

1. 들어가는 글

현재 선진국들은 대형광학망원경 분야에서 20년 만에 또 한번의 각축전을 벌이고 있다. 1949년에 미국의 Palomar천문대에 구경 5m의 망원경이 세워진 이후 3m~6m 크기의 대형망원경이 전 세계에 건설되었다. 이후 40년 만인 1990년대에는 2배의 구경인 6.5m~10m 초대형망원경들이 경쟁적으로 개발되어, 현재 십여 기의 초대형망원경이 운영되고 있다. 그렇지만 선진각국은 한 걸음 더 나아가, 25~42m의 거대망원경 개발에 또다시 경주하고 있는 것이다.

구경 6.5m 망원경 2기로 이루어진 마젤란 (Magellan) 망원경 개발을 주도했던 카네기재단의 천문대는 다시 한번 구경 25m의 GMT (Giant Magellan Telescope) 개발을 주도하고 있다. 여기에는 미국 내의 하버드대학, 국립

Smithsonian 천문대, 아리조나대학, 텍사스 A&M 대학, 텍사스 오스틴 대학들이 참여하고 있다. 국제 파트너로는 호주가 있는데, 호주국립대와 AAL (Astronomy Australia Limited)가 참여하고 있다. AAL은 호주 내 13개 천문우주관련 대학, 천문대, 기관들이 모여서 설립한 비영리 회사이다. 한국은 아직 Observer 자격으로 참여하고 있다. 이 GMT는 2018년에 완성되면 마젤란망원경이 설치되어 있는 칠레의 Las Campanas에 나란히 놓일 것이다.

1990년에 최초의 초대형망원경인 10m Keck 망원경을 건설하였던 캘리포니아공대는 캘리포니아주립대, 캐나다와 손잡고 30m 망원경인 TMT (Thirty Meter Telescope) 개발을 주도하고 있다. 이 역시 2018년 완성을 목표로 하고 있으며, 북반구와 남반구에서 가장 좋은 관측지인 하와이와 칠레 중 한군데에 설치하고자 한다. 한

특집 | 첨단 광학 및 광기술 개발

GMT 거대 망원경 광학계

김영수\*



그림 1. 세계의 대 망원경 현황

\* 한국천문연구원

편 미국의 Keck 망원경보다 8년이나 뒤늦게야 8m 망원경 4기를 설치했던 유럽은 이번에는 뒤처지지 않으려고 노력하고 있다. 유럽천문대가 주축이 되어 구경 42m인 E-ELT (European-Extremely Large Telescope)를 2017년에 완성한다는 목표로 열심히 추격하고 있는 것이다.

그렇다면 우리나라의 상황은 어떠한가? 현재 국내의 최대 망원경은 한국천문연구원이 보유하고 있는 보현산천문대의 1.8m 망원경이다. 이 망원경은 자랑스럽게도 만원권 지폐에도 나와 있지만 세계적인 망원경의 수준에는 못 미치고 있는 것이다. 전 세계적으로 4m급 망원경 뿐만 아니라 8m급 망원경들이 십여 대가 운영되고 있어서 보현산

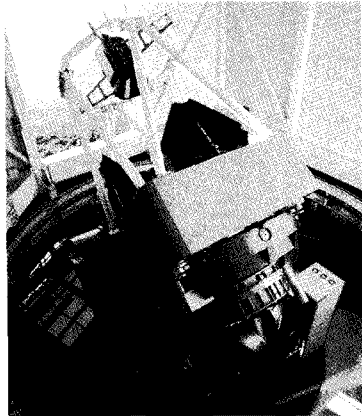
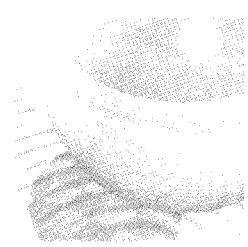


그림 2. 만원권 지폐에 있는 보현산천문대의 국내 최대 1.8m 망원경



망원경은 세계 50위권 아래로 밀려나 있는 것이다. 또한 스페인, 남아프리카공화국, 브라질, 칠레 등 우리나라와 경제수준이 비슷하거나 낮은 국가들도 8m~10m의 초대형망원경을 보유하고 있는 것이다.

이에 국내의 천문·우주과학계의 숙원인 대형망원경의 확보를 위하여 한국천문연구원 연구원이 주축이 되어 노력하고 있다. 세계 최대급인 GMT 25m 거대망원경의 개발에 참여하고자 하는 것으로, GMT 25m 망원경의 광학계에 대하여 자세히 알아본다.

## 2. GMT 망원경의 광학계

GMT의 주경은 원형의 8.4m 반사경 7장으로 이루어져 있다. 가운데에 한 장이 놓이고 그 주변에 6장의 반사경이

둘러싸여 있다. 이들은 곡률반경이 36m인 하나의 타원면을 이루어서  $f/0.7$ 의 매우 짧은 초점비가 된다. 부경 역시 7장의 반사경으로 지름 3.2m를 이루게 되는데, 각각의 반사경은 지름이 1.06m이다. GMT의 광학계는 Magellan 망원경과 마찬가지로 Gregorian 방식으로, 부경이 오목 타원면이다.

Gregorian 방식을 선택한 이유로는 다음의 몇 가지가 있다.

1. 부경은 광학적으로 지상 약 160m에 conjugate되는데, 넓은 시야각에서 ground layer AO (Adaptive Optics, 적응광학)을 하는데 아주 좋다.
2. Gregorian 방식은 주초점(prime focus)에 인공별을 두어서 망원경 내에서 적응광학계를 검정(calibration)할 수 있다. Cassegrain 방식은 이러한 검정이 불가능하다.

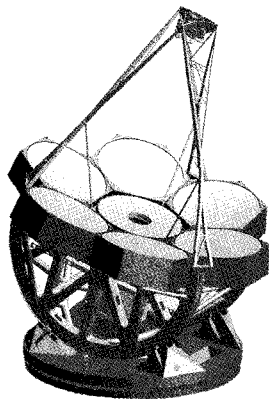


그림 3. GMT 개괄도

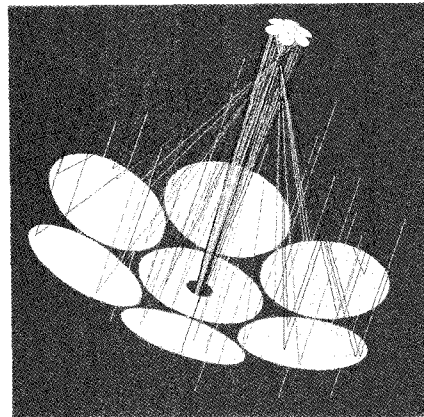


그림 4. GMT의 Gregorian 광학계

# GMT 거대 망원경 광학계

표 1. GMT의 광학계 사양

주경 (Primary Mirror, M1)		
형상	다중 반사경	7장 × 지름 8.4m
지름, D1	25.448 m	원형이 아님
곡률 반경, R1	36.000 m	
Conic constant, K1	-0.99829	타원면
개별 반사경 지름, D <sub>c</sub> 1	8.365 m	원형 반사경. 비축경들은 tilt됨: 13.522°.
중앙 hole의 지름	1.78 m	
부경 (Secondary Mirror, M2)		
형상	7개 다중 반사경	M1 반사경들과 1대1 대응
지름, D2	3.2 m	Pupil stop. 원형이 아님
곡률 반경, R2	4.2058 m	
Conic constant, K2	-0.71087	타원면
개별 반사경 지름, D <sub>c</sub> 2	1.063 m	
종합 (M1, M2)		
M1-M2간 거리, S	20.290 m	
M1 - 초점면 거리	5.500 m	
초점 거리, FL	202.745 m	
초점 비, f	f/8.0	전체 지름 25.4m
유효 면적 (Effective area), A	368m <sup>2</sup>	3.2m M2 원형 배플
Field curvature	2.203 m	관측기기 방향으로 구부러짐

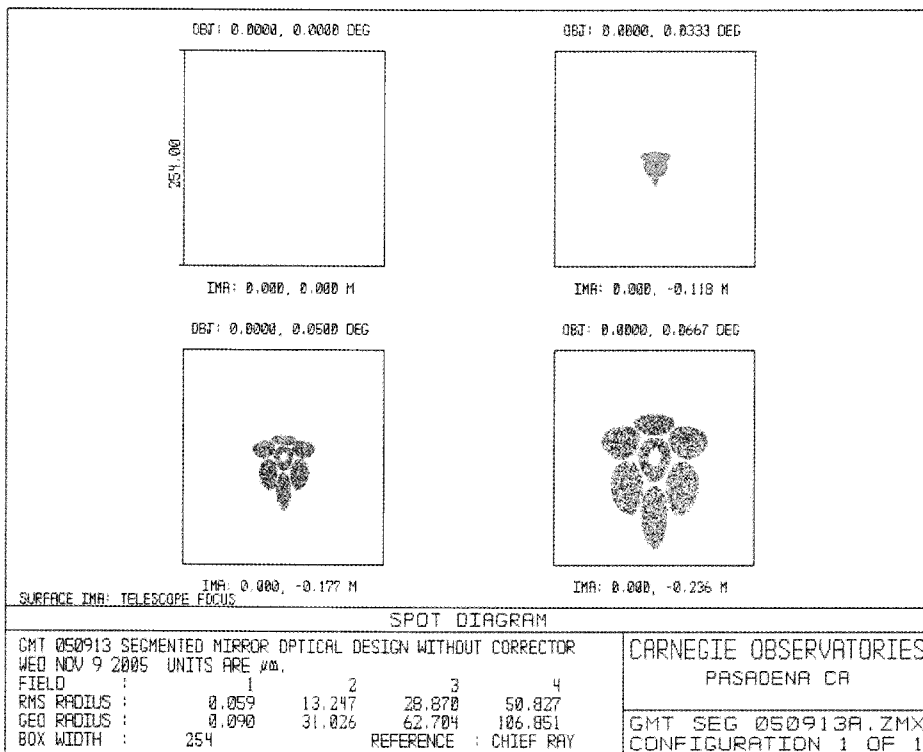
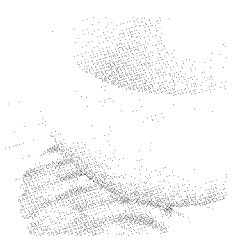


그림 5. GMT 망원경의 spot diagram



3. 망원경의 초점면이 관측기기 쪽의 방향으로 굽어져있어서 시상(seeing) 한계까지의 광시야 다천체 분광을 위한 collimator를 설계하는 데에 적절하다.
4. Cassegrain 방식과 다르게, 편평한 field screen을 망원경의 부경 아래에 위치한 exit pupil에 설치할 수 있다.

Gregorian 방식은 일반적으로 많이 사용하는 Cassegrain 방식에 비해 망원경의 길이가 길어지는 단점이 있다. 이 단점은 주경의 초점비를 매우 짧게 만들어서 망원경의 길이를 최소한으로 줄이는 것으로 보완했다.

이러한 광학계에 의해 만들어지는 상은 그림 5와 같다. 이는 입사각이 0', 2', 3', 4' 일 때의 각각의 상의 모습으로서, 박스의 크기는 0.25"이다.

다음 그림은 enclosed energy에 관한 도표이다. 파장이 500nm인 경우에 역시 입사각이 0', 2', 3', 4' 인 경우에 대하여 0.125"(127μm)까지 계산되었다.

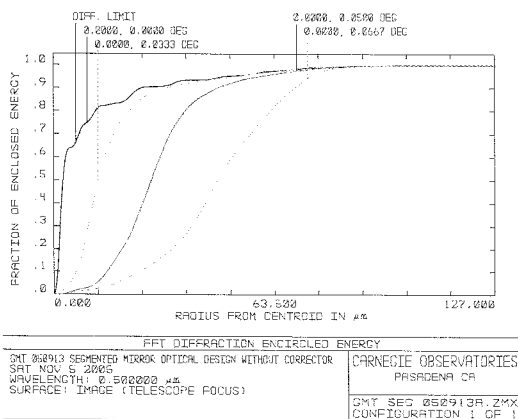


그림 6. GMT의 encircled energy

### 3. 주경 제작

GMT의 주경은 지름 8.4m의 반사경 7장으로 구성되어 있는데, 주변의 6장은 비축 비구면이면서 표면의 경사도가 매우 급하다. 이는 기술적으로 새로운 도전적인 사항으로서, 특히 표면정밀도를 시험하는 방법이 매우 중요하다.

GMT 주경의 설계와 제작은 파트너 기관 중에서 유일하게 시설과 장비, 경험을 축적하고 있는 아리조나 대학에서 수행된다. MMT(Multi mirror Telescope)와 Magellan, LBT(Large Binocular Telescope)의 주경 개발 경험을 가

지고 있는 것이다. 이미 증명된 설계와 현존하는 망원경 개발 경험으로부터 시작하여 여러 주요 개선을 하게 되어 GMT는 더욱 좋은 성능을 가지게 될 것이다. 첫 번째 주경은 이미 제작을 시작하여 표면 가공을 하는 중이며, 내년('09년) 초에 완성을 눈 앞에 두고 있다.

우선 주경의 형상에 대해 알아보면, 두께가 최대 704mm로서 지름과 두께 비가 약 12:1이므로 일반적인 반사경에 비해 상대적으로 얇은 것을 알 수 있다. 또한 경량화를 하여, 뒷부분에 벌집모양의 6각 구멍을 낸다. 이러한 honeycomb 반사경은 가벼우면서 강하여 중력에 의한 휨이 줄어들고 바람에 의한 영향도 적어진다. 또한 반사면의 얇은 유리나 강제적인 공기환기 방식으로 반사경의 thermal time constant를 한 시간 이내로 줄여서, 열에 의한 변형이나 mirror seeing이 궁극적으로 상에 크게 영향을 미치지 않도록 하였다.

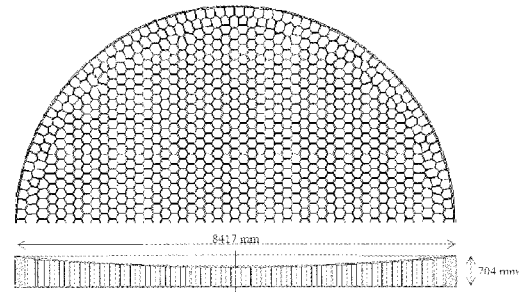


그림 7. 주경의 형상과 벌집모양의 경량화 모습

주경의 제작은 크게 3단계로 이루어진다. 반사경의 기본 형상을 만드는 주조(casting), 반사경의 형상을 다듬는 연마(generating), 반사경 표면을 정밀하게 다듬는 광택(polishing) 작업이다. 첫 번째의 주조작업은 화로(furnace)에서 진행된다. 우선 주경 모양의 틀을 만드는 데, 8.4m 크기로 벽을 만들고 반사경을 경량화하게 하는 1600여개의 서로 다른 육각기둥을 그 안에 배치한다. 설치가 완료되면 Ohara E6 유리 덩어리 18톤을 채운다. 화로의 뚜껑을 덮고 1,160도까지 가열하면서 5 rpm으로 회전시켜서 상부 표면을 곡면으로 만든다. 그리고는 용융점 아래로 급속히 온도를 내리다가 서서히 내리는데, 원자가 고정되는 530℃ ~ 450℃에서는 하루에 2.4 C 정도로 서

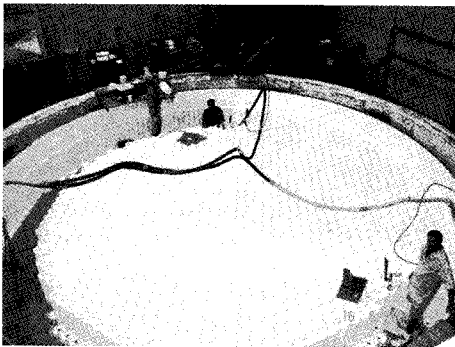
서히 식힌다. 이렇게 가열하고 식히는 과정은 3개월 정도 소요된다. 만들어진 반사경은 틀에서 떼어내 세척을 하고, 연마기로 옮겨진다.

연마작업은 3축 제어가 되는 LOG (Large Optical Generator)라는 연삭 틀을 이용하여 반사경의 뒷면과 앞면을 다듬는 것이다. 한번 LOG가 지나가면 표면은 0.5 mm ~ 0.1 mm 정도 깎이게 되고, 반사경의 전 표면을 한번 연삭하는 데에는 8시간이 소요된다. LOG는 profilometer 역할도 수행한다. 또한 레이저 tracker를 이용하여 표면 형상을 측정하는데, 두 가지 모두 측정정밀도는 10 $\mu$ m rms 이내이다. 한편 반사경의 중심부에는 50 mm 크기의 구멍을 뚫어 광택작업 시 발생하는 물과 광택제들을 배출시킬 수 있도록 한다.

세 번째 단계인 광택작업은 LPM (Large Polishing Machine)에서 이루어지며, 광택 틀은 다양한 크기가 사용되는데 주로 1.2m 크기의 stressed lap 한 쌍을 많이 사용한다. 이 stressed lap의 아래 알루미늄 판은 컴퓨터 제어

에 의해 그 면이 휘어지게 되어 있어서 표면 곡률이 바뀌는 비구면 뿐만 아니라 곡률 변화가 매우 큰 표면도 광택작업을 할 수 있다. 광택작업은 순서에 따라 다시 3단계로 나뉘어 진다. 첫 번째는 loose-abrasive grinding으로서, 연삭작업에 의해 발생한 미세한 표면 손상을 없애주어서 표면 정밀도를 2 $\mu$ m rms 정도로 만든다. 이는 stressed lap에 세라믹 타일을 붙여서 연마하는데, 연마제는 40 $\mu$ m ~ 10 $\mu$ m 크기를 사용한다. 표면측정은 여전히 laser tracker를 이용한다. 두 번째 작업은 stressed lap에 피치나 합성 패드를 붙여서 하는데, 반사경의 표면이 매끄러워져서 거울과 같이 상을 반사하게 된다. 이때부터는 영점보정계 (null corrector)를 붙인 간섭계를 이용하여 측정하고, scanning pentaprism으로 기울기 오차를 측정한다. 마지막 단계의 광택작업은 stressed lap과 작은 틀들을 사용하여 요구하는 정밀도까지 정확하게 표면 형상을 만들어 주는 것이다.

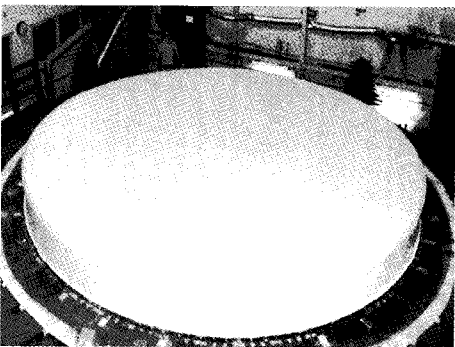
주경은 위의 세 단계를 거쳐서 완성되는데, 각 단계마다



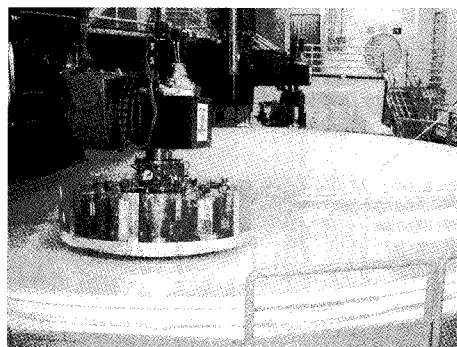
가) 반사경의 틀을 설치하는 모습



나) 화로를 가열하며 회전하는 모습



다) 연마하기위한 반사경의 모습



라) 반사경의 광택 작업

그림 8. 주경의 제작 과정

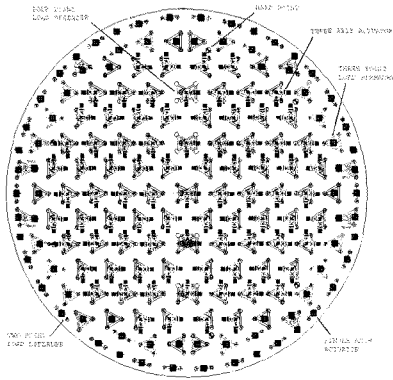
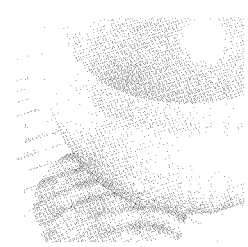


그림 9. 주경의 지지부

약 1년씩 소요된다. 그러므로 반사경 1장을 완성하는 데 3년이 소요된다. 그렇지만 세 단계가 각각 별도의 공간과 장비에서 수행되므로 3장의 반사경이 각각 일련의 작업단계에서 가공될 수 있어서, 매년 반사경이 1장씩 만들어질 수 있다.

완성된 주경은 이를 지지하는 지지부 위에 놓이게 되는데, 반사경은 상대적인 위치에 따른 하중의 변화에 의해 그 표면 형상이 조금씩 변하게 된다. GMT의 주경은 다른 대형망원경과 마찬가지로 하중의 영향을 보정하여 주는 능동광학이 적용된다. 능동적인 지지부는 비교적 간단한

공기 actuator를 이용하여 반사경의 형상을 매우 정밀하게 조정하는데, 6군데의 측정점과 165개의 actuator를 사용한다. 측정점은 반사경의 힘과 모멘트를 측정하여, 그에 대응하는 힘을 actuator들에 분배한다. 이 제어루프는 1Hz 정도이어서, 중력보정뿐만 아니라 바람에 대한 영향도 훌륭하게 보정해줄 것이다.

#### 4. 부경 (Secondary mirror)

GMT 부경은 오목한 타원면으로 만들어진다. 부경의 지름은 3.25m이고, 곡률반경이 4.2m인 하나의 타원면을 형성하게 된다. 부경은 7장의 반사경으로 이루어지는데, 각각의 지름은 1.06m이고 주경 7장과 1:1 대응한다. 부경은 두 가지 종류가 만들어질 예정이다. 하나는 일반적인 반사경에 빠른 tip-tilt가 가능한 부경 FSM(Fast-Steering Mirror)이고, 다른 하나는 매우 얇은 변형거울이 설치되는 적응광학용 부경 ASM(Adaptive Secondary Mirror)이다.

FSM은 두꺼우면서도 가벼운 반사경들로 이루어지는데, 그 지지대는 작고 빠르게 tip-tilt 운동을 하여, 바람에 의해 망원경에 발생하는 8Hz 정도의 낮은 진동을 보정하여 준다. 이러한 보정은 바람이 강해질 때에는 필수적으로

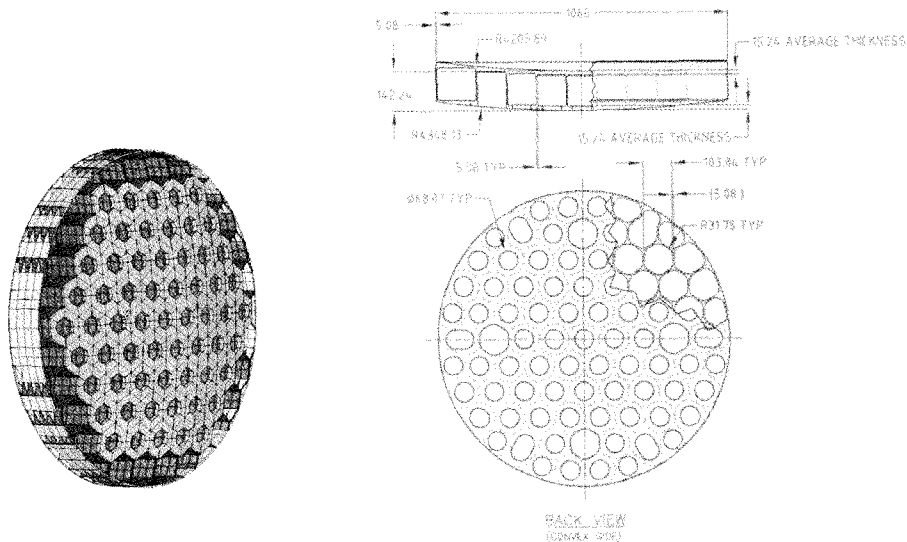


그림 10. FSM 반사경의 형상

필요한 것이다. FSM이 GMT에 먼저 설치되어 망원경 최종 조립과 초기관측에 사용된다. 7장씩의 주경과 부경의 광축을 조정하며, 이는 추후 ASM을 장착할 때에 그 기준을 제공하게 된다. 또한 ASM을 유지보수하거나 수리하는 동안에는, 이 FSM을 부착하여 지속적으로 관측할 수 있게 한다. FSM은 가시광 영역에서 관측하는 데에 주로 사용될 것이어서, 표면 코팅도 300nm 이하의 짧은 파장에서도 높은 반사율을 갖도록 한다. 반면에 ASM은 전형적인 코팅을 하게 되어, 400nm 이하에서는 반사율이 낮아지게 된다.

FSM의 반사경은 그림 10에서 보이듯이 meniscus 형태로서, 총 두께가 142mm이고 경량화한 질량은 107kg이다. 무게중심은 vertex의 뒤 22mm에 위치하고 관성모멘트는  $9.31 \text{ kg m}^2$ 이다. 경량화한 Zerodur로 만들어지는데, Schott사에서 기본 연마까지 하여 납품하게 될 것이다. 기계부와 전자부는 ASM과 공통으로 사용할 수 있도록 만

들어진다.

FSM에 대한 광학적 오차 요구조건은 표 2에 보이는 바와 같이 부경의 형상과 지지부에 대한 오차로 구분되는데, 상과 파면(wavefront)의 값으로부터 도출된 것이다. 요구값과 목표값은 80%의 에너지가 포함되는 spot의 크기를 각도(초각 arcsec)로 나타냈다. 광축정렬과 바람의 영향과 관련한 요구조건은 부경 지지대에 적용되어 있고, 형상오차는 부경의 가공과 시험 오차를 포함한다. 지지부의 오차는 단순히 상의 크기에 연관되는데, 고도 30도 ~ 90도 사이에서 중력에 의한 휨과 지지대에 의한 오차를 포함한다. 부경의 표면정밀도는 영점보정계인 CGH (computer-generated hologram)를 사용하여 측정하게 된다.

ASM은 부경을 직접 적응광학계로도 이용할 수 있게 하는 것이다. 두께가 2.4mm인 매우 얇은 변형거울을 자유자재로 휘어서 대기에 의해 왜곡된 상을 실시간으로 보정하는 것이다. 여기에는 672개의 전자기적 actuator를 사용하는데, 변형거울과 직접적인 접촉이 없이 높은 차수의 mode까지 수차를 보정한다.

이러한 적응광학계 부경은 현재 6.5m MMT (Multi Mirror Telescope) 망원경에서 사용되고 있다. MMT의 적응광학계 반사경은 지름이 640mm이고 변형거울의 두께는 2.0mm로서 336개의 actuator를 사용하고 있다. 두 개의 8.4m 망원경을 가지고 있는 LBT (Large Binocular

표 2. FSM의 부경과 지지부의 제작을 위한 상의 크기 요구값

오차 항목	$\theta_{80}$ (arcsec)	
	요구값	목표값
부경 형상오차	0.039	0.026
부경 지지부 오차	0.020	0.020
합계	0.044	0.033

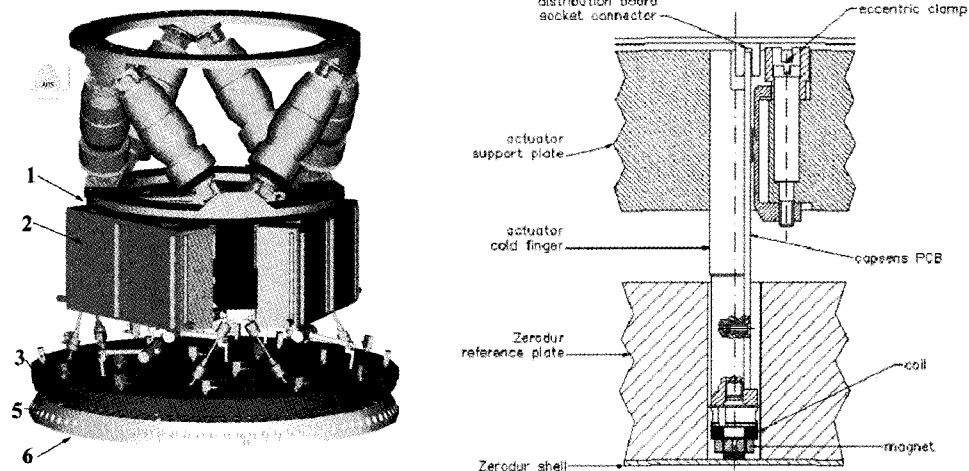


그림 11. LBT의 adaptive secondary 모습과 하나의 actuator 주변의 상세도

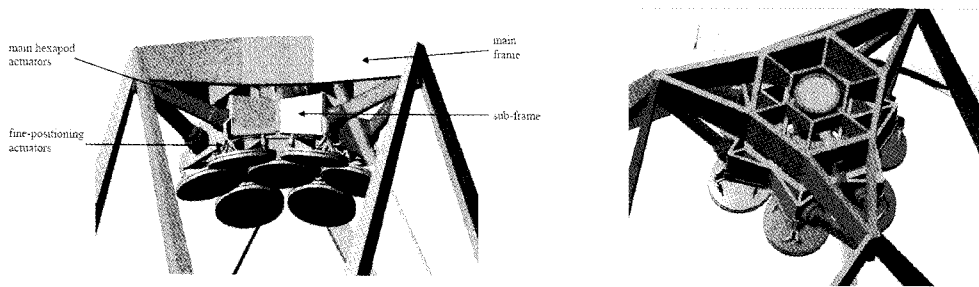
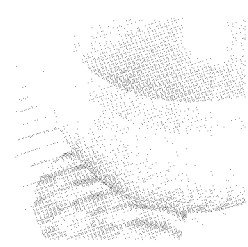


그림 12. ASM용 부경을 붙인 지지대의 모습과 부경부의 뒷면 모습

Telescope)는 현재 2개의 적응광학계 부경을 제작 중에 있다. 각각의 부경은 지름이 911mm인 Zerodur로 만들어지는데, 두께가 1.6mm인 변형거울을 672개의 actuator로 조정한다. 그림 11은 LBT용 적응광학계 부경의 모습과 actuator 한 개의 설치된 모습을 보여준다. 변형거울 (6)은 Zerodur 기준 유리판 (5)에 붙어있고 그 위에 냉각튜브 (3)가 있다.

부경의 지지부는 부경의 뒤에 위치해서 보이지 않게 하여, 주경 쪽에서 보면 각 반사경의 사이로는 배경하늘이 보이게 된다. 이것은 적외선 관측 시에 최적의 sky baffling을 하기 위한 것이다. 그리고 주경에서 오는 빛 중에서 시야 10° 내의 광선들만 부경에 도달하게 된다. ASM과 FSM 모두 똑같은 방법으로 지지부에 장착이 된다.

망원경의 상부 지지구조의 6개 strut가 삼각형 모양의 부경의 주 지지대를 잡고 있다. 이 주 지지대는 6개의 강한 위치조정용 actuator를 통해 부 지지대와 연결되어 있다. 7장의 부경은 각각 부 지지대에 다시 6개의 빠르고 정밀 위치조정 actuator를 통해 부착되어 있다. 주 actuator는 부경 전체를 조정하여 중력의 효과와 망원경 구조의 열적 변형을 보정하여 준다. 부 actuator는 부경 각각의 조정을 세밀하게 하며, 주경과 부경의 광축을 세부조정하게 된다. FSM에서는 정밀한 부 actuator가 바람에 의한 효과와 망원경 구동에 의한 jitter 효과를 보정하기 위해 빠르게 tip-tilt 운동을 하게 된다. ASM에서는 변형거울이 이 빠른 운동을 담당하게 되고, 부 actuator는 변형거울의 actuator들이 발생하는 stroke를 줄이는 느린 보정을 맡게 된다.

구조부의 주요 재질로는 알루미늄과 탄소섬유를 사용한

다. 설계의 기본개념은 탄소섬유 frame을 사용하여 구조적 성능을 개선하고, sub-frame의 열팽창을 최소화시키는 것이다. 바람이 불면 부경이 흔들리게 되는데, 돔의 환풍창을 닫은 상태에서 13m/s의 (90%) 바람이 불면 active 보정을 하지 않는 경우에는 0.08" rms의 상이 뻗힌다. 75%인 9.5m/s의 바람에서는 거의 반인 0.04"로 작아진다. FSM에서는 이 pointing error와 함께 tracking jitter에 의한 작은 error를 정밀 actuator를 이용하여 보정한다.

## 5. 맺는 글

이상으로 GMT의 광학계 성능과 주경의 제작과정, 부경의 구조에 대하여 알아보았다. 이외에도 다양한 광학계가 GMT 망원경을 개발하는 데에 필요하다. 적응광학계는 기존의 대형망원경에서 사용하는 수준을 넘어서, Multi-conjugate AO, Extreme contrast AO, Ground layer AO 들로 더욱 세분화되고 정교하게 만들어진다. 망원경의 뒷단에 부착될 CCD 카메라나 분광기와 같은 관측기들도 크기가 커지고 복잡하게 되어 한 차원 높은 세계 최고의 기술들이 필요로 하게 된다. 또한 광시야 보정 광학계도 있다. 자세한 사항은 CoDR(Conceptual Design Review) 자료에 있다. 이는 웹페이지 <http://www.gmto.org> 에서 찾아볼 수 있다.

이제 GMT 개발에 한국이 참여하게 되면 우리는 이러한 대형광학에 관한 첨단기술을 습득할 수 있게 되고 일정 부분 참여하게 될 것이다. 이로서 국내의 광학기술이 급성장



하여 세계적으로 어깨를 나란히 할 수 있게 되기를 바라며, 이는 꼭 달성해야 할 것이다.

## 참고 문헌

- (1) Carnegie Institution of Washington, GMT Conceptual Design Review, California (2006)
- (2) 한국천문연구원, 대형광학망원경개발사업 계획서, 대전 (2008)

## 약 령



### 김영수

• 학력 :

1998.11	London University (UCL) Ph.D.
1999.4~2000.6	유럽천문대 (ESO) 객원연구원
2000.7~2002.12	한국항공우주연구원 선임연구원
2002.12~현재	한국천문연구원 선임연구원
2004.8~2006.8	한국과학기술기획평가원 부연구위원
2004.3~현재	과학기술연합대학원 부교수