우주 생명의 신비를 밝히는 거대마젤란망원경

거대마젤란 망원경의 첨단 광학기술

DOI: 10.3938/PhiT.24.060

이성호·김지현·송제현

Optical Technology for the Giant Magellan Telescope

Sungho LEE, Jihun KIM and Jehun SONG

The optical design of the Giant Magellan Telescope (GMT) is based on a Gregorian optical prescription with segmented primary and secondary mirrors where each primary segment is conjugated with a matching secondary segment. The total aperture of the telescope is 25.4 m, with an $f/0.7$ primary focal ratio and an $f/8.2$ final focal ratio. The GMT will provide a 10-arcmin-diameter uncorrected field of view and a 20-arcmin field of view with a wide field corrector. The primary mirror is composed of seven 8.4-m segments, and the secondary is composed of seven 1.05-m segments, where two different sets of secondary mirror systems - the ASM (adaptive secondary mirror) or FSM (fast-steering secondary mirror) can be used. The ASM, with deformable front surfaces, is the core of the GMT adaptive optics (AO) system and will support four different observing modes: natural seeing, ground-layer adaptive optics (GLAO), natural guide-star adaptive optics (NGSAO), and laser tomography adaptive optics (LTAO). The FSM is optically identical to the ASM and will consist of seven rigid, light-weight mirrors. The

Korea Astronomy and Space Science Institute developed a prototype of the FSM from 2009 to 2014 in preparation for the manufacture of the real FSM segments, which is expected to begin in 2016.

서 론

거대 마젤란 망원경(Giant Magellan Telescope; GMT)은 그레고리안(Gregorian) 방식의 광시야 망원경으로 유효 초점비가 $f/8.2$ 이며 초점면 상에서 1 mm는 1.0각초(arcsecond)에 해당된다. 유효 구경 25.4 m인 GMT 망원경의 주경은 그림 1에서 보이는 것과 같이 7개의 조각거울로 구성되어 있으며 각각의 조각거울은 7개의 부경 조각거울과 켈레(conjugate)를 이룬다. 한 개의 직경이 8.4 m인 주경 조각거울들은 미국 애리조나(Arizona) 주립대의 리처드 F. 캐리스 반사경 연구소(Richard F. Carris Mirror Lab; RFCML)에서 제작하고 있는데, 붕규산(borosilicate) 유리 소재를 사용하고 뒷면을 별집모양의 경량화 구조로 만든다. 일곱 개의 조각거울이 모여서 만드는 주경의 광학면은 포물면에 가까우며, 주경의 초점비는 $f/0.7$ 로서 이 값은 현대의 대형 반사경 가공기술을 고려할 때 GMT 망원경의 구조를 최대한 작게 만들 수 있도록 설정된 값이다. GMT의 관측시야는 직경 10각분(arcminute)이며 광시야 보정렌즈를 사용하면 20각분까지 관측이 가능한데, 이것은 초점면 위에서 1.2 m의 면적에 해당한다.

GMT 망원경의 가대는 경위대식으로서 구조적 견고함, 부피의 최소화, 운영의 효율성을 최우선적으로 고려하여 설계되었다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 GMT 망원경의 구조는 크게 방위각 선로, 방위각 구조물, 광학계 지지 구조물(optical support structure; OSS)의 세 부분으로 구분된다. 주경과 부경 등 모든 광학계는 OSS 내에 설치되며 관측기기가 장착되는 세 가지 설치대(station) 또한 OSS 내의 주경 아래 부분에 위치한다. 고도로 안정적인 환경이 요구되는 관측기기의 경우 관측하는 동안 중력의 방향이 바뀌지 않는 방위각 구조물 위에 설치되며 망원경 초점면에 모인 별빛을 광섬유나 별도의 전달

저자약력

이성호 박사는 서울대학교 이학박사로서 한국천문연구원에서 각종 광학적 외선 천문관측기기 개발에 참여하였으며, 현재 대형망원경사업단에서 GMT FSM 개발을 수행하고 있다.(leesh@kasi.re.kr)

김지현 박사는 애리조나 대학교 이학박사로서 Large Binocular Telescope 개발에 참여하였으며, 현재 한국천문연구원 대형망원경사업단에서 GMT FSM 개발을 수행하고 있다.(jihun@kasi.re.kr)

송제현 연구원은 공주대학교 광공학석사로서, 현재 한국천문연구원 대형망원경사업단에서 GMT FSM 개발을 수행하고 있다.(jhsong0717@kasi.re.kr)

Fig. 1. (top) The GMT optical layout with the primary and secondary segments in conjugation (*i.e.* P1 to S1, P2 to S2, *etc.*). (bottom) The view of the primary mirrors from the sky, illustrating the unobscured light path to the outer segments of the telescope at any location in the 20 arcmin diameter field of view. (Figure from Bernstein, *et al.*, 2014)^[1]

광학계(relay optics)를 써서 끌어온다. GMT 망원경에는 두 가지 다른 종류의 부경을 사용할 수 있다. 하나는 적응광학 부경(adaptive secondary mirror; ASM)으로서 7개의 직경 1.05 m 크기의 변형거울로 구성되며 GMT 적응광학(adaptive optics; AO) 시스템에 사용된다. 다른 부경은 7개의 일반 경량화 반사경으로 구성된 고속구동 부경(fast-steering secondary mirror; FSM)으로서 광학적으로는 ASM과 동일하게 설계된다. 두 개의 부경은 각각 별도의 망원경 최상부 구조물에 6 자유도(6 degrees of freedom) 액추에이터를 써서 부착되며, 부경을 서로 교체할 때에는 망원경으로부터 해당 구조물 전체가 분리되어 통째로 교체하게 된다. FSM은 ASM이 완성되기 전 GMT 망원경의 초기 관측 기간과 ASM 완성 이후에는 ASM의 유지보수 기간에 사용될 예정이다.

Fig. 2. The major subassemblies of the telescope structure. (Figure from Bernstein, *et al.*, 2014)^[1]

GMT 적응광학 관측기술

적응광학기술은 GMT 망원경에 필수적인 요소이다. GMT 적응광학기술의 핵심은 ASM 부경시스템으로 MMT(Multiple Mirror Telescope), LBT(Large Binocular Telescope), Magellan, VLT(Very Large Telescope) 망원경에 사용된 ASM들과 유사한 크기와 구조로 개발될 예정이다. GMT의 ASM은 자연시상(natural seeing) 관측, 지상층 적응광학(ground layer adaptive optics; GLAO) 관측, 자연별 적응광학(natural guide-star adaptive optics; NGAO) 관측, 레이저단층촬영 적응광학(laser tomography adaptive optics; LTAO) 관측의 4가지 관측모드를 지원한다.

자연시상(natural seeing) 관측모드는 전체 파장 범위에서 동작하지만 지구 대기에 의한 파면(wavefront) 왜곡으로 퍼진 이미지를 관측기에 제공한다. 이 관측모드에는 ASM과 FSM 모두 사용할 수 있다. 적응광학계는 대기의 난류로 인해 왜곡된 파면을 빛의 회절한계에 의해 결정되는 가장 이상적인 파면에 근접하도록 보상하는 시스템이다. 이때 파면의 보상 정도를 스트렐비(Strehl ratio)로 표현하는데 1 또는 100%에 가까

REFERENCES

- [1] R. A. Bernstein, P. J. McCarthy, K. Raybould, B. C. Bigelow, A. H. Bouchez, J. M. Filgueira, G. H. Jacoby, M. Johns, D. Sawyer, S. Shectman and M. Sheehan, SPIE Proceedings **9145**, 47 (2014).

울수록 더 화질이 좋음을 뜻한다.

지상층 적응광학(GLAO) 관측모드는 ASM을 그레고리안 방식으로 배치함으로써 추가적인 광학계 없이 구현된다. 이 모드에서는 최대 10각분의 광시야 관측이 가능하며, 낮은 고도의 대기난류를 보정함으로써 근적외선 영역의 화질은 두 배 가량, 가시광 영역의 화질은 그보다 조금 낮게 개선할 수 있다. GLAO 관측모드에서는 망원경의 능동광학(active optics) 파면 센서(wavefront sensor)들을 사용하고 자연별을 AO 기준별(guide star)로 활용하므로 모든 관측기기에 대해 설치 위치에 구애받지 않고 적용할 수 있다.

자연별 적응광학(NGSAO) 관측모드는 한 개의 밝은 자연별을 기준별로 사용하며 이 별 주변의 좁은 시야에 대해 근적외선부터 적외선 파장대에 걸쳐 높은 스트렐비와 높은 대비(contrast)의 회절한계 화질을 제공한다.

레이저단층촬영 적응광학(LTAO) 관측모드는 하나의 희미한 자연별과 여섯 개의 레이저 인공별을 사용하여 하늘의 거의 대부분의 영역에 대해 다소 낮은 스트렐비의 적외선 회절한계 관측 능력을 제공한다. LTAO의 스트렐비는 근적외선 파장대에서 약 30% 이상으로, NGSAA의 약 70% 이상에 비해서는 낮지만 회절한계 관측시야가 자연별 주변의 좁은 영역에 국한되지 않는다는 것이 강점이다.

GMT의 AO 시스템은 망원경 제어시스템의 일부분으로 작동한다. 자연별이나 레이저 인공별로부터 관측된 AO 파면 센서 신호는 관측기기, 망원경 능동광학 파면 센서, 조각거울 사이의 에지 센서(edge sensor)로부터 측정된 신호들과 결합되어 ASM 구동 명령 계산에 사용된다. 이러한 처리과정은 망원경 제어시스템에 의해 조율된다.

GMT의 광학계 구성 및 능동광학 시스템

GMT 망원경의 광학계는 3가지 구성으로 운용할 수 있다(그림 3). 첫 번째는 그레고리안 협시야(Direct Gregorian Narrow Field; DGNF) 구성으로 주경으로 들어온 빛은 부경 반사 후에 기본적인 그레고리안 초점을 형성한다. DGNF 구성에 의한 시야각은 최대 직경 20각분으로 그 바깥쪽은 주변감광(vignetting)으로 어두워지는데 실질적으로는 직경 10각분의 외곽에서는 수차가 존재한다. 두 번째는 그레고리안 광시야(Direct Gregorian Wide Field; DGWF) 구성으로서 DGNF 구성의 광경로에 광시야 보정렌즈와 대기분산 보상기(Atmospheric Dispersion Compensator; ADC)를 추가함으로써 기본 그레고리안 초점면에 수차가 보정된 20각분의 시야각을 제공한다. 세 번째 구성은 꺾임 설치(Folded Port; FP) 구성으로서 주경, 부경 반사 후에 제 3반사경을 써서 광경로를 그레고리안 기기 회전대의 상판

Fig. 3. Optical configurations for GMT: Direct Gregorian Narrow Field (DGNF), Folded Port (FP) and Direct Gregorian Wide Field (DGWF), which is obtained using several refracting optics that comprise the Wide Field Corrector and Atmospheric Dispersion Compensator (WFC/ADC). (Figure from Bernstein, *et al.*, 2014)^[1]

위에 설치된 관측기기 쪽으로 꺾어준다. FP 구성에서 주변감광 없이 관측 가능한 시야각은 3각분이다. 이러한 세 가지 구성 외에 부가적으로, 일정한 중력 방향을 유지하기 위해 방위각 구조물 위에 설치하는 관측기기 쪽으로 광경로를 보내주는 전달 광학계가 있다. 또한, 세 가지 기본 구성은 보조 설치대나 기기 플랫폼에 설치되는 관측기기에 따라 변용될 수 있다.

DGWF 구성에서 사용되는 보정렌즈와 ADC는 370 nm부터 1 μm 까지의 넓은 파장 영역에서 잘 보정된 20각분의 시야각을 제공할 뿐만 아니라 서로 다른 파장 간의 대기분산량의 차이를 보상하는 역할도 한다. 보정렌즈와 ADC는 주경의 중앙 조각거울 셀(cell) 내에 있는 선로에 장착되어 있어서 필요에 따라 광경로 상으로 들어오고 나갈 수 있다. 보정렌즈의 구성 요소 중 마지막 비구면 시야 렌즈(field lens)는 관측기기 내부에 위치하게 되는 DGWF 초점면의 바로 앞에 놓여진다.

주경의 경면 형상과 주경-부경 간의 정렬은 파면제어시스템에 의해 능동적으로 유지된다. 그레고리안 초점면에 위치한 포착-가이드-파면측정 시스템(acquisition, guiding, and wavefront sensing system; AGWFS)이 4개의 자연별을 기준별로 사용하여, 광학정렬 오차, 상면만곡(distortion), 구조물의 저주파(20 Hz 미만) 진동 등을 감지한다. 망원경 초점과 조각거울 간의 정렬 오차는 주경, 부경, 제 3경을 지지하는 액추에이터들을 사용해서 보정하고, 고차(high order) 수차들은 주경 지지 시스템이 보정한다. 망원경 구동을 가이드하기 위한 피드백도 파면제어시스템에 의해 이루어진다. 4개의 AGWFS 센서들은 초점면 상의 광축으로부터 6분각에서 10분각 사이의 고리모양(annulus) 영역에서 옮겨 다니는데, 이와 별도로 그레고리안 시야의 중심부 광축 상에 전개되어 파면제어시스템의 정기적인 정렬과 검교정에 사용되는 센서도 있다. 또한, AGWFS는 GLAO 관측모드에서 ASM 경면 형상을 제어하기 위한 피드백도 제공한다. NGSAA나 LTAO와 같은 회절한계 적응광학 관측모드의 경우 ASM에 필요한 피드백은 별도의 자연별 또는 레이저 인공별 AO 파면 센서들과 조각거울 에지 센서들에 의해 제공된다.

Fig. 4. The first GMT primary mirror segment on the polishing machine at the Richard F. Carris Mirror Lab (RFCML). (Photo from www.gmto.org)

GMT 주경 제작

GMT의 주경은 8.4 m의 원형반사경 7개로 이루어져 있다. 1개의 축상(on-axis) 조각거울을 6개의 비축(off-axis) 조각거울이 둘러싸고 있는 형태로, 6개의 비축거울은 높은 비구면율을 갖는 비축 비구면 반사경이다. 이러한 비축 반사경의 제작은 난이도가 높은 기술을 요하게 되는데 RFCML에서는 제작의 난이도 및 문제 가능성을 미리 파악하기 위해 GMT의 개념설계 초기 단계부터 비축 반사경의 제작을 시작하였다. 이 반사경 제작에는 새로운 광학측정시스템의 개발과 28 m 높이의 테스트 타워 등 새로운 기반시설, 교차검증을 할 수 있는 표면정밀도 측정방법의 개발 등이 요구되었다.

주경의 제작은 크게 3단계로 이루어진다. 반사경의 기본형상을 만드는 주조(casting), 반사경의 형상을 다듬는 성형(generating), 반사경 표면을 정밀하게 다듬는 연마(polishing)작업이다.^[2] GMT 주경의 조각거울 7개 중 첫 번째로 제작된 반사경을 GMT1이라고 하는데 이것은 비축 조각거울로서 2005년에 주조되었고 2012년에 완성되었다. GMT1의 표면 정밀도는 27개 변형모드의 능동광학 보정 후 기준으로 19 nm RMS이며 더 많은 변형모드로 보정할수록 더욱 정밀해진다. 반사경 자체의 표면형상을 3번 측정한 결과는, 초점(focus), 비점수차(astigmatism), 코마수차(coma), 세조각수차(trefoil), 구면수차(spherical aberration)가 모두 오차범위 내에서 일치했다. 초점, 비점수차, 코마수차가 잘 맞다는 것은 곡률반경, 비축거리, 회전방향 등 조각거울의 기하학적인 구조와 배치가 광학설계에 맞게 잘 가공되었다는 것을 의미한다.

GMT2는 2012년에 주조되어 현재 반사경 뒷면의 연삭(grinding)과 연마 및 반사경지지 시스템의 하중 분산장치를

부착하는 두 번째 공정에 있다. GMT3는 2013년 중반에 주조되었으며, 축상 조각거울인 GMT4는 2015년 9월에 주조를 시작하였고 GMT5는 소재를 구매한 상태이다. 현재 단계에서 축상 조각거울을 제작하는 이유는 주경 7개 중 4개의 조각거울만 먼저 사용해서 초기 운영을 시작하기 위해서이다.

GMT 부경: ASM, FSM

GMT의 부경은 두 가지가 있는데, 하나는 변형 가능한 Adaptive Secondary Mirror(ASM)이고, 다른 하나는 Fast Steering Secondary Mirror(FSM)이다. 이 두 가지 반사경은 주경으로부터 오는 빛을 제 3반사경에 전달하는 것뿐 아니라 망원경의 광학적 성능을 향상시키기 위해 또 다른 기능들을 가지고 있다. ASM은 반사경 표면을 변형시켜 대기에 의해 왜곡된 별빛을 보정하는 기능을 가지고 있고, FSM은 경면을 변형시킬 수는 없지만 각 조각거울의 방향을 빠른 속도로 조정하면서 망원경이 바람에 의해 흔들리는 영향이나 망원경 자체에서 오는 진동을 보정하는 기능이 있다. ASM은 FSM보다 훨씬 복잡하므로 FSM보다 더 긴 개발시간이 필요하다. 그런 이유로 FSM이 먼저 개발되어 ASM이 완성될 때까지 사용될 예정이고 그 외에도 ASM이 유지보수 등의 이유로 사용되지 않을 때에는 FSM을 사용한다.

ASM과 FSM의 주요 기능 중 하나는 GMT 주경의 정렬오차를 보정하는 기능으로서 이를 위해 이 두 종류의 부경은 위치를 제어하는 액추에이터 위에 부착된다. 이 액추에이터들의 구동범위는 망원경 구조의 제작공차 및 조립공차, 온도변화에 의한 열팽창, 관측방향에 따른 중력적 변형 등을 보상하기에 충분하도록 설계된다. FSM의 설계는 기존의 마젤란(Magellan) 망원경 부경을 기본 개념으로 삼고 있고, 한국천문연구원에서도 예비설계와 각종 분석, 시험모델 제작 등을 수행하였다. ASM은 MMT, LBT, 마젤란 망원경, VLT 등 다른 대형 망원경에서 충분히 성능이 입증된 설계개념을 택하였다. GMT의 ASM 조각거울은 제로두어(Zerodur) 소재로 가공된 약 2 mm 두께의 변형 경면 뒤에 672개의 액추에이터를 장착하여 제작하게 된다.

적응광학계 파면센서 및 위상정합 기술

NGSAO나 LTAO 관측모드를 사용하는 협시야 AO 관측기기들에는 각각 동일한 규격의 파면센서들이 사용된다. 각 AO 관

REFERENCES

- [2] Y.-S. Kim, Optical Science and Technology 12(4), 32 (2008).

Fig. 5. The FSM prototype mirror developed in Korea (left) in the grinding and early polishing stage and (right) in the final polishing and testing stage. (Photo from Cho, *et al.*, 2014)^[3]

측기기의 저온유지장치(cryostat) 입사창으로는 장파장 투과식 색선택 거울(dichroic mirror)이 사용되는데 이것을 약간 기울게 장착하여 가시광을 파면센서 쪽으로 반사시켜 보낸다. NGS AO 모드에서는 망원경 입사동(pupil) 이미지를 92×92 개의 단위구경으로 나누는 피라미드 파면센서가 사용된다. 이 센서는 입사동 이미지 상에서 조각거울 간의 위상차를 측정할 수 있는데, 이 위상차 정보는 조각거울 방식의 GMT 광학설계에서 핵심적인 요소이다. NGS AO 파면센서 앞에는 또 다른 색선택 거울이 있어서 나트륨(Na) 레이저 인공별의 빛을 반사시켜 LTAO 모드에서 사용되는 6개의 Shack-Hartmann 파면센서 쪽으로 보낸다. GLAO 관측모드에서는 AGWFS가 시야 외곽에 있는 기준별 4개의 파면을 측정하여 저고도의 대기 난류를 단층촬영식으로 재구성한다. 여기서 GLAO가 적용되는 시야의 크기는 보정할 대기난류의 고도 범위를 소프트웨어적으로 선택함으로써 조정할 수 있기 때문에, 별도의 운용 부담이나 관측효율의 손실 없이 GMT의 모든 관측기기가 이용할 수 있다.

NGSAO와 LTAO 관측모드에서 높은 스트렐비의 회절한계 화질을 구현하기 위해서는 주경과 부경의 조각거울들이 65 nm RMS의 오차 이내에서 위상정합(phasing)되어야 한다. 그런데, 주경 조각거울 간의 간격이 30~40 cm로 크고 소재의 열팽창률이 무시할 수 없을 정도이기 때문에 에지(edge) 센서들만으로는 안정적인 측정이 어렵다. NGS AO 관측모드에서는 자연기준별의 파면센서가 조각거울의 광축방향 위치오차를 최대 2 kHz의 속도로 측정 가능하나, LTAO 모드에서는 대개 어

두운 자연 기준별만 사용 가능하다는 문제가 있다. 따라서 LTAO 모드에서는 3단계 위상정합 시스템을 사용하는데, 첫 번째로 정밀도는 떨어지지만 측정가능 범위는 넓은 광학 위상정합 센서를 써서 1차적인 위상정합을 구현하는 것이고, 두 번째는 주경과 부경 조각거울의 에지 센서들을 써서 1~2분 정도의 짧은 시간 동안의 정합을 유지하는 것이며, 마지막으로 관측기기에 설치된 고감도 광학 센서를 써서 시간에 따른 에지 센서의 편향을 보정하는 것이다. GMT의 주경과 부경은 각각 하나씩 쌍을 이루기 때문에 위상정합 오차는 고속 ASM을 사용하여 빠르게 보상할 수 있으며, GLAO 관측모드에서나 FSM을 사용할 때에는 위상정합이 필요하지 않다.

우리나라의 FSM 개발과 전망

FSM은 GMT의 두 가지 부경 중 하나로서, 2021년으로 예정된 역사적인 GMT의 최초 관측과 이후 초기 운영에 사용될 부경이며 GMT의 AO 시스템이 완전히 안정화될 때까지 상당한 기간 동안 과학연구 관측에 필요할 것이다. 한국천문연구원 은 FSM 개발을 위한 사전 기술개발의 일환으로 FSM 시험모델을 2009년부터 2014년까지 자체적으로 개발하였다. 이 과정에서, 한국천문연구원은 한국표준과학연구원과 협력하여 직경 1 m급 비축 비구면 반사경 제작을 위한 국내 역량을 확보하였으며 고등기술연구원과의 협력을 통해 FSM의 고속 구동 제어를 위한 기본 기술을 개발하였다. 향후 한국천문연구원은 FSM의 개발을 담당하여 설계, 가공, 조립, 시험의 전 과정을 총괄하며, 각 분야별 전문기관과 협력하여 제작을 진행할 예정이다. 그 첫 번째 단계로 2015년부터 GMT 본부와 함께 FSM 개발을 위한 상세계획을 수립하고 있으며, 2016년부터는 본격적으로 제작을 시작하여 2021년에는 모든 FSM 시스템을 완성하는 것을 목표로 하고 있다.

REFERENCES

- [3] M. Cho, A. Corredor, C. Dribusch, W. H. Park, G. Muller, M. Johns, C. Hull, J. Kern and Y.-S. Kim, SPIE Proceedings **9145**, 57 (2014).