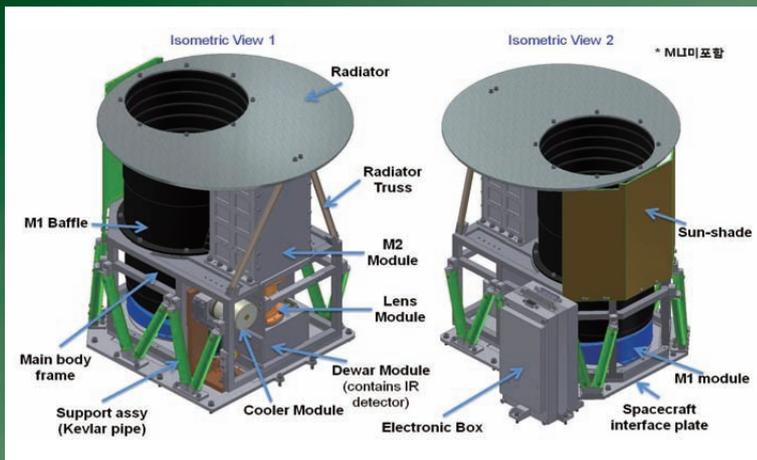


광학과 기술

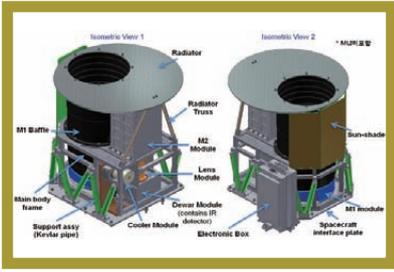
OPTICAL SCIENCE & TECHNOLOGY

[특집] 우주광학

- 우리나라 우주천문학의 발자취
- GMT 거대망원경의 부경 시험모델 개발
- 우주용 반사경의 개발
- 자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경



국내 최초의 적외선 분광 기능을 가진 우주망원경으로 2017년에 발사 예정인 NISS의 개념도



표지설명

국내 최초의 적외선 분광 기능을 가진 우주망원경으로 2017년에 발사 예정인 NISS의 개념도

- 회 장** : 정윤철(한국과학기술원)
차기회장 : 이상배(한국과학기술연구원)
부 회 장 : 김철민(대구경북과학기술원)
 이병호(서울대학교)
 이윤우(한국표준과학연구원)
 정영주(광주과학기술원)
 한재원(연세대학교)

- 편집위원회** |
편집위원장 김광준(한국전자통신연구원)
편집간사 김대근(단국대학교)
 김정호(경희대학교)
편집위원 김범민(고려대학교)
 김태현(SK텔레콤)
 김학민(경북대학교)
 이광조(경희대학교)
 이상원(한국표준과학연구원)
 임동성(피큐브㈜)
 임선도(한국표준과학연구원)
 정환석(한국전자통신연구원)
 최수봉(인천대학교)

발행인 정 윤 철
 인쇄인 김 성 배
 발행소 한국 광 학 회
 우) 04157
 서울특별시 마포구 독막로 320번지
 태영데시앙 1610호
 한국 광 학 회
 Tel. 02-3452-6560 Fax. 02-3452-6563
 E-mail : osk@osk.or.kr
 Web : www.osk.or.kr
 인 쇄 도서출판 씨아이알
 Tel. 02-2275-8603 Fax. 02-2265-9394
 2016년 1월 26일 인쇄
 2016년 1월 30일 발행

Contents

광학과 기술 Optical Science & Technology January 2016 20권 1호

회장이 보내는 편지 정윤철 02

초대석 이광조 04

특집 ■ 우주광학

우리나라 우주천문학의 발자취 이대희 06

GMT 거대망원경의 부경 시험모델 개발 김영수 12

우주용 반사경의 개발 이윤우, 양호순 19

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경
 장승혁, 박수중, 김건희 22

산업체 소개

(주) 엔티코아 28

한국광학회지 하이라이트 논문 소개

폴리머 도파로 브래그 격자를 이용한 단일 파장 가변 광섬유 레이저의 출력 특성 연구
 30

학회소식 31

국내의 학술회의 일정 33

우주 광학 특집

지난 수십 년간 은하계와 외부 은하에 대한 방대한 양의 지식이 축적되어 왔으며, 이는 우주 관측을 위한 광학 기기의 발전과 우주 광학 분야의 많은 연구자들의 노력 때문에 가능할 수 있었다. 이번 2016년의 첫 번째 광학과 기술 특집호에서는, 네 편의 기고문을 통해 현재 우리나라 우주 광학 연구의 발전상을 소개하고자 한다.

우선 한국천문연구원 이대희 박사님께서 우리나라 우주 천문학의 발자취와 향후 연구에 대한 전반적인 소개를 일목요연하게 해 주실 것이다. 본 기고문에서는 1990년대에 시작된 과학로켓 탑재체 개발에서부터, 과학기술위성 1호 원자외선 분광기 (FIMS) 개발, 과학기술위성 3호 다목적 적외선 영상시스템 (MIRIS) 개발, 그리고 적외선 우주 배경복사 관측 실험 (CIBER) 등을 흥미롭게 다루었다. 또한 2017년에 발사 예정인 차세대 소형위성 1호의 근적외선 영상분광기 (Near-Infrared Spectrograph for Star formation history, NISS)에 대한 소개를 할 것이다. NISS는 국내 최초의 적외선 분광 기능을 가진 우주 망원경으로서 우리나라 우주천문의 미래를 이끄는 초석이 될 것으로 기대되며, 또한 우주 광학을 연구하고자 하는 많은 후학들의 꿈이 되리라 생각된다.



이 광 조
경희대학교 응용물리학과
조교수

한국천문연구원 김영수 박사님께서 허블 우주 망원경 Giant Magellan Telescope (GMT)의 부경 시험모델 개발을 다루어 주실 것이다. 우리나라가 참여하고 있는 GMT는 미국의 카네기재단 천문대가 주축이 되어 개발하고 있는데, 이미 설계를 마치고 제작 단계에 들어선 상태로써 칠레의 Las Campanas에 세워질 예정이다. GMT에 대한 기본 소개는 김영수 박사님께서 지난 2008년의 광학과 기술 12권 4호에서 자세히 다루어 주신 바가 있다. GMT 개발에 참여하고 있는 기관들은 Harvard University, Smithsonian Institute, University of Texas at Austin, Texas A&M University, The University of Arizona, Chicago University 등이며, 또한 호주와 브라질의 상파울로 자치시가 동참하고 있다. 우리나라는 2009년부터 한국천문연구원을 대표기관으로 하여, 지분 10% 정도로 개발에 공식 참여하고 있다.

한국표준과학연구원 우주광학센터의 이윤우 박사님과 양호순 박사님께서 우주용 망원경을 위한 대형 비구면 반사경 개발에 대한 소개를 해주실 것이다. 순수 국내 기술로 완성하여 큰 의미를 가지는 우주용 반사경 가공 기술과, 중력을 감안한 측정 기술이 중점적으로 다루어질 것이다.

마지막으로 경희대학교 우주탐사학과 박수종 교수님, 스마트IT융합시스템연구단의 장승혁 박사님, 그리고 한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀의 김건희 박사님은 자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경 개발에 대한 내용을 다루어 주실 것이다. 개발된 반사경은 인공위성 탑재체의 소형 광시야 적외선 우주망원경에 직접적인 적용이 가능할 것으로 기대된다.

이번 2016년 첫 우주 광학 특집호를 통해, 천문학과 광학 분야의 많은 연구자들이 우주 광학이라는 융합분야에 더 많은 관심을 가지게 되기를 바라며, 또한 국가 경쟁력이 있는 순수 국내 기술 개발을 위한 협력을 더욱 넓혀갈 수 있는 기회가 되기를 기대한다.

특집 ■ 우주광학

우리나라 우주천문학의 발자취

이대희

06

GMT 거대망원경의 부정 시험모델 개발

김영수

12

우주용 반사경의 개발

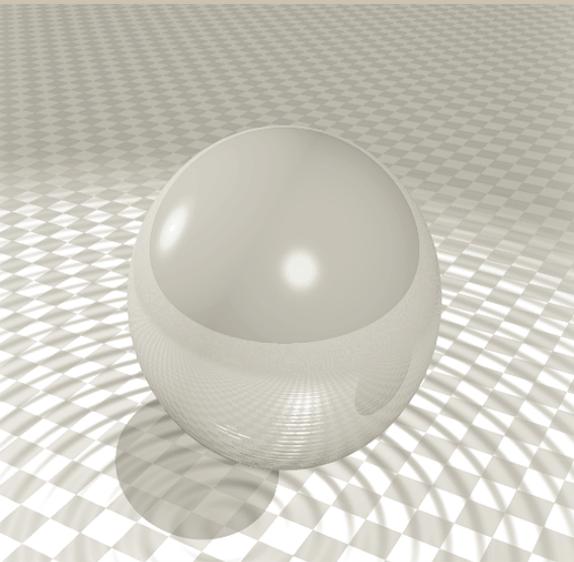
이윤우, 양호순

19

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

장승혁, 박수종, 김건희

22



특집 ■ 우주광학

우리나라 우주천문학의 발자취

이대회*

우주를 보다 멀리, 더 자세히, 그리고 보이지 않는 영역까지 관측하기 위해서는 우주 공간에서의 천문관측, 즉 우주망원경의 개발이 필수적이다. 미국을 비롯한 선진국에서는 이미 70년대부터 본격적인 우주관측을 시작하여 허블우주망원경과 같은 대형우주망원경을 통해 첨단 관측을 수행함으로써 우주관측 및 현대천문학을 주도하고 있었다. 이러한 우주공간에서의 관측은 지구 대기의 영향을 배제함으로써 지상관측이 불가능한 파장대역의 연구를 가능케 하여 현대천문학 발전에 새로운 장을 마련하고 있다.

1. 우주천문의 태동

반면, 우주천문 분야의 국내 연구기반은 취약하여 연구 장비와 인력 확보에 많은 어려움을 겪었다. 그러나 1990년대 들어 국력의 신장과 더불어 우리별위성, 무궁화위성, 다목적 실용위성 등 우리나라도 인공위성 보유국으로 발돋움하게 되었으며, 1990년 이후부터 우주관측기술 및 탑재물에 대한 개발 연구를 꾸준히 지속하여 1997년과 1998년에 발사된 과학로켓에 국내 최초의 과학탑재체인 X-선 검출기를 탑재함으로써 그 기술을 입증하게 된다.

가. 과학로켓 탑재체 개발

천체 X선은 지구 대기를 투과하지 못하기 때문에 인공

위성, 로켓, 열기구등을 이용하여 지표면으로부터 약 100km 이상을 벗어나야지만 2keV 정도의 X선을 관측할 수 있다. 한국천문연구원 X선 연구팀은 국내에서 개발되는 로켓에 X-선 검출기를 탑재한다는 목표 아래, X-선 관측시스템 XDR(X-ray Detection System)을 개발하였다.

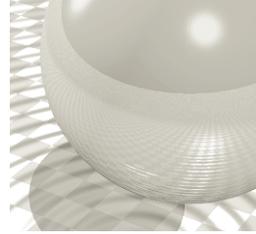
XDR은 1997년 7월 9일에 한국항공우주연구원에서 개발한 과학로켓-II (Korea Sounding Rocket, KSR II)에 실려 최초로 발사되었으나 이때는 로켓의 관성항법장치 고장으로 데이터 송수신이 이루어지지 못했다. 그 후 1998년 6월 11일에 KSR-II 2호기가 발사되었고, 수신된 데이터들을 분석한 결과 XDR이 약 1분 동안 정상적으로 동작함을 확인하였다.

XDR 로켓 실험은 우주관측을 향한 국내 최초의 시도였다는 점에서 큰 의의가 있다. 비록 천문관측 자체로서는 새로운 결과를 얻지 못했지만 검출기 제작부터 시스템의 완성, 그리고 텔레메트리 인터페이스 등의 경험을 통해 우주관측 시스템에 대한 경험과 기술이 축적되었으며, 이후 이러한 경험이 과학기술위성 1호 원자외선분광기 개발의 성공으로 이어졌다.

2. 우주천문의 발전

과학로켓 이후 인공위성을 이용한 천문관측 연구가 순조로이 진행된 것은 아니었다. 당시만 해도 우리나라에서 국산 위성을 이용한 천문관측 연구는 아직 요원한 일로 생각되었다. 90년대 초중반 KAIST 인공위성연구센터

* 한국천문연구원 우주과학본부 책임연구원



에서 개발한 우리별 위성 시리즈가 처음으로 우주 공간을 활용한 과학연구의 가능성을 제기하였고, 우리별 3호가 개발 중이던 98년 경, 과학기술위성 1호 기획연구가 시작되어, 천문연에서도 관심을 갖게 되었다.

과학기술위성 1호의 주탑재체 원자외선분광기 FIMS는 원래 미국 버클리 대학 Space Science Lab. (SSL) 팀에서 개발하여 스페인 위성에 탑재한 기기를 업그레이드한 것으로서 KAIST 우주과학실험실에 공동개발을 제안하였는데, 예산 및 대학원생들로만 구성된 인력의 한계로 1999년에 KAIST 우주과학실험실에서 천문연에 공동개발을 의뢰하게 되어 미국 버클리 대학 SSL, KAIST 우주과학실험실, 그리고 천문연 우주천문연구그룹이 공동으로 개발하는 프로젝트가 되었다.

가. 과학기술위성 1호 원자외선분광기 (FIMS) 개발

FIMS (Far-ultraviolet IMaging Spectrograph)는 2003년 9월 27일에 러시아 플레세츠크 우주기지에서 발사된 과학기술위성 1호 (STSAT-1)의 주 탑재체로 우리은하에 분포하는 고온(수만~수백만도)의 플라즈마로부터 발생하는 원자외선 영역의 방출선 관측을 주목적으로 하고 있다. 과학기술위성 1호의 버스시스템 개발은 인공위성연구센터에서 전담하고, FIMS는 한국천문연구원, 한국과학기술원, University of California at Berkeley가 공동으로 개발하였다.

FIMS는 8°×5' 크기의 개구(aperture)를 통해 들어온 빛을 parabolic cylinder mirror를 통해 집광한 후 rotation of

ellipse 형태의 회절격자로 분산시켜서 MCP(Micro Channel Plate)를 통해 증폭된 신호를 검출하는 구조를 가지고 있다. 스캐닝방식으로 대상 전체로부터 방출되는 광자를 검출하며 영상과 분광신호를 동시에 기록한다. 주 파장영역은 900-1150Å과 1330-1730Å이며 각 밴드의 분해능은 각각 2.0Å과 3.5Å이다.

과학기술위성1호는 고도 690km의 태양동주기 궤도에서 100분의 주기를 갖고 하루에 약 14번 지구 주변을 돈다. 이때 FIMS는 한 궤도 당 약 25분간 관측을 수행하게 되며, 은하 내부의 고온 플라즈마의 거시적인 공간 분포에 대한 전천 탐사를 6개월간 수행하였다. 이러한 전천탐사를 통해 분광 및 이미지를 동시에 측정함으로써 C IV 및 O VI 등 중요한 고온 플라즈마의 분광선들에 대한 전천 지도를 작성하였다. 전천탐사 수행 후 별 및 지구 대기 광에 의한 잡음을 보정하고 전체 하늘을 3도x 3도 픽셀로 나누어 은하의 지도를 재구성하게 된다. 한편, 전천탐사 중에 약 20 여개의 지향 관측을 수행하여 연구 가치가



그림 2. 원자외선분광기 FIMS 비행모델

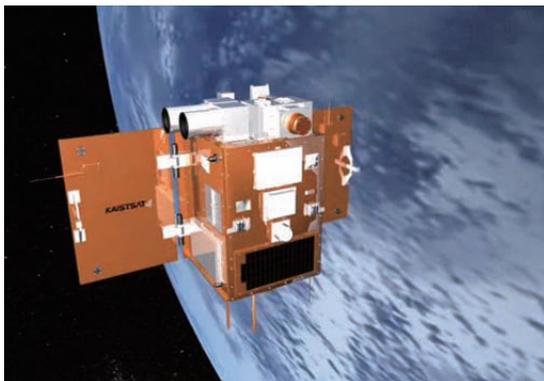


그림 1. 과학기술위성 1호 상상도

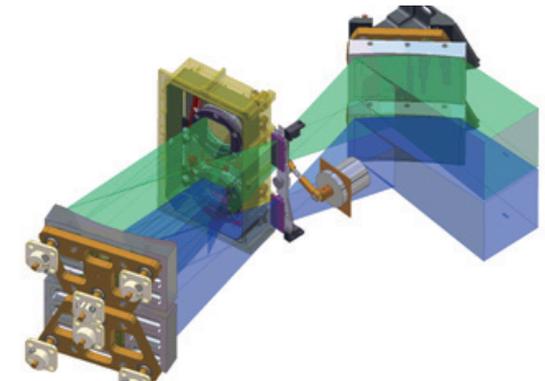


그림 3. 광경로 그림

우리나라 우주천문학의 발자취

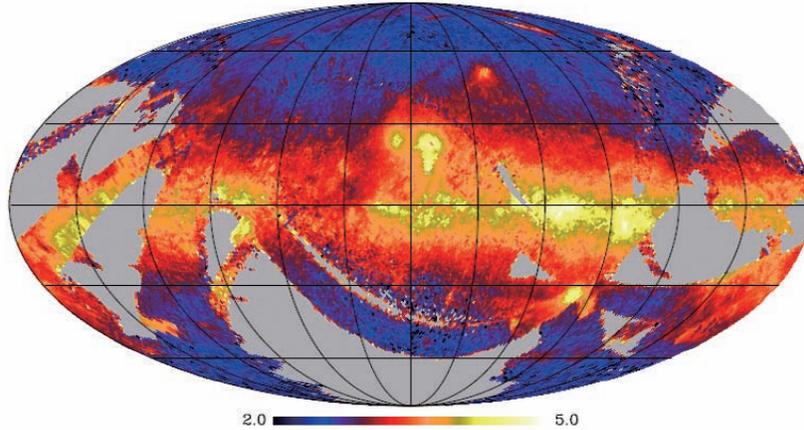


그림 4. 원자외선분광기 FIMS로 관측한 원자외선 전천지도(Seon et al. 2011, ApJS, 196, 15)

큰 천체들에 대한 원자외선 분광 및 영상 관측을 수행하였다. 이러한 임무를 통해 FIMS는 세계최초로 원자외선 대역의 전천지도(all-sky map)를 작성하였다. 또한, 세계 최초로 두 개의 주요 방출선인 OVI(1035Å) 및 CIV(1555Å)를 동시에 관측함으로써 잘 알려져 있지 않은 우리은하의 고온 기체에 대한 성질을 연구하였다.

그 결과, 2006년 6월 우리 은하의 고온 가스 및 성간물질 관측, 연구한 논문 9편을 국제적 명성의 저널 ApJ Letter에 특별호로 발간하였으며 그 이후로도 30여 편에 이르는 SCI 논문을 꾸준히 발표하였다.

3. 우주천문의 도약

21세기 들어 미국 NASA가 허블우주망원경의 대를

잇는 JWST (James Webb Space Telescope, 근적외선), 유럽 ESA에서는 Herschel Space Telescope (원적외선), 일본 JAXA/ISAS는 SPICA 적외선우주망원경 (중적외선)을 추진하고 있어 우주에서의 적외선 관측이 대세를 이루었다. 한국도 마침 서울대에서 일본 ISAS와 Akari 적외선우주망원경의 소프트웨어 개발 및 자료 분석으로 밀접한 협력 관계가 있었고, 또한 SPICA 개발에 공식적으로 참여하려는 움직임이 있었기 때문에 적외선 관측기술의 확보에 대한 요구가 생겨나게 되었다. 이렇게 축적된 적외선 관측기술과 FIMS로 확보된 우주탐재체 기술을 접목하여 2007년에 한국천문연구원은 과학기술위성3호 주탐재체로 다목적적외선영상시스템(MIRIS, Multi-purpose IR Imaging System)을 제안, 개발하게 된다.

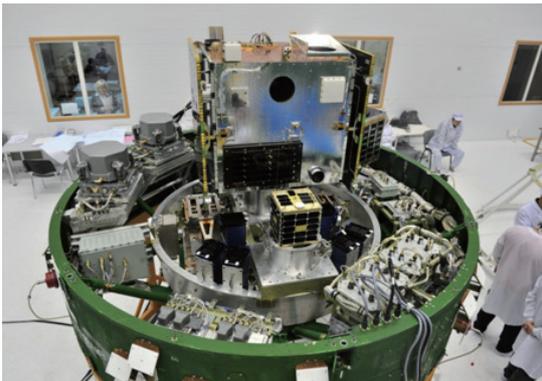


그림 5. 과학기술위성3호가 로켓에 장착된 사진(좌) 및 로켓 발사 사진(우)

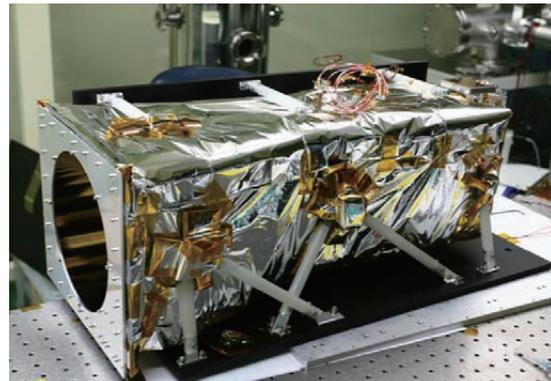


그림 6. 열차단을 위한 다층단열재로 포장되고 최종 조립된 MIRIS 우주관측카메라 비행 모델의 모습

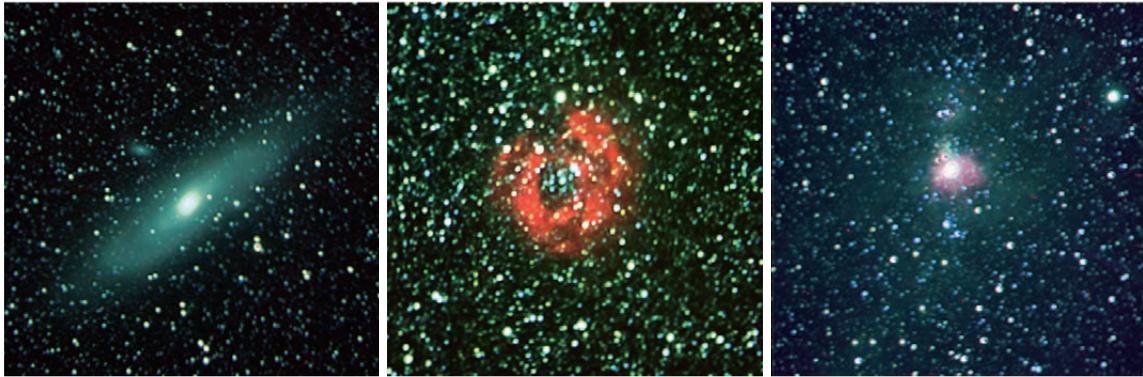
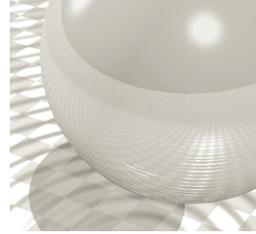


그림 7. MIRIS 우주관측카메라 영상: 안드로메다 은하, 장미성운, 오리온 성운

가. 과학기술위성3호 다목적적외선영상시스템 (MIRIS)

MIRIS는 과학기술위성 3호(주관기관: 항공우주연구원)의 주탑재체로서 2007년에 한국천문연구원에서 개발이 시작되었다. 국내 최초의 적외선 우주망원경으로, 2013년 11월 21일 러시아 드네프르 발사체에 의해 성공적으로 발사되었고, 초기 운영을 거쳐 2년의 관측을 수행하였다.

MIRIS 우주관측카메라는 0.9 μ m부터 2 μ m를 포함하는 근적외선 영역에서 관측을 수행하며, 이를 위해 두 개의 근적외선 광역필터(I, H 밴드)와 적외선 라인 관측을 위한 하나의 협대역 필터(Pa α 와 연속선), 암잡음 보정을 위한 알루미늄 재질의 필터를 가지고 있다. 카메라의 주경이 8cm로 작기 때문에, 광시야 관측에 초점을 두어 관측이 이루어질 예정이다. MIRIS 우주관측카메라의 관측 시야는 3.67도 \times 3.67도이며, 주요한 과학임무는 적외선 우

주배경복사 연구를 위한 황도북극영역의 광역필터 관측과 우리 은하면의 Pa α 방출선 서베이(survey)이다.

MIRIS는 발사 후 약 2달 동안의 초기 운영 및 검보정을 거쳐 정상 운용 중에 있다. MIRIS 우주관측카메라 및 지구관측카메라의 기능 및 성능 검증을 위해 촬영된 첫 영상은 MIRIS가 훌륭히 동작하고 있음을 보여주었다.

나. 적외선우주배경복사 관측실험 (CIBER)

CIBER 프로젝트는 한국의 한국천문연구원(KASI), 미국의 캘리포니아 공과대학 (California Institute of Technology, Caltech), 제트추진연구소 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 및 일본의 우주과학연구소 (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS) 등이 주축이 되어 진행되는 국제 공동 연구로서, 미국 NASA의 과학로켓에 적외선 카메라 및 분광기를 탑재하여 근적외선 (1-2 μ m) 영역에서의 우주배경복사를 관측함으로써 우주 초기의 별

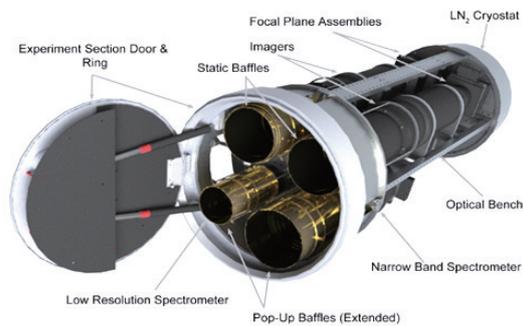


그림 8. CIBER 관측기기



그림 9. CIBER 발사 장면

우리나라 우주천문학의 발자취

및 은하에 대한 연구를 수행하려는 목적을 가지고 있다.

두 대의 광시야 카메라와 저분산 분광기, 그리고 고분산 분광기로 구성되는 CIBER는 액체 질소를 이용한 진공기 안에 장착되어 절대 온도 77K의 온도를 유지한 상태에서 작동된다. 카메라와 분광기에 공통적으로 운용되는 전자부 시스템은 데이터 획득 및 로켓과의 인터페이스를 담당한다. 두 대의 광시야 카메라는 근적외선 우주배경복사 공간 섭동을 측정하며, 저분산 분광기는 근적외선 우주배경복사의 스펙트럼을 관측한다. 고분산 분광기는 근적외선 우주배경복사의 잡음에 해당하는 태양계 내의 황도광을 정밀 측정한다.

CIBER는 1차 (2009.2), 2차 (2010.7), 3차 (2012. 2)에 걸쳐 미국 뉴멕시코주 화이트샌드 미사일기지서 성공적으로 발사되었으며, 최종 4차 (2013.6)는 미국 버지니아주 Wallops 우주센터에서 발사되었다. 네 차례의 발사를 거쳐 황도광 관측 연구 논문을 ApJ에 발표하였으며 그 밖에 네 편의 논문을 ApJS에 2013년에 발표하였고, 2014년에는 적외선우주배경복사 공간 요동에 관한 논문을 Science 저널에 게재하였다.

4. 우주천문의 미래

정부는 2013년 11월 새롭게 수립된 우주개발 중장기 계획에서 2014년부터 2040년까지의 우주 관련 로드맵을 발표하였다. 이 중장기 계획에 따르면 창의적 우주과학 연구 강화를 위해 우주기원 규명을 위한 심우주 관측 우주망원경 개발이 하나의 세부 항목으로 들어가 있는데, 구체적으로는 차세대 소형위성 활용과 우주망원경 국제협력 프로젝트 참여를 통한 우주망원경 기반 기술 확보, 차세대중형위성 이용 1m급 우주망원경 개발, 국내 주도 국제협력 3m급 우주망원경 개발을 명시하고 있어, 실제 담당 기관인 천문연의 우주망원경 로드맵을 반영하고 있다. 실제로, 핵심기술개발본부 우주탐재체 팀은 2012년 12월부터 차세대소형위성1호의 주탑재체로 별탄생 역사 연구를 위한 근적외선분광기(NISS, Near-infrared Imaging Spectrometer for Star formation history)를 개발하기 시작하여 우주망원경 기반 기술 확보에 주력하고 있으며, 우주망원경 국제협력 및 차세대중형위성 우주망원경 개발 선행 연구를 시작함으로써 국제적 수준의 국내

주도 우주망원경 개발의 주역으로 발전할 예정이다.

한편, NASA sounding rocket program 적외선우주배경복사 관측실험 2 (CIBER2)가 CIBER의 성공에 힘입어 계속 진행되었다. CIBER보다 성능을 10배 이상 개선한 CIBER2가 2012년 NASA의 연구 과제로 선정되었으며, 천문연에서는 기초기술연구회 협동연구사업으로 “우주용 30cm급 극저온 적외선 광기계 시스템 개발” 과제 (2012-2014)로 CIBER2 광기계 개발에 참여하고 있다.

천문연은 2014년에 미래창조과학부 정책연구로 “천문 우주개발 및 활용을 통한 우주과학 연구 활성화 방안 연구”를 수행하여 우리나라 우주망원경 개발의 세부 실천 목표를 세우고 있는데, 동시에 우주천문그룹은 국제협력 적외선우주망원경 참여를 위한 선행연구를 수행하여 국가 우주개발 중장기 계획과 천문연 우주망원경 로드맵을 결합하려 한다.

가. 차세대소형위성 1호 근적외선영상분광기 (Near-Infrared Spectrograph for Star formation history, NISS)

별탄생역사 연구를 위한 근적외선영상분광기 NISS는 차세대소형위성 1호의 주탑재체로서 시야각이 2x2도로 크며, 분광분해능 R=20의 선형분광필터 (LVF, Linear Variable Filter)를 사용하여 적외선우주배경복사 및 가까운 은하의 별 탄생 역사를 연구하려는 목적을 가지고 있다. NISS의 관측 파장 영역은 0.95 - 3.8 μm 이며 복사 냉각을 통하여 비축 광학계를 200K까지 냉각시키고 소형 냉동기를 이용하여 HIRG 적외선 검출기를 80K까지 냉각시켜 관측에 사용한다.

근적외선에서 관측되는 우주배경복사는 먼 우주 초기에 생성되는 별과 은하들로부터의 극미광이라고 추정되며, 거대 규모로 분포하고 있다고 알려져 있다. NISS는 이러한 적외선 우주배경복사를 저분산 영상분광으로 먼 우주의 시간 간격에 따라 어떻게 거대구조가 진화해 가는지를 밝힐 예정이다. 아울러 가까운 은하들과 은하단, 별탄생 영역 등에서도 별생성과 관련된 활동들이 근적외선 분광선으로 나타난다. NISS는 지상에서는 관측이 어려운 Pa α , PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon), H $_2$ O와 같은 별탄생과 관련된 분광선들을 관측하여 가까운 우주에서의 별생성 활동을 살펴볼 예정이다. 이러한 분광선

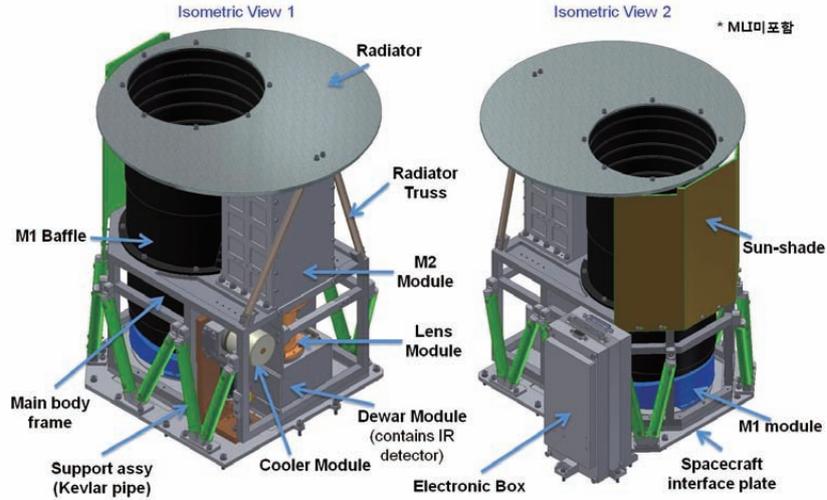
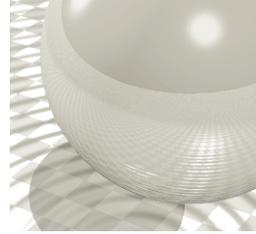


그림 10. 국내 최초의 적외선 분광 기능을 가진 우주망원경으로 2017년에 발사 예정인 NISS의 개념도

들은 다른 별생성 인자들과의 비교를 통해 별생성에 대한 정확한 검보정을 수행할 계획이다.

2017년에 발사 예정인 NISS는 국내 최초의 적외선 분광 기능을 가진 우주망원경으로써 우리나라 우주천문의 미래를 이끄는 초석이 될 것이다.

나. 우주망원경 국제협력 및 한국주도 중형우주망원경

한국은 NASA SMEX급 적외선 우주망원경 SPHEREx, 대형 적외선 우주망원경 WFIRST, 대형 자외선 우주망원경 WSO-UV, 소형 자외선 우주망원경 MESSIER 등 다양한 우주망원경 국제협력 기회를 찾고 있으며, 이를 통해 우주망원경 도약 기술 개발 및 선도적인 우주천문 연구를 수행할 계획이다.

우주개발 중장기 계획에 따르면 한국주도 중형우주망원경을 2020년대에 개발할 예정인데, 이를 위한 독창적인 과학 임무의 설정, 핵심 기술의 확보 및 국제공동 연구를 위한 네트워크 구성 등이 선행되어야 한다. 이를 통해 국내주도 중형우주망원경 개발뿐만 아니라 2040년대까지 우주천문 분야에서 국제적 빅사이언스를 선도할 수 있는 대형 우주망원경을 기획, 주도하기 위한 끊임없는 노력이 필요하다.

약 력



이대희

- 1991. 03. - 1995. 02. 한국과학기술원 물리학 학사
- 1995. 03. - 1997. 02. 한국과학기술원 물리학 석사
- 1997. 03. - 2001. 02. 한국과학기술원 물리학 박사
- 2001. 03. - 2003. 12. KAIST 인공위성센터 선임연구원
- 2004. 01. - 2010. 12. 한국천문연구원 선임연구원
- 2007. 08. - 2008. 10. Caltech 방문연구원
- 2011. 01. - 현재 한국천문연구원 책임연구원
- 2015. 09. - 현재 UST 교수

본 글은 한국천문학회에서 발간한 ‘한국천문학회 50년사’에 저자가 기고한 내용을 발췌하였습니다.”

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 설치되었다. 그러나 선진국들은 그 당시에 이미 10 m급의 초대형 망원경을 준공하고 있었고, 심지어 우리나라와 경제수준이

* 한국천문연구원

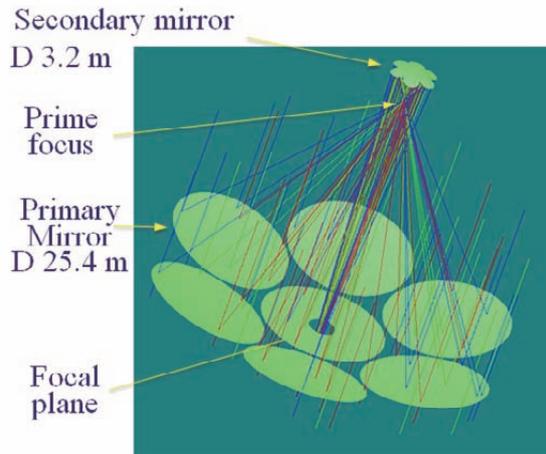
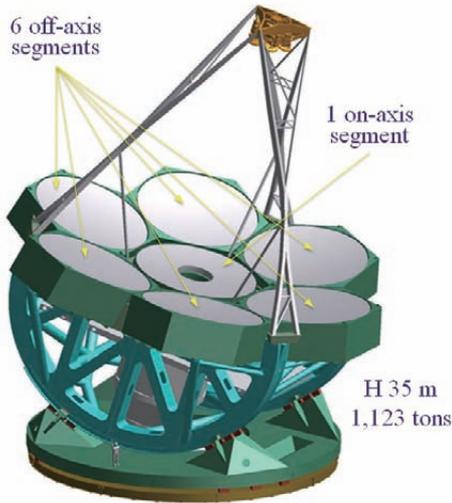
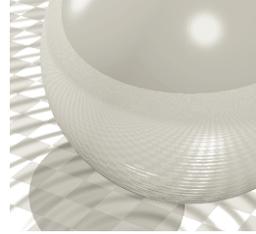


그림 1. 구경 25 m의 GMT 개발도와 광 경로도. 그레고리안 형식의 망원경으로서, 주경과 부경은 각각 8.4 m와 1.05 m의 오목반사경 7장으로 구성되어 있다. 주경과 부경 사이에 주초점 (prime focus)이 있어서 조립과 정렬에 유용한 구조이다.

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

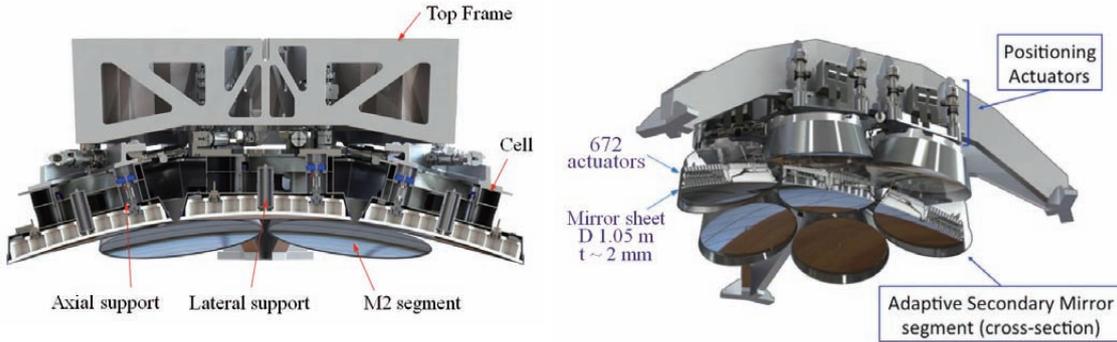


그림 2. GMT FSM과 ASM 부경. FSM은 반사경과 셀 사이가 진공이고 3개의 축방향 지지대와 1개의 횡방향 지지대가 있다. 축방향 지지대 안에 있는 피에조 액추에이터에 의해 틸트 구동을 함으로써 바람에 의한 망원경의 흔들림을 보정한다. ASM은 지구 대기를 통과하는 동안 왜곡되는 별빛의 파면을 복원해주는데, 두께가 2 mm 밖에 안 되는 지름 1 m 크기의 반사경을 670여개의 액추에이터로 변형시킨다.

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

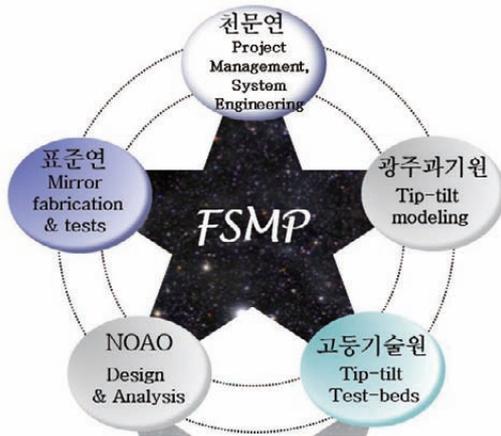
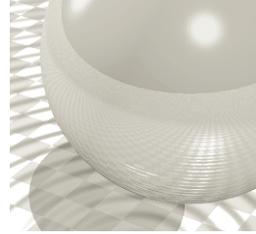


그림 3. FSMP 개발에 참여한 기관들과 역할. 친문연은 계획 수립, 진도 관리, 성능 검증 등의 시스템엔지니어링과 광학 설계를 하였고, 표준연은 비축 비구면 반사경의 가공과 시험, NOAO는 광기계 설계와 해석, 고등기술원은 틸트 test-bed 제작과 시험, 광주과기원은 틸트의 수학적 모델링을 하였다.

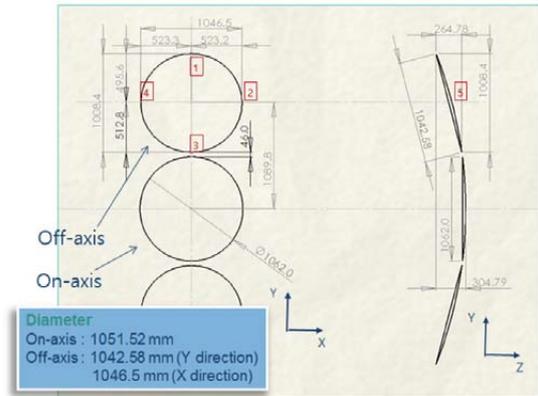


그림 4. 비축 반사경의 광학 설계. 광축 반사경은 원의 형태이지만, 비축면은 X 방향과 Y 방향의 지름이 서로 다르며, 중심점이 정 중앙에 있지 않다. 이처럼 비축면을 설계하고 가공할 때에는 고려할 사항이 많았다.

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 um 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

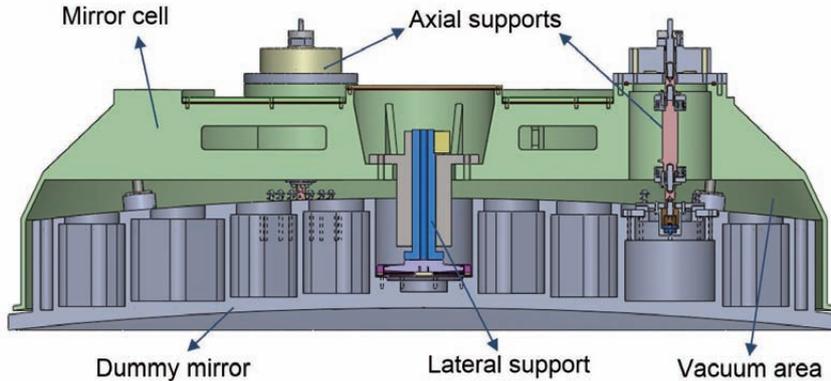


그림 5. 팁틸트 test-bed용 FSMP 구조도. 반사경과 셀은 3개의 축방향 지지대(axial support)와 1개의 횡방향 지지대(lateral support)로 연결되어 있고, 그 사이는 진공을 유지하여 반사경의 무게를 진공의 힘이 상쇄한다.

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

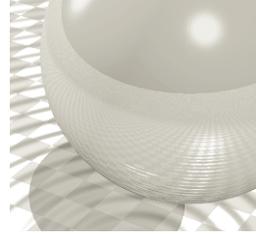
힘으로 지탱하고 있다.

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

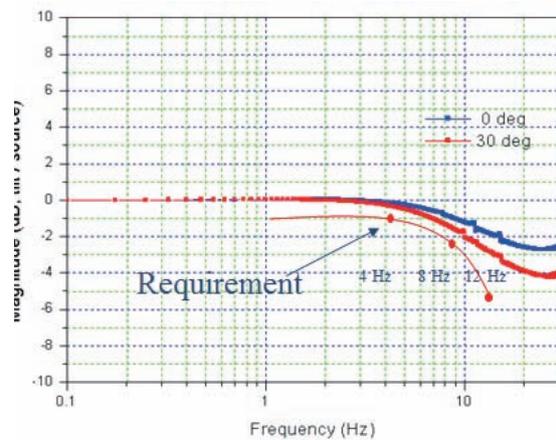
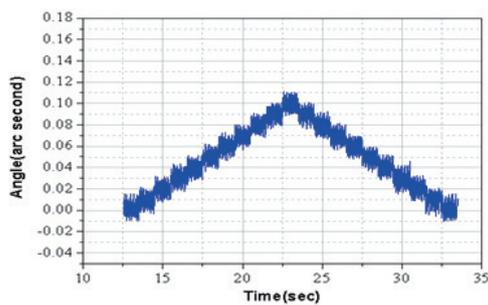


그림 8. 틸트 정밀도 시험 결과와 attenuation 시험 결과. 요구 정밀도인 0.02" 보다 작은 0.01" 단위로 구동하였는데도, 각 단계가 선명히 구분되어 보인다. 오른쪽 그래프는 밀집도 시험 결과인데, 30도 기울여서 attenuation 시험을 할 때에도 주파수별 요구값을 모두 만족함을 볼 수 있다.

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, 광주과기원, 표준연, NOAO의 참여자 분들께 다시 한 번 감사의 마음을 전합니다. 또한 적극적으로 도움을 주신 아리조나 대학과 GMT Organization의 관련자 분들께도 감사를 드립니다.

참고문헌

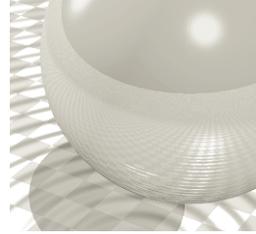
- [1] J.P. Gardner, J.C. Mather, M. Clampin, M., et al. The James Webb space telescope, *Space Sci. Rev.*, 123 (4), 485–606, (2006).
- [2] GMT Organization, GMT System Design Review, Pasadena (2014).
- [3] 김영수, GMT 거대망원경 광학계, *광학과 기술*, 12권 4호 (2008, 10월).
- [4] 한국과학기술기획평가원, 대형광학망원경개발사업 사전타당성 조사 보고서, 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



특집 ■ 우주광학

우주용 반사경의 개발

이윤우*, 양호순**

우리가 일상적으로 다루는 디지털 카메라나 휴대 폰용 카메라와 같은 광학제품들은 대부분 렌즈를 사용하여 제작된다. 하지만 렌즈들은 일반적으로 색수차를 가지고 있기 때문에 색수차를 제거하기 위하여 굴절률이 다른 물질을 사용하거나 오목과 볼록 조합을 사용한다. 따라서 고성능의 렌즈 시스템을 만들기 위해서는 여러 장의 렌즈를 사용하게 되어 복잡하고 제작이 어려워진다.

이에 반하여 천체망원경이나 우주용 망원경과 같은 정밀 광학계는 많은 광량과 높은 해상도를 위하여 큰 사이즈의 렌즈를 사용해야 하는데 렌즈 자체의 무게로 인하여 형상이 변형되고 큰 렌즈 재질을 균일하게 만들기 어려운 문제가 있어서 직경이 20 cm 이상이 필요한 경우 렌즈를 잘 사용하지 않는다. 이러한 경우에는 광학거울을 주로 사용하게 되는데 거울은 한 면만 사용하므로 사용하지 않는 뒷면을 파내서 무게를 줄일 수도 있고 렌즈처럼 색수차를 가지고 있지 않기 때문에 개수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 최근에는 거울의 수를 줄이면서 성능을 유지하기 위하여 비구면을 주로 사용한다.

천문우주용이나 인공위성용 광학거울은 일반적인 정보통신 및 계측기기에 사용하는 광학부품보다 직경이 크면서 면의 정밀도가 높다. 현재까지 국내에서 사용한 지상용 천체망원경의 최고 직경은 1.8 m이며 위성 카메라의 경우는 직경 0.8 m 정도이다. 특히 위성 카메라는 형상오차가 10 nm rms 이하인 초정밀

비구면 광학거울을 사용한다. 이러한 광학거울들을 제작하기 위해서는 가공기술과 아울러 초정밀 측정 기술이 수반되어야 한다.

한국표준과학연구원(이하 표준연)의 우주광학센터는 지난 2005년부터 우주용 반사경 개발에 특화하여 연구실을 운영하고 있으며 항우연, 천문연, 국과연등과 함께 지상용 또는 우주용 망원경을 위한 대형 비구면 반사경 개발 기술을 공동개발하고 있다. 본 월고에서는 그동안 표준연에서 개발한 우주용 반사경 개발 기술을 가공기술 및 중력을 감안한 측정기술 위주로 소개하고자 한다.

위성카메라용 정밀광학계를 개발하기 위해서는 그림 1과 같이 광학설계, 제작, 조립, 시험기술들이 함께 필요하다. 위성카메라는 그 특성상 전략물자에 포함되어 있어 기술이나 관련 제품의 국가간 이동이 쉽지 않다. 항공우주연구원은 다목적위성 1호부터 3A호에 이르기까지 다양한 우주용 카메라를 개발하면서 카메라시스템의 설계, 조립, 정렬 및 우주환경시험등에 관한 기술을 자체 보유하고 있는데 성공하였으나 사용된 반사경들은 대부분 해외에서 제작하고 시험하여 들 여온 것들이었다. 따라서 우리나라가 직접 우주개발을 하기 위해서는 반사경 제작의 국산화가 필수였다. 이를 위해서 표준과학연구원의 우주광학센터는 항우연과의 공동개발을 통해 2013년에는 직경 800 mm 우주용 반사경을, 2014년에는 직경 1 m 우주용 반사경을 국산화하는데 성공하였다(그림 2 참조).

* 한국표준과학연구원 산업측정표준본부장, ** 한국표준과학연구원 우주광학센터장

우주용 반사경의 개발



그림 1. 위성 카메라 개발 요소기술

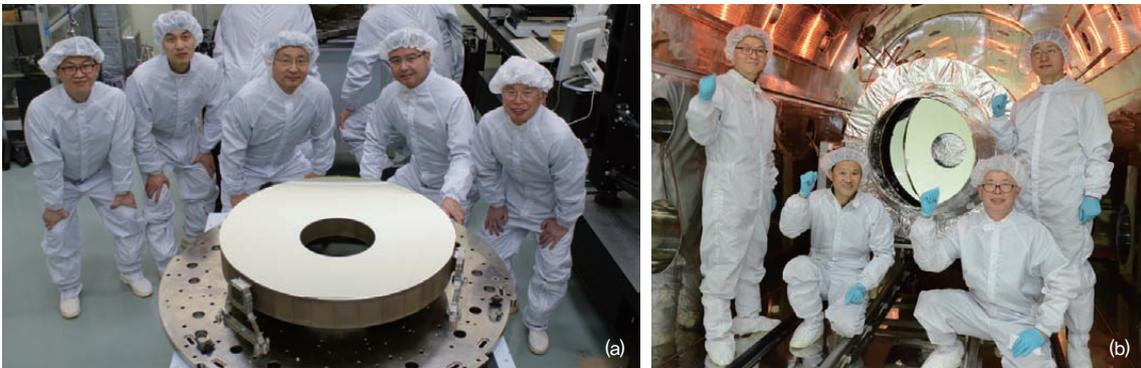


그림 2. (a) 직경 800 mm 우주용 반사경 개발 (b) 열진공챔버내에 설치된 직경 1 m 우주용 반사경

대형 비구면 거울을 개발하기 위해서는 광기계 설계기술, 경량화기술, 연마기술, 박막증착기술이 필요하다. 거울의 경량화는 광기계 설계에 따라 모양과 경량화 정도가 결정된다. 소형 거울의 경량화는 재질에 따라 다르며 최대 90% 까지 시도되기도 하지만 지상용으로는 일반적으로 60% 정도이고 우주용으로는 80% 정도까지 요구된다. 이렇게 경량화율이 높으면서도 중력에 의한 변형이나 로켓 발사시 겪는 진동을 견디기 위해서는 광기계 설계가 조심스럽게 진행되어야 한다.

경량화작업은 다이아몬드 공구를 사용하여 CNC(Computer Numerical Control) machine으로 하며 대량 생산하는 경우에는 water jet을 이용하여 투과형 중간판을 고속 제작 후 연마 면과 뒷면을 고온으로 녹이거나 접착하는 샌드위치 방법이 사용된다. 천체 망원경용 중형거울은 보통 접시 모양으로 경량

화 하지만 대형 거울은 유리를 녹여서 허니콤 모양으로 제작한다.

그림 3은 표준연에서 설계한 경량화 거울의 형상이다. 직경 1000 mm 우주용 망원경의 주경이며 광기계 해석에 따라 경량화 모양을 최적화 하였다. 경량화 비율은 80% 이어서 전체무게가 46 kg에 불과하며 제작기간은 약 6개월이다. 이를 위해서 뒷면에 남아 있는 웹의 두께는 2 mm 에 불과하여 작업중에 깨지기 쉬워 여러 가공조건을 감안한 별도의 가공방법을 사용하여야 했다. 최근에 (주)지우광기술이 경량화 및 에칭기술을 표준연으로부터 기술이전 받았고 향후 국내의 경량화 수요를 상당부분 담당할 예정이다.

우주용 반사경은 지상에서 가공이 되는 반면 사용은 중력이 없는 우주공간에서 사용되므로 지상에서 가공할 때 미리 중력효과를 측정하여 반사경의 변형량이 요구조건 이내인지를 확인하여야 한다. 이때 반

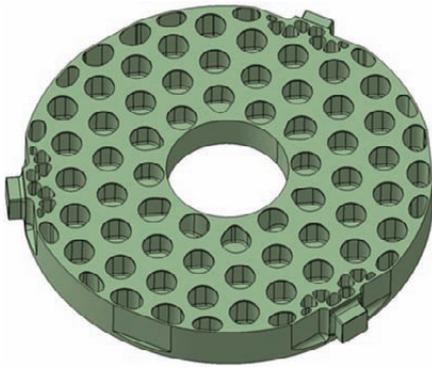
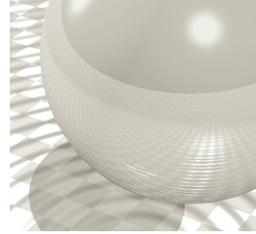


그림 3. 직경 1 m 반사경의 경량화 설계

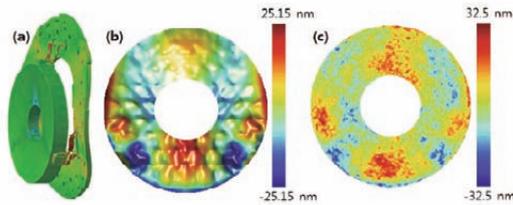


그림 4. (a) 중력에 의한 반사경의 변형, (b) 이론적인 중력효과 (c) 실제로 측정된 중력효과.

사면에 존재하는 형상오차와 중력에 의한 변형량을 분리하는 작업이 필요하다. 이를 위하여 반사경의 광축을 수평방향으로 향한 채 120도 간격으로 반사경을 돌려주면서 반사경의 형상오차를 측정하면 중력 효과는 사라지고 실제 반사면에 존재하는 형상오차만 남게 하는 방법을 사용할 수 있다[1]. 이때 돌리는 각도에서 발생할 수 있는 오차를 고려하여 보다 자세한 중력효과를 계산할 수 있는 방법도 개발되었다[2]. 그림 4는 측정결과로부터 중력효과를 계산한 결과이다. (a)는 중력에 의해 반사경 및 구조물의 변형을 묘사한 그림이고 (b)는 유한요소해석에 따른 계산 결과이고 (c)는 실제 측정결과이다. 변형 형상이나 값들이 해석결과와 측정결과 사이에 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

이렇게 제작이 된 반사경에는 반사율을 높이기 위해 반사코팅을 한다. 일반적으로 가시광 영역에서의 반사율을 높이기 위해서는 은코팅을 수행하고 적외선 영역을 위해서는 금코팅을 수행한다. 코팅이 완료된 반사경은 최종적으로 진동시험 및 열주기, 열진공 시험과 같은 우주환경시험을 거쳐서 반사경의 형상

변화에 유의미한 변형이 없어야 비로소 우주용으로 사용할 수 있다. 표준연의 우주광학센터는 이러한 모든 제작과정을 순수 국내 기술로 완성하였고 우주환경시험을 거쳐 센터에서 제작되는 직경 1 m 이하 우주용 반사경이 우주에서 사용가능함을 공식적으로 인정받았다. 이러한 노력을 바탕으로 2018년과 2019년에 발사될 차세대 중형위성에 들어갈 직경 600 mm급 우주용 반사경들을 항우연과 같이 개발하기로 최근 결정하여서 우주용 반사경 개발을 시작한지 10여년만에 마침내 국산화의 길을 열수 있게 되었다.

참고문헌

[1] E.E. Bloemhof, J.C.Lam, A.F.Feria and Z. Chang, Appl. Opt. 48, 4239 (2009)
 [2] H.G.Rhee, H. Kihm, H.S.Yang, Y.S.Ghim, Y.W.Lee, JKPS, 65(9), 1385 (2014)

약력

이윤우



이윤우 박사는 1985년 한국표준과학연구원에 입원하여, 1994년 KAIST에서 물리학으로 박사학위를 취득하였고, 영상그림, 광도영상그림, 나노광계측그림장, 우주광학센터장등을 역임하였고 현재는 산업 측정표준본부의 본부장을 맡고 있다. (ywlee@kriss.re.kr)

양호순



양호순 박사는 1999년 영국 University College London에서 천문 및 물리학으로 박사학위를 취득하였고, 2003년까지 ㈜세트레이이 연구원을 거쳐 현재는 한국표준과학연구원 우주광학센터의 센터장을 맡고 있다. (hsy@kriss.re.kr)

특집 ■ 우주광학

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

장승혁*, 박수중**, 김건희***

1. 서론

1609년 이탈리아 과학자 갈릴레오 갈릴레이(Galileo Galilei, 1564-1642)는 망원경을 사용하여 최초로 천체를 관측하였다. 천체망원경은 인류가 보지 못했던 천체의 모습을 보여주면서 우주에 대한 인식 자체를 바꾸고, 과학혁명의 견인차 역할을 하였다. 그런데 볼록렌즈와 오목렌즈의 조합으로 이루어진 갈릴레이 망원경은 렌즈를 크게 만드는 것이 어렵고, 굴절과정에서 색수차가 생기는 단점이 있었다. 1668년 영국의 물리학자 아이작 뉴턴(Isaac Newton, 1642-1727)은 오목거울을 사용하여 최초의 반사망원경을 만들었다. 그 후 영국의 천문학자 프리드리히 윌리엄 허셜(Friedrich William Herschel, 1738-1822)은 일생동안 400개 이상의 반사망원경을 직접 제작하면서 반사경을 크게 하고 성능을 개량하여 천왕성, 외부 은하 등 많은 천체를 발견하였다. 또한 허셜은 1800년에 태양의 스펙트럼에서 적외선을 발견하여 천문관측이 가시광선 파장대를 벗어나는 계기를 마련하였다[1].

적외선은 투과성이 좋아서 블랙홀이 있는 은하의 중심과 별이 탄생하는 성간구름의 내부를 관측할 수 있다. 또한 멀리 있는 천체는 우주의 팽창으로 적색편이가 되어 적외선 파장대에서 관측된다. 그렇지만 대부분의

적외선 에너지는 지구 대기에 흡수되기 때문에 본격적인 적외선 천문학 연구는 1970년대 이후 지구 대기권을 벗어난 우주에서 가능하게 되었다. 적외선 우주망원경은 큰 구경으로 우주의 가장 먼 천체를 관측하는 목적으로 미국, 유럽, 일본 등이 경쟁하고 있다. 지금까지 가장 큰 적외선 우주망원경은 2009년 유럽우주항공우주국(European Space Agency)이 발사한 구경 3.5m 허셜 우주 망원경(Herschel Space Observatory)이다.

한편 우주와 우리 은하의 구조를 연구할 때는 소형 광시야 적외선 우주망원경으로 넓은 시야를 확보하여 넓은 지역을 관측해야 한다. 우리나라에서 2013년 발사한 과학기술위성 3호에 탑재된 구경 80 mm 다목적 적외선 영상시스템(MIRIS: Multi-purpose IR Imaging System)이 이러한 목적을 가지고 있다. MIRIS의 망원경은 굴절식이고 0.9 - 2 μm 파장대에서 근적외선 우주배경 복사와 우리 은하의 가스분포 구조 등 관측을 수행하였다[2]. 굴절식 망원경은 카메라 렌즈 설계 기술을 사용하여 여러 장의 렌즈로 광학 수차를 보정할 수 있지만, 유효 파장대가 5 μm 보다 커지면 사용할 수 있는 렌즈의 재질이 제한되어 색수차 보정이 어렵다. 또한 저온 냉각 상태에서 우주 로켓의 발사 충격을 견딜 수 있는 광기계 구조에 제약이 있어서 크게 만드는 것이 불가능하다.

반사망원경은 유효 파장대에 제한이 없어서 적외선

* 스마트IT융합시스템연구원, ** 경희대학교 우주탐사학과, *** 한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀

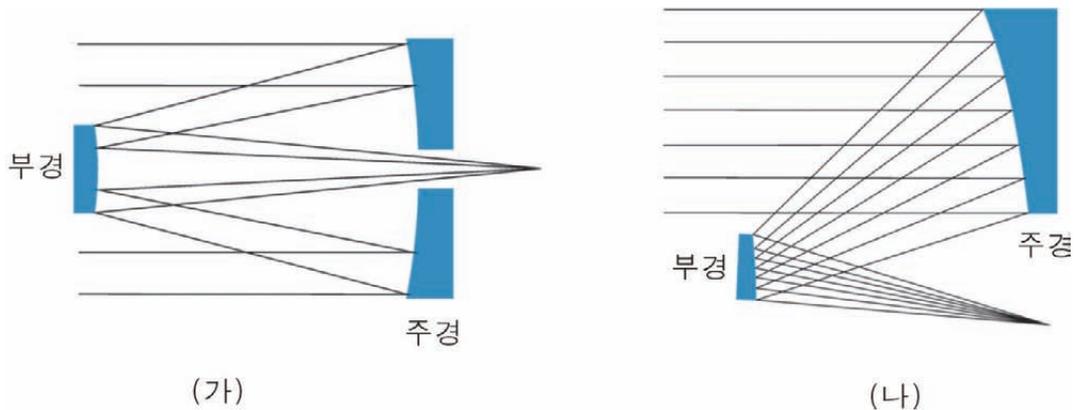
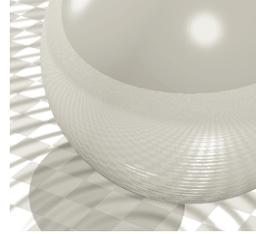


그림 1. (가) 축대칭 반사망원경과 (나) 비축 반사망원경

관측에 많은 장점이 있다. 또한 반사경을 알루미늄으로 제작하면 저온에서 알루미늄 구조물과 같은 비율로 수축하여 광기계 장치가 단순해지는 장점이 있다. 그림 1 (가)에서 보듯이 반사망원경은 전통적으로 축대칭 형태로 만들어 지는데, 모든 반사경이 하나의 축을 공유하도록 되어 있다. 굴절망원경을 비롯한 렌즈를 이용한 결상 광학계도 대부분 하나의 축을 공유하도록 만들어지지만, 굴절망원경과는 달리 반사망원경은 축대칭 구조로 인해 큰 단점이 발생한다. 바로 부경에 의한 차폐현상이다. 반사망원경의 부경은 유효 구경의 크기를 줄이고 입사 빛이 회절, 산란되어 이미지의 해상도를 낮춘다. 또한 주경의 중심 구멍 주변의 열복사와 산란광이 적외선 파장대의 열복사 잡음을 크게 한다. 이를 피하기 위해서는 그림 1 (나)와 같이 주경에 의해 빛이 비스듬하게 반사되도록 만들어야 하는데 그럴 경우 주경의 형태는 비축대칭이 된다. 마찬가지로 부경에서 반사된 빛도 주경으로 돌아가지 않게 하기 위해서는 부경의 형태 또한 비축대칭이 되어야 한다. 이렇게 비축대칭 형태의 미러로 이루어진 비축 반사망원경은 전통적으로 극히 제한적 목적에서 사용되었다. 그 이유는 이러한 비축 반사경을 만들 수 있는 기술이 과거에 없었기에 비축 망원경 설계 기술도 개발되지 않았고, 관례적으로 비축 반사 망원경은 전통적인 축대칭 반사망원경보다 결상 성능이 나쁘다는 선입관 때문이다.

최근 컴퓨터 제어 공학의 발달로 초정밀 가공 기술이 발달하여 과거에는 불가능했던 자유곡면 반사경의 제작이 가능하게 되었고 이를 이용하여 비축대칭 반사경을 만들 수 있어서 비축 반사망원경이 주목을 받고 있

다. 본 연구팀은 비축 반사망원경의 수차를 처음부터 해석학적으로 다시 분석하여 축대칭 반사망원경과 동등한 광학 성능을 가진 비축 반사망원경을 설계하고, 광시야 적외선 우주망원경의 시험 모델을 제작하고 있다.

2. 비축 반사망원경의 수차 이론

비축 반사망원경의 결상성능을 알아보기 위해서는 비축 반사망원경의 수차를 분석해야 한다. 해석학을 바탕으로 하는 수차 이론이 등장한 19세기에는 비축 반사경의 제작이 불가능하였기에 모든 결상 광학계는 축대칭 광학계를 대상으로 하였다. 컴퓨터가 등장하기 훨씬 전에 축대칭 반사망원경의 기본 설계 원리는 완성되었고, 현대의 망원경 설계자는 복잡한 수차 이론을 몰라도 렌즈 설계 소프트웨어를 사용하여 기본 설계 값 주변에서 최적화된 설계를 얻을 수 있다. 그렇지만 전통적으로 알려진 수차 이론은 축대칭 광학계를 전제로 하고 있기 때문에 비축 반사망원경에는 적용할 수 없다.

비록 상당히 오래 전부터 비축 광학계에 대한 연구가 있었지만 그 복잡성으로 인해 실제로 광학계의 설계에 적용하기에는 어려움이 따른다 [3-8]. 하지만 단순화된 비축 광학계는 비교적 수차의 해석이 용이하다. 그 중에 하나가 서로 초점을 공유하는 원뿔 곡선(conic section) 반사경들로 이루어진 비축 동초점(confocal) 시스템이다. 이 광학계는 그림 2에서 보는 것과 같이 원뿔 곡선의 성질로 인해 최종 초점에서는 고전 축대칭 광학계와 마찬가지로 수차가 없는 완벽한 상을 맺는다 [9].

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

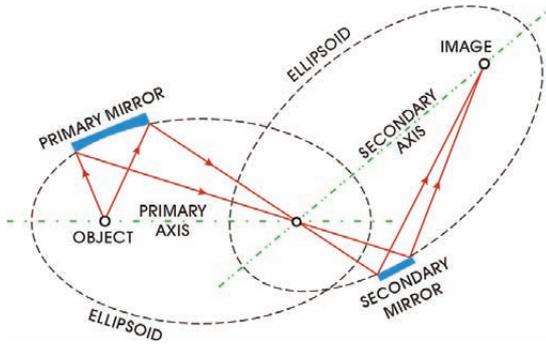


그림 2. 두 개의 반사경이 서로 초점을 공유하지만 축을 공유하지 않는 비축 반사광학계

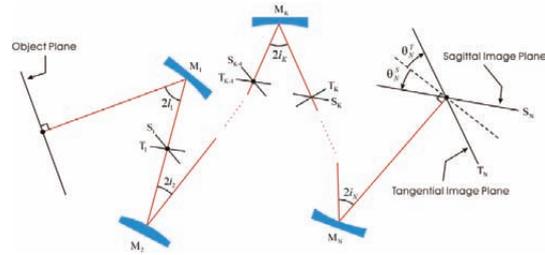


그림 3. 서로 초점을 공유하는 N개의 conic mirror로 이루어진 비축 반사광학계

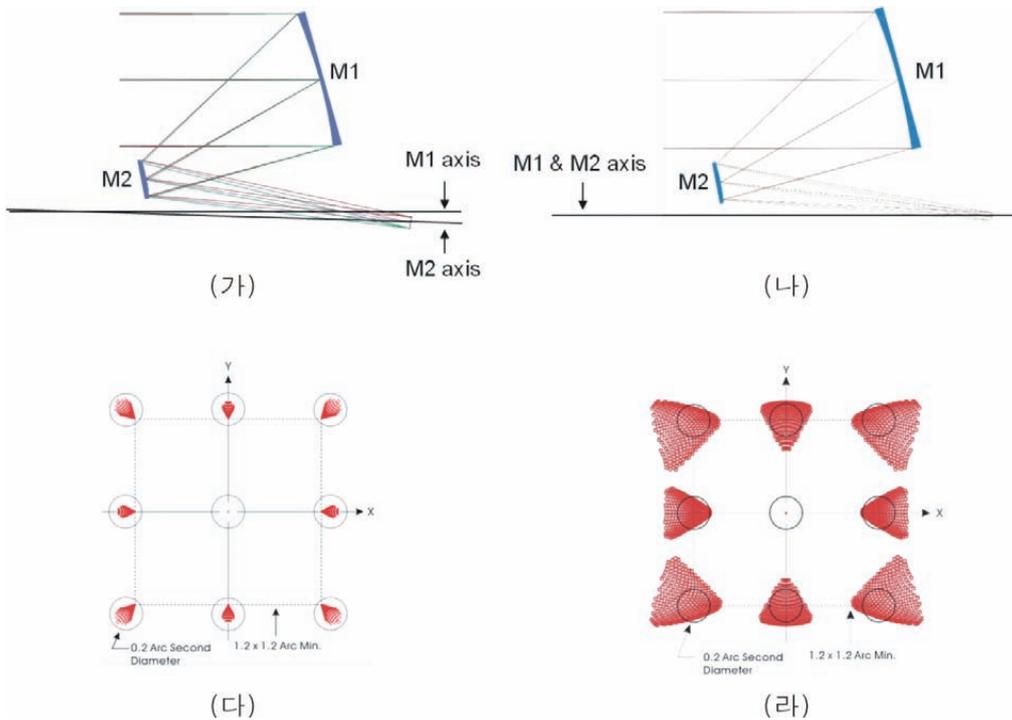
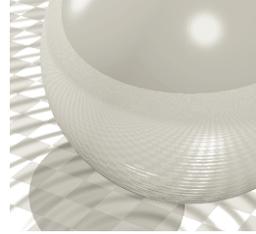


그림 4. 선형 비점수차가 제거된 비축 카세그레인 망원경과 선형 비점수차가 제거되지 않은 비축 카세그레인 망원경

한가지 주목할 부분은 서로 초점을 공유하기만 하면 각 반사경의 축이 일치할 필요가 없다는 것이다. 문제는 초점 주변부의 결상 성능이다. 비축 광학계는 축 대칭성이 없기 때문에 축대칭 광학계에 비해 수차가 클 것이라고 예상해 볼 수 있다. 이는 사실인데, 비축 광학계는 축대칭 광학계에 없는 선형 비점수차(linear astigmatism)가 발생하기 때문이다. 선형 비점수차는 탄젠셜(tangential)

상면과 새지털(sagittal) 상면이 기울어져 서로 일치하지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 선형 비점수차는 일반적인 축대칭 광학계에서 탄젠셜 상면과 새지털 상면의 곡률 차이로 발생하는 3차 비점수차 보다 한 차수가 낮은 2차 수차이다. 따라서 광학계의 결상 성능에 가장 큰 영향을 미치며 넓은 상면을 위해 반드시 제거 되어야 하는 수차이다 [9].



다행히 서로 초점을 공유하는 2개 이상의 원뿔 곡선 반사경들로 이루어진 비축 반사광학계에서는 선형 비점수차의 제거가 가능하다 [9,10]. 선형 비점수차의 제거 조건은 다음 식과 같다.

$$\sum_{p=1}^{N-1} \left[(1+m_p) \tan i_p \prod_{q=p+1}^N m_q \right] + (1+m_N) \tan i_N = 0$$

여기서 N은 반사경의 개수, m_k 와 i_k 는 각각 k번째 반사경의 확대율과 중심광선의 입사각이다 (그림 3).

위의 식을 만족하도록 비축 반사광학계를 설계하면 축대칭 광학계와 동등한 수차 성능을 가지게 된다. 예로서 그림 4 (가), (나)는 두 개의 서로 다른 비축 고전 카세그레인식 망원경을 보여주고 있는데, (가)는 선형 비점수차 제거 조건을 만족하도록 설계 되었고, (나)는 일반 축대칭 카세그레인의 주변부를 사용하는 것으로 선형 비점수차 제거 조건을 만족하지 않는다. 두 망원경 모두 유효 구경과 유효 초점비는 각각 1m와 f/8로서 동일하다. 그림 4 (가) 망원경의 부경 축은 주경 축으로부터 기울어져 있는데, 기울어진 각도는 선형 비점수차 제거 조건과 원뿔 곡선 방정식으로부터 계산할 수 있다. 그림 4 (나) 망원경의 주경과 부경축은 서로 일치한다. 그림 4 (다), (라)는 각각 그림 4 (가), (나) 망원경의 스폿다이아그램 (spot diagram) 을 보여주는 것으로 (가) 망원경은 선형 비점수차가 제거 되어 일반 축대칭 망원경과 동등한 수차 성능을 보여주는 반면 (나) 망원경은 그렇지 않다는 것을 알 수 있다.



그림 5. 자유곡면 반사경 가공 모습.

3. 알루미늄 자유곡면 반사경의 제작

그림 4 (나)에서 보여주는 비축 카세그레인 반사망원경은 축대칭 반사망원경 반사경의 가장자리를 사용하고 있다. 이러한 경우에는 축대칭 비구면 반사경을 만들어서 가장자리를 잘라서 반사경을 만드는 것이 일반적이고, 이 제작 방법은 전통적인 축대칭 반사경을 만드는 것과 거의 동일하다. 하지만 축에서 멀리 떨어진 비축반사경이나 고차 수차의 제거를 위해 최적화된 자유곡면 반사경의 경우는 그러한 방법을 사용할 수 없고 자유곡면 가공을 할 수 있는 서보툴머시닝 (Servo Tool Machining) 기술을 사용해야 한다 [11,12]. 이 기술은 기존의 축대칭에서 사용하는 2차원 (x, z) 좌표에 한 차원을 추가하여 3차원 (x, y, z) 또는 (r, θ, z) 좌표의 가공 경로를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 한국기초과학지원연구원이 보유한 5축 제어 초정밀 다이아몬드 선삭기계 (Nanotech 450 UPL, Moore Nanotechnology System)를 사용하고 있다. 그림 5는 자유곡면 반사경의 가공 모습을 보여준다. 자유곡면 반사경의 표면은 간섭계로 측정할 수 없다. 본 연구에서는 한국기초과학지원연구원이 운영하는 초정밀 비접촉식 3차원 형상 측정장비 UA3P (Ultra-high Accurate 3-D Profilometer, Panasonic Co.)를 사용하고 있다.

반사경을 가공하고 표면 측정을 하여 분석을 할 때는, 설계 값과 차이(오차)를 다음의 세가지 공간주파수로 분류한다.

- (1) LFE (Low Frequency Error): 밀리미터 주기의 오차로 반사경의 형상 오차를 표시한다. 이 오차는 광학계의 결상 성능을 결정한다.
- (2) MFE (Mid Frequency Error): 마이크로미터 주기의 오차로 다이아몬드 톨이 지나가면서 생겨서 톨마크라고도 한다. 이 오차는 동심원 패턴으로 나타나고 격자 분광기처럼 간섭 현상을 만든다.
- (3) HFE (High Frequency Error): 나노미터 주기의 오차로 표면 거칠기를 표시한다. 이 오차는 반사경 표면의 산란과 반사율을 결정한다.

자유곡면 가공은 다이아몬드 선삭기계의 C-축이 재료의 회전에 동기화되어 움직이는 서보툴머시닝 기술을 쓰는데, 기계의 가공경로와 속도를 지정한

자유곡면 알루미늄 반사경을 사용한 비축 적외선 우주망원경

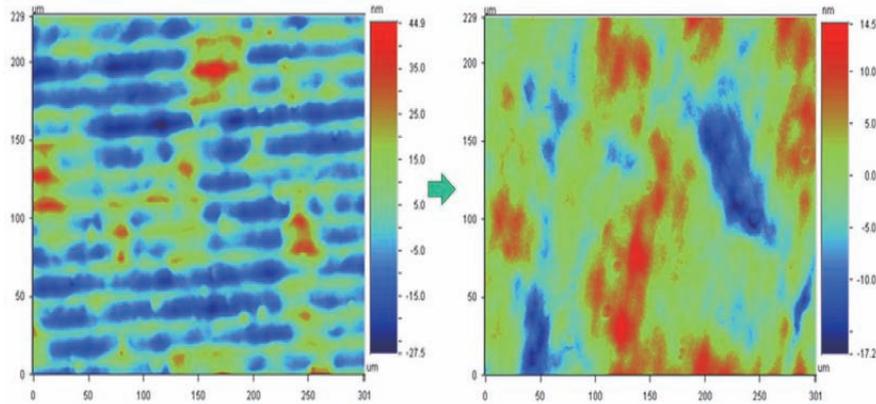


그림 6. 왼쪽은 DTM 가공 후에 보이는 MFE, 오른쪽은 표면 연마 후의 모습 [13].

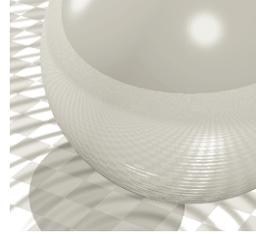
프로그램 값에 따라서 위의 LFE, MFE, HFE 값이 다르게 나타난다. 모든 에러 값을 동시에 줄이는 가공 방법은 없고 상호 보완적으로 나타나는 에러를 없애는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 LFE와 HFE 를 최소화하는 프로그램으로 가공하였고 그림 6에서 보이는 MFE를 줄이는 표면 연마 연구를 진행했다 [13]. 알루미늄은 무른 재질의 특성으로 반사경의 LFE(형상정밀도)가 작아질 위험이 있고, 표면 연마 작업의 효율이 떨어진다. 이 단점을 극복하기 위해 표면을 무전해 니켈 도금하고 200도에서 열처리를 하여 표면 강도를 4배 이상 높이고 연마를 했다. 그림 8은 연마 후에 MFE 가 현저하게 줄어든 모습을 보여준다.

4. 결론

초정밀 가공 기술의 발달로 기존에 불가능했던 자유 곡면 반사경의 제작이 가능해지고, 다양한 형태의 비축 반사망원경 설계가 등장하고 있다. 선형 비점수차가 완전히 없어지는 비축 반사경 수차 이론을 활용하면 축대칭 광학계와 동등한 성능의 비축 반사망원경을 만들 수 있다 [14,15]. 자유 곡면 반사경은 초정밀 다이아몬드 선삭기로 만들 수 있다. 현재까지의 연구 결과로는 알루미늄 반사경으로 적외선 파장대의 우주 망원경 제작이 가능하다. 초정밀 다이아몬드 선삭기의 가공 기술을 개발하면 반사경 재료를 다양화 할 수 있고, 광학과 자외선 우주 망원경에 활용할 수 있는 표면 정밀도를 얻을 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- [1] 박수중, 천문관측기술, 네이버 학문명백과 (2014), <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2083669&cid=44413&categoryId=44413>
- [2] I. S. Yuk, et al., "Preliminary Optical Design of MIRIS, Main Payload of STSAT-3", Publications of The Korean Astronomical Society 22, 201 (2007)
- [3] R. A. Buchroeder, "Tilted component optical systems," Ph.D. thesis (Optical Science Center, University of Arizona, Tucson, Arizona 1976).
- [4] K. P. Thompson, "Aberration fields in tilted and decentered optical systems," Ph.D. thesis (Optical Science Center, University of Arizona, Tucson, Arizona 1980).
- [5] J. R. Rogers, "Vector aberration theory and the design of off-axis systems," in International Lens Design Conference, W. H. Taylor and D. T. Moore, eds, Proc. SPIE 554, 76—81 (1985).
- [6] P. J. Sands, "Aberration coefficients of plane symmetric systems," J. Opt. Soc. Am, A62, 1211—1220 (1972).
- [7] J. M. Sasian, "How to approach the design of a bilateral symmetric optical system," Optical Engineering 33, 2045—2061 (1994).
- [8] B. D. Stone and G. W. Forbes, "Second-order design methods for definitive studies of plane-symmetric, two-mirror systems," J. Opt. Soc. Am, A 11, 3292—3307 (1994).
- [9] S. Chang and A. Prata, Jr., "Geometrical theory of aberrations near the axis in classical off-axis reflecting telescopes," J. Opt. Soc. Am, A22, 2454—2464 (2005)
- [10] S. Chang, "Linear astigmatism of confocal off-axis reflective imaging systems with N-conic mirrors and its elimination," J. Opt. Soc. Am, A 32, 852—859 (2015)
- [11] S. Kim, S. Pak, and S. Chang, et al., "Proto-model of an infrared wide-field off-axis telescope," Journal of the



Korean Astronomical Society 43, 169-181 (2010)

- [12] L. Li, X. Min, D. Chen, and J. Wang, "Special techniques in ultra-precision machining", Proc. SPIE 6722, 672213-672213-6 (2007)
- [13] S. Kim, S. Chang, and S. Pak, et al., "Fabrication of electroless nickel plated aluminum freeform mirror for an infrared off-axis telescope," Applied Optics 54, 10137-10144 (2015)
- [14] S. Chang, "Off-axis reflecting telescope with axially-symmetric optical property and its applications," Proc. SPIE 6265, Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter, 626548 (2006)
- [15] S. Chang, "Elimination of linear astigmatism in off-axis three-mirror telescope and its applications," Proc. SPIE 8860, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VI, 88600U (2013)

약력

장승혁



- 2003 University of Southern California, Los Angeles, California, USA, 전자공학과 박사
- 1996 University of California, Riverside, California, USA, 물리학과 석사
- 1993 서울대학교, 물리학과 학사
- 2014. 7 - 현재 (재)스마트IT융합시스템연구단, 연구부교수
- 2013. 3 - 2014. 6 삼성전자 S.LSI 사업부 이미지개발팀, 책임연구원
- 2011. 1 - 2013. 2 삼성전자 반도체 연구소, 책임연구원
- 2004. 3 - 2010. 12 삼성종합기술원, 전문연구원
- 수차이론, 비축 반사망원경, 적외선 결상광학계, 반사식 안테나, 이미지 센서

박수중



- 1997 University of Texas at Austin, USA, 천문학과 박사
- 1994 University of Texas at Austin, USA, 천문학과 석사
- 1990 서울대학교, 천문학과 학사
- 2011. 3 - 현재 경희대학교 우주과학과, 교수
- 2010. 3 - 2012. 2 경희대학교 천문대, 대장
- 2006. 3 - 2011. 2 경희대학교 우주과학과, 부교수
- 2002. 12 - 2006. 2 한국천문연구원 우주과학연구부, 선임연구원
- 2001. 8 - 2002. 8 일본 우주과학연구소 JAXA/ISAS, 초빙부교수
- 1998. 9 - 2002. 12 서울대학교 자연과학대학 천문학과, 조교수
- 1997. 8 - 1998. 5 막스플랑크 연구소, 박사후 연구원
- 광학 및 적외선 관측기기, 비축 반사망원경, 별탄생 연구, 우리은하 중심 연구

김건희



- 2003 충남대학교 기계공학과 생산기계 박사
- 1999 충남대학교 기계공학과 생산기계 석사
- 1996 한밭대학교 기계설계공학과 학사
- 1993. 9 - 현재 한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀장(책임연구원)
- 2007. 3 - 현재 과학기술연합대학원대학교(UST) 나노메카트로닉스학과 교수
- 2005. 3 - 현재 충남대학교 기계공학과, 분석과학대학원 학연교원
- 2009. 1 - 현재 한국생산제조시스템학회, 한국기계공학회 초정밀나노가공부문 이사
- 2013. 8 - 2014. 6 아리조나대학교 광공학대학 방문연구자
- 2003. 3 - 2012. 2 한밭대학교 기계설계공학과 겸임교수
- 광학계 초정밀가공 및 평가, 적외선 망원경, 초정밀 열영상 현미경 개발, 첨단광분석장비개발