 관측 방법을 정리하였다. 마지막 8장에서는 보현산 천문대 편광기 계획을 요약, 정리하였다.

2. 스톡스 인자

편광과 스톡스 인자의 설명은 여러 책(Kitchen 1984, 등)에 잘 나와 있으나, 차후 계속되는 논의를 위해서 여기에 간단히 정리하였다.

그림 1과 같이 장반경과 단반경이 각각 a, b이고 장반경과 x축사이의 위치각이 ψ 로 타원 편광된 빛의 전기장 E 는 편광 방향이 서로 수직이고 위상차가 δ 인 두개의 선형 편광 성분으로 다음과 같이 분해할 수 있다. 여기서 $a^2 + b^2 = e_1^2 + e_2^2$ 이다.

$$E = ie_1 \cos \omega t + je_2 \cos(\omega t + \delta)$$

편광의 방향과 모양을 알 수 있는 네 개의 스톡스 인자 I, Q, U, V는 다음과 같이 정의된다.

$$I = I_u + I_v$$

$$Q = e_1^2 - e_2^2$$

$$U = 2e_1e_2 \cos \delta$$

$$V = 2e_1e_2 \sin \delta$$

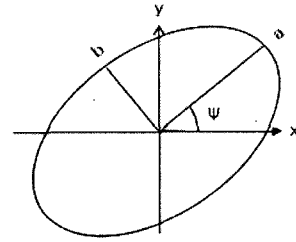


그림 1. 장반경과 단반경이 각각 a, b이고 장반경과 x축사이의 위치각이 ψ 로 타원 편광된 빛의 전기장 E 는 편광 방향이 서로 수직이고 위상차가 δ 인 두개의 선형 편광 성분으로 분해할 수 있다.

여기서 I_u 와 I_v 는 각각 편광 되지 않은 빛과 편광된 빛의 세기를 나타내며, $I_p = (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2} = e_1^2 + e_2^2$ 로 표시할 수 있다. 선형 편광도 π_L , 원형편광도 π_E 와 편광도 π 는 다음과 같이 정의된다.

$$\pi_L = (Q^2 + U^2)^{1/2} / I$$

$$\pi_E = V / I$$

$$\pi = I_p / I = (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2} / I = (\pi_L^2 + \pi_E^2)^{1/2}$$

여기서 $\tan \beta = b / a$ 라면, $\cos 2\beta = \pi_L / \pi$, $\sin 2\beta = \pi_E / \pi$, $\tan 2\beta = \pi_E / \pi_L$ 이 된다. 이를 이용하면 정규화된 스톡스 인자는 다음과 같이 간단히 표시된다 (그림 2 참조).

$$Q/I = \pi \cos 2\beta \cos 2\psi = \pi_L \cos 2\psi$$

$$U/I = \pi \cos 2\beta \sin 2\psi = \pi_L \sin 2\psi$$

$$V/I (= \pi_E) = \pi \sin 2\beta$$

따라서 네 개의 스톡스 인자를 알면 빛의 세기와 편

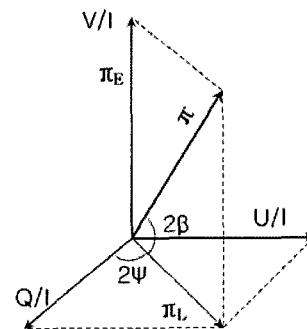


그림 2. 스톡스 인자 I, Q, U, V와 편광도 π , π_E , π_L 의 관계

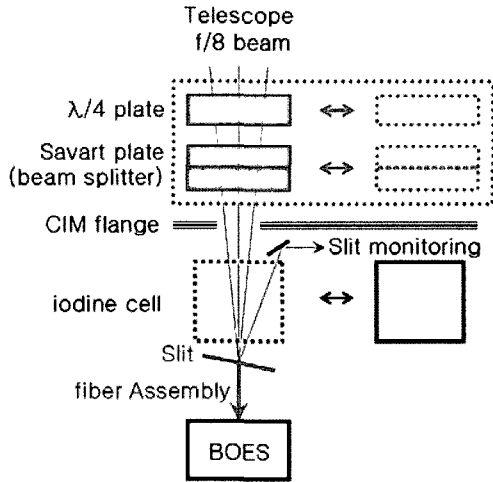


그림 3. $\lambda/4$ 판과 Savart 판으로 구성되어 있는 보현산천문대 편광기의 구조. CIM 플랜지 앞 AGU 회전판에 설치된다. $\lambda/4$ 판은 별도의 이동과 회전이 가능하다. 편광기를 제작하면서 광섬유 부분도 개조할 예정이다.

광의 모양(타원도, 위치각 ψ)을 알 수 있다. 여기서 $b=0$ 이면 선형 편광이 되는데, $\beta = 0$ 이기에 V 는 0이 되며 위치각 ψ 는 $\tan 2\psi = U/Q$ 가 된다. $a=b$ 이면 원형 편광이 되는데, $2\beta = 90^\circ$ 가 되어 $Q = U = 0$ 이 되고, $V = I_p$ 가 된다. 따라서 Q 와 U 는 선형 편광과 관련되고, V 는 원형 편광과 관련되는 인수임을 알 수 있다. V 가 양이면 시계 방향으로 회전하며, 음이면 반시계로 회전하는 편광이다.

3. 보현산 천문대 편광기의 광학계 구성

$\lambda/4$ 판과 Savart 판으로 구성된 보현산 천문대 편광기는 4,000 - 8,000 Å에서 편광을 측정할 예정이며, 그 구조와 배치는 그림 3과 같다. 편광기는 BOES의 CIM (cassegrain interface module) 플랜지 위에 점선으로 된 사각형 안에 있는 것으로, CIM 플랜지와 1.8 m 망원경의 AGU 판 사이에 있는 150 mm 공간에 설치한다. 편광기를 사용할 때는 편광 광학계가 망원경 광축에 오게 되는데, 망원경의 자동 추적기(auto-guiding)도 같은 공간을 이용하기에 편광 관측을 할 때에는 망원경 자동추적기를 사용할 수 없고, 시야가 2.4분에 불과한 BOES의 슬롯모니터링을 이용하여, 망원경 자동추적을 하거나 수동으로 추적해야 한다.

$\lambda/4$ 판과 Savart 판은 모두 복굴절 성질을 이용한 것이다. 복굴절이란 굴절율이 정상광(ordinary wave)과 비정상광(extra ordinary wave)에 따라 굴절율이 다른 현상이다. 정상광과 비정상광은 결정축(optic axis)과 편광 방

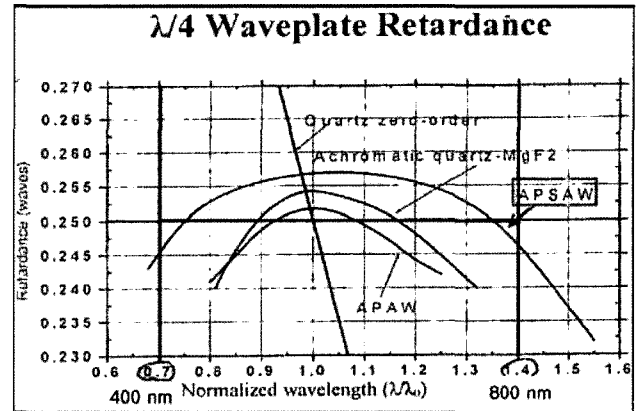


그림 4. Astropribor사의 APSAW $\lambda/4$ 판의 파장에 따른 위상 지연. λ_0 를 570 nm로 설정하면 400 - 800 nm에서 $(0.25 \pm 0.007)\lambda$ 의 정밀도를 보인다.

향의 각도에 따라 결정된다. 복굴절을 보이는 대표적인 결정은 방해석(calcite)과 석영(quartz)이다.

$\lambda/4$ 판은 두께를 정밀하게 가공하여 정상광과 비정상광의 굴절율 차에 두께를 곱한 광경로 차이(optical path difference)가 $\lambda/4$ 만큼의 위상차가 나게 함으로 선형편광을 원형 편광으로, 또는 원형 편광을 선형편광으로 바꿔주는 역할을 한다. 단일 결정으로 제작된 $\lambda/4$ 판은 유효 파장 범위가 좁다.

$\lambda/4$ 판에서는 물결무늬가 흔히 나타나는 문제가 있다. AAT와 WHT의 편광 분광기와 Pic du Mide의 2 m 망원경에 설치된 MuSiCoS 편광분광기(파장범위 : 4,000 ~ 7,000 Å, 파장분해능 ~ 35,000)에서 사용한 독일 Bernard Halle Nachf사의 $\lambda/4$ 판에서는 강도 변화 2% 정도의 물결무늬가 생기며, 파장분해능이 35,000 이상인 고분산 편광기에서는 이의 보정이 어렵다는 문제가 있었다(Donati et al., 1999). 그러나, 하와이대 2.2 m 망원경의 LIPS 편광분광기(파장범위 : 1,500 - 3,000 Å, 파장분해능 ~ 7,000)에서는 우크라이나 Astropribor사의 APSAW를 채택함으로 편광정밀도를 0.1% 이하로 달성하였다(Ikeda et al., 2003). Astropribor사의 APSAW는 여러층의 PMMA(polymethyl methacrylat)를 결정축을 달리하여 붙임으로 넓은 파장 범위에서도 유효한 결과를 보여준다. 그림 4는 0차 APSAW의 정규화된 파장에 따른 위상 지연의 오차를 보여준다. 기준파장 λ_0 를 5,700 Å로 하면 우리가 필요로 하는 파장 범위인 4,000 - 8,000 Å에서 $(0.25 \pm 0.007)\lambda$ 의 정밀도를 보인다(Samoylov et al., 2004). Savart 판은 복굴절 성질이 있는 방해석을 결정축 방향을 달리하여 두 장을 붙여놓은 판인데(그림 5), 입사된 빛의 선형 편광 방향에 따라 다른 방향으로

빛의 진로를 나눠주는 역할을 한다. 즉, 선형 편광기(linear polarizer) 기능과 광선 분리 기능(beam splitter)을 동시에 수행한다. 선형 편광기에서는 0도와 90도 두 번에 걸쳐 측정해야 하는 것을, Savart 판을 이용하면 한번의 측정으로 가능하게 된다.

그림 5는 Savart 판의 구조와 기능을 잘 보여준다. 왼쪽에서 편광되지 않은 빛이 입사할 때, 수평으로 편광된 빛은 정상광으로 직진하여 통과하나, 수직으로 편광된 빛은 비정상광으로 굴절이 일어나 광로 이동이 있다. 이 광로 이동은 방해석 판의 두께에 비례한다. 두 번째 판에서는 정상광으로 첫 번째 판을 통과한 빛은 비정상광이 되어 광로 이동이 있으며, 비정상광으로 첫 번째 판을 지나온 빛은 정상광으로 직진한다. 두 판을 통과하도록 한 것은 두 빛의 광경로 차이를 같게 하기 위함이며, 두 판의 두께는 같다. 최종적으로 두 빛의 이격 광로 거리는 한 판에서의 이격거리 d의 $\sqrt{2}$ 배가 되며, 출사 광로는 입사 광로에서 모두 d 만큼 서로 수직으로 떨어지게 된다.

슬릿을 쓰는 분광 편광기에서는 큰 문제가 없으나, 광섬유를 사용하는 경우에는 두 빛 사이 거리를 임의로 조정하기가 불가능하기에 Savart 판의 적정 두께에 대한 검토가 필요하다.

시상이 좋지 않은 보현산에서는 두 상거리가 크면 클수록 Savart 판에서 분리된 빛이 다른 광섬유에 들어올 확률이 줄어든다. 그러나, Savart 판에는 수차와 더불어 색분산이 있어서, 판 두께가 커질수록 두 상 사이 거리는 멀어지는 반면, 수차와 색분산도 같이 증가한다. BOES에서는 200 μm 보다 큰 광섬유를 쌍으로 설치하는 것은 상접침 문제가 있다(그림 7 참조). 따라서 편광기에는 150, 200 μm 광섬유를 사용하는데, 광섬유가 얇은 만큼 수차도 작아야 되기에 상거리를 줄여야 한다. 우리는 상거리를 500 μm 으로 결정하였으며 이것은 7.2각초에 해당한다.

광섬유 쌍의 사이 거리가 500 μm 인 경우, 한 광섬유에 들어오는 편광된 빛의 양과 다른 광섬유로 들어가야 하는 편광이 이 광섬유로 들어오는 빛의 양의 비율을 시상에 따라 계산한 결과, 거의 무시할 정도로 작았다(표 1).

실제 제작된 Savart 판에서는 상거리가 약간 달라질 수 있기 때문에 편광 분광기의 효율을 위해서는, 제일 먼저 이것을 도입한 후, 상거리를 실측한 뒤에 그에 맞는 광섬유 입구 V자 홈을 제작하는 것이 필요하다.

현재 Savart 판은 영국 Halbo optics사에 제작 의뢰를 하였으며 보호판을 포함하여 총 13 mm 두께로, 산란광 제거를 위한 광대역 무반사 코팅 후 도입될 계획이다. 제작사에서 제시한 상거리 500 μm 에서의 파장별 상거리는 표 2와 같다.

망원경 광축으로 들어온 빛은 편광기 광학계 설치 공간에서 직경 32 mm가 되며 Savart 판에서는 25 mm가 된

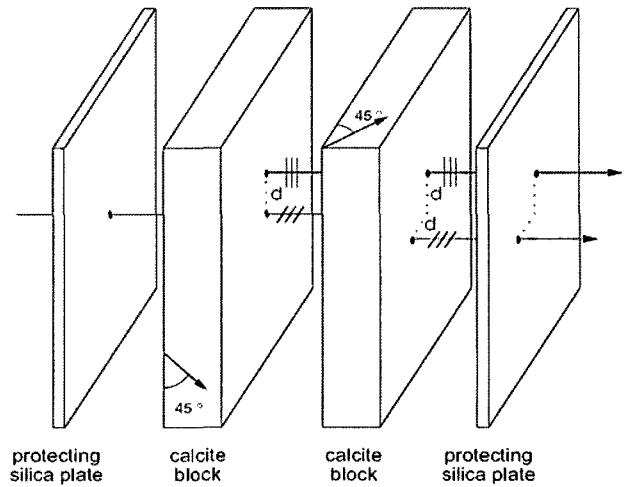


그림 5. 편광 방향에 따라 광선을 분리해주는 Savart 판의 구조. Dotani 외(1999)의 fig.3에서 옮겼다.

표 1. 광섬유 쌍 거리가 500 μm 일때, 시상에 따라 한 광섬유에 다른 광섬유에 들어갈 편광이 들어오는 비율. 단위는 %이다. 거의 무시할 만한 양이다.

시상 ()	3.5	4.0	4.5	5.0
150 μm 광섬유	0.00	0.03	0.15	0.47
200 μm 광섬유	0.01	0.05	0.20	0.60

표 2. Savart판의 파장에 따른 상거리

파장(A)	4000	5000	6000	7000	8000
상거리(μm)	520	500	490	480	475

다. 우리는 편광 광학계 직경을 50 mm로 설정하여 상업화된 일반 마운트를 사용할 수 있도록 하였다. 일반적으로 광학계 유효경은 외경의 90 %이기에 유효 직경 45 mm라면 시야각 3.4분에서는 편광 광학계 마운트로 인한 빛 가림은 없다. 따라서 편광 광학계가 망원경 광축에 온다고 하여도 슬릿 모니터링의 시야 2.4분은 충분히 확보된다.

4. 광섬유부의 제작

이번에 편광기를 제작하면서, 광섬유와 광섬유 입구, 출구의 V자 홈도 모두 새로 제작할 예정이다. 편광기에는 코어 직경 150, 200 μm 인 광섬유를 각각 쌍으로 설치할

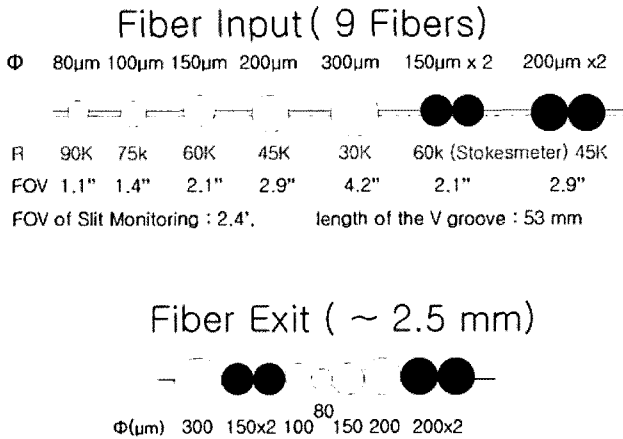


그림 6. 편광기를 제작하면서, 광섬유 입구 V자 홈(윗그림)과 출구 V자 홈(아랫그림)도 그림과 같이 개조한다. 편광관측에는 150, 200 μm 광섬유 쌍을 이용한다.

예정이며, 기존의 80, 200, 300 μm 광섬유와 더불어 100, 150 μm 광섬유가 추가된다(그림6). 그림 6에는 각 광섬유에서의 파장 분해능(R)과 시야(FOV, 단위: 각초)도 같이 제시하였다.

4.1. 광섬유

BOES는 3600 - 10100 Å의 넓은 파장 범위를 2k x 4k CCD 하나에 담기 때문에 차수 간격(order separation)이 충분히 넓지 않다. 차수간 거리는 116차인 4020 Å에서는 460 μm(30.6화소)으로 넓고 파장이 길어질수록 좁아져 58차인 8050 Å에서 제일 좁은 265 μm(17.7화소)이고 다시 파장이 길수록 넓어져 마지막 46차인 9930 Å에서는 290 μm(19.3화소)이 된다.

현재 쌍으로 설치되어 있는 200, 300 μm 광섬유는 광섬유 출구에서 쌍 간의 거리를 380 μm 띄어 놓아, 차수 간격이 제일 좁은 8050 Å 부근에서, 한 광섬유에서 생긴 차수 사이의 중앙에 다른 광섬유에서 생긴 차수가 나타나도록 하였다.

그림 7은 현재 BOES에 쌍으로 설치된 200(좌측)과 300(우측) μm 광섬유에 바닥고르기 광원을 비췄을 때 얻은 상의 단면 부분 그림이다. 윗 그림은 차수 간격이 넓은 4000 Å 영역이고, 아랫 그림은 차수 간격이 제일 좁은 8050 Å 영역이다. 그림에서는 차수를 분리하여 점선으로 표시함으로써, 상겹침 영역에서의 바닥의 모양을 알 수 있도록 하였다.

평균 반치전폭(FWHM)이 7.6 화소로 나타나는 300 μm 광섬유는 그림 7의 우측에서 보듯이 겹치는 부분이 많아, BOES에서는 쌍으로 사용하기에 적당하지 않다. 평

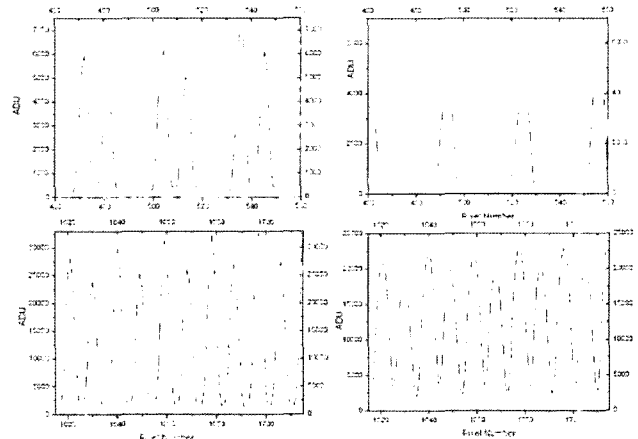


그림 7. BOES의 200(좌), 300 μm(우) 광섬유에서의 차수겹침. 위는 차수간격이 넓은 4000 Å 근처이며 아래는 차수간격이 좁은 8050 Å 근처에서의 바닥고르기 화면의 단면 그림이다. 각 그림에서 바닥 위치를 보이기 위해 점선으로 각 차수를 분리하여 표시하였다.

균 반치전폭 5.1화소로 나타나는 200 μm 광섬유는 겹치는 부분이 작아 쌍으로 사용하려면 200 μm 이하의 광섬유만 사용할 수 있다. 150 μm 광섬유에서는 평균 반치전폭이 3.8화소로 예상되며, 차수 사이에 산란광 부분이 잘 나타나리라 기대된다.

편광기에서 사용하는 Savart 판에서는 색분산과 비점수차 등이 있기에 편광기의 효율만 고려하면 광섬유 직경이 클수록 좋다. 그러나 위와 같은 이유 때문에 BOES 편광기에서는 150과 200 μm 광섬유만 사용할 예정이다.

그림 8은 BOES 편광기에서의 효율 점검을 위해서 광선 추적프로그램인 Zemax로 광섬유에서의 결상 크기를 계산한 것이다. λ/4 판에 대한 광학 자료는 얻지 못하여 두께 13 mm 인 방해석 판으로 하고, Savart 판은 5000 Å에서 두 결상이 0.5 mm 떨어지도록 방해석 각 판의 두께를 3.2 mm로 설정하였다. 입사광은 망원경 광축에서 3.6초 비축으로 입사되고, 4000 부터 8000 Å까지 여러 파장의 편광된 빛을 사용하였다. 그림 8에서 가운데 그림의 원 직경은 0.5 mm이며 좌우 그림의 중심원 직경은 광섬유 크기와 같은 150, 200 μm이다. 작은 150 μm 광섬유에서도 넓은 파장의 빛이 광섬유 안에 잘 들어가는 것을 볼 수 있다. 실제 결상 크기는 시상과 PSF(point spread function)을 합성한 것이 된다. 높은 효율을 위해서는 제작된 Savart 판에 의한 결상 이격 거리와, 제작 설치된 광섬유 위치가 정확히 일치하는 것이 필요하다.

현재는 4만5천보다 높은 파장 분해능이 필요할 때에는 효율이 떨어지는 80 μm 광섬유를 쓸 수 밖에 없는데, 새

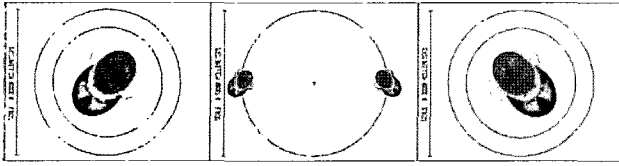


그림 8. 150, 200 μm 광섬유에서의 편광영상 결상 모습. 좌우 그림의 두원은 광섬유 크기와 같은 직경 150, 200 μm 이며, 중앙 그림의 원직경은 0.5 mm이다.

로 제작할 때는 100, 150 μm 광섬유를 추가하여, 6만과 7만5천으로 예상되는 파장 분해능으로도 관측할 예정이다. 이렇게 하여 단일 광섬유 5개(80, 100, 150, 200, 300 μm)와 쌍 광섬유 2중(150 μm x 2, 200 μm x 2)으로 총 9가닥의 광섬유를 새로운 시스템에서는 사용할 예정이다.

기존에는 Polymicro사의 STU 광섬유를 사용하고 있으나 새로 제작할 광섬유는 80 μm 광섬유를 제외하고는 STU 보다 빛투과율이 개선되어 출시된 FBP 광섬유를 사용할 예정이다. BOES에서는 광섬유 길이가 18.5 m가 되는데, 이 길이에서 두 광섬유의 빛 투과율 비교는 김강민 외(2004)의 그림 9를 참조한다.

4.2. 광섬유 입, 출구의 V자 홈

광섬유 입구 V자 홈은 BOES의 기존 슬릿 어셈블리에 설치되기에, 길이가 55 mm로 제한된다. 그림 6에서, 밝은 별이나 BOES 초점 조절용으로 사용하기에 슬릿 모니터링 시야가 중요하지 않는 80 μm 광섬유는 V자 홈 끝단에서 3 mm에 놓는다면, 광섬유 사이 거리를 7.5 mm 까지 떼어 놓을 수 있다. 노출 중, 다른 광섬유에 빛이 들어가는 것을 차단하는 슬릿 커버의 열린 부분을 12 mm로 하면 슬릿 모니터링 시야는 2.4분이 된다.

그림 8에서 보듯이 광섬유 입구 V자 홈 제작시, 윗덮개와 아래덮개의 공차는 20 μm 이하로 정밀하게 제작되어야 한다.

기존 광섬유 입구 V자홈은 너무 무거워서 방향 조정 스프링이 힘겹게 지탱하는 것으로 추측된다. 이것은 긴슬릿 방향 조정 나사를 움직이면서, V자 홈을 조금만 스쳐도 방향이 달라져, BOES의 효율이 많이 떨어졌던 경험이 있기 때문이다. 새로 제작될 광섬유 입구는 중간에 구멍을 크게 하여 무게를 지금의 절반 정도로 줄일 예정이다.

광섬유 출구 V자 홈에서는 높은 파장 분해능을 갖는 얇은 광섬유 일수록 중앙에 배치하고, 낮은 분해능을 갖는 굵은 광섬유는 양쪽 가로 배치한다. 이것은 포물 조준경에서는 비축 광선일수록 수차가 커지기 때문이다.

편광기에 사용할 쌍으로 된 광섬유는 CCD에서 상거리가 133 μm 가 되어야 하므로, 광섬유 출구에서는 서로를

380 μm 떼어 놓는다. 나머지 광섬유는 최대한 붙여서, 이웃하는 광섬유 버퍼 끝 사이 거리를 60 μm 로 하면 제일 바깥에 설치되는 광섬유 끝단까지의 거리는 BOES 포물 조준경 초점에서 1.3 mm 이내가 된다.

광섬유 입출구 V자 홈의 설치와 조정은 김강민의 (2004)에서 제시된 방법에 따른다.

5. 기계부 제작

편광 광학계를 지지하고, 이동과 회전을 시켜주는 기계부가 각 관측 모드에서 어떻게 움직여야 하는지를 먼저 정리하였다.

선형 편광을 관측할 때는 $\lambda/4$ 판은 뒤로 빠지고, Savart 판만 망원경 광축으로 와서 위치각을 0, 45, 90, 135도로 회전시키면서 관측한다. 그러나 Savart 판만 회전시키면, 초점에서의 결상 위치도 같이 회전하게 되어 고정 위치에 있는 광섬유에 빛이 들어가지 못한다. 따라서 Savart 판은 미세 조정 회전 마운트 위에 설치하여 회전각을 조정하여 광섬유에 빛이 입사되는 것을 확인하고, 고정시킨 다음에는 Savart 판이 실린 편광 광학계는 광섬유가 있는 CIM과 항상 일체로 회전하도록 한다.

원형 편광 관측에서는 Savart 판과 CIM의 위치각을 0도로 하고, $\lambda/4$ 판만 -45도와 45도로 회전하며 관측한다.

편광 모드를 사용하지 않을 때, 즉 영상 측광 관측이나 보통의 분광관측 모드에서는 이들 편광 광학계가 모두 비축에 있어야 한다.

따라서 편광 광학계 전체의 이동 기능이 있어야 하고, $\lambda/4$ 판은 별도로 이동과 회전 기능을 가져야 하며, 이들은 모두 원격제어가 되어야 한다. 선형 편광 관측시 Savart 판과 CIM의 동시 회전은 별도의 회전 기능 추가 없이, AGU의 기기 회전(instrument derotator) 모드를 이용한다. 이때 발생하는 불편함은 슬릿 모니터링 시야도 따라 돌아가는 것 외에는 없다. AGU가 45도씩 회전하는데, 1분 정도 소요되는데, BOES CCD의 읽기시간이 3분 30초 정도 걸리기에 노출을 마치고, CCD 읽기 시간동안 AGU 기기 회전을 한다면 시간의 낭비는 없는 셈이다.

편광 광학계 전체의 이동 범위는 현재 2k CCD를 사용할 때에 빛가림이 없으려면 편광 광학계 마운트 끝단이 광축에서 70 mm 만 떨어지면 되나, 차후 보다 큰 측광용 CCD를 사용할 가능성이 있기에, 이동 거리를 128 mm 이상으로 하여 망원경 배플 주경쪽 바깥까지 이동하도록 한다. 그 위에 장착된 $\lambda/4$ 판은 70 mm의 선형 이동과, 스텝모터와 베벨(bevel)이나 웜기어(worm gear)를 이용하여 ± 45 도 회전하는 기능을 갖추게 될 것이며, 그 회전 정밀도는 ± 1 도 이다.

편광광학계 전체는 BOES CIM 플랜지 앞 대신에, 망원경 AGU 판에 부착할 계획이다. CIM 플랜지 앞에 부착하면 설치 및 실험실 시험이 편리한 장점이 있기는 하지만, 공간 확보가 불리하고, CIM을 망원경에 부착할 때 편광광학계가 파손될 위험 부담이 있기 때문이다. 편광광학계가 망원경 쪽에 붙게 되면, 망원경에 붙는 모든 기기에 의한 편광 관측이 가능하여, 편광 영상관측도 할 수 있게 된다. 다만 설치 및 실험실 시험을 위해서는 같은 위치에 편광기 광학계가 올 수 있도록 CIM 플랜지 앞에도 편광 광학계의 탈부착이 가능한 레일을 설치한다.

6. 편광기 조정 및 설치

6.1. 편광 상거리 측정

제일 먼저 할 일은 Savart 판에 의해 편광 방향에 따라 두 개로 나뉜 상의 거리를 정밀하게 측정하는 것이다. 방법은 레이저, 핀홀, 광선 확대기(beam expander), f/8 빔을 만드는 광학계, 회전 마운트 위에 장착된 선형 편광기, Savart 판을 순서대로 광학 테이블 위에 세워 놓는다. 광학계를 정렬한 후에는 시력 보호를 위하여, 레이저 대신 액체 광섬유(liquid fiber)로 전달되는 텅스텐 불빛으로 광원을 바꾸고, 색분산을 줄이도록 색필터를 설치하고, Savart 판 뒤에 눈금자가 있는 현미경을 놓는다. 현미경 대신, 셔터 있는 CCD를 선형 이동 레일 위에 설치하여 사용할 수도 있다. 선형 편광판을 회전시키면, 어떤 위치에서는 두 상의 밝기 차이가 가장 크고, 45도를 더 돌리면 두상의 밝기 차이가 최소가 되며, 다시 45도를 더 돌리면 처음 밝았던 상은 제일 어두워지고, 처음 어두웠던 상이 제일 밝아진다. 같은 방향으로 선형 회전판을 계속 돌리면 1회전에 4번 이러한 현상이 반복된다. 두 상이 같이 나타날 때 눈금자 붙은 현미경(혹은 CCD)으로 상거리를 재고, 선형 회전판을 90도와 180도 더 돌렸을 때도 같은 거리가 나오는지 확인한다. 이 측정된 상거리만큼 쌍 광섬유 거리가 되도록 광섬유 입구 V자 홈을 제작한다. 이 상거리의 측정은 현미경 대신 CIM 슬릿 어셈블리를 이용하여 재확인 할 수도 있다. 즉 슬릿 어셈블리 인코더 값이 3만 변할 때, 6 mm 이동하는 것을 이용하여 선형 편광기의 편광 방향을 90도 돌렸을 때의 상 이동 거리를 BOES로 스펙트럼을 찍어보면서 확인할 수 있다.

6.2. 편광 광학계의 방향 설정

앞서와 같은 광학계 배치에서 선형 편광기의 편광축을 수직으로 놓는다. Savart 판을 회전시켜 편광상 밝기 차이를 가장 크게 만든 다음 고정 클램프를 죄어 준다. 이때의 Savart 회전각을 0도로 설정한다.

다음에는 λ/4 판을 Savart 판 앞에 설치한다. λ/4 판

을 회전시켜서 어두웠던 편광상이 가장 밝아지는 각도를 찾는다. 이때의 λ/4 판 회전각을 0도로 설정한다.

λ/4 판과 Savart 판을 치우고, 대신 또 다른 선형 편광판을 설치하는데, 이것의 편광축을 수평으로 하여 빛이 통과되지 않도록 한다. 선형 편광판 사이에 λ/4 판을 두고 회전시키면서 아까 설정하였던 λ/4 판 회전각 0도에서 투과 광량이 가장 밝아지는지 확인한다.

이 편광 광학계를 망원경의 AGU 판에 설치할 때에는 망원경이 남중을 향하도록 하고, 이 각도가 그대로 유지 되도록 설치한다.

망원경이 남중방향을 향할 때, CIM에 있는 광섬유 쌍 방향은 동서로 되어 있어 Savart 판을 통과한 두개의 편광상 방향은 광섬유 쌍 방향과 일치하지 않는다. 망원경 AGU 판은 그대로 두고, 망원경의 기기 회전을 이용하여 CIM을 돌려서 편광상이 광섬유 쌍과 일치하도록 한다. 이때는 슬릿 모니터링을 이용한다. 이후 망원경의 방향에 따라 AGU판과 CIM이 같이 회전하도록 한다.

7. 편광 관측 방법

선형 편광기(linear polarizer)를 가지고 I, Q와 U를 측정하는 방법은 다음과 같다. 선형 편광기를 0, 45, 90, 135도로 돌리면서 빛의 세기를 측정한다. I₀를 위치각 θ에서의 광량이라 하면, I, Q, U는 다음 식에서 알 수 있다.

$$Q/I = (I_0 - I_{90}) / (I_0 + I_{90})$$

$$U/I = (I_{45} - I_{135}) / (I_{45} + I_{135})$$

$$I = I_{\theta} + I_{90+\theta}$$

보현산 천문대 편광 분광기에서는 선형 편광기 대신 Savart 판을 사용하는데, 관측시 스토크스 인자별로 편광 광학계의 위치와 회전각을 정리하면 표 3과 같다.

선형편광과 관련된 Q, U를 측정할 때에는 λ/4 판 없이 Savart 판만 광축에 오게한 다음, Savart 판과 광섬유 입구 V자 홈을 일체로 하여 회전시키는데, 북쪽을 기준으로 하여 위치각 0도에서 관측하면, 0도와 90도로 편광된 성분이 기록되면서 Q/I(정규화된 Q)를 얻는다. 45도에서는 마찬가지로 135도로 선형 편광된 자료까지 같이 얻기 때문에, U/I(정규화된 U)를 얻는다. 그러나 일반적으로 광섬유 쌍거리 투과율이 서로 다르기 때문에, 보다 정밀한 측정을 위해서는 편광된 빛을 광섬유를 바꿔 들어오도록 함으로써, 기기 오차를 보정해줄 필요가 있다. 이때는 0도와 90도에서 Q/I를, 45도와 135도에서 U/I를 얻는다. 즉 한 별을 0, 45, 90, 135도에서 한번씩, 총 네 번 관측으로 선형 편광과 관련한 스토크스 인자를 얻는다. I는 네 번 관측한 자료의 평균으로 구하는데, 물론 편광 표준성 관측을 이용한 눈금조정 과정을 거쳐야 한다.

표 3. 스톡스 인자별 편광 광학계의 위치각. x는 망원경 광축에서 빠진 상태를 의미한다. 정밀 측정을 할 때는 *에서와 같이 90, 135도에서도 관측한다.

스토크스 인자	I, Q, U	V
$\lambda/4$ 판	x	-45, 45
Savart + 광섬유입구	0, 45 (90, 135)*	0

원형 편광과 관련된 V는 Savart 판과 광섬유 입구 V자 홈을 위치각 0도에 두고 $\lambda/4$ 판을 위치각 -45도와 45도에 두고 각각 관측한 자료에서 얻는다.

BOES 편광 스펙트럼은 같은 차수가 두줄씩 수직으로 나타나는데, 왼쪽선의 스펙트럼 세기를 L, 오른쪽선 세기를 R이라 하고, 여기에 위치각을 아랫첨자로 표시한다면,

$$Q/I = (L_0 - R_0) / (L_0 + R_0)$$

이 된다. 위치각 90도에서 관측하면 L_0 로 나타났던 편광은 R_{90} 으로 나타나고, R_0 은 L_{90} 이 되기에

$$Q/I = (R_{90} - L_{90}) / (R_{90} + L_{90})$$

이 된다. 여기서 $L_0 + R_0 = R_{90} + L_{90} = I_u + I_p = I$ 이며, 0도와 90도에서 각각 관측한 결과에서 구한 Q/I는 이 둘을 평균한다. 즉,

$$Q/I = [(L_0 - R_0) - (L_{90} - R_{90})] / [(L_0 + R_0) + (R_{90} + L_{90})]$$

마찬가지로 U와 V는 다음과 같이 된다.

$$U/I = [(L_{45} - R_{45}) - (L_{135} - R_{135})] / [(L_{45} + R_{45}) + (R_{135} + L_{135})]$$

$$V/I = [(L_{45} - R_{45}) - (L_{-45} - R_{-45})] / [(L_{45} + R_{45}) + (R_{-45} + L_{-45})]$$

Q, U에서는 첨자가 Savart 판과 광섬유 입구의 위치각인 반면, V에서는 $\lambda/4$ 판의 회전 위치각이기에 L, R을 이탤릭체로 달리 표시하였다.

편광 위치각 ψ 와 편광도 π , π_L , π_E 는 2장에서 제시한 수식을 이용하여 구한다.

8. 요약 및 논의

보현산 천문대에서는 1.8 m 망원경에 편광 광학계를 설치하여, 기존의 BOES와 연결, 고분산 분광 편광관측이 가능하도록 할 계획이다.

고분산 편광 분광관측에는 150과 200 μm 의 두 가지 광섬유를 사용할 계획이며, 파장 분해능은 각각 60,000과 45,000이 된다. 기존 BOES에서는 파장분해능이 30,000, 45,000과 90,000이었으나, 단일 천체 분광용으로 100과 150 μm 광섬유를 추가함으로, 파장분해능 75,000과 60,000으로도 분광 관측을 할 수 있다. 새로 설치되는 광섬유는 기존 STU보다 단파장에서 투과율이 개선된

FBP를 사용할 계획이다.

BOES에서는 요오드통을 이용하여 초속 4m 정도의 정밀성으로 시선속도를 측정할 수 있기 때문에, 이 자료와 함께 관측하면 보다 정밀한 자기장 측정이 가능할 것으로 생각된다.

이 편광기는 원형 편광과 선형 편광 관측이 모두 가능하나, 보현산의 급변하는 기상 상태 때문에 원형 편광 관측에 주로 이용될 것으로 추정된다.

BOES 대신에 긴슬릿 분광기와 결합하면 중분산으로 편광 관측을 할 수 있고, 영상 측광용 CCD와 결합하면 편광 측광 관측도 가능하기는 하다. 그러나 긴슬릿 분광기에서는 원형 편광이 $\lambda/4$ 판을 거치면서 선형 편광으로 바뀌고, 선형 편광 방향에 따라 격자에서의 반사 효율이 크게 차이가 난다는 문제가 있다. 측광 CCD에서의 편광 영상측광도 자동추적기 사용이 불가능한 상태에서 두 편광상이 0.5 mm (7.2각초, 21화소)밖에 떨어져 있기 때문에 별상을 분리하는 것이 쉽지 않은 문제가 있다.

이 편광기를 제작하는데 7천만원 정도의 재료비가 소요되며, 2006년 초부터 제작을 시작하면 여름기간에 설치하여, 가을 시험관측을 거쳐서 2007년 상반기부터는 1.8 m 망원경으로 편광 분광 관측연구가 가능할 것으로 본다.

참고문헌

김강민, 장비호, Galazutdinov, G., 윤태석, 2004, 보현산천문대 고분산 에셀 분광기(BOES)의 광섬유 부분 제작과 설치, 천문학논총, 19, 47

Donati, J-F, Catala, C., Wade, G. A., Gallou, G., Delaigue, G., & Abou, P., 1999, A dedicated polarimeter for the MuSiCos échelle spectrograph, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 134, 149

Eversberg, E., Moffat, A. F. J., Debruyne, M., Rice, J. B., Piskunov, N., Bastien, P., Wehlauf, W. H., & Chesneau, O., 1998, Hot Stars in All Four Stokes Parameters, PASP, 110, 1356

Ikeda, Y., Akitaya, H., Matsuda, K., Kawabata, K. S., Seki, M., Hirata, R., & Okazaki, A., 2003, Development of high resolution spectropolarimeter, LIPS, SPIE Proc. 4843, 437

Kitchen, C. R., 1984, "Astrophysical Techniques", Adam Hilger Ltd. pp332-352.

Samoylov, A. V., Samoylov, V. S., Vidmachenko, A. P., & Perekhod, A. V., 2004, Achromatic and super-achromatic zero-order wave plates, Journ. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 88, 319