

보현산천문대 고분산 에셀분광기(BOES) 제작¹
CONSTRUCTION OF THE BOAO ECHELLE SPECTROGRAPH (BOES)

김강민^{2,3}, 장정균², 천무영², 박병곤^{2,3}, 형식², 한인우², 윤태석³, Steven S. Vogt⁴

²한국천문연구원 보현산천문대

³경북대학교 천문대기과학과

⁴미국 리크 천문대

KANG-MIN KIM^{2,3}, JEONG GYUN JANG², MOO-YOUNG CHUN², BYEONG-GON PARK^{2,3}, SIEK HYUNG²,
INWOO HAN², TAE SEOG YOON³ AND STEVEN S. VOGT⁴

²Bohyunsan Optical Astronomy Observatory, Korea Astronomy Observatory: kmkim@boao.re.kr

³Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University

⁴Lick Observatory, U.S.A.

Received Jul. 31, 2000; Accepted Aug. 4, 2000

ABSTRACT

The BOES (BOAO Echelle Spectrograph), a fiber-fed echelle spectrograph of the BOAO 1.8 m telescope, has been designed and now is being manufactured. The BOES follows a white pupil design collimated with two off-axis parabolic mirrors. The 136 mm collimating beam leaving the 41.59 grooves/mm R4 echelle grating is refocused near the narrow folding mirror. Through the two cross-disperser prisms and $\phi 250$ mm ($f/1.5$) transmission camera, the beam images on EEV $2k \times 4k$ CCD. The BOES can take the wavelength range of 3700 to 10100 Å at a single spot with spectral resolution $R = 20000$ to 40000 depending on the fiber set employed. We describe the key sciences and performance, current status of construction, and future plan of the BOES.

Keywords: astronomical instrumentation, spectrograph, high resolution, fiber-fed

1. 서론

보현산천문대에서는 1996년 11월부터 천문대의 국책연구사업 (구 스타프로젝트)의 일환으로 1.8 m 망원경의 관측기기로 고분산 에셀분광기(BOES; BOAO Echelle Spectrograph)를 제작하고 있다. 2002년 상반기 완성을 목표로 진행되고 있는 BOES는 현재 광학계와 기계부에 대한 설계가 끝나고 주요 광학계가 제작 중에 있으며 기계부 제작이 진행되고 있다.

분광기를 제작하기 위해서는 먼저 핵심 연구과제를 설정하고 이를 구현하기 위한 분광기 규격을 정해야 한다. BOES 계획이 추진되면서 분광기를 이용한 주요 연구분야를 설정하기 위하여 분광관측 경험이 있는 국내 천문학자들의 의견을 조사하고, 외국 전문가의 자문과 더불어, 앞으로 분광관측 수요 분야도 고려하여 BOES의 주요 연구분야를 다음과 같이 설정하였다.

1. 우리 은하 안의 별, 성운과 성간물질의 화학원소의

¹본 연구는 과학기술부가 지원하는 국책연구 "광학, 전파 망원경을 이용한 천체 분광 관측 연구"의 지원으로 진행되고 있습니다.

진화와 동역학 (kinematics)

2. 외부 은하와 HII 영역의 화학성분과 동역학
3. 혜성, 행성, 분광쌍성 등의 분광학적 연구
4. K형, M형 또는 만기형 별의 화학 조성비
5. 우리 은하 Baade window 안의 만기형 별의 분광선 모습
6. δ Scuti 변광성의 화학원소
7. 타원은하 내에 존재하는 구상성단의 MgII, H β , H γ 선유폭 연구
8. 외계행성 탐색 및 성진 (asteroseismology) 연구
9. RS CVn형, Ap형 별의 자기활동, 자전, 채층활동 연구 등이다.

이러한 연구가 가능하기 위해서 분광기는 다음 요건을 갖추어야 하는데 이들 하나 하나가 구현하기 쉽지만은 않은 조건들이다.

1. 파장 분해능이 30000 이상은 되어야 하며,
2. 관측 파장 범위는 [O II] $\lambda 3727\text{\AA}$ 을 포함하여 0.37 μm 에서 1 μm 까지 관측할 수 있어야 하고
3. 퍼진 천체(extended objects)의 분광관측도 가능하도록 차수 분리 정도가 충분히 크고
4. 1.8 m 망원경으로 3 m급 정도의 망원경과 경쟁력이 있기 위해서는 효율이 좋아야 하며
5. 산란광이나 밝은 방출선에 기인한 고스트(ghost) 등이 거의 없어야 하며
6. 시선속도 정밀측정을 위해서는 요오드 튕(iodine cell)을 채택하여야 한다.

1.8 m 망원경의 관측기 부착 한계 (무게 150 kg, 길이 125 cm) 때문에 이러한 성능을 구현하기 위해서는 1.8 m 망원경의 구조상 카세그레인 분광기보다는 광섬유를 사용해 망원경에서 따로 떨어져 있는 분광기로 빛을 전달하는 방식(fiber-fed)을 채택하기로 하였다.

BOES는 CIM(Cassegrain Interface Module), 광섬유, 분광실에 따로 설치된 분광기 부분 등 크게 세 부분으로 나누어진다. CIM은 1.8 m 망원경의 카세그레인 초점에 붙어서, 보정광원(calibration lamp)을 슬릿에 넣어주고 슬릿을 모니터링하는 역할을 하며, 광섬유는 별빛을 망원경에서 분광실로 옮겨주며, 분광실 안의 광학테이블 위에 설치되는 분광기는 광섬유를 통해 전달된 빛을 광학계로 분산시켜 최종 분광선을 얻게 한다. 이 중 CIM은 천무영 외(2000)에서 별도로 다루었기 때문에 본 논문에서는 이를 제외하고 나머지 BOES 부분의 구조와 제작방향, 앞으로의 계획과 BOES의 예상되는 성능을 제시한다.

2. BOES의 특징

BOES의 분광기 부분의 전체적인 구조는 그림 1과 같다. 이것은 quasi-Littrow 방식의 dual white pupil (Baranne 1972) 구조로 경제적이면서 고효율이라는 점 때문에 ESO천문대 VLT의 UVES, Calar Alto 천문대 3.5 m 망원경의 FOCES(Peiffer et al. 1998), McDonald 천문대 HET 망원경의 HRS(Tull 1998), ESO 천문대 1.52 m 망원경의 FEROS (Kaufer and Pasquini 1998) 등 최근 개발된 분광기에서 많이 채용하고 있다. 이 구조가 고효율인 것은 격자 입사각을 격자 흡수직면(facet normal)과 0.6도 차이를 두어 거의 Littrow 구조에 따르도록 하였기 때문이며, 경제적인 것은 크기에 따라 기하 급수적으로 가격이 상승하는 격자와 프리즘 위치를 망원경 주경의 동(pupil)의 결상 위치에 둬므로 최소 크기의 격자와 프리즘을 사용할 수 있기 때문이다.

광섬유에서 나온 $f/8$ 빛은 비축(off-axis) 포물경인 제1조준경(main collimator)에서 반사되면서 평행광이

되어 에셀격자에 0.6도의 각으로 입사된 후, 격자에서 분산된 빛은 다시 제1조준경과 평면경, 그리고 제2조준경(transfer collimator)에서 반사된 후 수직 분산장치(cross disperser)인 2개의 프리즘을 거쳐 카메라를 통과하여 CCD에 결상하게 된다.

BOES의 조준광(collimated beam) 직경은 136 mm이고, blaze 각이 76.05도인 R4 에셀격자를 사용하여 throughput(단위:각초)은 125000이며 3700 ~ 10100 \AA 까지의 가시광 전 파장영역을 15 μm , 2048 × 4096 소자의 CCD 한 프레임에 담는다.

또한 광섬유를 두 세트 준비하여 관측목적에 따라 슬릿 크기를 달리하여 관측할 수 있게 하였는데, 이것은 그동안 개발된 광섬유 분광기 중에서 처음 시도되는 것으로 생각한다.

BOES는 그 주요 연구분야중 하나인 정밀 시선속도 측정(외계행성 탐색, 성진 연구 등)을 위해 요오드 튕을 CIM 앞에 두어 별빛의 분광선에 요오드의 아주 폭이 좁은 흡수선들이 겹쳐 나타나게 함으로써 시선 속도의 정밀성을 초속 수 m까지 높여주는 기능도 있다.

BOES는 1.8 m 망원경에서 사용하기 때문에 외국의 망원경에 비해 구경이 작아, 이들과 경쟁하기 위해서는 높은 효율이 요구된다. 우리는 BOES 효율의 목표를 Lick 천문대 3 m Shane 망원경에 붙어 사용하고 있는 HES 분광기를 대상으로 상정하고 있다. Shane 망원경은 보현산천문대 1.8 m 망원경에 비해 면적비가 3배가 되므로 BOES의 효율을 HES의 3배 정도 되게 함으로, HES와 같은 성능의 분광기를 만들고자 한다. 이의 구현을 위해 설정한 BOES 각 광학계 부품의 규격과 제작 진행상황, 그리고 앞으로의 계획을 다음에 정리하였다.

3. 광섬유

광섬유는 현재 개발된 것 중 투과율이 가장 좋은 Polymicro Tech.사의 STU 광섬유를 사용한다(Schoetz et al. 1998). 광섬유는 코어직경 200 μm 짜리 2개(광섬유 세트#1)와 400 μm 짜리 하나(광섬유 세트#2)를 설치하여 관측목적에 따라 광섬유를 선택할 수 있게 하였다. 광섬유는 입사광의 초점비가 작을수록 초점비 나빠짐(Focal Ratio Degradation, FRD)이 작아지기 때문에 BOES는 1.8 m 망원경의 $f/8$ 부경에 사용한다. 200 μm 코어는 2.9초에 해당하며, 슬릿에서 두 광섬유를 1분(슬릿 모니터링 시야는 2.8분) 떼어놓아, 2개중 하나는 천체를, 다른 하나는 배경하늘을 동시에 관측할 수 있도록 하는데, 이때 파장 분해능 R 은 40000 정도가 된다. 400 μm 코어(5.7초)는 퍼진 천체 관측에 사용하며 R 은 20000 정도가 된다.

코어직경 200 μm 짜리 광섬유에서 입사광 초점비가 8일 때는 초점비 나빠짐(FRD)으로 인한 빛 손실이 30 %인 반면 초점비 6.3에서는 5% (Barden 1998)인 것과, 슬릿에

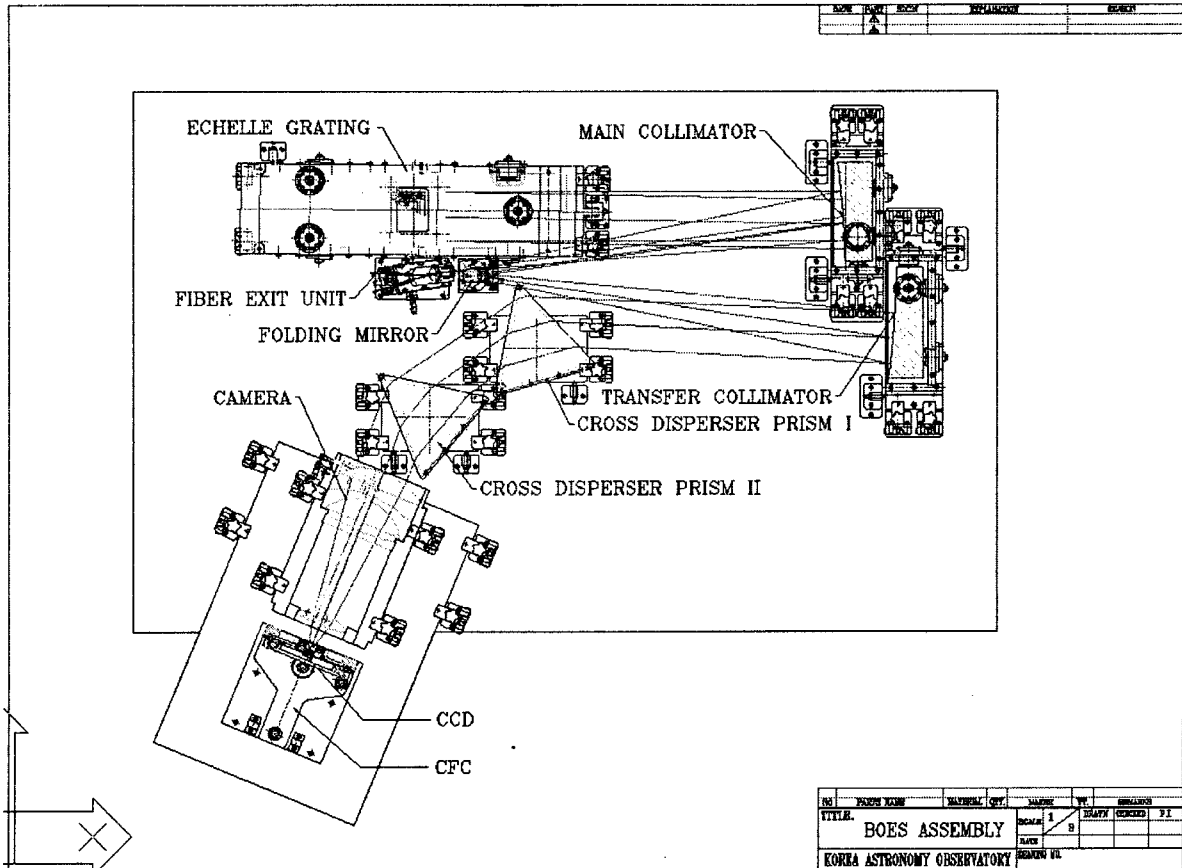


그림 1.— 광학테이블 위에 설치될 BOES 분광기의 모습

마이크로렌즈 없이 광섬유를 설치하는데 있어서 상당한 빛의 손실과 추적의 어려움(Kaufer 1999)이 있기는 하지만 마이크로렌즈(전형적 크기 직경 1 mm, 길이 2 mm)는 광대역 무반사 코팅의 어려움, 광축을 1도 이내로 맞추어 설치하기 등의 어려움이 있고, 이것이 잘못되면 30% 이상의 빛의 손실이 생길 수 있기 때문에 (Vogt 1999) BOES에서는 빛 손실을 감수하면서 마이크로 렌즈는 사용하지 않기로 하였다.

광섬유의 초점비 나빠짐은 입사광 초점비 뿐 아니라 광섬유 선의 곡률이 작아도 발생한다. 이를 방지하기 위해 광섬유를 주름관 안에 두어서 곡률반경 100 mm 보다 더 굽지 않도록 할 예정이다. 또한 먼지가 광섬유 입구(fiber-input)를 막지 않도록 CIM 앞에 창을 설치한다.

광선추적에 의하면 광섬유 출구(fiber-exit)에서 두 광섬유 간격이 500 μm 보다 크면 8046 Å 부근에서 차수가 겹칠 우려가 있으므로 V자 홈(v-groove)을 이용해 두 광섬유 간격을 이보다 작게 설치하는 것도 필요하다.

광섬유는 특성상 단파장에서 투과율이 좋지 않기 때문에 [O II] $\lambda 3727\text{\AA}$ 등 단파장을 관측하기 위해서는 광섬유 길이가 짧을수록 유리하다. 이 때문에 분광실을 망원경과

가까운 2층에 설치하고, 광섬유가 망원경의 케이블트위스트를 통과하도록 하여 CIM에서 분광기까지 광섬유 길이가 14 m 정도로 가능하도록 하였다.

4. 분광기 부분

4.1. 조준경(Collimator)

조준경은 직경 600 mm, 초점거리 1088 mm인 포물경(파면오차 $\text{RMS } \lambda/15$)을 그림 2와 같이 둘로 나눈 두 개의 비축 포물경으로 구성되어 있다. 여기에서 제2조준경에 포물경의 중심을 포함하도록 한 것은 차후 광축을 잡는데 편하기 때문이다. 제1조준경은 조준광을 만들며 제2조준경은 프리즘에 평행광을 넣어줄 뿐 아니라 입사각 0.6도 때문에 제1조준경에서 생긴 수차를 보정하는 기능을 한다. 따라서 두 조준경의 광축은 일치해야 한다.

광섬유 출구에서 나온 빛은 CCD까지 제1조준경에서 두 번, 평면경에서 한 번, 제2조준경에서 한 번하여 총 4번 반사되기 때문에 이들 표면은 넓은 파장 범위에서 반사율이 높은 은코팅을 채용하였으며, 은코팅의 일반적인 단점인 수명이 짧은 문제도 Newport Thin Film Lab's SilverStar 방식의 코팅을 채용함으로 해결하였다. 현재 조준경은 금

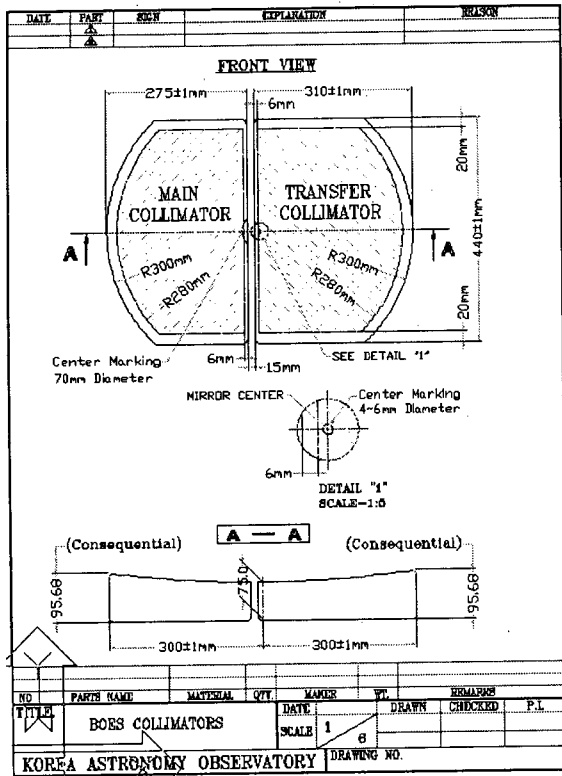


그림 2.— BOES 조준경, 600 mm 직경의 포물경을 둘로 잘라 내어 두 개의 비축 조준경을 만든다. 왼쪽의 작은 비축 포물경이 제1조준경이며, 오른쪽 큰 것은 제2조준경이다.

년 12월 도입 예정으로 프랑스 SESO사에서 제작 중에 있다.

4.2. 에셀 격자

41.59 grooves/mm, 격자면 크기 203 × 837 mm인 모자이크 (크기 214 × 840 × 125 mm의 Zerodur 유리 블록에, 203 × 411 mm 격자가 가운데 15 mm 간격을 두고 양쪽에 찍혀있는 수지가 붙어있음) 방식의 에셀격자는 Spectronics사(구 Lichardson Grating Lab)에서 제작하여 이미 국내에 도입되었는데 blaze 각은 76.05도(R4)로 측정되었다. 따라서 차수와 파장(단위 μm)의 곱 $m\lambda$ 는 격자 입사각 0.6도를 고려하여 46.6676이고, 46 ~ 130의 분광차수를 사용하는데, 4811.1 Å(97차)의 빛이 프리즘의 최소 편이각이 되고 CCD 중앙에 결상되는 중심파장이 되도록 분광기를 설계하였다.

4.3. 평면경

분광기 설치 공간(광학테이블)을 줄일 수 있도록 빛을 쬐어 주는 역할을 하는 평면경은 광선추적 결과 폭은 13.1 mm, 길이는 광축을 중심으로 -112.3 ~ 80.6 mm가 되어 200 mm가 필요하다. 실제 제작에서는 폭은 여유분을 고려하

고, 길이는 광축 중심으로 125 mm가 유지되도록 하여 20 × 250 mm이며 두께는 공간 여유분과 유리 휨을 고려하여 최대 가능한 30 mm로 하였으며 조준경과 같이 Zerodur 재질에 은코팅을 할 예정이다. 격자에서 분산된 136 mm 조준광은 평면경 위치에서 직경 15 mm에 수렴하므로 이 범위 내에서는 λ/15 로, 전체적으로는 λ/8정도(RMS)로 제작되어야 한다. 이것의 위치선정의 정밀성은 요구되지 않으나 좌우 방향조정(회전)이 필요하다. 현재 평면경은 국내 제작이 추진되고 있다.

4.4. 수직 분산장치 (Cross Disperser)

수직 분산장치로는 격자 대신 2개의 프리즘을 사용한다. 프리즘은 비록 가격은 높지만 넓은 파장 영역에서 효율이 고루 높고, 차수간의 간격 분리가 유리하여 관측 시야를 넓힐 수 있기 때문이다. 프리즘 재질은 일본 Ohara사의 S-BSL7Y (BK7 계통이며 근자외선 영역에서 투과율이 높은 특성이 있음)이며 꼭지각이 55도인 두 개의 프리즘(삼각형 밑변 × 옆변 × 기둥높이 = 264.2 × 286 × 265 mm)을 사용한다. 이것은 프리즘으로는 크기가 무척 크기 때문에 유리 매질내의 굴절율의 변화가 2×10^{-6} 보다 작아야 하며 표면의 광대역 무반사 코팅도 일반적인 고온이 아닌 저온에서 시행해야 한다. 고온코팅의 경우 유리 내부까지 균일한 온도 유지가 어렵고 또는 온도 유지가 안될 경우 불균일한 열팽창으로 인한 파손의 위험이 있기 때문이다.

Ohara사는 열처리시 담금질(annealing) 온도가 조금 낮았고 냉각 속도가 조금 빨라서 BOES의 프리즘 유리 제작 과정에서 한 차례 실패(복굴절, 균질 굴절율에서 불합격)하였다. 그후 재제작에 들어가 7월 말 프리즘 유리를 납품할 예정이며, 이 프리즘 유리는 미국 Zygo사로 보내 프리즘 가공을 하고, 이어 코팅 전문회사 (저온 초광대역 무반사 코팅이 가능한 회사는 세계에 몇 군데 없음)에 보내 무반사 코팅을 시행한 후 도입할 예정이다.

4.5. 카메라

구경 250 mm, 초점거리 383 mm (f/1.5), 시야각 9.5도인 카메라는 Corning (구 Optovac)사의 단결정 형석(CaF₂) 3개(1,3,5번 렌즈)와 Ohara사의 BAL25Y 2개(2, 6번 렌즈), PBL25Y 1개(4번 렌즈)하여 총 6개의 구면렌즈로 구성되어 있다. 마지막 6번 렌즈는 CCD 듀어의 창(window) 역할을 하며 서터는 직경 80 mm 이상 (Prontor사의 E100, 직경 100 mm 서터를 고려 중) 되는 것을 5번과 6번 렌즈 사이에 둔다.

먼저 기본설계에서 제시된 렌즈 크기보다 두께는 5 mm, 직경은 10 mm 정도 큰 실린더형 유리를 주문 도입하였다. 유리는 열처리 과정에 따라 굴절율이 달라지기 때문에 나중에 같은 재질의 유리를 주문해도 같은 굴절율의 유리를 확보할 수가 없다. 따라서 만일의 경우 카메라 렌즈가 사용 중에 파손되면 같은 성능으로 카메라를 복원하는 것이

불가능하다. 이에 대비하여 Ohara사 유리는 두매씩 구매하였다.

제작된 유리의 굴절율은 설계할 때 사용하였던 카다로 그에 제시한 굴절율과 차이가 있다. 따라서 유리 도입시 측정된 굴절율 자료를 이용하여 카메라의 설계를 수정하여야 한다. 먼저 Corning사에 제작한 형식의 굴절율 측정을 요구하였더니 이를 위해서는 렌즈 제작시 깎아버릴 양면을 연마(polishing)해야 한다(7,500불 소요)고 하였다. 형식은 순수 분말을 욕조에 넣고 결정을 키워가는 방식으로 제작하기 때문에 욕조의 온도, 농도 등 환경에 따라 굴절율을 변화가 있는지를 중국의 형식 제조 전문가인 재중교포장인화 박사께 문의하였고 굴절율에 있어 거의 차이가 없을 것이란 자문을 받아 Malitson(1963)이 제시한 굴절율 자료를 그대로 사용하기로 하였다. 제작이 끝난 Ohara사의 유리는 여섯 파장에서 측정된 굴절율 자료를 받아 이를 20°C에서의 굴절율로 환산한 다음, Schott의 분산식에 근사시켜 6개의 분산상수를 얻고 이를 사용하여 결상성능 최적화로 카메라를 재설계하였다. 이때 21개 기준 파장에서 구한 spot diagram은 그 RMS 반경이 대개 15 μm (CCD 소자 크기) 이하로 아주 좋게 나타났다.

국내기술로는, 비구면은 3차원 측정기를 이용하여 1 μm ($\sim 2\lambda$) 정도의 가공만 가능하나 구면은 RMS $\lambda/10$ 정도는 가능하기 때문에 처음에는 카메라의 국내제작 가능성을 타진하기 위하여 우수한 업체와 접촉하였으나, 국내 기업은 가공 중에 쪼개지기 쉬운 형식으로 큰 구경의 렌즈를 가공했던 경험이 부족하여 결국 외국에서의 가공으로 방침을 바꾸었다. 외국에서 카메라를 제작하는 방식에 있어서도 렌즈가공과 광대역 무반사 코팅, 그리고 하우징(housing)까지 일괄하여 한 회사에 의뢰하는 방식을 생각하였었다. 그러나 차후 논의과정에서 렌즈가 설계대로 가공된다 해도 6개 렌즈의 각 곡면과 두께에서 발생하는 공차의 누적으로 결상성능이 저하될 수 있다는 우려 때문에, 각각을 전문회사에 맡기고, 렌즈 가공후 곡면과 두께 측정 자료로부터 다음 곡면의 곡률과 두께를 다시 최적화하여 가공하는 방식을 채택하기로 하였다. 이를 위해 렌즈 가공에 대한 기술 제안 요구서를 작성하여 미국과 프랑스 등 7개 회사에 송부하였으며 7월중 업체선정을 마치면 보유하고 있는 유리를 보내 8월말부터 가공에 들어갈 예정으로 있다.

FEROS에서는 온도 변화에 따라 초점의 위치가 달라짐을 열팽창율이 큰 Derlin 막대기를 사용, 카메라의 위치가 자동으로 변하게 하여 항상 CCD에 초점을 유지하게 하는 장치를 간단한 방식으로 만들었다(Kaufer 1997). BOES도 같은 방식을 채택할 예정이다.

카메라와 CCD 듀어는 별도의 조립대(breadboard) 위에 설치한 다음 광학테이블 위에 고정시킨다(그림1). 이것은 광학테이블의 폭이 좁은 것이 주된 이유지만, 카메라와 듀어의 광축을 별도의 조립대 위에서 맞추고, 이를 광학테이블 위로 가져와 두 번째 프리즘에서의 상대적인 위치만

맞춰주면 되어 광축 맞추기가 편리하게 되는 장점도 있다.

4.6. CCD

BOES는 15 μm 소자의 2k \times 4k CCD에 맞게 설계되어 있으며 기존 제품 중 여기에 적합한 것은 SITE, Marconi Electronics(구 EEV)에서 생산되는데, 이중 단파장 영역의 양자 효율이 아주 우수한 Marconi의 CCD44-82 칩을 사용하기로 하였다.

CCD를 제어하기 위한 제어장치는 그동안 보현산천문대에서 충분히 활용경험을 쌓은 SDSU 제어기를 사용하기로 하였다. 이 제어기는 현재 보현산천문대가 보유하고 있는 2대의 영상관측용 CCD 카메라와 1대의 중분산 분광기용 CCD 카메라에 장착하여 사용중이다. 단지 BOES용은 기존에 사용한 제 1세대 SDSU 제어기 대신 보다 안정적인 동작과 빠른 데이터 전송을 지원하는 제2세대 SDSU 제어기를 채택할 예정이다. CCD 카메라의 최적화 및 구동 프로그램 등은 보현산천문대에서 그동안 충분한 기술을 확보하였기 때문에 별로 문제될 것은 없다고 판단된다.

4.7. 연속공급형 냉각기 (CFC)

냉각장치의 경우 기존의 영상관측용 CCD 카메라 등에서 널리 쓰이는 냉각 방식은 약 3리터 정도 용량의 듀어에 액체질소를 담아 이 액체질소가 모두 증발할 때까지 CCD 카메라를 냉각시키며 온도 제어기를 이용하여 온도를 약 -100°C 정도로 일정하게 유지한다. 이 방식으로는 CCD의 온도를 대략 20시간정도 일정하게 유지할 수 있다. 그러나 BOES의 경우 분광실 내의 온도를 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하여야 하기 때문에 증발하는 액체질소에 의한 실내온도 변화를 막아야 하고 액체질소 보충을 위해 관측실의 문을 여닫는 횟수도 최대한 억제해야 하는 어려움이 있다. 따라서 BOES를 위한 냉각장치는 이미 성공적으로 개발되어 ESO의 FEROS와 UVES에서 활용하고 있는 연속공급형 냉각기를 사용하기로 하였다. 이 냉각기는 대용량의 액체질소 탱크로부터 공급관을 통하여 듀어에 연속적으로 액체질소를 공급받으며 설정온도에 따라 공급되는 액체질소의 양을 통제할 수 있고 증발되는 기체는 배기관을 통하여 관측실 외부로 배출시키는 구조로 되어 있어서 관측실내 온도를 일정하게 유지하는데 매우 적합하다. 또한 액체질소 고갈시 외부의 대용량 탱크만 다시 채우면 되므로 에셀분광기의 설계조건을 충족시킬 수 있는 장점이 있다. 우리는 ESO의 연속공급형 냉각기 개발자인 Lizon에게 기술지원을 요청하여 냉각기 설계도와 구성부품, 그리고 성능시험 등의 자료(Lizon 1999)를 받았으며 관련 부품들을 구매하여 실제 제작에 필요한 준비를 완료하였다. 냉각기의 실제 제작은 관련 부품들을 조립하여 실험실에서 진공도 시험과 냉각 시험, 온도 유지실험 등과 함께 이루어질 예정이며 제작의 전 과정에 Lizon이 함께 참여할 예정이다.

4.8. 광학계 마운트

아무리 우수한 광학계라 할지라도 광학계 마운트가 잘못되면 경면에 변형이 생겨 제대로 성능을 발휘할 수가 없기 때문에 광기계부(optomechanics)는 매우 중요하다. 그러나 천문연구원은 물론 국내에 이분야 전문가가 거의 없는 실정이다. 우리는 ESO의 FEROS가 BOES와 유사한 점에 착안하여 광학계 마운트 설계를 외국에 유상 의뢰하는 대신 FEROS 개발 실무자인 Kaufer의 도움으로 FEROS의 광학계 마운트 거의 전 도면을 AutoCAD 파일로 받을 수가 있었다. 우리는 이를 분석하고 의문나는 사항은 Kaufer에게 문의하여 FEROS의 광기계부 도면을 이해할 수 있었으며, 이에 따라 BOES의 광학계 마운트를 보현산천문대에서 자체적으로 해결할 수 있게 되었다. Kaufer의 자료에는 그동안 ESO에서 수십 차례 시행착오를 거치며 실험한 결과로 얻어진 유리 및 쇠의 최적의 접착제 및 접합 방법, 광축 조절기구 등 귀중한 자료들이 포함되어 있다.

FEROS의 에셀격자는 R2를 사용하므로 154 × 306 mm 크기의 격자로 가능하였으나 BOES의 에셀격자와는 크기 차이가 많아 마운트의 구조 역학이 달라지므로 이를 참조할 수가 없었다. BOES는 격자 무게가 60 kg이나 되는 데다 먼지보호를 위해서 격자면이 아래를 향하도록 해야 했기 때문에 격자를 위에서 잡아 주는 마운트 설계에는 격자의 휨이 방지되도록 하는 하중 분석 작업이 요구된다. 이를 보현산천문대에서 감당하기에는 기술적으로 어려웠으나 VLT의 UVES 제작 담당인 Dekker의 도움으로 UVES의 에셀격자 마운트 제작도면을 얻을 수가 있었고, 여기에 blaze 각도와 배플의 위치 등 약간의 수정을 가하여 BOES 격자 마운트도 자체 설계할 수 있었다. 현재 광기계부는 설계가 완성되어 국내에서 제작중이며 필요한 Super-Invar와 Derlin 등의 재료구입도 마친 상태다.

BOES는 FEROS보다 카메라와 프리즘이 클 뿐 아니라 다른 광섬유 분광기와는 달리 광섬유를 교체할 수 있도록 광섬유 출구에 두 조의 광섬유를 수직으로 (공간배치가 수직으로 밖에 나오지 않는다) 배치하였기 때문에 BOES의 광축의 높이는 FEROS보다 30 mm가 높은 300 mm로 광학계 마운트를 설계하였다.

4.9. 분광실 관측 환경

분광실은 1.8 m 망원경동 2층의 기계실 (320 × 370 cm)을 사용할 것이다. 이것은 광섬유의 투과율이 짧은 파장에서 좋지 않아 망원경에서의 거리가 가까울수록 유리하기 때문이다. 건물진동에 있어서는 1층의 현 분광실에 비해서는 불리하나, 2층에서 돔을 회전하면서 측정된 진동을 Newport 진동 감쇄장치(광학테이블 다리) 자료와 합성하여 추정된 진동 정도는 우려할 만한 수준이 아닌 것도 확인하였다. 분광실의 환경은 온도, 습도, 진동, 먼지 등이 안정되어야 한다. 온도의 변화에 따라 광학계 부품의 팽창과 더불어 굴절률도 변화하여 결상성능이 나빠지기 때문이다. 일정한

온도 유지를 위해 냉각이 가열보다 어려운 점을 감안하고, 보현산천문대에서는 여름철은 정비기간으로 관측이 중지되기 때문에 관측기간 중 가장 기온이 높고 올라가는 6월 밤 산정의 기온을 근거로, 분광실의 실내온도를 20 (광학계 설계 온도) $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 결정하였고, 습도는 60 % 이하로 유지하기로 하였다. 항온 유지에서 아울러 신경써야 할 것은 시간당 온도의 변화량이 0.1도 이내를 유지하는 것이다(Kaufer 2000). 이것은 Derlin의 열팽창을 이용한 카메라 초점 맞추는 장치를 원활하게 작동하기 위해서이다. 분광실에 현재 설치 완료된 항온제습기에 의해 이러한 환경이 유지되고 있음을 확인하였다. 고분산 분광기의 부품은 먼지, 습기 등에 의해서 효율과 코팅의 수명이 단축될 수 있다. 특히 알루미늄으로 코팅된 에셀격자는 재코팅이 거의 불가능하기 때문에 관측(보관) 환경이 중요하다.

분광기는 1500 × 2400 × 200 mm 크기의 Newport 광학테이블 (Model M-RPR58-8) 위에 설치된다. BOES가 제대로 성능을 발휘하기 위해서는 산란광의 차단이 중요한데, 이를 위해 광학테이블 위 광학 부품이 설치되지 않은 곳은 산란광 방지를 위하여 검은 벨벳으로 덮는다. 또한 광섬유 출구 앞에 조리개를 설치하여 초점비 나빠짐으로 인해 $f/8$ 보다 빠르게 퍼져 나가는 빛을 차단하며, 평면경 앞에 빛이 수렴되는 부분에도 조리개를 두어 산란광을 차단한다. 그리고 각 광학계에서 산란되어 나온 빛이 다른 광학계에 영향을 주지 않도록 빛의 경로만 뚫고, 나머지는 무광 검정칠을 한 판으로 광학계 주위를 산란광 차단벽으로 막는다. 또한 경면의 먼지 보호를 위해서 무광 검정칠을 한, 2 mm 두께의 알루미늄으로 덮개를 만들어 분광기를 안전하게 덮는다. 여기에는 몇 개의 문이 있어 덮개를 완전히 제거하지 않고도 광학계 부품에 접근할 수 있게 한다.

5. BOES의 추정 효율

BOES가 지향하는 목표 중 하나는 고효율로 1.8 m 망원경으로도 구경 면적비가 3배쯤 되는 3 m급 망원경용 분광기에서의 분광관측까지 할 수 있도록 하는 것이며 Lick 천문대의 3 m Shane 망원경에 사용하는 HES 분광기를 벤치마킹 대상으로 하였다.

BOES 각 부품에서의 효율로부터 BOES의 총 효율을 계산하였다(표 1). 여기에서는 대기소광과 차수의 양끝단 부근의 파장에서 예상되는 비그네팅은 고려하지 않았으며, 별이 정확히 광섬유 중심에 계속 추적되고 있다고 가정하였다. 망원경에서는 주 부경의 반사와 함께 부경 가림의 영향을 고려하였고, 시상 2초에서 200 μm 코어(2.9초에는 별빛 75%가 통과)짜리 14 m 길이의 광섬유에서 초점비 나빠짐으로 인한 30%의 빛의 손실도 고려하였고, 에셀격자는 blazed peak에서의 값(0.65)으로 계산하였다. 그 결과, BOES의 효율은 HES (Vogt 1999)보다 1 μm 부근의 장파장 쪽을 제외하면 3배 정도의 효율을 보이며 0.4 μm 이하의 단파장에서는 그 이상 효율이 좋은 것으로 나타났다.

표 1. BOES의 추정 효율

파장(μm)	0.36	0.38	0.40	0.45	0.55	0.70	0.80	1.0
망원경	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.70	0.65	0.77
광섬유	0.33	0.38	0.41	0.44	0.45	0.45	0.46	0.46
조준경, 거울	0.95	0.97	0.985	0.99	0.97	0.99	0.99	0.985
에셀격자	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
프리즘	0.86	0.92	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.80
카메라	0.78	0.89	0.89	0.89	0.95	0.89	0.89	0.54
CCD	0.75	0.81	0.89	0.89	0.79	0.66	0.48	0.03
BOES	0.064	0.106	0.136	0.149	0.132	0.109	0.075	0.003
Lick HES	0.007	0.010	0.030	0.050	0.057	0.040	0.025	0.008

BOES에서는 많은 광학계 면을 사용하기 때문에 효율을 높이기 위해서는 반사율이나 무반사 코팅이 매우 중요하고 이것은 또한 산란광을 줄이는데도 역시 중요하다.

BOES의 효율 계산에서 광섬유가 가장 중요하게 나타났으며 계산시 추적문제는 고려하지 않았는데, 슬릿에 광섬유를 부착할 때 광섬유 클래딩과 슬릿의 접촉부분에서는 모니터링이 되지 않기 때문에 추적문제로 인한 빛 손실은 더 커질 수 있다.

6. 맺는 말

보현산천문대의 BOES 제작 연구사업에 대해, 일부에서는 우리의 경험부족과 제작결과의 신뢰성 때문에 turn-key 방식의 일괄 발주를 선호하는 의견도 있었으나, Lick 천문대에서 제시한 견적은 CCD와 연속공급형 냉각기, 에셀격자와 모든 코팅을 제외하고도 170만불(재료비 70만불과 인건비 및 관리비 등 100만불)이나 되고, 이를 포함하면 220만불 정도로 추정되어 보현산천문대에서 확보 가능한 예산(120만불)을 훨씬 초과하였다. 이에 따라 외국 전문가의 자문을 받으면서, 우리가 가능한 것은 직접 설계하고 일부를 국내에서 제작하며, 외국에서 제작해야 되는 물품도 물품별로 우리가 규격 및 제안 요구서 작성, 제안서 검토, 업체선정, 제작 일정관리, 검수 등을 직접 수행함으로써, 소요 예산의 절감을 기하는 방식으로 제작을 진행하고 있다. 이렇게 함으로써 관련 기술 습득과 더불어 원하는 규격과 성능의 분광기를 확보할 수 있을 것으로 기대하고 있다. BOES의 유료 자문자로는 Lick천문대의 HES분광기와 Keck 망원경의 HIRES 분광기를 개발하였던 Lick 천문대의 Vogt를 위촉하였는데, 천문대에서 유료 자문자를 두고 기기 개발을 시도하기는 이번이 처음이다. 또한 FEROS를 개발하였던 ESO의 Kaufer와 북경천문대 2.14 m 망원경의 고분산 에셀분광기를 개발하였던 장시앙에게도 필요에 따라 자문을 받고 있으며, 국내 광학 설계 전문가와 광학계 성능 검사 전문가의 도움도 받고 있다. 우리의 경험부족으로 인한 개발 실패의 가능성은 위에서 언급한 국내의 자문자의 도움으로 줄어 들 것으로 생각한다.

BOES의 부품제작에 사용되는 기술들(모자이크 에셀격자, 높은 균질도의 굴절율이 요구되는 프리즘 유리, 초광대역 무반사 저온 코팅, 긴 수명의 은 반사막 코팅, 직경 255 mm의 단일 형석 결정 등과 관련된 기술)은 90년대에 들어와 개발된 최신 기술이라 이를 확보하고 있는 업체는 세계적으로도 한 두 군데에 불과하다. 이들 업체가 자체 일정에 쫓겨 우리 광학계 부품 제작에 적극적이지 않으면 BOES 제작 일정은 그만큼 늦어질 수밖에 없다. 카메라 렌즈에 사용하는 형석 유리에서 이런 어려움을 겪고 겨우 확보하였으며, Ohara사는 프리즘 유리 제작에 실패하여 재제작에 들어감으로써 BOES 제작 일정에 차질을 빚었다. 우리는 제작 일정이 다소 늦어지더라도 “State-of-the-Art”인 BOES의 우수한 성능 구현을 위해 최선을 다할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

그동안 BOES의 제작과 관련하여 자문을 하여준 중국의 장시앙, 장인화 박사와 ESO의 A. Kaufer, H. Dekker, J.-L. Lizon 박사께 감사를 드립니다.

참고문헌

천무영, 김강민, 장정균, 형식, 성현철, 장비호, 한인우. 2000, “BOES Cassegrain Interface Module”, 광학 천문학 워크샵 2000 - 천체분광학
 Baranne, A. 1972 in ESO/CERN Conference, ed. S. Laustsen & A. Reiz (Geneva), p.227
 Barden, S. C. 1998, Optics in Astronomy III, ASP Conference Series, vol. 152, p.14
 Kaufer, A. 1997, Final Design Report for the FEROS, Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl
 Kaufer, A. 1999, Email Communications
 Kaufer, A. 2000, 개인 면담
 Kaufer, A., Pasquini, L. 1998, SPIE Proceedings “Optical Astronomical Instrumentation”, ed. by D’Odorico, S., vol. 3355, p.844
 Lizon, J.-L. 1999, Technical Operating Manual of the VIMOS Continuous Flow Cryostat, ESO
 Malitson, 1963, Appl. Opt., 2, 1103

Pfeiffer, M. J., Frank, C., Baumuller, D., Fuhrmann, K., Gehren, T. 1998, *A&ASS*, **130**, 381
Schoetz, G. F., Vydra, J., Lu, G., Fabricant, D. 1998, *Optics in Astronomy III*, ASP Conference Series, vol. **152**, p.20

Tull, R. G. 1998, *SPIE Proceedings "Optical Astronomical Instrumentation"*, ed. by D'Odorico, S., vol. **3355**, p387
Vogt, S. S. 1999, Phase B Report of the BOES, BOAO