

보현산천문대의 광학천문 관측장비와 기술개발 소개

한인우 · 김강민 · 천무영 · 육인수

천문대 보현산천문대

1. 머리말

보현산천문대는 대덕 연구 단지에 있는 표준과학연구원 부설 천문대 소속의 관측소로서 경상북도 영천시 보현산 (해발 1,124m) 정상에 위치하고 있다. 1996년 4월에 공식적으로 준공식을 갖고 96년 9월부터 정규 관측 연구를 수행하고 있다. 현대 천문학은 감마선부터 전파에 이르는 전자파의 전 영역에서 천체를 관측하고 있다. 보현산 천문대는 이 중에서 가시광선 영역의 관측을 하고 있으며, 장래 근적외선 관측 기기를 설치할 예정이다. 현재 보현산 천문대의 주요 연구 장비로는 1.8m 망원경과 4채널 태양 플레어 망원경과 이에 따른 부대 관측기기가 있다. 이 글에서는 보현산천문대의 주요 관측 장비인 1.8m 망원경, 태양 망원경, 분광기와 CCD 카메라에 대하여 소개하고, 관측기기 개발 활동으로 파면 측정 및 적응광학 연구, 1m 망원경 개발 그리고 2k CCD 카메라 개발에 대하여 설명하기로 한다.

발전된 천문 연구를 위해서는 첨단 관측기기 개발이 필수적이다. 정교한 관측기기 개발에는 각종 첨단 광학 기술이 필요한 것은 너무나 당연한 일이다. 천문 관측 기기 개발에는 이미 다른 광학 분야에서 개발된 기술을 응용하는 경우가 많지만 천문관측기기 개발을 통하여 신기술이 개발되는 경우도 많다. 그동안 천문대의 관측기기 개발 활동이 활발하지 않았던 관계로 천문대와 광학계 사이의 교류가 별로 없었던 것이 사실이다. 보현산천문대 준공을 계기로 천문대의 관측기기 개발 활동이 활성화되고 있다. 이 글이 계기가 되어 향후 천문대와 광학계의 교류가 활발해 지기를 희망한다.

2. 망원경

2.1 1.8m 망원경

보현산천문대의 1.8m 망원경은 반사식 망원경으로 국내 최대 크기의 광학망원경이다. 광학계 형태는 주경과 부경 두 장의 반사경으로 이루어진 Ritchey-Chretien 형 망원경이다. 그림 1이 1.8m 망원경의 구조도이다. Ritchey-Chretien 형 망원경은 구면

수차와 코마 수차가 없는 광학계로서 대형 천체망원경은 대부분 이 형식을 채택하고 있다. 1.8m 망원경의 주요 관측기기로는 CCD 카메라, 분광기, 스펙클 카메라 그리고 사진 건판 카메라가 있다. 1.8m 망원경에는 F/8, F/15의 두 초점이 있다. 따라서 각각의 초점에 해당하는 두 개의 부경이 있다. F/15 용 부경이 F/8 부경 뒤에 위치하며, F/15 초점을 사용하려면 F/8 부경을 떼어내야 된다. F/8 초점은 주로 CCD 카메라를 이용한 천체 영상 관측에 이용되고, F/15 초점은 분광기를 이용한 분광 관측에 이용된다. 표 1에 1.8m 망원경의 제원 및 특성을 정리하였다.

1.8m 망원경에는 자동추적기가 있어 관측중인 천체를 정확히 추적할 수 있다. 자동추적 장치는 ICCD (Intensified CCD)를 빛 감지 장치로 사용하여 약 12등급의 별을 망원경 자동 추적에 이용할 수 있다. 자동 추적 정밀도는 시간 당 1 arcsec 이하이다.

1.8m 망원경 반사경 표면은 순수 알루미늄으로 코팅되어 있다. 코팅 후 시간이 지남에 따라 점차 반사율이 떨어지므로 대체로 1년에 한번 다시 코팅을 해준다. 현재 천문대에서는 1.8m 망원경 코팅을 위하여 국내 기술로 알루미늄 증착기 제작을 추진 중이다. 제안된 증착기의 성능은 1.8m 주경 전면에 걸쳐 코팅막 두께 약 100nm의 코팅을 하고 막 두께의 정밀도는 10nm 이내이며 코팅 직후 반사율은 90%로 되어있다.

2.2 태양 망원경

태양 플레어 망원경은 태양 플레어와 흑점 등 태양 표면에서

표 1. 1.8m 망원경의 제원 및 성능

○ 주경 : 유효 직경 1.8 m, F/2.5, 무게 1.4 ton, 재질 Zerodur		
○ 광학계 : Ritchey-Chretien 형태		
○ 초점비 : F/8, F/15 케세그레인 초점		
○ 광학계 성능	시야 지름	blur circle diameter
- F/8 with corrector	40 arcminute	0.4 arcsec
- F/8 without corrector	9 arcminute	0.4 arcsec
- F/15	2.2 arcminute	0.4 arcsec
○ 주경, 부경 표면 가공 정밀도 : r.m.s. 1/20 at 635 nm		
○ 망원경 무게 : 25 ton		
○ 마운트 : 적도의식, 포크 마운트		
○ 부대 관측기기 부착 : 최대 1.25 m, 150 kg		
○ 망원경 지향 정밀도 : r.m.s. 2 arcsec		

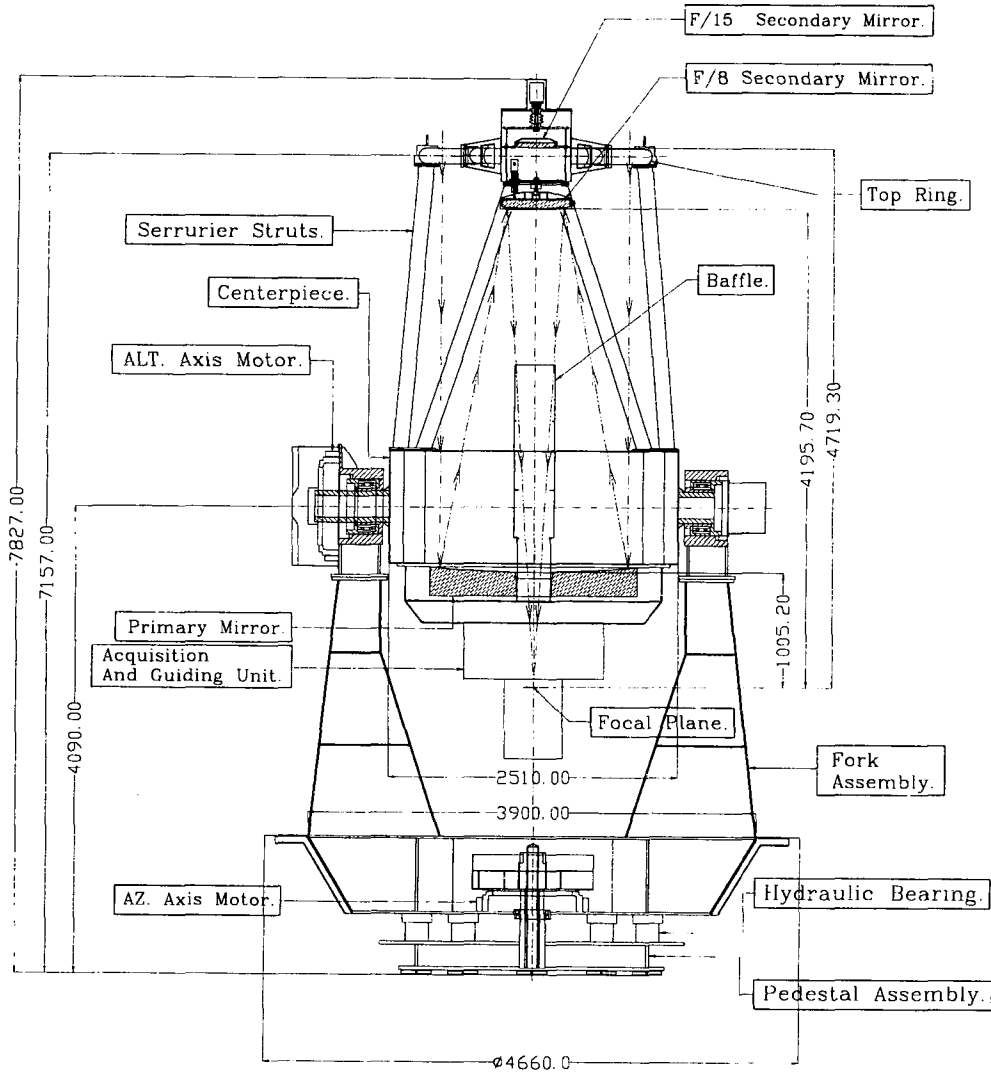


그림 1. 1.8m 망원경 구조도.

발생하는 현상을 연구할 목적으로 1995년 4월 설치되어 현재 태양 표면 현상을 상시 관측하고 있다. 태양 망원경의 주요 연구 목표는 태양 표면 현상과 자기장과의 상관 관계를 연구하는데 있다. 태양 활동은 지구를 둘러싼 우주 환경에 큰 영향을 미치므로, 태양 망원경으로 관측한 데이터는 태양 활동에 의한 인공 위성의 장비 훼손 및 위성 통신에 대한 전파 방해를 효과적으로 예보하기 위한 기본 자료로 이용될 것이다.

태양 망원경은 네 대의 굴절 망원경과 한 개의 가이드 망원경이 하나의 경통 내에 결합되어 있다. 경통의 길이는 340cm 이고, 전체 무게는 약 5톤에 달한다. 네 개의 굴절 망원경을 설치한 이유는 태양 표면을 4개의 서로 다른 파장 대역에서 동시 관측하여 플레어나 홍염 등의 표면 현상을 심층적으로 연구하는데 있다. 그림 2에 태양망원경의 4 채널 광학계 구조도를 나타내었다.

네 대의 망원경은 백색광 관측 (White Light ; WL), H-alpha,

백터 자장관측 (VMG) 및 도플러 시선 속도 측정 망원경 (LMG)으로 구성되어 있으며 이 중에서 WL과 H-alpha 망원경의 대물렌즈는 직경이 15cm (F/15)이고 VMG와 LMG의 대물렌즈 직경은 20cm (F/8)이다. 네 채널 광학계는 경통 내부에 광학 레일을 얹어 광축 배열을 쉽게 하였으며 각 망원경의 광학계는 그림 2에서 보는 바와 같이 대물렌즈, 평행광 렌즈, 리오필터, KDP 등으로 이루어져 있다. 특히 H-alpha, VMG, LMG 에 설치되어있는 리오필터는 0.125-0.25Å의 매우 좁은 투과 밴드폭을 가지고 있어서 태양 표면의 정밀 관측을 할 수 있다. KDP는 자기장 측정을 위한 핵심 장치로서 두 개의 서로 다른 방향으로 편광된 빛을 동시에 관측할 수 있다. 그림2의 CCD 카메라는 아날로그 형으로서 광학계를 통과하여 형성된 이미지는 여기에서 비디오 신호로 변환되어 관측실에 있는 비디오 레코더에 상시 기록된다. 비디오 신호는 또한 영상처리기를 통과하여 컴퓨터에 디지털 영상 파일로 저장할 수도 있다. 영상처리는 비디오

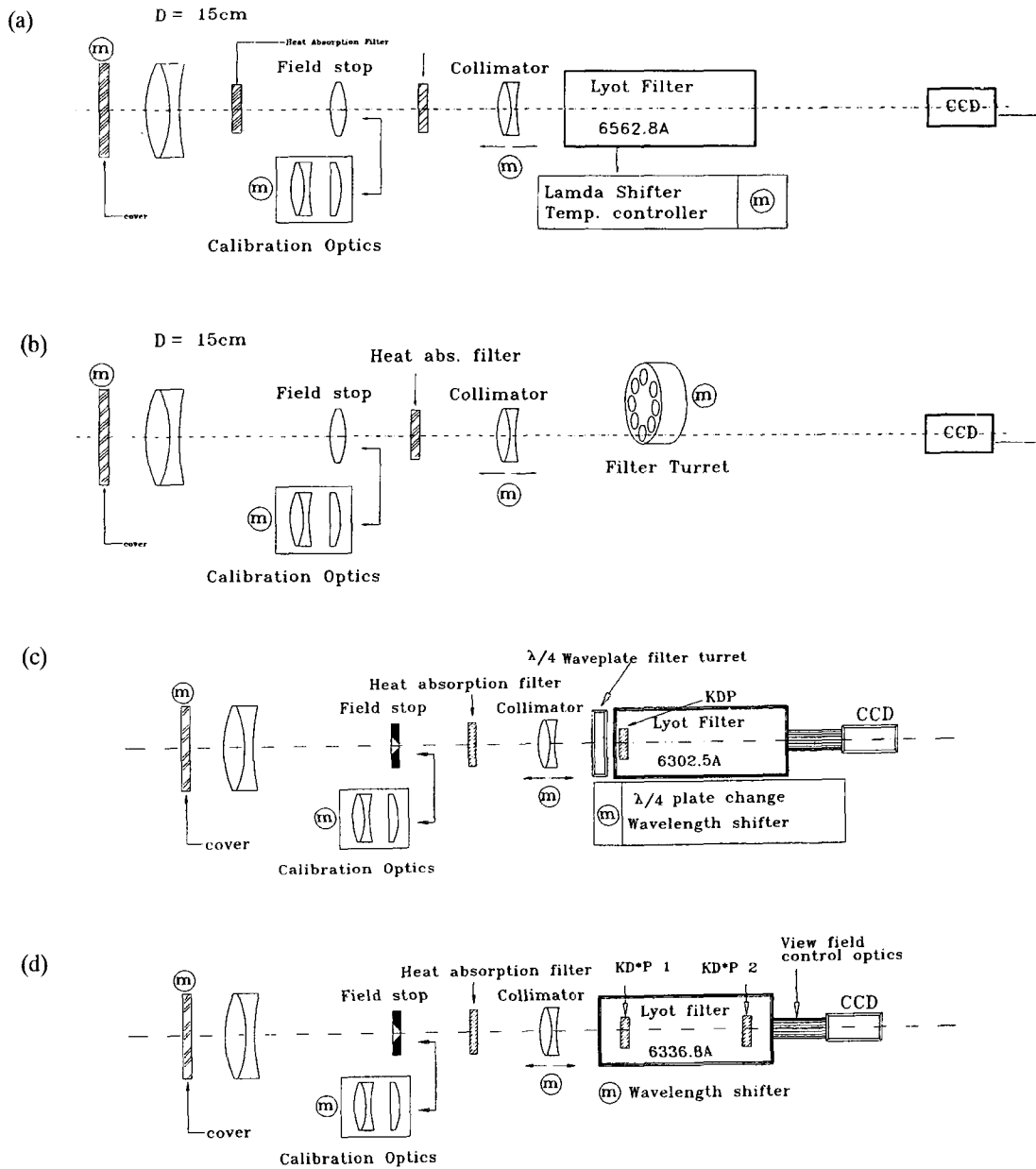


그림 2. 태양 망원경 구성도. (a) H-alpha 관측, (b) 백색광(WL) 관측, (c) 벡터자장관측(VMG) 및 (d) 도플러 시선 속도측정 망원경(LMG).

신호를 두 개의 서로 다른 편광 자료로 분리하여 저장하며, 이 진상관 계산에 의하여 대기 요동에 의한 영상의 움직임을 보정하여 공간 분해능과 축광 분해능을 향상시켜 준다.

마지막으로 태양 망원경 네 채널의 관측 특성 및 목표를 설명하기로 한다. WL은 태양 광구의 연속선을 관측하여 흑점의 운동학적 진화 및 태양 활동도 변화를, H-alpha는 수소 6562.81Å 분광선을 관측하여 태양 채층의 물질 분포 및 플레어 폭발을 연구하는데 이용된다. VMG는 Fe I의 6302.8Å 분광선의 편광 관측을 이용하여 태양 광구의 3차원적 자기장 분포를, LMG는 역시 Fe I 6336.5Å 분광선을 이용하여 태양 광구의 시

선 방향에 대한 도플러 속도를 측정하는데 사용된다. VMG와 LMG 자료를 종합하면 태양 표면의 자기장의 3차원 벡터 성분을 구할 수 있어 자기장과 태양 표면 물질 분포의 상관 관계를 자세히 연구할 수 있다.

3. 관측 장비

3.1 CCD 카메라

전하결합소자 (Charge coupled Device; CCD)는 1970년대 초

미국의 Bell Lab에서 그 원리가 발표된 이후^[4] 수광 소자로서의 탁월한 성능을 미리 간파한 미국 제트 추진 연구소(JPL)의 Janesick 그룹에 의해 널리 홍보되어 80년대부터 천문학계에서 가장 널리 쓰이는 수광 소자가 되었다.

전하결합소자는 이미 사용되고 있던 많은 수광소자들 -광증배관(PhotoMultiplier tube; PM tube), 사진 건판, 다채널판(Multi-Channel Plate; MCP)- 들을 대체하여 대부분의 천문관측 기기에서 수광 소자로 쓰이고 있다. 이것은 전하결합소자가 기존의 수광소자에 비해 ① 높은 양자 효율, ② 약한 빛에서 센 빛까지 직선적으로 반응하는 탁월한 선형성, ③ 상을 왜곡시키지 않는 높은 기하학적 안정성(geometric stability), ④ 장시간 동안 그 특성이 변화하지 않는 물리적 안정성(physical stability) 들을 가지고 있기 때문이다.

90년대 들어 전하결합소자는 8mm 캠코더나 로봇의 눈 등으로 산업전판에 응용되기 시작하고 있으며 천문학계에서는 더 넓은 면적을 동시에 관측하기 위해 여러 칩을 동시에 장착하는 모자이크 전하결합소자 카메라등이 개발되고 있다.

일반 산업에 사용되는 것과 천문 관측용 전하결합소자 카메라 사이에는 다음과 같은 천체관측의 특수성 때문에 차이가 있다.

① 한장의 영상을 얻는데 걸리는 시간: 보통의 비디오 이미지가 아니라면 초당 20에서 30화면을 얻어야 한다. 그러나 천문 관측에서는 짧게는 수 초에서 수 시간에 걸쳐 한장의 화면(영상)을 얻게 된다. 이것은 본질적으로 천체에서 오는 빛이 미약하기 때문이며 이 미약한 빛을 다시 필터로 걸러거나, 분광기로 파장에 따라 퍼뜨리기 때문에 수 초에서 수 시간이 걸린다.

② 최소한의 잡음: 광원이 충분히 세다면 작은 잡음은 무시할 만 하다. 그러나 가장 미약한 빛을 측정하고자 하는 천문학에서는 잡음 역시 최소로 줄여야 한다. 열잡음을 줄이기 위해서 액체 질소를 이용하여 영하 100도로 전하결합소자 칩을 냉각한다.

③ 많은 화소: 전문가용 전하결합소자 카메라는 대부분 일백만개 화소 이상(1024 pixel×1024 pixel)을 갖는다. 일반 TV용이라면 이보다 적은 화소로 충분하다. 물론 이것은 상대적이고, 칩 가격이 점차 떨어지고 있으므로 산업용에서도 더 많은 화소를 쓰게 될 것이다.

④ 높은 양자효율: 같은 망원경과 필터에서 수광소자의 양자효율이 2배로 증가한다면 관측하는 이는 원하는 자료를 기존보다 절반의 시간에 원하는 자료를 얻을 수 있게 되고 더 어두운 천체까지 관측할 수 있게 된다. 즉 망원경 구경이 $\sqrt{2}$ 배 커진 망원경을 갖는 것과 같은 효과이다. 따라서 항상 최상의 양자효율을 갖는 칩을 사용하게 된다. 전하결합소자 칩의 특성상 짧은 파장($\lambda < 4000\text{\AA}$)에서는 급격하게 양자 효율이 떨어진다.

이것을 극복하기 위해 특별한 코팅을 하거나 칩을 얇게 만들어 뒷면에서 빛을 쬐는 방식(Back-side illumination)을 택하기도 한다. 물론 두 방식을 모두 쓰기도 한다. 이런 처리를 하게 되면 당연히 칩 가격은 올라간다.

아래에 보현산 천문대가 보유하고 있는 전하결합소자 카메라에 대하여 소개하기로 한다.

3.1.1 제작 과정

보현산 천문대 건설과 1.8미터 망원경 제작이 결정된 직후 천문대에서는 이 망원경의 주요 관측기기로 중분산 분광기와 영상용(Direct Imaging) 전하결합소자 카메라를 선정하였다. 여러 제작 가능한 곳을 알아보던 중 미국 하와이 대학의 천문학 연구소(Institute for Astronomy; IfA)와 공동으로 보현산 천문대 1번 전하결합소자 카메라(이후 BOAO_CCD#1으로 칭함)를 제작하게 되었다. 실제 IfA에서 완전히 제작을 끝내고 천문대 연구원이 이 과정에 참여하는 형식으로 진행이 되었다.

93년 제작을 마치고 국내에 들어온 BOAO_CCD#1은 실험실 시험을 거쳐 1.8미터 망원경이 가조립되어 94년 7월 목성과 슈메이커-레비9 혜성의 충돌장면을 관측하는데 이용되었다. 그 후 시험관측 기간을 거쳐 96년 9월 1.8미터 망원경이 국내외 천문학자들에게 공개된 이후 주 관측기기로 이용되고 있다. 그림 3에 BOAO_CCD#1 관측중 제어 컴퓨터에 나타난 이미지를 보여주었다. 보현산 천문대의 웹 홈페이지(<http://www.boao.re.kr>)를 방문하면 언제나 BOAO_CCD#1으로 찍은 멋진 천체 사진들을 볼 수 있다.

3.1.2 카메라 구성

BOAO_CCD#1의 구성도를 그림 4에 보인다. BOAO_CCD

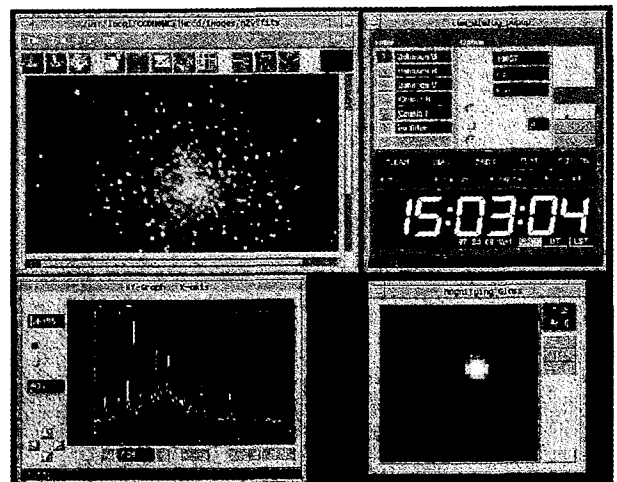


그림 3. BOAO-CCD #1 관측중 제어컴퓨터에 나타난 이미지.

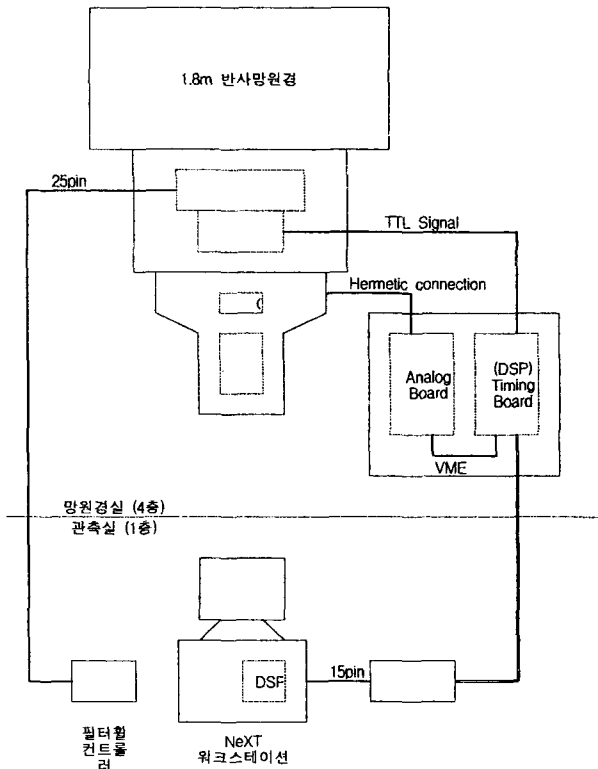


그림 4. 보현산 천문대 1번 CCD 카메라 시스템 (BOAO CCD#1)의 구성도.

#1는 크게 ① 칩과 듀어, ② 제어기, ③ 필터박스, ④ 제어 컴퓨터로 이루어져 있다. ①, ②, ③은 망원경의 카세스레인 초점에 부착되어 있으며 ④ 제어 컴퓨터는 이로부터 30여 미터 떨어진 관측실에 위치해 있다. 제어 컴퓨터와 제어기 사이는 광 케이블로 연결되어 있어 주위 잡음 영향없이 제어 명령 및 영상 자료를 전송할 수 있다.

칩은 Tektronics 사의 1024×1024칩(TK1024)을 사용하였다. 그 특징을 뒤에 설명할 2K CCD 칩과 비교하여 표 2에 정리하였다.

표 2. 현재 보유한 전하결합소자 칩의 특성 비교

특 성	TK1024 (back illuminated)	SI424A	
		front	back
format	1024×1024	2048×2048	
pixel size	24μm×24μm	24μm×24μm	
imaging area	24.6mm×24.6mm	49mm×49mm	
readout noise	<7e	<5e	<7e
dark current (at 20°C MPP)	0.05nA/cm ²	0.05nA/cm ²	0.05nA/cm ²
Q.E. (at -90°C)	400nm >35% 700nm >60%	<10%	>50%
제작사	Tektronix	SITE	

듀어는 IfA에서 제작한 modular dewar로서 액체 질소를 3리터 넣을 수가 있으며 칩을 영하 100도로 24시간 유지시켜 준다.

제어기는 미국 산디에고 주립 대학 (SDSU)에서 만든 범용 전하결합소자 제어기를 사용하였다. SDSU controller는 Motorola DSP56001을 기반으로 제어하고자 하는 칩의 특성에 맞는 Clock pattern과 Analog Voltage (D/A converter 사용)를 소프트웨어로 정의할 수 있어 대부분의 전하결합소자칩을 제어할 수 있다. 또한 Utility Board를 통해 카메라에 필요한 주변 장치(셔터, 필터휠, 온도제어)들을 제어할 수 있어 전체 카메라 계를 꾸미는데 있어 부가적인 장치를 최소화할 수 있다.

3.2 분광기

천체의 온도, 압력 그리고 구성 원소 등의 천체물리학적 특성을 자세히 연구하는 데 분광기는 필수적이다. 실제 천체에 관한 정보의 70% 이상이 분광 관측을 통하여 얻어진다 하여도 과언이 아니다. 보현산 천문대에서 보유하고 있는 분광기는 반사 그레이팅을 이용하는 분광기로서 빛 분산 정도로는 중분산 분광기로 분류할 수 있다. 관측 파장 영역은 3,500~10,000Å의 가시광 및 근적외선이며 1~4Å의 파장 분해능으로 관측할 수 있다. 보현산천문대 분광기의 제원과 광학계 구성은 다음과 같다(표 3).

슬릿 앞에 위치한 거울은 천체 관측 중에는 슬릿을 모니터링 하고, 비교 광원을 사용할 때는 별빛을 차단하면서 비교 광을 슬릿으로 보내 주는 역할을 한다. 슬릿은 알미늄 코팅이 되어있는 두 개의 유리면으로 구성되어 있는데, 광축과 10도 정도 기울어져 있다. 관측자는 관측 당일의 시상(see-

표 3. 보현산 천문대 중분산 분광기의 제원

크 기	70×25×50 cm (무게 80 kg)
관측파장 범위	3,500~10,000 Å
분 산	20~200 Å/mm (0.4~4 Å /pixe)
슬 릿	길이 : 25 mm, 폭 : 50~1,000 m (조절가능)
차수 제한 필터	BG37, BG39, GG475, RG595
collimator (f/15)	Dall-Kirkham Cassegrain 방식 (f=1,067 mm)
collimating beam 직경	60 mm
회 절 격 자	300, 600, 1200 groove/mm
카 메 라	f/1.5, f/4.2 (직경 : 100 mm)
광 검 출 기	CCD (Thomson 7896A, 1024×1024, 19 m/pixel)
비 교 광 원	Fe-Ne, Fe-Ar, 할로겐 램프

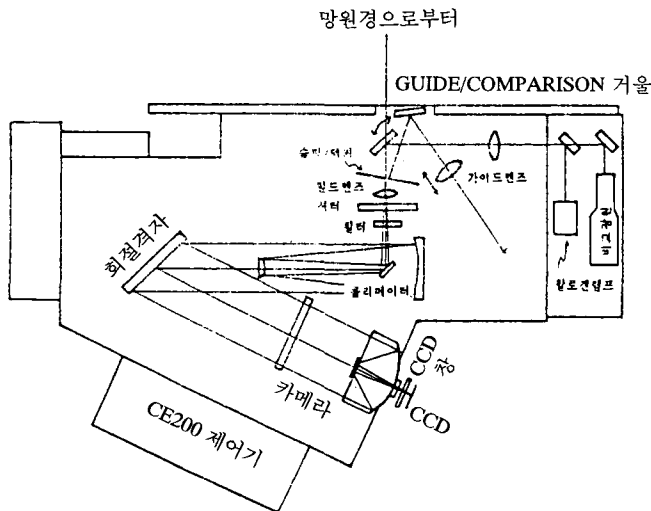


그림 5. 보현산 천문대 중분산 분광기 광학계 구성도.

ing) 크기나 관측 목적에 따라 슬릿 폭을 조절할 수 있다. 별 이미지의 일부는 알루미늄 코팅이 된 슬릿 표면에서 반사되어 슬릿 모니터링 장치에 상이 맺힌다. 사용자는 이 상을 통하여 별 이미지가 슬릿 중심에 제대로 맺혀 있는지 확인할 수 있다(그림 5).

필드 렌즈는 별과 같은 점 광원 천체를 관측할 때에는 필요가 없으나 외부 은하나 성운과 같이 넓은 천체를 관측할 때 이용된다. 이 때에는 콜리메이터와 회절 격자의 크기가 제한되어 있어 슬릿에 들어온 빛 중 일부는 관측할 수 없다. 필드 렌즈를 사용하면 빛을 집중시켜 상의 폭이 작아지도록 하여 슬릿에 설 상을 모두 관측할 수 있다.

콜리메이터는 Dall-Kirkham Cassegrain 형으로, 부경을 움직여 평행광을 만든다.

회절격자는 "standard plane reflectance ruled grating"으로 300, 600, 1200 groove/mm의 3가지를 사용하고 있다. 1차 빔을 관측할 때 이들 격자별 분산과 spectral purity(슬릿을 1초 열었을 때)는 표 4와 같다.

카메라는 초점거리 150mm(F/1.5)인 Schmidt Cassegrain 카메라와 420mm(F/4.2)인 Maksutov 카메라가 있다. 비교 광원

표 4. 각 회절격자의 특성.

회 절 격 자		300g/mm	600g/mm	1200g/mm
Blazed Angle(°)		7.40	14.67	28.70
선형분산 (Å/mm)	F/1.5카메라	224	112	56
	F/4.2카메라	80	40	20
분해능 (Å/pixel)	F/1.5카메라	4.5	2.2	1.1
	F/4.2카메라	1.6	0.8	0.4
spectral purity (Å, 슬릿 : 1")		4.1	2.1	1.0

에는 청색 영역을 관측할 때 사용하는 Fe-Ar, 적색영역을 관측할 때 사용하는 Fe-Ne hollow-cathode 램프가 있으며 CCD의 바닥퍼기(flat fielding)에 사용하는 텅스텐 할로겐 램프가 있다.

광 검출기는 Thomson사의 TH7896A CCD를 사용하는데 이것은 1024×1024개의 화소로 구성되어 있으며 각 화소의 크기는 19μm 정사각형이다. CCD는 전기냉각 방식으로 영하 40도를 유지한다. 이외에도 슬릿 모니터링 장치, 분광기 제어컴퓨터(486PC)와 콘솔이 있다.

4. 관측기기 개발 현황

4.1 2 K CCD 카메라 개발

4.1.1 개발 동기 및 목표

앞에서도 소개된 바와 같이 CCD는 모든 광학 천문관측기에 이용되는 핵심 부품이다. 천문대에서 2K 카메라 자체 제작을 시작한 배경은 다음과 같다.

- ① 더 넓은 시야를 한 번에 관측할 수 있도록 한다. (망원경 효율 증대)
- ② 주 관측기로서 고장에 대비한다. (자체 기술 확보)
- ③ 향후 국내 천문 관측용 전하결합소자 카메라 수요를 만족시킨다. (외국 제품 대체)

천문대에서 전하결합소자 칩 자체를 개발할 여건은 아니므로 아래 기술 개발을 주요 목표로 삼았다.

- ① 디지털 신호처리기(Digital Signal Processor; DSP)를 이용한 제어 소프트웨어 개발
- ② Motif(X11R5)를 이용한 GUI 관측자 소프트웨어(이미지 프로세싱 포함) 개발
- ③ 전하결합소자 카메라 조정(Optimize) 기술 개발
- ④ 관련 주변 기기 및 필터 박스 제작

4.1.2 구성

2K CCD는 앞서 설명한 BOAO_CCD#1과 같은 구성을 갖는다. 2K CCD 개발에서 원형 모형으로 기존 BOAO_CCD#1를 설정하였기 때문에 하드웨어 구조는 동일하다. 칩과 듀어 만이 큰 차이가 날 뿐이다. 물론 2K CCD 카메라는 모든 제작 과정을 천문대가 자체적으로 처리한다는 점이 가장 큰 차이이다.

2K CCD 칩의 특성이 표 2에 정리되어 있다. front로 표시된 것은 engineering grade 칩(나쁜 픽셀이 매우 많아서 상대적으로 싼 값에 판매하는 칩)이고, back으로 표시된 것은 최종 사용될 scientific grade chip이다.

4.1.3 현재 상태 및 앞으로의 전망

현재 까지 앞서 설명한 네가지 목표중에서 ①, ②, ④는 완성되어 기존 BOAO_CCD#1 에 결합하여 관측에 활용되고 있으며, 카메라 전체 시스템 조립이 완료되어 최종 조정 단계에 있다. 97년 9월까지의 실험실 최적화 작업을 완료한 후, 망원경 부착 시험 등을 거쳐 98년 상반기에 2K CCD는 외부 관측자들에게 공개될 예정이다.

이러한 기술 개발을 바탕으로 보현산 천문대 중분산 분광기의 최종 수광소자로 사용되고 있는 전자냉각방식 (Thermoelectric colling method)의 기존 상업적인 전하결합소자 카메라를 액체질소 냉각 방식의 카메라로 대체하는 작업을 수행중이며, 향후 국내에서 발생하는 전문가용 천체 관측 전하결합소자의 수요를 충당할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 IfA와 Lick 천문대등 선진 기술을 갖고 있는 외국 천문대와의 협조를 통하여 대형 망원경용 모자이크 전하결합소자 카메라의 제작기술을 확보할 예정이다.

4.2 파면 측정, 적응광학 연구 현황

천체 관측 기술의 발전은 (1) 더 어두운 천체까지, (2) 더 자세히, 그리고 (3) 더 넓은 전자파 영역에서 관측하는 데 목표를 두고 있다. 더 어두운 천체를 관측하기 위하여 망원경이 점점 대형화되어 이제 직경 10m의 망원경이 가동되고 있는 실정이다. 더 넓은 관측 영역의 측면에서는 적외선 감지 소자의 발달에 힘입어 적외선천문학이 바야흐로 황금기를 구가하고 있다. 지상망원경의 경우 더 자세히 천체를 관측하는 데 가장 큰 걸림돌은 대기의 요동이다. 망원경의 분해능은 회절 이론에 따르면 망원경 구경 크기에 따라 선형적으로 증가한다. 하지만 대기 요동 때문에 지상 관측의 경우 지구에서 가장 대기가 안정된 지역에서도 분해능이 0.5 arcsec에 못미치고 있다. 이는 직경 30cm 망원경의 회절 한계에 불과한 수준이다.

대기 요동에 의한 효과를 보정하여 망원경의 회절 한계 분해능을 얻는 기술이 적응광학기술이다. 적응광학기술은 원래 군사 부분에서 활발히 연구되었는데, 냉전의 종료에 따라 군사기밀이 해제됨에 따라 민간 부분으로 기술이 많이 이전되어 천문 관측기기 개발에도 큰 도움이 되었다. 현재 전세계의 3m 급 이상의 망원경은 대부분 적응광학기술을 도입하고 있는 실정으로, 근적외선 영역부터 적응광학 기술이 실제 관측에 활용되고 있다. 적응 광학 시스템의 핵심은 대기 요동에 의하여 찌그러진 파면 측정 기술과 측정된 파면을 보정하는 기술의 두 가지로 나눌 수 있다. 이 글에서는 이에 대한 자세한 논의는 생략하기로 하고 파면 측정에 관련한 천문대 연구 활동을 소개하기로 한다.

보현산천문대는 1.8m 망원경의 주경과 부경의 정밀한 광학계 정렬을 위하여 지난 4~5년간 꾸준히 파면 측정 기술을 연구하여 실용화하였다. 1.8 m 망원경의 광학계는 1/20 파장 정도로 정밀하게 가공되었지만 주경과 부경의 광축이 서로 어긋나면 코마 수차가 발생하여 망원경의 광학적 성능이 떨어진 다. 광축 정렬 이외에도 망원경의 광학적 성능을 조사하기 위하여 망원경이 실제 설치된 상태에서 어떤 수차가 있는지를 정밀하게 측정할 필요가 있다. 이러한 이유로 대부분의 천문대에서는 망원경의 광학계를 정확히 일치시키는데 고심해 왔다. 그러나 망원경의 광학계는 광학계 자체가 매우 크고 망원경이 설치되어 있는 상태에서 측정해야 하기 때문에 용이한 일이 아니다.

지금까지 망원경의 수차를 측정하는 데 가장 널리 이용되던 방법은 하트만 방식이다. 그러나 하트만 방식은 망원경 직경 크기의 하트만 마스크를 제작하여야 하면 데이터 획득 및 분석이 매우 번거로운 단점이 있다. 보현산천문대에서는 하트만 방식이 이용한 곡률 감지법을 이용하여 망원경의 수차를 정밀하게 측정하는 기술을 개발하였다. Hartmann 방식이 파면의 기울기를 측정 한 후, 이를 적분하여 파면을 추정하는 것에 비하여, 새로운 방식은 파면의 곡률 (Laplacian)을 측정 한 후, 이를 적분하여 파면을 추정하는 과정을 따르기 때문에 곡률감지법이라 부른다. 파면의 곡률은 비초점 이미지를 분석하여 구할 수 있다. 원래 이 방법은 하와이 대학의 F. Roddier에 의하여 개발되어 망원경의 수차 측정과 적응 광학계에 이용되고 있다. 비초점 면에 맺힌 상을 조사하면 광학계의 수차를 추정할 수 있다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. Roddier는 초점면 안쪽과 바깥 쪽에서 얻은 두 이미지의 차이를 분석하여 광학계의 수차를 정량적으로 측정할 수 있다는 사실을 발견하였다^[12]. 이 원리는 다음의 수학적 식으로 설명할 수 있다(그림 4 참조).

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = K \left(\nabla^2 W - \frac{\partial W}{\partial n} \delta_c \right)$$

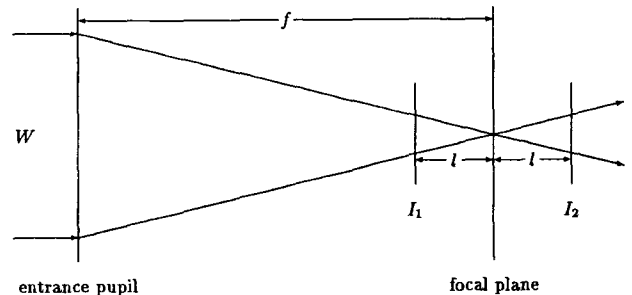


그림 6. 곡률 감지법의 광학 구성도.

위 식에서 I_1 과 I_2 는 초점면에서 l 만큼 안과 밖에서 얻은 2차원 이미지이며 δ_c 는 파면 가장자리를 따라서 형성되는 Dirac-delta 함수이다. 위 식은 I_1 과 I_2 의 차이는 파면 내부에서는 파면 W 의 곡률이 되고 파면 가장자리에서는 법선 방향의 기울기가 된다는 것을 의미한다. 따라서 위식은 Neumann 경계 조건으로 주어진 Poisson 2차 미분 방정식이다. 따라서 Poisson 방정식을 풀면 파면을 구할 수 있다. Poisson 식을 푸는 방법은 SOR, FFT 등 여러 가지가 있으나 보현산천문대는 파면을 Zernike 다항식으로 전개하고, 최소 자승법을 이용하여 그 계수를 쉽게 계산하는 방법을 독자적으로 개발하여 사용하고 있다^[3]. 이 방식의 장점은 복잡한 미분 방정식을 풀지 않고 쉽게 Zernike 다항식으로 분해된 파면의 수치를 계산할 수 있다는 점이다. 천문대에서 하트만 방식이 아닌 곡률 감지법을 파면 측정에 이용한 이유는, 파면 측정을 위하여 별도의 장치가 필요없고 천체 관측에 사용하는 CCD 카메라를 이용할 수 있다는 점이다. 실제 이 방법을 1.8m 망원경 광축 조정에 응용한 결과 망원경 수차를 30nm 정도로 정밀하게 측정할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

보현산천문대에서 적응 광학과 관련하여 현재 추진하고 있는 연구는 대기 시상 측정기 제작이다. 여기서 대기 시상은 대기 요동에 의한 파면의 찌그러짐 정도라고 이해하면 된다. 이 연구의 배경은 우선 국내 천문 관측지의 대기 요동을 정밀하게 측정하여 향후 관측기기 개발에 이용하는 데 있다. 관측기기의 효율을 극대화하기 위해서는 기기 설계시에 천체 이미지 크기를 고려하여야 한다. 다음으로는 대기 시상 측정기 개발을 통하여 실시간에 대기 요동에 의한 파면 측정 기술을 확보하여 향후 천문대 적응 광학 시스템 개발에 응용하고자 한다. 천문대에서 현재 구상중인 대기 시상기는 망원경 수차 측정에 이용한 방식과 기본 원리는 동일하다. 그림 7에 천문대에서 구상하고 있는 대기 시상기의 개략도를 나타내었다.

그림 7에서 MM (vibrating Membrane Mirror)는 공기압에 따라 곡률이 변한다. MM의 곡률에 따라 LA (Lenslet Array)에 형성되는 이미지의 비초점 거리가 +/-로 변하게 된다. LA의 역할은 비초점 이미지를 적당한 형태의 구역으로 분할하여 각 구역의 이미지를 APD (Avalanche Photo-Diode)에 형성시키는 것이다. 대기 시상 측정을 위해서는 LA를 4구역으로 나누는 것으로 충분하다. MM을 대개 수백 Hz로 진동시키고 이에 동기시켜 LA 각 구역을 통하여 APD에 들어온 광량자 수를 세어 이 신호를 분석하면 Zernike 다항식으로 분해된 파면 오차 중 몇 개의 계수를 구할 수 있다. 현재 구상중인 대기 시상 측정기의 경우에는 tip/tilt 항과 defocus 항을 계산할 수 있다. 대기 요동 이론에 의하여 몇 개의 Zernike 항 계수로부터 전체 대기 요

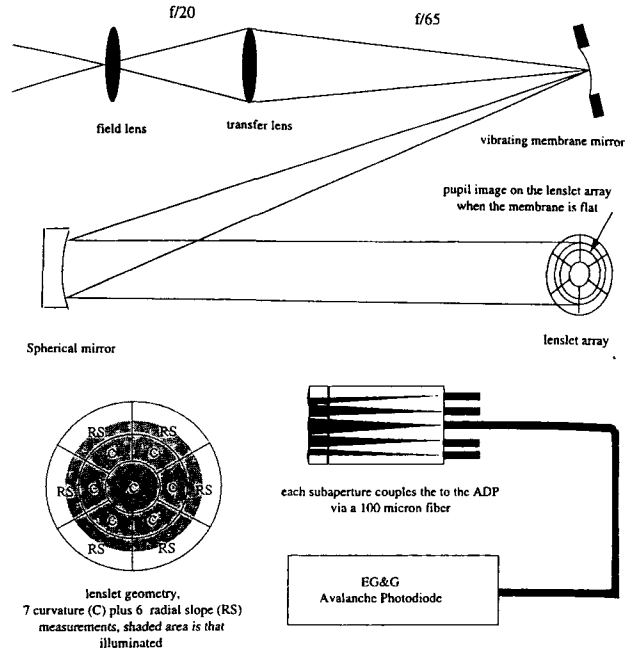


그림 7. 대기시상 측정기 구성도.

동의 크기를 통계적으로 추정할 수 있다.

4.3 1m 망원경 개발

현재 국내 망원경 제작 기술은 매우 낙후되어 있는 실정으로 30cm 이상의 망원경을 제작한 경험이 없는 상태이다. 이는 기술적 한계보다는, 국내 망원경 수요가 아직 많지 않아 산업계에서 많은 투자를 하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 국내에 도입된 연구용 망원경은 모두 외국 제품이다. 천문대에서는 그동안 60cm, 1m, 1.8m 망원경 운용을 통하여 축적된 지식을 바탕으로 94년부터 1m 망원경을 개발하고 있다. 현재 전체 망원경 시스템 설계가 완료되어 광학계와 기계부 제작이 50% 정도 진척된 상태이다. 앞으로 97년 말까지 시스템 제작을 완료하고 98년 부터는 시험 관측을 시작할 예정이다. 설계된 망원경은 대체로 1.8m 망원경과 비슷한 형태이다(그림 8 참조). 표 5에 개발중인 1m 망원경의 광학계 설계 데이터를 정리하였다.

광학계 설계와 관련하여 현재 개발 중인 1m 망원경의 특이

표 5. 1 m 망원경 광학계 설계 데이터

광학계 형태	: Ritchey-Chretien
망원경 초점비	: F/10
주 경	: 유효 직경 1 m, 초점비 F/10
	곡률 -5400.00 mm, conic constant -1.05330
부 경	: 곡률 -1980.37 mm, conic constant -3.53846
주경과 부경 사이의 거리	: 1977.16 mm
뒤초점 길이	: 700.0 mm

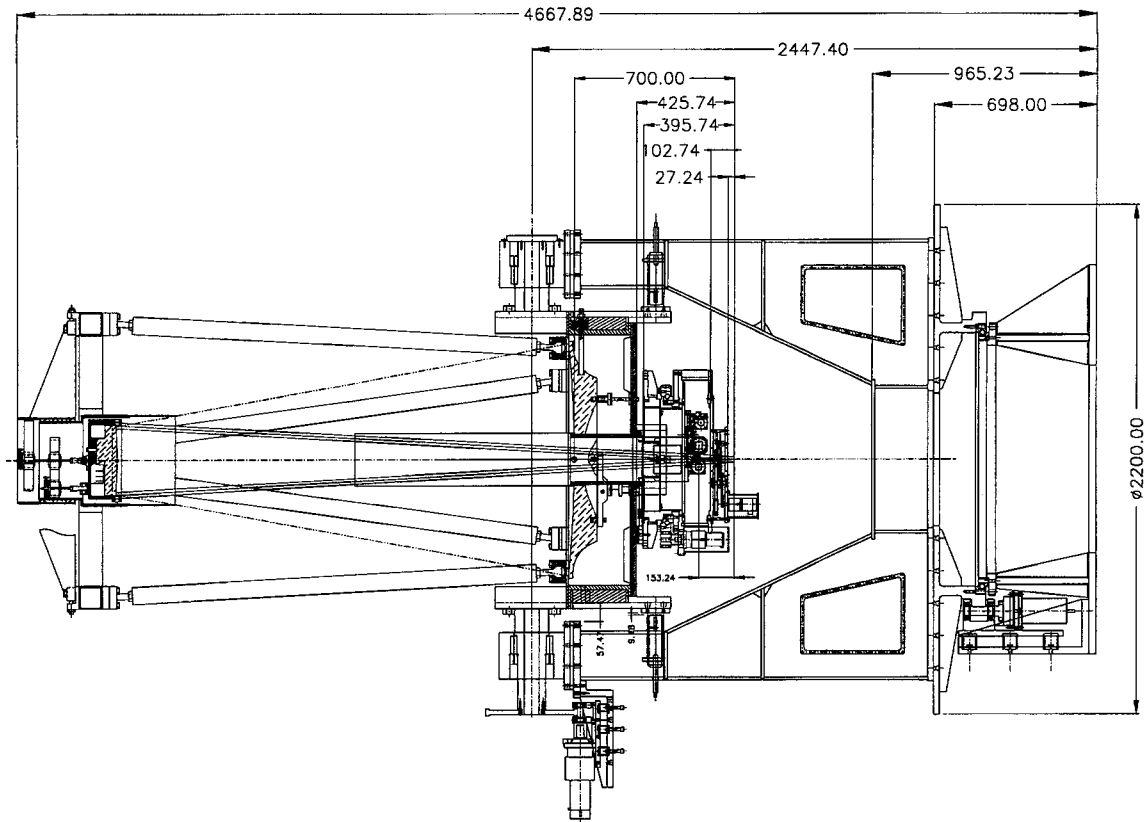


그림 8. 1 m 망원경 조립도.

점은 주경 뒷면을 double arch 형태로 파냈다는 사실이다(그림 8의 주경 부분 참조). 주경 뒷면을 이런 형태로 가공하는 이유는 먼저 주경 무게를 약 50% 정도 줄일 수 있기 때문이다. 주경 무게가 가벼워지면 망원경 기계부가 좀 더 간단해지고 열관성이 작아지기 때문에 관측중 주경과 외부 대기 사이의 온도차 때문에 생기는 대기 요동에 의한 이미지 찌그러짐이 줄어드는 장점이 있다. 다음으로는 주경 경면 변형을 최소화 하기 위한 지지 구조가 간단해지는 이점이 있다. 1m 크기의 망원경은 대개 18점 이상의 지지점이 요구되는 데, 주경 뒷면을 더블 아치로 가공하여 6점 지지만으로 경면 변형을 1/10 파장 이하로 줄일 수 있었다.

참고문헌

1. F. Roddier, "Curvature sensing and cokmpensation: a new concept in adaptive optics," *Appl. Optics* **27**, pp 1223-1225 (1988).
2. C. Roddier and F. Roddier, "Wavefront reconstruction from defocused images and the testing of ground-based optical telescopes," *J. Opt. Sci. Am. A* **10**, 2277-2287 (1993).
3. I. Han, "New Method for Estimating Wavefront from Curvature Signal by Curve fitting," *Optical Engineering* Vol. **34** No 4, pp 1232-1237 (1995).
4. W. S. Boyce, G. E. Smith, "Charge Coupled Device," *Bell Systems Technical Journal*, Vol **49**, pp 587-593, Apr. (1970).