

보현산천문대 고분산 에셀 분광기(BOES)의 광섬유 부분 제작과 설치
MANUFACTURING AND INSTALLATION OF THE FIBER PARTS IN THE BOES

김강민¹, 장비호¹, G. Galazutdinov¹, 윤태석²

¹한국천문연구원, ²경북대 천문대기과학과

KANG-MIN KIM¹, BEE-HO JANG¹, G. GALAZUTDINOV¹, AND TAE SEOG YOON²

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

²Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

E-mail: kmkim@boao.re.kr

(Received November 30, 2004; Accepted December 14, 2004)

ABSTRACT

We present the detailed description on the fiber techniques adopted in the BOES: the design concepts and manufacturing of the v grooves, the procedures of the fiber polishing, adhering of the fibers to the v grooves, and the axis alignment of the fiber input and exit. The high efficiency and throughput of the BOES imply that the adopted fiber arts and the other optical components were well designed and properly treated. We learned that the relatively low efficiency of the 80 micron fiber comparing with the 200 and 300 micron fibers comes from the seeing and the guiding effects not from the poor fiber handling.

Keywords: astronomical instrumentation, spectrograph, fiber-fed, fiber technique

1. 서론

보현산 천문대에서 자체 개발한 고분산 에셀 분광기(BOES)는 2003년 하반기부터 1.8 m 망원경의 주 관측장비로 운용되고 있다. BOES는 1.8 m 망원경의 카세그레인 초점에 모아진 별빛을 광섬유로 옮겨서 망원경동 2층에 설치된 고분산 분광부에 전달하는 방식을 채용하고 있다. 이것은 1.8 m 망원경이 카세그레인 초점 하나 밖에 없으며, 이곳의 기기 설치 공간과 무게의 제한 때문에 광섬유 전달(fiber-fed) 방식을 채용할 수 밖에 없었다.

BOES에서 광섬유는 코어 직경 300 μm (시야 4.3 각초) 짜리 두 개 (광섬유 #1과 #2), 200 μm (시야 2.9 각초) 짜리 두 개 (광섬유 #3과 #4)와 80 μm (시야 1.1 각초) 짜리 한 개 (광섬유 #5)를 설치하여 관측 목적에 따라 광섬유를 선택할 수 있도록 하였다. 80 μm 광섬유는 고분해능 관측과 BOES 카메라 초점 조절에 사용되며, 200과 300 μm 광섬유가 주로 관측에 활용되는데, 300 μm 광섬유는 행성상 성운처럼 주로 어두운 퍼진 천체(extended objects) 관측용으로 사용한다. 200 μm 과 300 μm 광섬유가 두 개씩 있는 것은 하나는 관측 대상용이고 다른 하나는 배경하늘 관측용으로, 한번의 노출로 배경하늘 보정을 할 수 있도록 설계하였다. 이들은 카세그레인 초점에서 서로 6 mm (시야 1.4 각분) 떨어져 있다.

광섬유는 특성상 단과장에서 투과율이 좋지 않기 때문

에 OII 3727 등 단과장 영역을 관측하기 위해서는 광섬유 길이가 짧을수록 유리하다. 이 때문에 분광실을 망원경과 가까운 2층에 설치하고, 광섬유가 망원경의 케이블 트위스트(cable twist)를 통과하도록 하였더니 망원경의 CIM(Cassegrain Interface Module)에서 고분산 분광부까지 광섬유 총 길이는 18.5 m가 되었다.

BOES에서 사용한 광섬유는 Polymicro Technologies의 STU(Schötz et al., 1998)이며 버퍼(buffer)는 폴리아미드(polyamide)로 된 것을 택하였다.

광섬유를 지지하는 가장 일반적인 방식은 모세관(capillary tube)이나 커넥터 형식의 페룰(ferrule)을 사용하는 것이다. 모세관 방식은 얇은 관에 광섬유를 넣고 접착제를 관 입구 주위에 바르면 모세관 현상으로 접착제가 관 틈새를 타고 올라가 광섬유 표면과 관 내부에 접착제가 고루 발라진다. 이를 자외선 등이나 햇볕 아래 놓아 두면 접착제가 굳어져서 광섬유가 관에 붙게 된다. 광섬유 지지는 결국 이 관을 마운트하는 방식인데, 그동안 국내에서도 한 두 개의 광섬유를 사용하는 경우에는 이러한 방식을 이용하였다. ESO 천문대 2.2 m 망원경에 설치된 FEROS(Kaufer, 1997) 분광기에서는 광섬유 통신에서 흔히 사용하는 방식인 페룰을 채용하였다. 그러나 모세관 방식이나 페룰 방식은 그 두께 때문에 좁은 영역에 많은 광섬유를 설치해야 하는 경우에는 사용하기 어렵다. BOES

에서는 망원경에서 모아진 별빛이 광섬유로 들어가는 부분인 광섬유 입구(fiber input)나 광섬유를 통과한 별빛이 고분산 분광부로 나가는 부분인 광섬유 출구(fiber exit) 모두에서 폐를 대신 V자 홈(V groove)이 파진 판을 사용하였다. V자 홈에 광섬유를 설치하면 광섬유가 V자 홈의 두 접점에서만 닿게 됨으로써 광섬유에 과도한 힘이 전달되지 않는다. 광섬유에 힘이 가해지거나 곡률이 심하면 출사광에서 입사광보다 초점비(f 수)가 커져 빛 손실(FRD; f ratio degradation, Parry 1998, Avila 1998, Schmoll et al., 1998)이 생긴다. V자 홈 방식은 좁은 영역에 많은 광섬유를 설치할 때에 사용되는 방식이다.

본 연구에서는 BOES 광섬유부분의 제작 과정에서 사용하였던 V자 홈의 제작과 광섬유의 연마, 설치 방법을 제시하였다. 이것은 천문 관측기기 제작에서 광섬유의 활용도가 높아가는 상황에서 차후 다중 고분산 분광기를 비롯하여 광섬유를 이용한 측정기기를 개발하려는 사람에게 도움이 될 것으로 생각한다. 아울러 BOES의 광섬유 시스템의 성능을 살펴보고, 차후 개선 방안을 제시하였다.

2. V자 홈 제작

광섬유 입구에서는 광섬유 지지와 더불어 슬릿 모니터링을 위해서 빛을 슬릿 모니터링 광학계로 반사 시켜줘야 하는 기능도 필요하다. 광섬유 입구를 만드는 방식은 긴 슬릿을 만드는 방식과 비슷하게 얇은 스테인레스 판에 구멍을 뚫고 이를 연마하여 사용(Vogt, 1999)하기도 한다. 그러나 이 경우에는 연마된 광섬유 끝을 상하지 않으면서 구멍 사이에 정확히 위치시키는데 큰 어려움이 있다. BOES에서는 V자 홈 위에 광섬유를 놓고 에폭시 접착제로 고정된 다음 윗덮개를 덮는 방식으로 처리하였으며 V자 홈 끝 단면 자체를 슬릿 모니터링을 위해 8도 기울어진 거울로 만드는 방식으로 광섬유 입구를 설계, 제작하였다(그림 1). 연마된 거울면이 부식되지 않도록 V자 홈은 스테인레스로 제작하였으며 반사율을 높이도록 알루미늄 코팅을 하고 그 위에 SiO_2 하드코팅을 덧씌워 연마면과 알루미늄 코팅이 상하지 않도록 하였다.

광섬유 배치는 광섬유 입구 V자 홈 한쪽 끝단에서 10, 16 mm 되는 곳에 300 μm 광섬유(광섬유 #1과 #2)를, 26, 32 mm 되는 곳에 200 μm 광섬유(광섬유 #3과 #4)를, 42 mm 되는 곳에 80 μm 광섬유(광섬유 #5)를 두었다. 이것은 슬릿 모니터링 CCD가 보는 광섬유 입구 면적이 11 x 11 mm인 것을 고려한 것이다. 다른 광섬유를 통해 빛이 들어가지 않도록 광섬유 입구 앞에는 구멍 크기가 16 x 22 mm인 슬릿 덮개를 설치하였다. 구멍이 한쪽으로 더 긴 것은 슬릿 모니터링 방향으로 가는 빛이 차단되지 않도록 하기 위해서였다. 광섬유 입구 V자 홈의 경면 길이는 광섬유 배치를 고려하여 52 mm로 하였다.

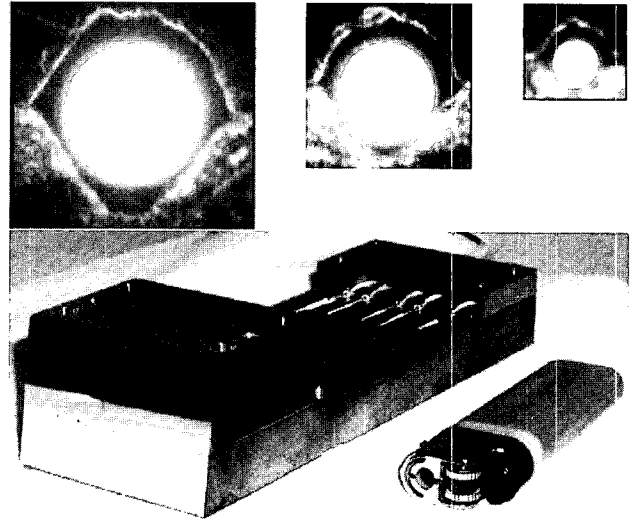


그림 1. 부식방지를 위해 스테인레스로 제작된 광섬유 입구에서 V자 홈에 끼워진 광섬유 부분 확대 사진(위)과 광섬유 입구 전체 모습 사진(아래). 위의 세 사진은 왼쪽부터 300, 200, 80 μm 광섬유 모습(같은 배율)이며 아랫쪽이 V자 홈이고 위쪽이 V자 홈 덮개이다. 아래 사진에서 왼쪽의 반사면은 슬릿모니터링을 위해 광축 수직면과 8도 기울어진 거울로 되어 있다. 윗덮개와 아래 V자 홈 사이에는 300 μm 광섬유 두개, 200 μm 광섬유 두개와 80 μm 광섬유 하나가 차례로 끼워져 있다. V자 홈 뒤편에 지지판이 보이는데, 이것은 광섬유를 직접 지지하는 것이 아니라 테프론 판을 눌러 지지하도록 되어 있다.

광섬유 입구 윗덮개에도 아래쪽 V자 홈의 광섬유 위치와 정확히 같은 곳에 작은 반원형 홈을 내어 이 사이에 광섬유를 넣을 수 있도록 하였다. 이 윗덮개 구멍의 크기가 크면 광섬유를 넣기는 쉬우나 슬릿 모니터링에서 별의 위치를 확인할 수 없는 면적이 커지기 때문에 이 구멍 크기를 가능한 한 줄이는 것이 필요하다. 그러나 크기가 줄어들면 그만큼 윗 덮개와 아래 판의 홈 위치 정밀도가 높아야 한다. 80, 200, 300 μm 광섬유 자체 크기는 비퍼를 포함하여 지름이 각각 102, 240, 370 μm 정도 (10% 오차)이기에 이 구멍 지름을 각각 170, 320, 450 μm 으로 하였다. 이것은 시야각으로 2.4, 4.6, 6.5 각초가 된다. 구멍 주위는 직각이 아니고 곡선으로 되어 있어 광섬유 부근에서 슬릿 모니터링을 할 수 없는 시야는 이 보다 훨씬 커진다.

광섬유 입구 V자 홈을 제작할 때 유의할 점은 윗덮개와 아래 V자 홈에서 구멍간 거리가 정확한 일치하도록 하는 것 외에도 두 거울면이 같은 평면이 되도록 하는 것이다. 이를 위해 윗덮개와 아래 V자 홈을 틈이 거의 없

는 작은 핀으로 박아 정밀히 고정하고 한꺼번에 연마한 후, 광섬유를 넣고 윗덮개를 닫은 후 다시 핀을 뽑으면 원래 위치에 와서 다시 하나의 거울 평면이 되도록 하였다. 광섬유를 광섬유 입구에 넣을 때는 현미경으로 보면서 광섬유 끝단이 거울면과 일치하도록 하였다.

광섬유는 외경 2 mm 내경 1 mm인 테프론 관 안에 넣어 보호되도록 하였으며, 광섬유 입구와 출구 뒷단에 있는 지지판은 광섬유를 직접 압박하지 않고 이 테프론 관을 눌러 지지하도록 되어있다. 광섬유 길이에 따른 하중도 광섬유에 직접 작용하지 않고 테프론 관과 고정용 지지판에만 작용하도록 하였다. 이들 테프론 관은 열팽창율이 높아 광섬유 입구에서 출구까지 하나의 관으로 연결하면 여름과 겨울의 온도차에 의한 열팽창, 수축으로 인해 광섬유에 압력을 가하게 된다. 이를 막기 위하여 스테인레스 관으로 열팽창 차단장치(thermal brake; Fabricant et al., 1998)를 만들어 붙였다. 이 열팽창 차단 장치 안에서는 테프론 관이 끊겨있어 외부 온도 변화로 테프론 관이 팽창, 수축해도 광섬유에 압력을 주지 않는다. 그리고 광섬유 전체를 보호하기 위해 이 5개의 테프론 관을 금속 주름관 안에 넣었다. 광섬유는 곡률 직경이 200 mm 이하로 굽게 되면 초점비 나빠짐이 생겨 빛 손실이 생긴다(Polymicro Technologies, 1999). 이 금속 주름관은 광섬유의 곡률 직경이 이보다 작아지지 않도록 하는 역할도 한다.

먼지가 광섬유 입구에 있으면 분광기의 효율을 떨어뜨리게 된다. 먼지로부터 광섬유 입구를 보호하기 위해 CIM 앞에 미닫이 창을 설치하여 관측을 하지 않을 때는 미닫이 창을 닫아 먼지가 들어오지 못하게 하였다.

광섬유 출구는 중앙에 80 μm 광섬유를 두고 양쪽으로 200 μm 와 300 μm 광섬유를 배치하였다(그림 2). 이것은 BOES의 조준경(collimator)이 포물경이어서 이 조준경의 초점 위치에 있는 광섬유에서 나오는 빛은 좋은 결상을 얻을 수 있으나 초점에서 멀어질수록 결상 성능이 나빠지기 때문에 정밀한 상이 나타나는 80 μm 광섬유를 출구의 중앙에 배치하고 이를 포물 조준경 초점에 설치하였다.

또한 광섬유 출구 제작에서 중요한 것은 1) 두 광섬유

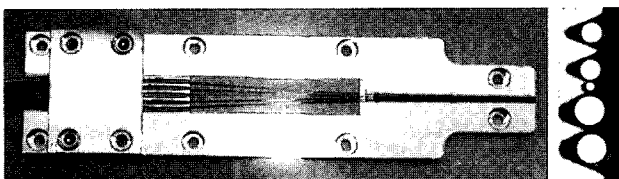


그림 2. 광섬유 출구와 출구 부분 확대 사진. 출구 중심에 80 μm 광섬유가 있고 양쪽으로 200, 300 μm 광섬유 세트가 있다. 각 광섬유 세트에서 두 광섬유 중심은 서로 380 μm 떨어져 있다.

(#1과 #2, #3과 #4) 중심간 거리는 차수 간격이 가장 좁아지는 부분 (8,046 Å 부근, 차수로는 58번)에서 한 광섬유에서 생긴 57번과 58번 차수 상 가운데에, 다른 광섬유의 58번 차수의 상이 정확히 놓이도록 380 μm 떨어뜨려 놓는 것과 2) 빛 손실을 작게 하기 위해 각 광섬유가 광섬유 출구 앞 77.109 mm에 설치된 스톱의 중앙을 지향하도록 V자 홈의 각도를 유지하는 것과 3) 놓인 광섬유 높낮이가 굽기가 같은 광섬유 별로 일치해야 하는 것이다.

1.8 m 망원경으로 분광 관측할 때 사용하는 광섬유는 망원경동 4층과 BOES 고분산 분광부가 설치된 2층 분광실 사이에 18.5 m 길이로 설치되었다. 실험실 시험을 위해서 같은 길이의 광섬유를 1층 분광 실험실과 2층 분광실 사이에도 설치하였다. 이것은 실험실 시험에도 이용하지만 2층과 4층 사이의 광섬유가 파손될 경우에 대체용으로도 활용할 수 있다. 광섬유 입구와 출구의 V자 홈은 광섬유로 직접 연결되어 있어 CIM이 이동해도 광섬유 입구가 부착된 슬릿 어셈블리를 같이 이동할 수 없기에 슬릿 어셈블리와 광섬유 입, 출구 V자 홈은 각각 2조씩 준비하였다. 광섬유 출구에서는 2개의 V자 홈을 위 아래로 배치하고, 마이크로미터를 이용하여 수동으로 높이 조절함으로써 광섬유 출구 V자 홈을 선택할 수 있게 하였다.

V자 홈을 가공할 때 홈 표면에 생기는 찌꺼기(bur)는 아무리 V자 홈 가공이 잘 되었다 하더라도 광섬유를 원하는 방향으로 설치하는 데 장애가 된다. 따라서 샌드 블라스터(sand blaster) 방식으로 이들 찌꺼기를 완전히 제거해 주었다. 또한 광섬유는 조그만 흠집에도 쉽게 부서지는 특성이 있기에 샌드 블라스터로 광섬유에 손상을 입힐 수 있는 날카로운 부분을 전체적으로 부드럽게 모따기(chamfering)하여 광섬유를 보호하는 것도 필요하다.

코어직경 200 μm 짜리 광섬유에서 입사광이 f/8일 때는 초점비 나빠짐으로 인한 빛 손실이 30 %인 반면, f/6.3에서는 5 % (Barden, 1998)로 빛 손실을 줄일 수가 있어 광섬유에 입사되는 빛의 초점비를 줄이는 마이크로 렌즈를 광섬유 입구 끝단에 부착하는 경우(Kaufner, 1997)도 있다. 전형적인 마이크로 렌즈의 크기는 직경 1 mm, 길이 2 mm이기에, 광대역 무반사 코팅의 어려움과 함께 광축을 1도 이내로 맞추어 설치하기에는 어려움이 따른다. 마이크로 렌즈의 광축을 잘못 맞추면 30 % 이상의 빛의 손실이 생길 수 있기 때문에 (Vogt, 1999) BOES에서는 초점비 나빠짐에 의한 빛 손실을 감수하면서 마이크로 렌즈는 사용하지 않았다.

10 μm 정도의 정밀도가 요구되는 광섬유 입구와 출구의 V자 홈 제작, 표면의 경면 연마와 코팅은 국내 업체에서 수행하였다. 광섬유의 끝단면 연마와 광섬유 설치는 보현산천문대에서 자체적으로 하였다.

3. 광섬유 연마

광섬유 입구에서 입사광이 광섬유 단면과 빗면으로 입사되면, 단면에서 프리즘 같은 굴절이 생기고 이에 따라 전 반사(total reflection) 조건을 벗어날 수 있는 여지가 생겨 광섬유의 빛 전달 효율을 떨어뜨리는 결과를 가져온다 (Polymicro Technologies, 1999). 따라서 광섬유가 지향하는 방향도 망원경 광축 방향과 일치해야 하며 광섬유는 끝 단면을 길이 방향에 수직으로 연마해야 한다. 이를 위해 우리가 사용한 광섬유 연마기를 그림 3에 보였다.

광섬유 연마기는 간단한 기능만 있기에 자체 제작이 가능하다. 연마봉(polishing head)에는 30개 정도의 홈과 구멍이 있어 여기에 광섬유를 끼우면 한꺼번에 연마가 가능하도록 되어 있다. 상품 생산이 되고 있는 광통신용 광케이블의 끝단 연마기도 이와 비슷하기는 하나 우리가 사용한 연마기와는 연마봉이 다르고, 정수 세척시설이 없는 차이가 있다.

BOES를 제작하면서 우리가 사용하였던 광섬유 연마 과정을 정리하면 다음과 같다.

1) 끈을 이용하여 망원경 뒷단 CIM의 광섬유 입구 부근에서 망원경 케이블 트위스트와 망원경 지지 기둥(pier)를 거쳐 2층 분광실 광섬유 출구까지의 거리를 약간 여유 있게 측정하여 광섬유 길이를 18.5 m로 결정하였다.

2) 광섬유를 그 길이 만큼 절단한 후 테프론관과 열팽창 차단 장치에 넣는다. 테프론관의 총 길이는 V자 홈과 열팽창 차단장치 길이 만큼 짧게 하여 광섬유 양 끝단에서는 광섬유가 노출된 채로 V자 홈에 고정될 수 있도록 하였다.

3) 연마봉 앞면으로 광섬유를 5 mm 정도 튀어나오게 하고 고무줄로 동여 광섬유를 고정한다. 연마봉 앞면에 알미늄 테이프를 5 mm 정도 튀어 나오게 감아 접착제 액에 광섬유가 잠길 수 있도록 벽을 만든다.

4) 접착제(Universal Photonics사의 wafer mounting wax #300) 덩이를 깨뜨린 조각을 비이커에 넣고 전자렌지나 전기 곤로를 이용하여 120도 정도에서 녹인다. 이때 녹은 접착액에는 기포가 보이지 않아야 한다. 기포가 있으면 없어질 때까지 가열을 계속한다. 이 접착제는 경화시 광섬유 유리와 비슷한 경도가 되기에 광섬유와 같이 연마해도 광섬유 연마면이 상하지 않는다.

5) 연마봉의 광섬유 끝이 튀어나온 부분을 뒤집어 냄비 속의 물에 닿게 하여 끓인다. 이것은 연마봉이 뜨거워야 접착제가 잘 붙기 때문이다. 연마봉의 광섬유 있는 부분은 헤어드라이를 이용하여 물기나 이물질들을 완전히 제거하고 녹은 접착제를 연마봉 위에 붓는데 광섬유 끝단까지 오도록 한다. 이때 기포가 있으면 연마하는 중에 광섬유에 홈집이 생길 수 있기 때문에 기포가 없도록 주의한다. 접착제는 30분 정도 식히면 굳는다.

6) 래핑 필름(lapping film)을 연마기의 연마판(glass

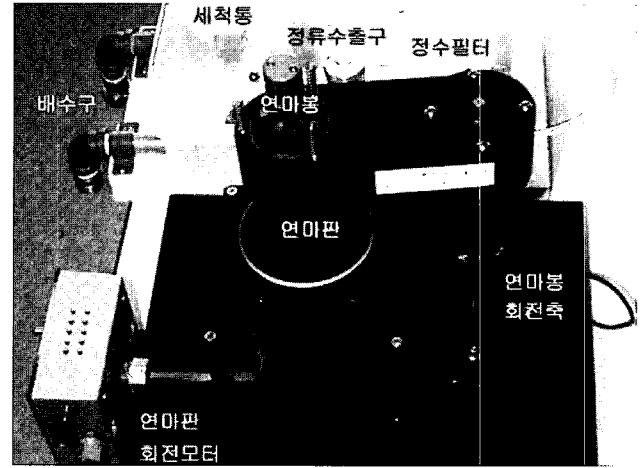


그림 3. 광섬유 연마기.

flatter)에 붙인다. 이 필름은 Moyco Disc 제품으로 60, 20, 9, 5, 3, 1, 0.3 μm 짜리가 있는데 처음에는 60 μm 짜리를 붙이고 연마를 진행하면서 차례로 가는 것으로 교체한다. 모터 스위치를 올리면 연마판이 회전하는데, 연마봉을 연마봉 회전축을 중심으로 좌우로 움직여주어 고르게 연마되도록 한다. 연마봉은 래핑 필름 판에 수직으로 되도록 하며 연마봉에 너무 힘을 주어 누르면 접착제가 깨지는 경우가 있다.

7) 연마봉과 래핑 필름 사이의 연마되는 부분에는 증류수에 액체 비누를 섞은 윤활제를 연마 중 계속 뿌려주어 접착제가 깨지지 않도록 한다.

8) 래핑 필름별로 2-3분 정도 연마한 후, 다음 미세한 것으로 래핑 필름을 교체한다. 필름을 교체할 때마다 필터를 통과한 정류수로 연마면 주위를 씻고, 연마면을 보푸라기가 없는 화장지로 깨끗이 닦아 이전의 필름에서부터 떨어져 남아 있는 굵은 연마사를 제거한다. 연마시 주위 온도가 섭씨 20도 이상 되고 물의 온도도 섭씨 20 - 30도 정도 되어야 하며 차가운 환경에서 차가운 물을 사용하면 접착제가 깨질 수 있다.

9) 마지막으로 0.3 μm 의 래핑필름으로 연마를 마친 후 100배 배율 정도의 현미경으로 광섬유 연마면을 검사한다. 연마가 잘된 것은 굵힘 자국이 없이 버퍼와 크레딩이 원형으로 보인다. 한쪽만 연마한 경우에는 광섬유 코어 부분이 검게 보이나 양쪽을 다한 경우에는 빛이 투과되기에 밝게 보인다 (그림 4). 연마면 주위가 깨져 있지 하면 연마 불량이나 실제 광섬유 연마에서 기포 없이 접착액을 부었다면 불량율은 거의 없다.

10) 연마봉을 아세톤에 담가 2시간 정도 지나면 접착제는 녹아 없어지고 연마된 광섬유만 남게 된다.

11) 연마가 끝난 광섬유는 테프론 테이프로 감싸 연마면을 보호한다.

12) 테프론 테이프 보호한 광섬유를 사용할 때는 테이프를 벗기고, 털날림 없는 탈지면봉에 아세톤을 묻혀 광섬유 연마면을 살며시 닦아준 후 사용한다. 이때 솜털이 연마면 주위에 남아있지 않은지 확인한다. 이것은 BOES를 사용하면서 슬릿 어셈블리를 CIM에 매번 부착할 때에, 또한 수시로 먼지가 광섬유 입구를 가리치 않도록 할 때에도 같은 방법으로 광섬유 앞단의 청결을 유지한다.

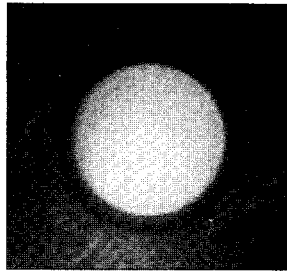


그림 4. 잘 연마된 광섬유의 현미경 사진.

4. V자 홈에 광섬유 붙이기

2장에서 설명한 V자 홈 뒤편의 지지판은 테프론 관만을 지지하기 때문에 광섬유를 V자 홈에 별도로 직접 부착하는 작업이 필요하다. 이때 광섬유에 압박이 가해지면 초점비 나빠짐으로 인한 빛 손실이 커지기 때문에 광섬유에 힘이 최소한도로 가해지도록 주의해야 한다. 이를 위해 FEROS에서는 V자 홈 위에 광섬유를 놓고, 그위를 고무패드를 덮고 고무 밴드로 동여 고정하는 방법(Kaufer, 2000)을 사용하였다. 그러나 이 방법은 고무패드가 압력을 주어 광섬유가 힘을 받을 우려(Zajac, 2001)가 있다. 특히 광섬유 입구에서는 광섬유가 빠질 수가 있기에 우리는 접착제를 이용한 방식을 채택하였다.

접착제는 Loctite사의 E-120HP 에폭시를 사용하였다. 이 접착제는 굳을 때 열을 발생하거나 수축하는 성질이 없어, 굳으면서 광섬유에 압박을 주지 않는 것으로 확인되었다(Zajac, 2001). 이 에폭시는 굳는데 보통 이틀이 걸리나 에폭시 A, B와 유리가루(fused silica powder, S209)를 무게비로 1:1:2로 혼합하여 사용하면 유리가루는 경화촉진제 역할을 하여 굳는데 하루가 채 걸리지 않는다. V자 홈에 광섬유를 놓고 솜과 고무밴드를 이용하여 광섬유를 고정시키고, 혼합한 접착제를 이쑤시게를 이용하여 세 군데 정도에 미세하게 찍어 붙여서 광섬유에 압박을 가함이 없이 광섬유를 고정 할 수 있었다.

5. 광섬유 광축 조정

다음은 광섬유가 설치된 V자 홈을 조정하여, 광섬유의 위치와 방향을 정확히 설정해야 한다.

광섬유 입구에서는 광섬유 단면에 수직으로 빛이 입사되지 않으면 광섬유 출구에서 나오는 별빛은 균질한 원형으로 나오지 않고 반지 형태로 나오게 되어 초점비 나빠

짐이 훨씬 커져 빛 손실이 많아진다. 따라서 광섬유 입구는 정확히 망원경 광축에 있고, 광섬유 지향 방향도 망원경 광축을 지향하도록 설치하여야 한다. BOES에서는 5개 광섬유가 한꺼번에 V자 홈에 고정되어 있기에 광섬유 방향을 각자 조절할 수는 없고 광섬유들의 평균 방향이 최적이 되도록 V자 홈 지향 방향을 조절하도록 되어 있다.

광섬유 광축 조정에는 레이저(laser), 광속 확대기(beam expander)와 집광 렌즈가 필요하다. 레이저만 사용하면 레이저 광속 지름에 비해 광섬유 면적이 너무 작아서, 레이저 빛 중 극히 일부만 들어와 광량이 너무 작아진다. 레이저 광량 모두를 이용하기 위하여 광속 확대기로 레이저 광속 직경을 30 mm로 키운 뒤에 렌즈로 집광하는 방식을 사용하였다. 집광 렌즈는 확대된 레이저 광속을 f/8로 집광되도록 하기 위하여 초점 거리가 240 mm 정도인 렌즈를 선택하였다.

광섬유 광축 조정은 광섬유 입구부터 하는 것이 편리하다. 광섬유 입구의 광축 조정은 다음과 같이 수행하였다.

- 1) 광섬유 입구가 설치된 CIM을 망원경에 부착하고 광섬유 #1이 망원경 중심에 오도록 한다.
- 2) 망원경 배플을 제거하고 주경 중심 구멍에 흰 종이로 스크린을 만들어 붙인다.
- 3) 광섬유 출구에 레이저를 설치하고 레이저 초점을 광섬유 #1에 맞춘다.
- 4) 광섬유 입구에서 나온 레이저 빛이 망원경 주경 중심 구멍에 설치한 스크린에 비치는 자국을 그리고, 그 중심을 표시해둔다.
- 5) 광섬유 입구에서 광섬유 #2가 망원경 중심에 오도록 하고 광섬유 출구에서 레이저 초점을 광섬유 #2에 맞추고 위 4)번 과정을 반복한다. 이런 과정을 모든 광섬유에서 반복한다.
- 6) 이들 다섯 개 광섬유 빛 자국 중심의 평균 위치가 주경 중심 구멍 중앙에 오도록 광섬유 입구 V자 홈의 방향을 조정한다 다음, 다시 각 광섬유 자국의 중심을 찾는 작업을 결과가 만족스러울 때까지 반복한다. 레이저 자국들이 망원경 광축 주위에 모이게 되면 광섬유 입구 V자 홈을 고정한다.

7) 광섬유 출구 앞에 CCD를 설치하고 망원경을 통해 1 등성 정도의 밝은 별을 각 광섬유에 넣어주고 CCD 상을 보면서 초점비 나빠짐이 어느 정도인지와 함께, 최종적으로 광섬유 입구 V자 홈 방향의 성공적인 설치 여부를 확인한다. 방향이 잘못된 광섬유는 광섬유 출구에서 빛이 그림 5와 같이 반지 모양으로 나오게 된다. 광섬유가 망원경 광축에 있을 때는 BOES의 모든 광섬유에서 좋은 결과를 얻었다. 광섬유를 슬릿 모니터링이 가능한 +/- 4 mm 만큼 망원경 광축에서부터 밖으로 이동시키면서 확인해 보아도 광섬유 #3이 망원경 광축에서 +2 mm 보다 벗

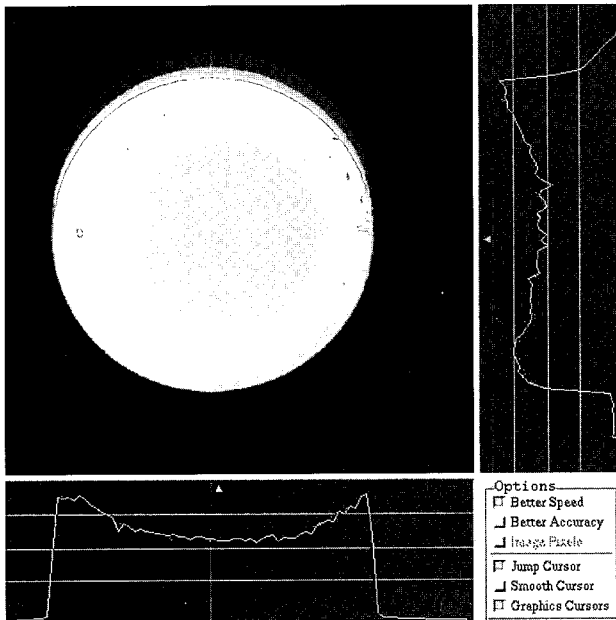


그림 5. 광섬유 #3이 망원경 광축에서 +4 mm 떨어져 있을 때 초점비 나빠짐으로 인해 광섬유에서 나오는 빛은 주변이 밝고 가운데가 어두운 반지 모양이 뚜렷하게 나타났다. 광섬유 #3은 +2 mm부터 초점비 나빠짐 현상이 나타나기 시작했다.

어나 있는 경우를 제외하고는 모두 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 200 μm 광섬유 두 개를 모두 사용할 때, 광섬유 #3은 광축에서 - 방향으로 이동해야 하므로 실제 관측에서 이것이 문제될 가능성은 전혀 없다. 따라서 광섬유 지향 방향, 즉 광섬유 설치에는 문제가 없는 것을 확인하였다.

광섬유 출구에서는 광섬유 끝단이 주 조준경 초점에 있고 출사광의 방향은 고분산 분광부 설계에 따른 방향이 되도록 V자 홈이 설치되어야 한다. 광섬유 출구 V자 홈의 위치와 방향은 다음 방식으로 조정하였다.

- 1) 먼저 주 조준경과 부 조준경의 위치를 잡고 주 조준경 초점 위치에 표시된 마운트를 설치한다.
- 2) 현미경으로 주 조준경 초점으로 표시된 마운트가 정확히 상 중심에 오도록 맞춘다.
- 3) 표시된 마운트를 치우고 광섬유 출구의 80 μm 광섬유 끝단이 현미경 상 중앙에 오도록 V자 홈 위치를 조정 한 후에 현미경을 치운다.
- 4) 광선 추적 프로그램을 이용하여 빛 자국이 표시된 주 조준경 모양을 실제 크기로 출력하여 오린 스크린을 주 조준경에 정밀하게 붙인다.
- 5) 앞서와 같은 방식대로 레이저를 광섬유 입구에 넣고 주 조준경 출구에서 나오는 레이저 자국이 주 조준경의 빛 자국 위치에 정확히 일치하도록 V자 홈의 방향을 조

절한다.

6) 레이저 자국으로 광학계를 정렬하는 방식은 광섬유 출구 방향 뿐 아니라 고분산 분광부의 평면경, 프리즘과 카메라 등 나머지 광학계의 방향과 광축을 맞추는 데에도 사용하였다.

6. 토의

BOES는 파장 분해능과 효율면에서 뛰어난 성능을 보이고 있다. 이것은 광섬유를 비롯한 모든 광학계가 정상으로 제작되고 설치되었음을 의미한다.

그림 6에는 2003년 11월에 관측한 자료에서 구한 BOES의 광섬유 별 측정된 효율을 나타내었다. 여기서 점선은 대기소광을 보정하기 전 효율이며 실선은 보현산 표준 대기 소광계수(김강민외 1997)를 적용하여 대기보정을 한 것이다. 관측일도 아주 맑은 날은 아니어서 그날 자료에서 파장별 대기 소광 계수를 구하는 것이 어려워 꽤정한 날에 구한 자료를 이용하였다. 따라서 BOES의 실제 효율은 이보다는 많이 높을 것으로 추정된다. 6500 \AA 부근에서 나타나는 최대 효율은 80, 200, 300 μm 광섬유는 80 μm 광섬유에 비해 효율이 5.2배와 6.9배가 되었다. 이 그림을 보면 80 μm 광섬유는 다른 광섬유에 비해 그 효율이 너무 낮아, 혹 제작이나 설치가 잘못된 것으로 오인하기 쉽다.

그림 7은 시상(seeing)이 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 각초에서 망원경 추적 오차에 따른 광량을 계산한 것으로 80, 200, 300 μm 광섬유에 대해 각각 점선, 실선과 쇄선으로 나타내었다. 여기에서 망원경 추적오차가 없다고 하면, 80, 200, 300 μm 광섬유에서의 빛 통과율은 시상이 2 각초일 때는 19, 73, 92 %이며, 시상이 3각초일 때는 9, 45, 73 %가 된다. 즉 시상이 2 각초일 때는 200과 300 μm

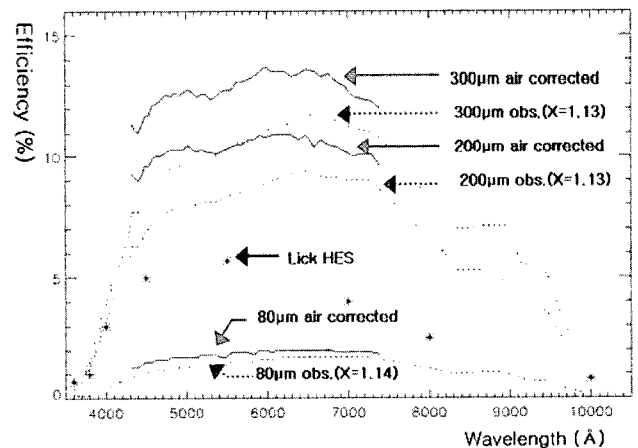


그림 6. 광섬유별 분광기의 효율.

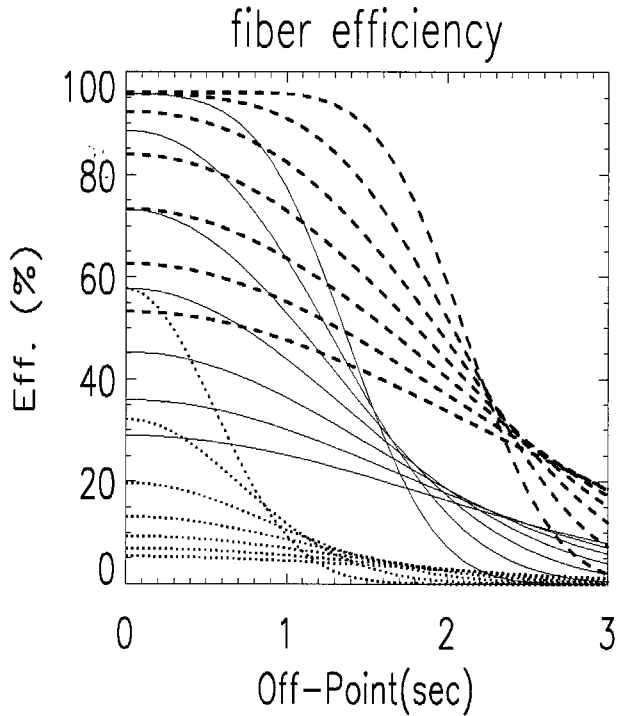


그림 7. 시상과 망원경 추적오차에 따른 광섬유별 입사 광량. 점선, 실선, 쇄선은 각각 80, 200, 300 μm 광섬유를 나타내며 7개의 선은 위에서부터 시상이 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 각초일 때를 나타낸다.

광섬유는 80 μm 광섬유에 비해 광량이 3.7, 4.7배가 되며, 3 각초일때는 4.5, 7.3배가 된다. 따라서 80 μm 광섬유에서 상대적으로 낮게 보이는 효율은 광섬유의 제작이나 설치에 잘못된 것이 아니라, 구경이 작은 이 광섬유에서는 상대적으로 시상과 망원경 추적 오차에 보다 민감하기 때문이다.

200과 300 μm 광섬유는 천체와 배경 하늘을 동시 관측할 수 있도록 두개를 설치하였는데 바닥고르기 광원을 두 광섬유에 동시에 넣어주고 얻은 스펙트럼이 일부 겹쳐 나왔다(김강민, 2003). 따라서 현재는 두 광섬유의 동시 사용에는 문제가 있으며 배경 하늘 보정은 일반적인 방법으로 수행하는 것이 좋다. 예를 들어 한시간 노출한 대상에서 배경 하늘 보정이 필요하다면 배경 하늘을 15분 노출하고, 이를 4배하여 보정 화면으로 활용하는 식으로 해결한다.

차후 BOES의 광섬유를 개선할 때에는 200과 300 μm 광섬유는 모두 하나만 설치하고 대신 150 μm 광섬유를 추가로 설치할 계획이다. 현재 BOES의 파장 분해능은 300, 200, 80 μm 광섬유에서 각각 30,000, 45,000과 90,000이 되는데 요오드 통을 활용하여 성진(asteroseismology)

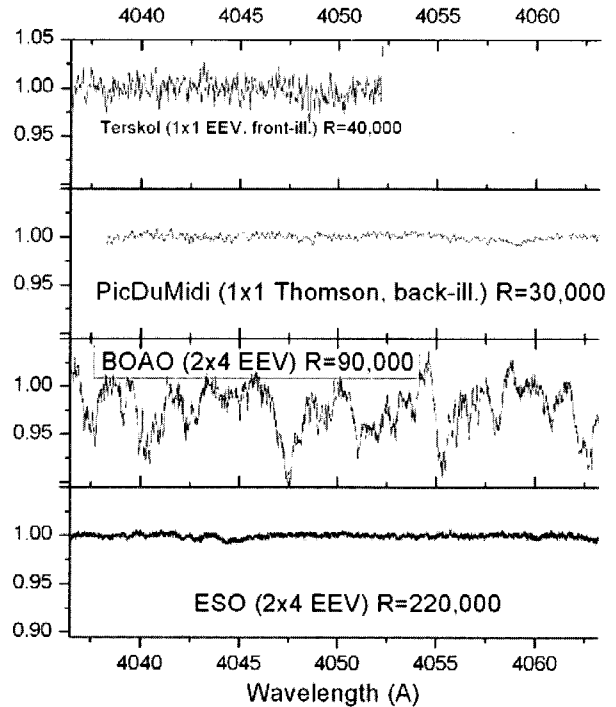


그림 8. 여러 분광기에서 얻은 바닥고르기 광원 스펙트럼. 세 번째에 보인 BOES 스펙트럼에서는 짧은 파장에서도 다른 분광기에서와는 달리 물질무늬가 보인다.

연구 등 정밀 시선속도 측정을 위해서는 파장 분해능이 50,000이 넘어야 한다(Butler 외, 1996). 따라서 현재 BOES에서는 80 μm 광섬유만 사용할 수 있는데, 이것은 시야각이 1.1 각초에 불과하여 그림 6과 7에서 보듯이 광섬유 입구에서의 빛 손실이 너무 크다. 이를 해결하는 방안으로 150 μm 광섬유를 설치하면 추정 분해능은 53,000이고, 시야각은 2.1 각초가 되어 80 μm 광섬유에 비해 빛 손실도 줄이고 적절한 분해능도 얻을 수 있다.

또 다른 문제는 BOES 스펙트럼에서는 짧은 파장에서도 물질무늬같은 광량 변화가 보인다. 물론 바닥고르기 보정을 하면 이 광량 변화는 사라지기 때문에 심각한 문제는 아니다. 일반적으로 CCD 칩의 두께와 관련하여 뒷면 조사(back illuminated) 방식의 CCD에서는 긴파장에서는 간섭무늬가 스펙트럼에 나타나나 짧은 파장에서는 나타나지 않는다.

그림 8은 서로 다른 분광기에서 얻은 짧은 파장에서의 스펙트럼을 비교한 것이다. 여기에서 Terskol과 ESO의 분광자료는 광섬유를 사용하지 않은 것이며, Pic DuMidi 분광자료는 광섬유를 사용한 것이다. 우리와 다른 광섬유를 사용하는 FEROS 분광자료에서도 단파장에서 마찬가지로 간섭 무늬가 나타나지 않는다. BOES에서의 광량 변

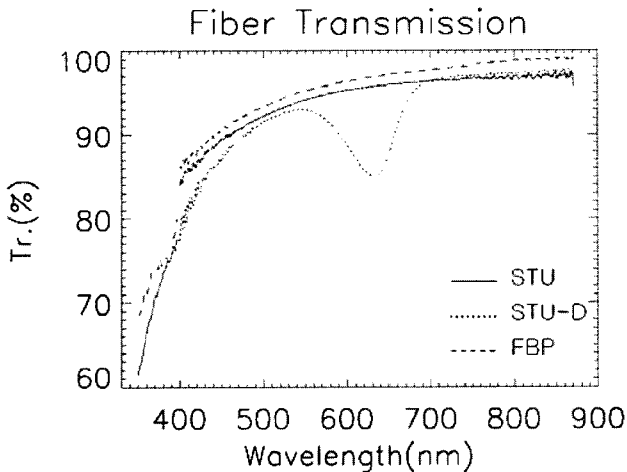


그림 9. 길이 18.5 m인 광섬유의 파장별 투과율. 400 nm 이상과 이하에서는 측정 방식이 달라(Nelson 2004) 불연속으로 보이고 있다.

화는 STU 광섬유에 포함된 OH에 의한 흡수 때문에 나타나는 것으로 추측된다. STU 광섬유 제작사에서 보내온 자료에서는 파장 간격이 3 Å으로 커서 이런 광량의 변화를 확인할 수는 없었다.

그림 9는 제작사가 dB/km 단위로 보내온 광섬유의 파장별 감쇄율 자료(Nelson, 2004)로부터, BOES에서 사용하고 있는 것과 같은 길이인 18.5 m일 때의 광섬유별 투과율을 계산한 것이다. 광섬유 입구와 출구의 유리 표면에 반사율은 고려하지 않았다. 400 nm 부근에서 광섬유 투과율이 불연속으로 나타나는 것은 400 nm 보다 짧은 파장의 빛과 긴 파장의 빛에서의 감쇄율 측정 방식이 다르기 때문이다(Nelson, 2004). 여기서 STU-D는 STU와 같은 물성이나 OH 성분이 작은 특성을 가지고 있으며 건조(dry)하다는 의미로 D 첨자를 붙인 것인데 650 nm 부근에서 투과율의 저하를 보이기에 BOES에서는 STU-D 대신 STU 광섬유를 사용하였다. FBP 광섬유는 STU보다 단파장에서의 투과율을 개선하여 출시되고 있는 광섬유로 차후 BOES에서 광섬유 개선할 때를 대비하여, 보현산천문대에서는 150, 200, 300 μm 굵기의 FBP 광섬유를 확보하고 있다. 이를 사용할 경우 4000 Å이하에서는 15 % 정도의 투과율 증가가 예상된다.

감사의 글

BOES를 제작하면서 광섬유 연마와 V자 홈 설계 등 광섬유와 관련하여 여러가지 도움을 제공하여준 Harvard Smithsonian Center for Astrophysics의 Dr. Fabricant와 Zajac께 감사를 표합니다. 본 연구는 한국천문연구원의 기관고유사업(2004-1-300-03)와 한국과학재단의 목적기초연구

(R01-2001-000-00026-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김강민, 손동훈, 형식, 윤태석, 1997, 천문학논총 12, 167
 김강민, 2003, 보현산천문대 분광기 시스템의 개발과 성능 분석, 경북대 박사학위논문
 Avila, G., 1998, Fiber Optics in Astronomy, ASP Conference Series, **152**, 44, ed. by S. Arribas, E. Mediavilla and F. Watson
 Barden, S. C. 1998, , Fiber Optics in Astronomy III, ASP Conference Series vol. **152**, 14, ed. by S. Arribas, E. Mediavilla and F. Watson
 Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., McCarthy, C., Dosanjh, P., Vogt, S. S., 1996, PASP, **108**, 500.
 Fabricant D. G., Hertz E. N., Szentgyorgyi A. H., Fata R. G., Roll J. B., and Zajac J. M., 1998, Proceedings of Optical Astronomical Instrumentation, SPIE **3355**, 285, ed. by S. D'Odorico
 Kaufer, A., 1997, Final Design Report for the FEROS, Landessternwarte Heidelberg-Koenigstuhl.
 Kaufer A., 2000, 개인면담
 Nelson, G., 2004, 개인서신
 Parry I. R., 1998, Fiber Optics in Astronomy III, ASP Conference Series, **152**, 3, ed. by S. Arribas, E. Mediavilla and F. Watson
 Polymicro Technologies, 1999, The Book on the technologies of Polymicro
 Schmoll J., Popow E., and Roth M. M., 1998, Fiber Optics in Astronomy III, ASP Conference Series, **152**, 64, ed. by S. Arribas, E. Mediavilla and F. Watson
 Schötz, G. F., Vydra, J., Lu, G., and Fabricant, D. 1998, Fiber Optics in Astronomy III, ASP Conference Series, **152**, 20, ed. by S. Arribas, E. Mediavilla and F. Watson
 Vogt S. S., 1999, Phase B Report of the BOES, BOAO.
 Zajac J. M., 2001, 개인면담.