

특집 ■ 우주광학

GMT 거대망원경의 부경 시험모델 개발

김영수*

1. 들어가는 글

‘허블 우주망원경’은 가장 널리 알려진 망원경일 것이다. 허블 우주망원경으로 촬영한 사진을 누구나 한 번쯤은 보았을 것이므로. 허블 우주망원경은 지름이 2.4 m이며 지구 상공 600 km 위에 떠 있으면서 우주를 관측하는데, 1990년에 발사되어 현재까지 25년간 운용되어 오고 있다. 물론 반사경을 제외하고는 CCD 카메라 등의 관측 기기나 다른 부품들은 지속적으로 교체되어왔다.

그 후속으로 차세대 우주망원경이 제작되고 있다. 지름 6.5 m의 James Webb Space Telescope (JWST)가 몇 년 후에 발사될 예정이다. 이것은 적외선 전용 망원경이어서 허블 우주망원경이 보내온 천체들의 가시광 영상과는 다른 얼굴을 보여줄 것이다.⁽¹⁾

그렇지만 허블우주망원경이나 JWST가 세계에서 가장 큰 망원경은 아니다. 지상에는 이미 이보다 훨씬 큰 망원경들이 즐비하다. 지름 8 m 보다 큰 망원경이 전 세계적으로 13기나 운영되고 있는 것이다. 게다가 차세대 지상 망원경이 개발되고 있는데, 3기의 거대망원경이 2020년대 초에 완공을 목표로 진행되고 있다. 이들은 지름 25 m의 Giant Magellan Telescope (GMT), 지름 30 m의 Thirty Meter Telescope, 지름 39 m의 European Extremely Large Telescope이다. 참고로, 한국이 현재 가지고 있는 망원경은 보현산에 있는 지름 1.8 m 망원경이 최대 크기이다. 세

계 수준에서 50년 이상 뒤떨어져 있는 것이다.

우리나라가 참여하고 있는 GMT는 미국의 카네기재단 천문대가 주축이 되어 개발하고 있다.⁽²⁾ 2001년과 2002년에 2기의 6.5 m Magellan Telescopes 건설을 완성한 후, 차세대 거대망원경 개발을 착수한 것이다. GMT는 현재 설계를 마치고 제작 단계에 들어서고 있는데, Magellan Telescopes가 설치된 칠레의 Las Campanas에 세워진다. GMT에 관해서는 지난 2008년의 『광학과 기술』에 자세히 설명한 바 있다.⁽³⁾ GMT 개발에는 세계의 우수한 기관들이 참여하고 있는데, 미국 내에서는 Harvard University, Smithsonian Institute, University of Texas at Austin, Texas A&M University, The University of Arizona, Chicago University들이 참여하고, 호주와 브라질의 상파울로 차치사가 동참하고 있다.

한국은 한국천문연구원 (천문연)이 대표기관으로서 GMT 개발에 지분 10% 정도로 2009년부터 공식 참여하고 있다. 국가연구개발사업으로 10년간 총 예산 909억 원을 투입하는 대형망원경개발사업을 2008년에 정부와 국회로부터 승인을 얻었던 것이다.

그렇지만 대형망원경을 확보하기 위한 준비와 승인이 단시일에 이루어진 것은 아니다. 국내 최대 망원경인 보현산 천문대의 1.8 m 망원경이 1994년에 설치되었었다. 그러나 선진국들은 그 당시에 이미 10 m급의 초대형 망원경을 준공하고 있었고, 심지어 우리나라와 경제수준이

* 한국천문연구원

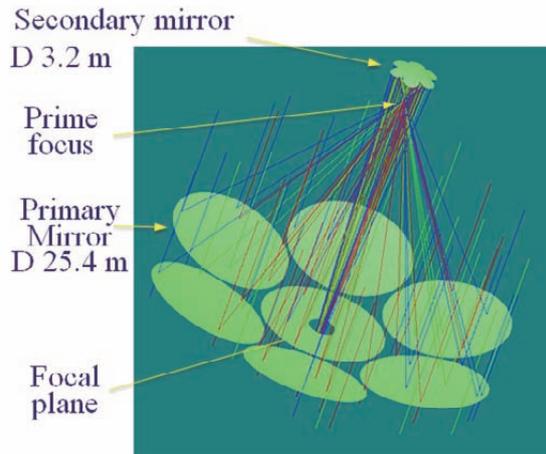
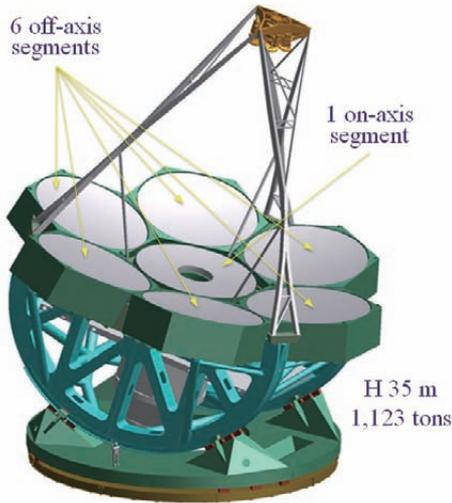
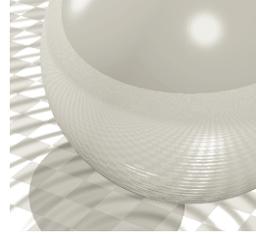


그림 1. 구경 25 m의 GMT 개발도와 광 경로도. 그레고리안 형식의 망원경으로서, 주경과 부경은 각각 8.4 m와 1.05 m의 오목반사경 7장으로 구성되어 있다. 주경과 부경 사이에 주초점 (prime focus)이 있어서 조립과 정렬에 유용한 구조이다.

비슷한 남아프리카공화국, 스페인 등도 초대형 망원경 개발을 시작하고 있었다. 국내의 천문우주 연구 수준이 세계 수준에 일부 도달해 있던 상황에서, 초대형망원경에 대한 국내 천문학자와 우주과학자들의 요구가 점점 커지는 것은 당연한 일이다. 이를 충족하기 위하여 천문연은 대형망원경 건설 계획을 세웠었다. 마침 슈메이커-레비9 혜성이 목성에 충돌하는 유일무이한 우주 쇼가 1994년 7월에 펼쳐졌는데, 국내에서 제대로 관측하지 못했다는 비난 여론이 올랐었고, 이에 힘입어 6 m 적외선 망원경을 건설하는 것을 승인받았다. 그러나 1997년에 IMF 외환위기를 맞으면서 이 사업은 결국 취소되어 사업비를 정부에 반납하였다.

이후 2003년부터 초대형망원경을 개발하자는 움직임이 다시 일어났다. 탐사망원경인 8.4 m LSST를 복사하는 방안 등을 검토하였으나, 6.5 m 광시야망원경을 멕시코에 설치하는 것으로 천문연은 최종 확정하였다. 이에 대한 구체적인 계획을 만들었고 2006년에 사업의 사전타당성조사를 무사히 통과했었다.⁴⁾ 그렇지만 연구수요의 질이 높아지고 국제정세가 급변함에 따라 계획을 전면 재검토하였고, 효과성과 실현성이 더 높은 방안으로 수정하게 되었다.

마침내 세계 최대급 망원경인 GMT 거대망원경에 국제공동개발 참여하는 수정 방안이 마련되었고, 이 계획은 천문연과 학계의 동의를 얻었다. 2008년에는 수정된 계

획에 대해 간이타당성조사를 다시 받은 후, 당시 교육과 학부, 기획재정부, 국회 순으로 사업승인을 받았다. 실로 15년 만에 이룬 쾌거였고 기초과학 분야에서 역사상 최대 프로젝트였다. 이는 천문연 뿐만 아니라 한국천문학회, 한국우주과학회가 일심 단결하여 총력을 기울인 덕분에 가능하였던 것이다.

2 GMT의 부경 FSM

GMT는 그레고리안 형식의 망원경으로서, 부경도 주경과 마찬가지로 7장의 오목 반사경으로 구성되어 있다. 부경은 전체 지름이 3.2 m이고, 각 반사경의 지름은 1.05 m이다. 주경과 부경의 반사경들은 광학적으로 1:1로 대응하도록 되어 있어서, 7개의 망원경이 한 구조 위에 놓고 그 초점들이 한 점에 모아지게 되는 구조이다. 부경의 각 반사경이 지름 1 m 정도이므로, 국내에서 가공하기에 무리가 없는 크기이다. 그렇지만 7장 중에서 가운데에 있는 반사경을 제외한, 주위에 있는 6장은 광축이 경면 상에 없는 비축면이기 때문에 가공하고 정렬하는 데 고도의 전문성이 요구된다.

GMT의 부경은 두 종류가 만들어질 예정이다. 첫 번째는 Fast-steering Secondary Mirror (FSM)로서, 각 반사경의 뒤에 틸트 작동기(tip-tilt actuator)들이 달려있어서 반사

GMT 거대망원경의 부경 시험모델 개발

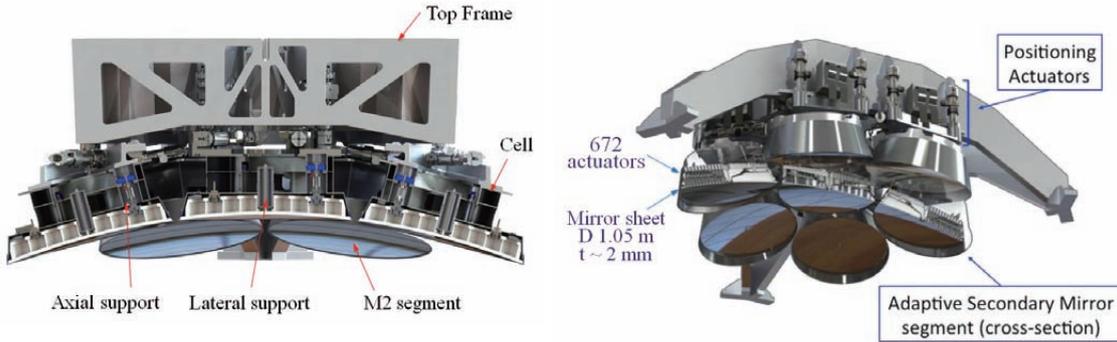


그림 2. GMT FSM과 ASM 부경. FSM은 반사경과 셀 사이가 진공이고 3개의 축방향 지지대와 1개의 횡방향 지지대가 있다. 축방향 지지대 안에 있는 피에조 액추에이터에 의해 틸트 구동을 함으로써 바람에 의한 망원경의 흔들림을 보정한다. ASM은 지구 대기를 통과하는 동안 왜곡되는 별빛의 파면을 복원해주는데, 두께가 2 mm 밖에 안 되는 지름 1 m 크기의 반사경을 670여개의 액추에이터로 변형시킨다.

경들을 20 Hz 정도의 주기까지 틸트 작동한다. 바람에 의해 망원경이 흔들리는 것을 보정하여 안정된 상을 얻도록 하는 것이다. FSM은 망원경의 초기 가동 및 운영에 사용될 것이다. 두 번째 종류는 Adaptive Secondary Mirror (ASM)이라고 하는데, 지름 1.05 m인 각 반사경의 두께를 2 mm 정도로 매우 얇게 만들고, 그 뒤에 670여개의 액추에이터를 붙여서 미러의 표면을 자유자재로 변형할 수 있게 한다. 이로써 적응광학계 보정을 부경에서 직접 할 수 있게 되는데, 이것은 별빛이 지구 대기를 지나서 망원경에 도달할 때에 대기의 흔들림에 의해 찌그러진 상의 파면을 복원시켜주는 것이다. 제작하는 데 장기간이 소요되는 ASM이 완성되면 FSM을 교체하게 되며, FSM은 백업용으로 관리한다. FSM과 ASM에 관해서도 2008년의 『광학과 기술』 기고문에 자세하게 기술되어 있다.⁽⁹⁾

3. FSM 시험모델 (FSMP) 개발

GMT를 건설하는 데 필요한 여러 부분 중에서, 국내 기술로 제작이 가능한 부분들에 우리나라가 참여하려고 한다. 부경도 그 중의 하나로서 우선 FSM 제작 참여를 추진하고 있다. 이를 위하여 첫 단계로 FSM의 시험모델(FSM Prototype: FSMP)을 개발하여 핵심기술을 확보하고자 하였다. FSM의 핵심기술로는 크게 두 가지가 있는 것으로 파악되었다. 첫째는 비축 비구면의 반사경 가공 및 시험 기술이다. 구경 1.05 m의 대형 반사경이 구면이 아닌 타원면일 뿐만 아니라, 비축면이어서 표면을 가공하고 시

험하는 데에는 세계 최고 수준의 기술이 필요한 것이다.^(5,6) 여기에 더하여, 기존의 대형 망원경의 반사경들은 초점비가 f/1 보다 훨씬 컸던 것에 비해서, 이 반사경면은 f/0.65로서 경사도가 매우 급하므로 가공과 시험의 난이도가 더욱 올라가게 된다. 이러한 기술들을 확보하기 위하여 실제 크기의 반사경을 연마 가공하고 시험 장치를 만들었다.

또 다른 핵심기술은 반사경을 초정밀도로 틸트 제어하는 기술이다. 100 kg에 달하는 반사경을 0.02 초각(arcsecond)의 정밀도로, 그리고 20 Hz까지의 주기로 구동 제어하는 것이다. 이를 위해서는 기계부를 정밀하게 제작하고 조립하는 기술뿐만 아니라 정확한 전기전자 구동기와 지능적인 제어 알고리즘이 함께 어우러져야 성능이 제대로 나올 수 있다. 이를 위하여 여러 가지의 틸트 test-bed들을 제작하고 시험함으로써 초정밀 기술을 확립해 나갔다.

FSMP 개발을 위하여 국내외 전문기관들과 함께 협력하여 공동으로 개발하였다. 반사경의 가공과 시험은 한국표준과학연구원(표준연)이 수행하였고, 틸트 test-bed 제작과 시험은 고등기술원에서 이루어졌다. 광주과기원은 틸트 알고리즘을 개발하여 지원하였고, 광기계 설계와 해석은 미국국립광학천문대(National Optical Astronomy Observatory, NOAO)의 도움을 얻었다. 천문연은 계획 수립, 진도 관리, 성능 검증 등의 시스템엔지니어링과 광학 설계를 담당하였다.

FSMP 개발은 2009년부터 2014년까지 총 6년간 진행되었는데, 2009년에는 표준연과 함께 마젤란 망원경의 부

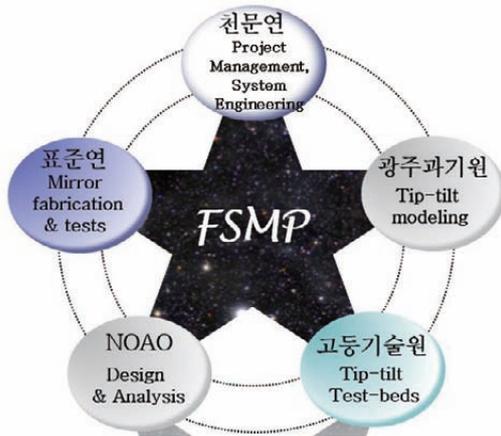
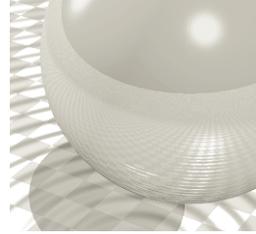


그림 3. FSMP 개발에 참여한 기관들과 역할. 친문연은 계획 수립, 진도 관리, 성능 검증 등의 시스템엔지니어링과 광학 설계를 하였고, 표준연은 비축 비구면 반사경의 가공과 시험, NOAO는 광기계 설계와 해석, 고등기술원은 틸트 test-bed 제작과 시험, 광주과기원은 틸트의 수학적 모델링을 하였다.

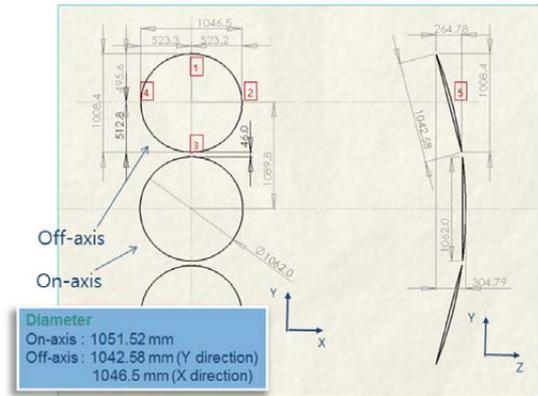


그림 4. 비축 반사경의 광학 설계. 광축 반사경은 원의 형태이지만, 비축면은 X 방향과 Y 방향의 지름이 서로 다르며, 중심점이 정 중앙에 있지 않다. 이처럼 비축면을 설계하고 가공할 때에는 고려할 사항이 많았다.

경을 해석하였다. 2010년에는 NOAO와 함께 FSMP를 설계하고 해석하였는데, 반사경의 두께가 100 mm에서 140 mm로 변경되어서 설계와 해석을 다시 하였었다. GMT의 설계가 조금씩 변경되었고, 따라서 부경의 곡률반경과 conic constant 값이 수차례 변경되었다. 설계가 확정될 때까지 무한정 기다릴 수가 없어서 2011년 초에 당시 설계 값으로 고정시켰다. 이는 GMT의 최종 설계 값과는 약간 차이가 난다.

가. 비축 비구면 반사경의 개발

비축 비구면의 반사경은 기본 설계 단계에서부터 풀어야 할 숙제가 많았다. 무엇보다 비축 반사경의 형상이 원형이 아닌 타원형이어서 반사경의 지름이 방향에 따라 달랐던 것이다. 따라서 비축면의 중심점을 정하는 것도 단순하지 않았다. 그림 4에서 보이듯이 광축에서 방사선 방향(Y 방향)으로 경면이 타원을 이루다보니, 비축면의 중심에서 +Y 방향과 -Y 방향(광축 방향)의 표면이 동일하지 않다. 중심점을 잘못 정하게 되면, 주경과 시야가 일치하지 않게 되어 상이 흐려지고 광손실이 생기는 것이다.

비축비구면 반사경이 불리일으키는 문제는 또 있었다. 반사경의 축 방향 지지대는 3군데에 놓이는데, 이 3곳에 배당되는 하중이 똑 같지 않았다. 약 1%의 무게 차이가

생기는데, 틸트를 0.02" 정도로 정밀하게 제어하는데 불확정도를 가중 시키는 것이다.

반사경의 가공은 뒷면부터 시작했다. 지름은 최종 지름보다 좀 더 크게 만들어서 시작하였다. 뒷면을 사양에 맞게 곡면으로 다듬고 나서, 구멍을 파서 무게를 줄이는 경량화 작업을 했다. 12 가지의 모양이 다른 구멍을 총 91개 만들었는데, 이 작업은 총 7개월이 걸렸다. 검사결과 2군데 구멍에서 균열이 생겼는데, 경미한 상태여서 간단히 접착액을 주입하여 균열이 커지는 것을 막았다. 그리고 가공 중에 생기는 미세한 균열들을 치유하기 위해 에칭 작업을 하고 뒷면 가공을 마무리했다. 각 구멍의 깊이를 최종 측정된 결과 값들은 ± 0.1 mm 이내에서 설계 값과 일치하였다.

앞면 가공은 비구면에 가깝게 연삭하여 표면의 peak-to-valley가 5 μ m 이내로 되었을 때에 폴리싱 작업으로 넘어갔다. 폴리싱 작업 중간에 반사경의 지름이 정확히 맞도록 잘라냈는데, 이 때문에 반사경의 무게가 달라졌으므로, 이를 지지하는 가공 셀을 정밀 조정하였다. 총 17개월에 걸친 가공을 한 후 표면정밀도가 13.7 nm rms인 반사경이 만들어졌다. 이는 요구 값인 20 nm rms보다 작은 값으로 가공되었던 것이다. 그렇지만, 이것은 지름 1030 mm에 대한 측정값으로, 가장자리 부분의 34 mm(각 17 mm)는 제외된 것이었다. 표면정밀도 시험을 하는 데에는 2 종류의 Computer Generated Hologram을 차례로 사

GMT 거대망원경의 부경 시험모델 개발

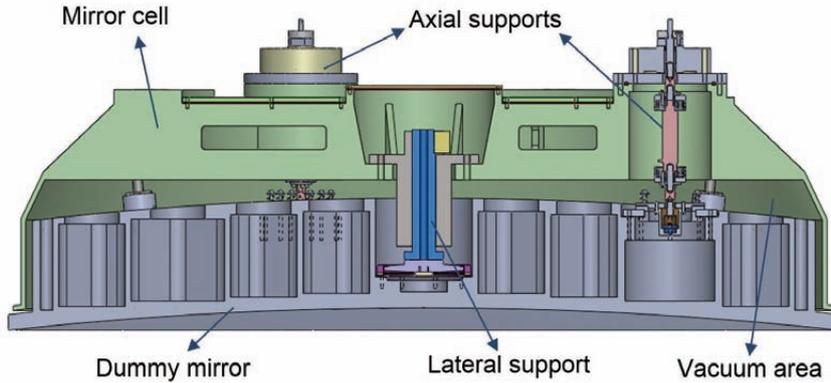


그림 5. 팁틸트 test-bed용 FSMP 구조도. 반사경과 셀은 3개의 축방향 지지대(axial support)와 1개의 횡방향 지지대(lateral support)로 연결되어 있고, 그 사이는 진공을 유지하여 반사경의 무게를 진공의 힘이 상쇄한다.

용하였다. 이 시험 결과는 아리조나 대학이 직접 별도로 시험한 Software Configurable Optical Test System 방법의 결과와 비교하였었는데, 요구 값 이내에서 서로 일치하였다.⁽⁷⁾

나. 팁틸트 test-beds 개발

FSM의 팁틸트를 정밀하게 구동할 수 있는 기술을 개발하고 확보하기 위해서 FSM 부경의 test-bed를 실물 크기로 제작하여 시험하였다. FSM은 반사경을 지지하는 미러셀로부터 3개의 축방향 지지대(axial support)와 1개의 횡방향 지지대(lateral support)가 있어서 이들이 반사경을 각 방향별로 지지하고 있다. 3개의 축방향 지지대에는 각각 피에조 액츄에이터(peizo actuator)가 있어서, 이들이 수축과 팽창을 함으로써 팁틸트 작동하도록 되어 있다. 그렇지만 이때 횡방향 지지대는 지장을 줘서는 안 된다. 그리고 미러 셀과 반사경의 사이 공간은 약한 진공으로 밀폐되어 있어서 반사경의 수직방향 무게를 이 진공의

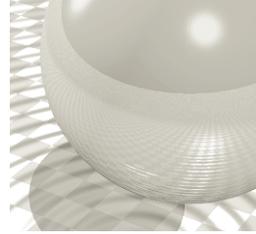
힘으로 지탱하고 있다.

팁틸트 test-bed를 제작 조립하고 구동시험 할 국내의 전문기관을 찾기 위해서 여러 회사와 연구소들을 알아보다가 최종적으로 2010년 7월부터 고등기술원과 협력하게 되었다. 광주과학기술원의 기전공학부는 그 이전인 2010년 2월부터 참여하여, 기구학 방정식부터 시작하여 여러 가지의 필요한 수학적 모델을 개발하여 제공하였다.

팁틸트 test-bed는 반사경의 가공시험보다 개발 과정이 좀 더 복잡하였다. 우선 백여 개의 부품들을 구입하거나 제작하였다. 물론 이를 위해서 각 부품들에 대한 해석을 수행하여 적절한 부품을 구입하거나 만들었다. Test-bed에서 사용한 반사경은 유리 소재 대신 알루미늄으로 제작하였다. 표면을 구면으로 만든 것을 제외하고는, 경량화나 구면의 뒷면 등의 형상은 동일하였고, 관성모멘트를 위해서 무게도 비슷하게 맞췄다. 각 부품들과 유닛들은 성능에 이상이 없는지 하나하나 시험하였다. 팁틸트를 구동하는 핵심부품인 피에조 액츄에이터와 플렉서는 독일의 Physik Instrumente GmbH & Co. 제품을 사용하였는



그림 6. 팁틸트 test-bed를 위해 제작된 유닛들의 모습. 왼쪽부터 알루미늄으로 가공된 미러셀, 역시 알루미늄으로 제작된 더미 미러, 중간에 있는 피에조 액츄에이터가 스프링으로 둘러싸여있고 맨 위에 로드셀이 결합된 축방향 지지대.



데, 플렉서의 카탈로그 값이 잘못되었음을 밝혀내기도 하였다.

Test-bed의 조립과 시험을 할 때에는 여러 형태의 test-bed를 단계적으로 개발하여서 차근차근 접근하였다. 첫째로 실제 무게의 반사경을 대신하여 1/10 무게의 가벼운 철판을 이용하였다. 축방향과 횡방향의 지지대들을 연결하여 각 유닛의 작동상황을 점검하고 특성을 파악하였다. 두 번째는 100 kg에 달하는 실제 무게의 알루미늄 반사경을 진공 대신 스프링으로 연결하여 시스템의 구동특성을 연구하였다. 세 번째는 실제로 알루미늄 반사경을 진공 펌프를 이용하여 들어 올리고 수직방향에서의 진동 특성을 시험하였다. 마지막으로 반사경을 30도, 60도 등으로 기울인 상태에서 틸트 성능을 측정하였다. 반사경을 기울였을 때에는 진공에 의한 힘이 cosine에 비례하

여 작아지고, 그만큼 반사경의 무게를 횡방향의 지지대가 감당하여야 한다. 그렇지만 이와 동시에 횡방향의 지지대는 틸트 구동에는 영향을 주지 말아야 한다.

틸트 구동 정밀도는 0.02"로서 매우 작은 각거리인데, 액츄에이터가 이동하는 거리로 환산하면 58 nm 밖에 되지 않는다. 이 작은 값을 측정하기 위해서 반사경의 앞에 Eddy current sensor를 달았다. 시험 결과는 매우 성공적이어서, 고정밀도의 틸트 구동이 가능함을 보였다. 그리고 레이저를 이용한 광학 시연장치도 설치하여 눈으로 직접 확인할 수 있도록 하였다. 성능을 시험하는 지표로는 상의 밀집도 (attenuation) 값이 요구되었는데, 이 값들도 모두 만족함을 보였다. 최종적으로는 표준연에서 가공한 비축 비구면 반사경을 이 test-bed와 결합하였다.



그림 7. 수직방향 측정용과 기울임 시험용 test-bed들 모습

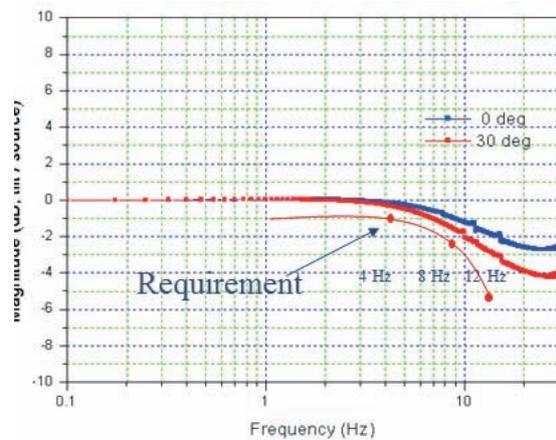
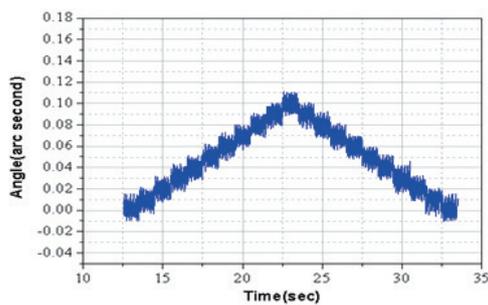


그림 8. 틸트 정밀도 시험 결과와 attenuation 시험 결과. 요구 정밀도인 0.02" 보다 작은 0.01" 단위로 구동하였는데도, 각 단계가 선명히 구분되어 보인다. 오른쪽 그래프는 밀집도 시험 결과인데, 30도 기울여서 attenuation 시험을 할 때에도 주파수별 요구값을 모두 만족함을 볼 수 있다.

GMT 거대망원경의 부경 시험모델 개발

4. 맺는 글

우리는 2009년부터 GMT 개발에 공식적으로 참여하고 있으며, 이를 통하여 첨단기술을 확보하고 활용하고 있다. FSM 부경의 시험모델을 개발하여, 비축 비구면 반사경의 가공과 시험기술을 세계 수준으로 끌어올렸고, 틸트 정밀제어 기술을 성공적으로 개발하였다. 새로운 본딩 기술도 개발하였다. 이러한 기술들은 FSM 제작에 많이 활용될 것이고, 산업발전에 이바지할 것이다.

이외에도 우리는 GMT 개발에 다양하게 참여하고 있다. 천문연은 GMT에 붙일 측정기기 개발에도 참여하고 있는데, 하버드 대학과 함께 G-CLEF 가시광분광기 개발에 참여하고 있으며, 텍사스 대학과 함께 GMTNIRS 적외선분광기 개발도 준비하고 있다. 또한 국내 기업들이 망원경 구조나 enclosure, 선형 모터 등을 제작하여 GMT 개발에 참여할 수 있도록 지원을 아끼지 않고 있다.

GMT가 완성된 후에 활용할 천문관측 및 연구에 대한 준비도 착실히 진행되고 있다. GMT를 이용하여 관측하기에 좋은 연구주제를 대학교수들과 함께 발굴하고 있으며, 국내 천문학자들이 4~8 m급 망원경을 이용하여 관측 연구를 할 수 있도록 지원하고 있다. 또한, 매년 섬머스쿨을 열어서 대학원생들이 장차 GMT를 잘 활용할 수 있도록 교육도 수행하고 있다. GMT에 참여하고 있는 세계의 우수한 기관들과도 연구개발 협력을 강화하고 있다.

천체를 연구하는 데 망원경은 필수적인 장비이다. 망원경이 클수록 집광력이 커지고 분해능이 좋아져서, 더 멀리 있고 더 희미한 천체를 관측할 수 있다. 거대망원경을 이용하여 선도적인 천문 연구를 하게 될 날이 머지않았다. 이제 2020년대에는 우리도 세계 최대급 망원경을 활용할 수 있게 되어, 세계적인 연구를 수행하고 천문학 발전에 많은 기여를 하게 될 것이다. GMT 개발에 참여함으로써 우리는 첨단 기술을 확보하고 기초연구를 강화하게 되어, 일거양득의 효과를 거두는 것이다.

이 지면을 빌어서 이러한 도전적인 부경개발에 밤낮없이 헌신적으로 노력하여 주신 천문연, 고등기술원, 광주과학기술원, 표준연, NOAO의 참여자 분들께 다시 한 번 감사의 마음을 전합니다. 또한 적극적으로 도움을 주신 아리조나 대학과 GMT Organization의 관련자 분들께도 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] J.P. Gardner, J.C. Mather, M. Clampin, M., et al. The James Webb space telescope, Space Sci. Rev., 123 (4), 485-606, (2006).
- [2] GMT Organization, GMT System Design Review, Pasadena (2014).
- [3] 김영수, GMT 거대망원경 광학계, 광학과 기술, 12권 4호 (2008, 10월).
- [4] 한국과학기술기획평가원, 대형광학망원경개발사업 사전타당성 조사 보고서, 조사자료2006-09 (2006).
- [5] Y.-S. Kim, K.-B. Ahn, K. Park, I.K. Moon, & H.-S. Yang, Accuracy Assessment of Measuring Surface Figures of Large Aspheric Mirrors, JOSK, 13 (2), 178-183 (2009).
- [6] K.-B. Ahn, Y.-S. Kim, S. Lee, et al., Sensitivity analysis of test methods for aspheric off-axis mirrors, Advances in Space Research, 47, 1905-1911 (2011).
- [7] Y.-S. Kim, J. Kim, J. H. Song, et al., Prototype Development for the GMT FSM Secondary - Off-axis Aspheric Mirror Fabrication, Journal of Astronomy and Space Sciences, 31 (4), 341-346 (2014).

약력

김영수



- 1980~1986 연세대학교 이학학사 및 이학석사
- 1990~1998 London University (UCL) Ph.D.
- 1999.4~2000.6 European Southern Observatory 객원연구원
- 2000.7~2002.12 한국항공우주연구원 선임연구원
- 2002.12~현재 한국천문연구원 책임연구원
- 2004.8~2006.8 한국과학기술기획평가원 부연구위원
- 2002.12~2008.12 대형망원경사업 기획연구, 그룹장
- 2009.1~2015.5 대형망원경개발사업 프로젝트 매니저, 시스템엔지니어
- 2015~SPIE Senior Member