

시작하면서

최근에 미국의 구글(Google)사가 인터넷상에서 지구 곳곳의 고해상도 영상을 다양한 방법으로 쉽게 검색할 수 있는 소프트웨어를 무료로 배포해 화제가 된 적이 있었다. 이러한 서비스의 배경에는 고화질로 지상을 촬영할 수 있는 기술의 발전이 뒷받침되어 있는데, 사실 우주에서의 지구 관측은 군사적인 목적으로 시작이 되었으며 미소 냉전이 끝나는 1990년대부터 상업용 위성으로 응용이 시작되었다. 한때 미국의 대표적인 국방정보수집 위성인 키홀(Keyhole)위성의 해상도가 어느 정도인지가 세간의 관심거리가 된 적이 있지만, 상업용 목적으로는 프랑스의 스팟(SPOT)위성이 10m 규모의 해상도를 제공해왔으며 해상도 1m급의 IKONOS, Orbview 및 Quickbird 등의 개

원경(Hubble Space Telescope, HST)의 환상적인 우주 사진은 많은 이들의 감동을 불러 일으켰다. 구경이 2.4m에 이르는 대형 반사경을 탑재 했기에 가능한 일이었다. 또한 2013년 발사를 목표로 개발되고 있는 제임스웹우주망원경(James Webb Space Telescope, JWST)은 반사경의 구경이 6.5m 이니 놀라울 따름이다.

지상촬영 카메라이던 우주망원경이던 보다 더 높은 해상도를 가지는 영상을 얻기 위해서는 기본적으로 큰 반사경을 장착해야하는데, 이는 미국을 위주로 세계 각국에서 우주용 대구경 반사경을 개발하는 목적 중의 하나이다. 어쩌면 더 자세히 보고 더 멀리 보고자 하는 인간의 지적 욕구에 기인하는지도 모를 일이다.

거대한 제임스웹우주망원경이 개발되면 천문학자들이 말하는 우주의 시작을 볼 수 있을까?

특집 ─ 첨단 광학 및 광기술 애설

우주용 대구경 반사경의 활용과 기술동향

장흥술*

발로 본격적인 고해상도 위성카메라 개발이 시작되었다. 최근에는 미국에 의해 해상도 0.4m급의 GeoEye위성이 발사 되었으며, 러시아, 프랑스, 이스라엘, 일본 등도 1m급 탑재카메라를 개발 했다고 알려져 있으며 우리나라도 다목적 실용위성 시리즈의 탑재카메라 개발을 통해 고해상도 위성 카메라를 운용 및 개발 중이다.

지구상의 물체를 고해상도로 촬영하는 기술은 카메라의 방향을 우주로 향하게 만들면 우주를 관측하는 망원경으로 변신하는데, 1990년대에 미국에서 개발된 허블우주망

국내의 위성카메라 및 우주망원경 개발 현황

우리나라도 국가차원의 우주개발중장기개발계획이 수립되어 추진됨에 따라 고해상도 위성카메라가 개발되었으며 핵심 부품중의 하나인 대구경 반사경은 별도의 개발 계획에 따라 현재 한국항공우주연구원과 한국표준과학연구원 주도로 개발 중이다.

표1은 국내에서 개발된 위성탑재카메라의 해상도와 구경을 보여주는데, 국내의 위성탑재용 광학탑재체의 개발은

* 한국항공우주연구원 위성기술사업단 위성광학기술팀

우주용 대구경 반사경의 활용과 기술동향

표 1. 국내의 위성탑재 지상관측 카메라 개발현황

위성탑재체	개발기관	해상도	예상구경
다목적2호 MSC	한국항공우주연구원	1m	0.6m
다목적1호 EOC	"	6.6m	0.12m
MACsat 탑재체	세트렉아이(주)	2m	0.3m
우리별3호 탑재체	인공위성연구센터	15m	-
우리별2호 탑재체	"	-	-
우리별1호 탑재체	"	-	-

1992년 8월에 발사된 과학실험용 위성인 우리별 1호에 장착된 지구표면 촬영 카메라를 시작으로 한다. 실용위성으로는 1999년 발사된 다목적실용위성 1호의 전자광학카메라(Electro-Optical Camera, EOC)가 6.6m 해상도를 구현하였으며, 이후 2006년 발사에 성공한 다목적실용위성 2호의 과학관측용 고해상도카메라(Multi-Spectral Camera)는 최고급의 해상도인 1m 해상도를 가지므로 본격적인 고해상도 지상관측 위성탑재 카메라로 분류 할 수 있다.

우주관측분야에서는 과학위성용으로 몇몇 탑재체가 개

발되었지만 아직 대구경 반사경을 탑재한 우주망원경의 본격적인 개발은 시도되지 않고 있다.

각국의 위성카메라 및 우주망원경 개발 현황

미국을 비롯하여 많은 나라들이 위성카메라와 우주망원경을 개발하였는데, 우주망원경의 경우 허블망원경과 같



그림1. 고해상도 지구관측위성(Geo-Eye, Orbview3, IKONOS, KOMPSAT2, Pleiades)

표 2. 각국의 고해상도 위성카메라 및 우주망원경 개발현황

위성	국가	발사년도	지상해상도	예상구경(m)
GeoEye-1	미국	2007	0.4m(흑백), 1.65m(컬러)	1.1m
Pleiades	프랑스	2010 예정	0.7m(흑백)	0.7m
QuickBird 2	미국	2001	0.6m(흑백), 2.4m(컬러)	0.6m
IKONOS 2	미국	1999	1m(흑백), 4m(컬러)	0.7m
Orbview 3	미국	1997	1m(흑백), 4m(컬러)	-
KOMPSAT2	한국	2006	1m(흑백), 4m(컬러)	0.6m
EROS B1	이스라엘	2003	0.87m(흑백), 3.5m(컬러)	-
Hubble Space Telescope	미국	1990	우주망원경	2.4m
Herschel Space Telescope	유럽	2009 예정	우주망원경	3.5m
James Webb Space Telescope	미국	2013 예정	우주망원경	6.5m

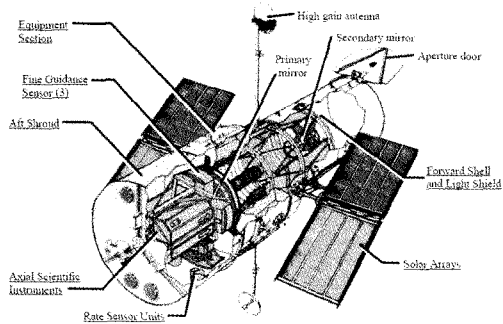


그림 2. 허블우주망원경

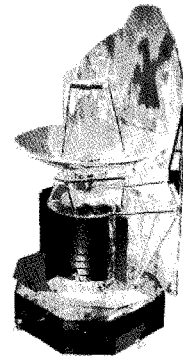


그림 3. 허블우주망원경

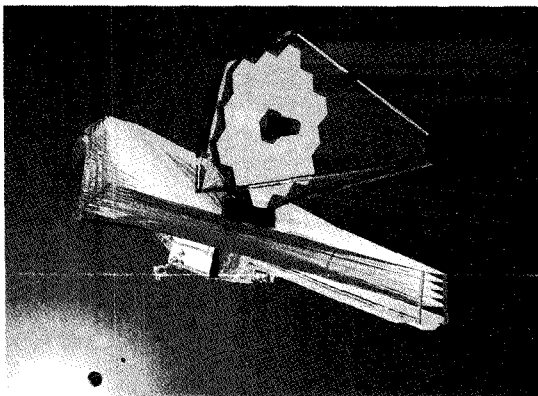


그림 4. 제임스웹우주망원경

이 광학계의 유효구경이 2m 이상인 초대형 광학계가 이미 적용되었으며 현재 개발되고 있는 차기 우주망원경은 다수의 반사경으로 구성된 6.5m의 주반사경을 가진다고 한다.

현재 운용중인 지상해상도 1m 내외의 위성카메라는 주 반사경의 유효구경이 0.6m~0.7m 정도이며 2007년 발사된 GeoEye-1의 경우 0.4m 해상도에 주반사경의 구경이 1.1m이다.

IKONOS 위성과 QuickBird 위성

그림 5의 IKONOS 위성과 QuickBird 위성은 본격적인 고해상도 지상관측 시대를 구현한 대표적인 위성인데, IKONOS는 Eastman Kodak(현 ITT사)사에서 카메라를 제작하였으며 구경 0.7m의 반사경을 장착하고 있다. QuickBird는 2007년 GeoEye가 발사되기 전까지는 최고의 상용 고해상도 관측 위성으로 미국의 Ball Aerospace사에 의해 제작되었다. 탑재카메라는 Ball High

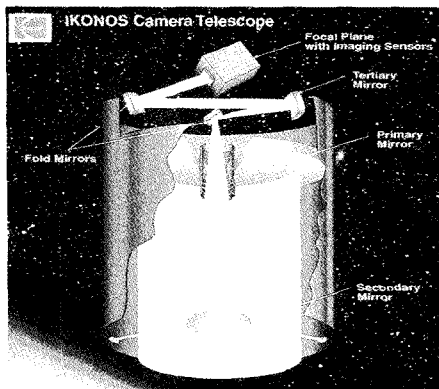
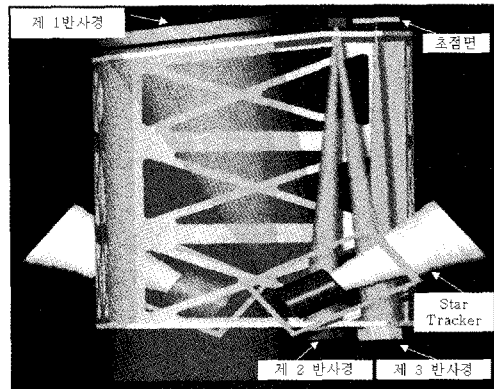


그림 5. IKONOS와 QuickBird 탑재 카메라의 광학적 형태



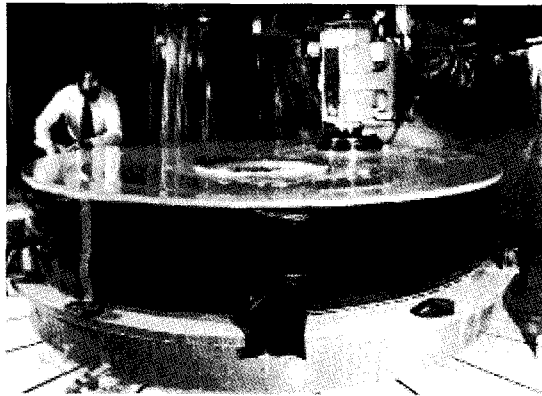


그림 6. 허블우주망원경의 주반사경 가공과정

Resolution Camera(BHRC) 60을 장착하였는데, 각각의 반사경은 저열팽창 재료를 이용해 가공되었으며 카메라의 광학계를 지지하는 주 구조물은 그래파이트 복합재(Graphite Composite)로 만들어져 열구조적 안정성이 매우 높다.

허블우주망원경(Hubble Space Telescope, HST)과 제임스웹우주망원경(James Webb Space Telescope, JWST)

허블우주망원경은 두 가지 측면에서 유명하게 알려져 있다. 구경 2.4m의 초대형 주반사경을 장착한 위성탑재 우주망원경으로 환상적인 우주의 이미지를 전송해 천문학자들 뿐만 아니라 많은 사람들을 놀라게 했다. 하지만 반

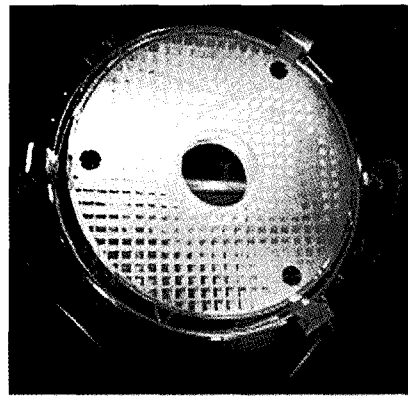


그림 7. 허블우주망원경의 격자형 반사경

사경의 제작 실수로 천문학적인 수리비용을 들여 우주에서 수리한 최초의 우주 망원경으로도 유명하다.

그림 8의 주반사경가공 실수로 인해 발생한 구면수차가 망원경의 영상을 흐리게 했다는 결과는 1990년 7월 2일 구성된 진상조사 위원회(Hubble Space Telescope Optical Systems Board of Investigation)의 조사로 밝혀졌으며 막대한 추가 예산을 들여 COSTAR(Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement)라는 장비가 우주에서 허블망원경에 교체되어 장착 되었다.

제임스웹우주망원경은 그림10과 같이 태양과 지구사이의 중력균형점인 라그랑지안포인터(Lagrangian Point)중의 하나인 L2 지점에서 우주를 관측하게 되는데, 1.3m 크기의 육각형 반사경 18개를 조립해 만들어진 주반사경의 크기는 허블우주망원경의 2.5배인 6.5m이다. 크기로만 보면 현재 운용중인 최대 지상망원경과 비슷한 수준이지

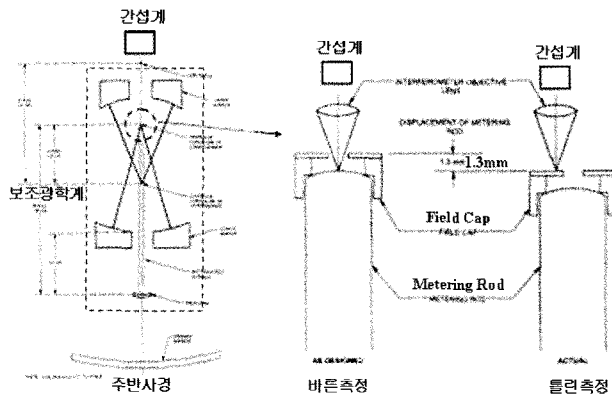


그림 8. 허블우주망원경의 주반사경 제작 실수요인

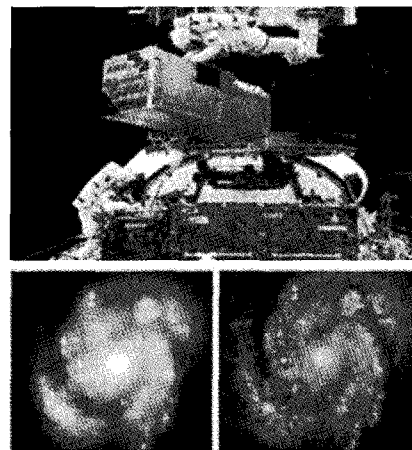


그림 9. 수리와 전후 영상

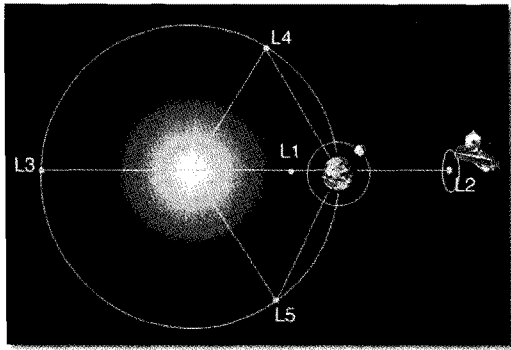
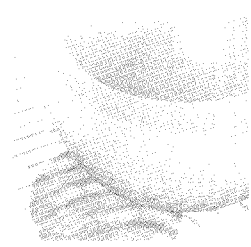


그림 10. 제임스웹우주망원경의 운용궤도 (라그랑지안 포인트 L2)

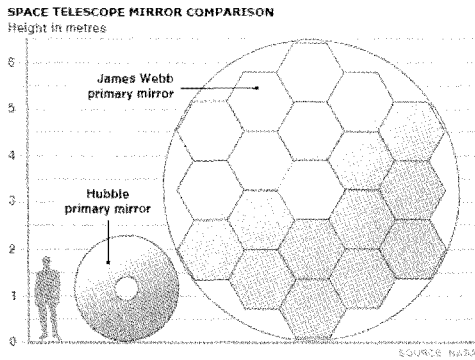


그림 11. 허블우주망원경과 제임스웹우주망원경의 주반사경 크기 비교

만 대기가 없는 우주에서 관측하는 것을 감안하면 구경 수십 미터짜리 지상망원경과 맞먹는 규모이다. 망원경의 크기가 너무 큰 나머지 좌우 양쪽 가장자리에 배열된 육각형 반사경들은 접혀서 우주로 올라가고 우주에서 펼쳐지게 설계되어 있다. 또한 부반사경은 지지대와 함께 접혀서 우주로 올라가며 우주에서 펼쳐지게 된다.

우주용 대구경 반사경의 구성과 응용되는 기술

고해상도 관측을 목적으로 우주에서 운용되는 인공위성 탑재용 광학계는 우주를 보던 지상을 보던 기본적인 구성은 유사하다. 그림 12, 그림 13과 같이 다수의 반사경과 지지하는 구조물 그리고 광학계 전체를 지지하는 구조물 등으로 구성된다.

광학계의 구성 부품 중 해상도를 결정하는 것은 일차적으로 주반사경(Primary Mirror) 크기인데, 실제 주반사경은 그림 14의 예와 같이 반사경 외에 지지구조물(Flexure)과 지지대(Bench, Bezel, Mount 등) 등으로 구성되는 하나의 조립체 형태이다.

이러한 우주용 대구경 반사경 조립체를 제작하기 위해서는 정밀한 가공 기술 뿐 만 아니라 몇 가지 추가적인 첨

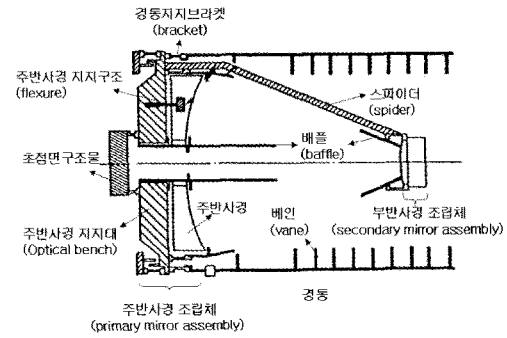


그림 12. 대구경 우주망원경의 구성 예

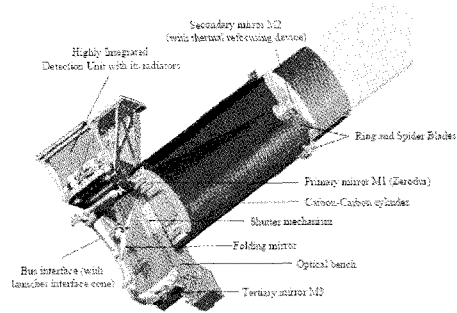


그림 13. Pleiades 위성의 카메라 구조

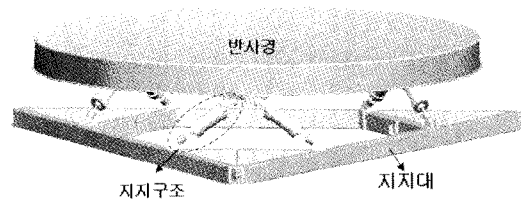


그림 14. 주반사경 조립체 구성

우주용 대구경 반사경의 활용과 기술동향

표 3. 주요 반사경 재료의 물리적 특성

재질	비강성(Specific Stiffness) 10 ⁴ N-m/g	열변형성(Thermal Distortion) um/W
Zerodur	3.58	0.031
ULE	3.08	0.011
Silicon Carbide(CVD)	14.52	0.016
Beryllium(I-70)	15.62	0.058

단 기술이 필요한데, 우선 반사경의 구경이 1m 내지 수 미터에 달하므로 반드시 경량화 가능한 재질이 필요하다. 그리고 우주의 극한 온도에서 성능이 구현되어야 하므로 열적 특성이 우수해야 하며 지상에서 발사 시 가해지는 엄청난 진동과 가속도를 견뎌야 하므로 구조적으로 튼튼해야 한다.

반사경의 경량화와 열구조적 설계

주반사경의 무게가 이를 지지하는 구조물과 전체 카메라의 무게를 결정하는 제일 중요한 요소이므로 반사경의 설계는 무게를 줄이기 위한 경량화와 열구조적 특성을 함께 고려해야 한다. 구조적으로 안정적이고 가벼운 반사경 설계를 위해서는 반사경 자중에 의한 변형을 결정하는 비강성(Specific Stiffness)을 높여야 하고 우주의 열적 환경에 강한 반사경을 위해서는 열변형성(Thermal Distortion)이 낮은 재질을 선택해야 하는데, 표3에서 보듯이 둘 다를 만족시키는 최선의 재료는 없지만, 일반적으로 열변형성이 우수한 제로두(Zerodur)나 유엘이(ULE) 등을 사용하는 방법과 비강성 특성이 우수한 실리콘카바이드(SiC)나 베릴륨(Be) 등의 재질을 사용하여 경량화 비율을 높이는 방법이 있다. 실리콘 카바이드의 경우 가공하기가 어렵지만 우수한 열구조적 특성으로 인해 최근에 많이 개발되고 있으며, 베릴륨의 경우 지상에서 존재하는 금속 계열 중 가장 가벼운 재료로 가공 시에 발생하는 분진의 독성으로 인해 사용을 꺼려 왔으나 제임스웹우주망원경의 초경량화를

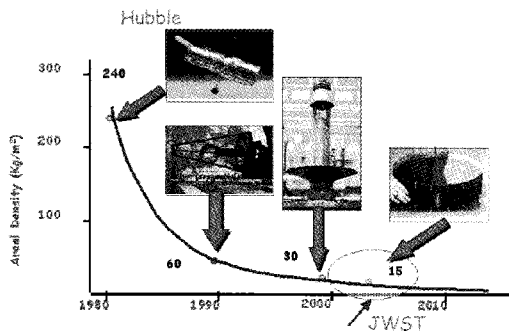


그림 15. 우주망원경의 무게/면적 비교

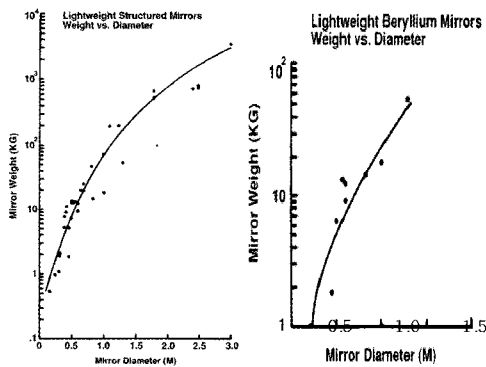


그림 16. 일반경량화 반사경(좌)과 베릴륨반사경(우) 무게차이

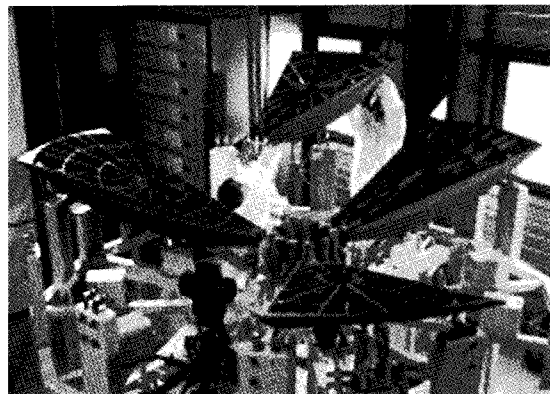


그림 17. 허블우주망원경의 SiC 반사경

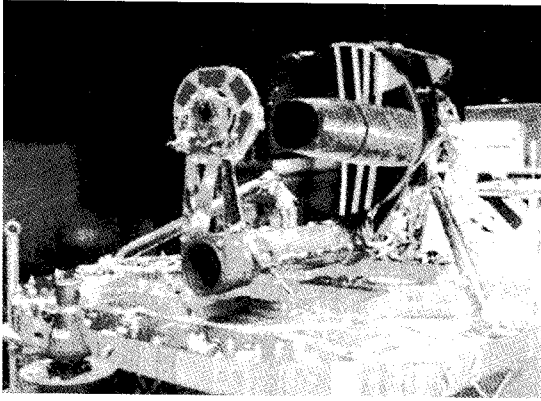
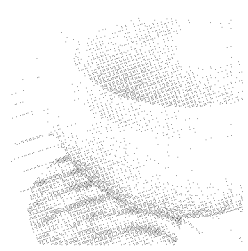


그림 18. ROCSAT2 카메라의 SiC 반사경

위한 재료로 선택되었는데 1.3m 구경의 베릴륨 반사경의 무게가 20kg에 불과 하니 얼마나 가볍게 제작이 되는지 알 수 있다. 전체 반사경의 크기는 ULE로 제작된 허블우주망원경에 비해 2.5배 정도 크지만 무게는 절반 정도 수준이다. 최근에는 복합재를 사용하여 강성을 최대한한 반

사경 구조물에 얇은 제로두 반사경을 접착하는 등의 복합재를 사용한 경량화 기법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

실리콘카바이드 반사경이 장착된 우주망원경으로는 그림 17과 같이 2009년 유럽우주기구에서 발사 예정인 허셀우주망원경(Herschel Space Telescope)이 있는데 여러 조각으로 나뉜 반사경의 전체 구경은 3.5m이다. 프랑스의 Boostec이라는 회사가 반사경 제작을 담당하는데 구경 0.6m의 ROCSAT2 지구관측카메라(그림 18), 구경 1.5m의 ALADIN 우주망원경 등에 적용되었다.

실제 반사경의 재질을 결정할 때는 열구조적 특성 뿐 만 아니라 지지구조물의 재료, 가공의 용이성, 원재료의 납기, 충분한 사용경험, 적용대상 임무 등을 종합적으로 고려해 결정한다. 우주망원경과 같이 초대형 반사경을 탑재한 경우에는 제임스웹우주망원경에서와 같이 반사경 뒷면에 반사경의 형상을 조절 할 수 있는 장치(actuator)를 장착해 우주에서 최적화된 형태를 유지하게 하기도 한다.

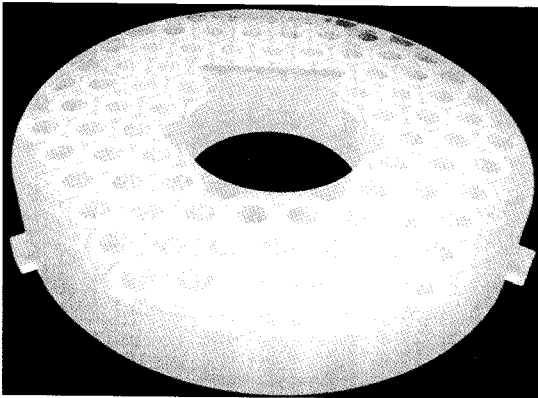


그림 19. 일체형-반열림 뒷면 경량화 반사경

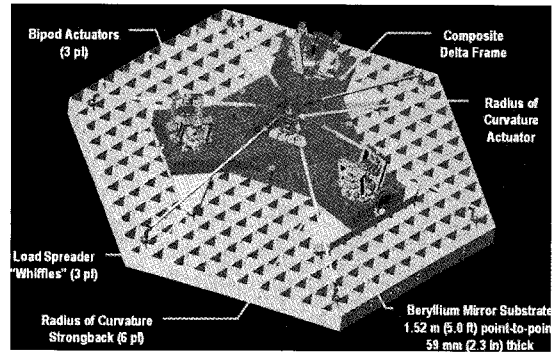


그림 20. 일체형-열림 뒷면 경량화 (JWST)

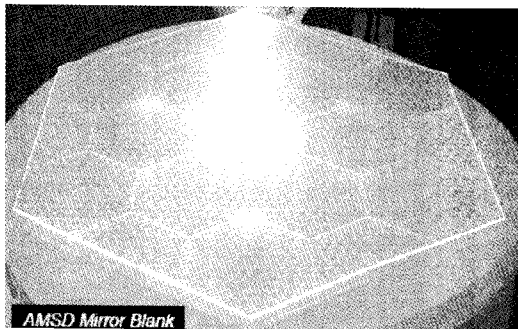
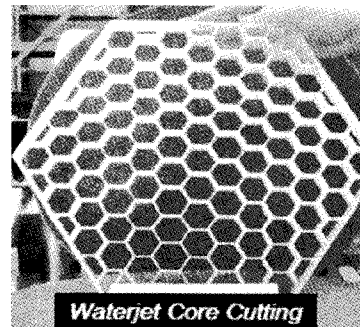


그림 21. 샌드위치형 반사경과 내부 코어 구조 예



반사경의 단면 및 뒷면 구조

반사경 경량화와 함께 구조적 안정성 확보를 위해서는 재질선택 뿐만 아니라 반사경의 뒷면을 어떻게 처리하느냐가 중요한 기술 중의 하나이다. 여러 가지 기준으로 구분이 가능하나 일체형과 샌드위치형으로 구분할 수 있다. 일체형은 반사경을 통째로 가공하여 뒷면을 파내는 기술이고 샌드위치형은 반사경 앞면과 뒷면을 따로 만들어 벌집 모양의 중간 구조물에 샌드위치와 같이 붙이는 방법을 말한다.

허블우주망원경의 경우 샌드위치형 반사경이며, 제임스 웹우주망원경의 베릴륨 반사경은 일체형 가공으로 뒷면 파내기 경량화 기술이 적용되었는데 뒷면의 격자는 각각 1mm 정도의 두께를 가진다고 하니 초경량화 기술이 적용된 셈이다.

뒷면의 열린 형태에 따라 열린형(open back)이나 뒷면 반열린형(semi-open back type), 뒷면 닫힌형(close-back) 등으로 구분되기도 한다.

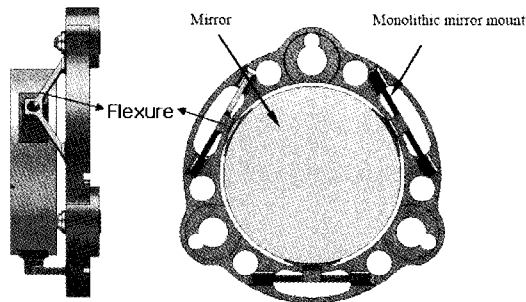


그림 22. 반사경 측면지지 구조 예

반사경의 지지 구조물 및 지지대

반사경 조립체는 반사경 뿐 만 아니라 반사경을 지지하는 지지구조물과 지지대도 중요한 부품이다.

반사경의 지지구조물(flexure)은 반사경을 지지하면서 변형과 진동에 대한 내구성을 높이고 열적 특성을 우수하게 유지시켜주는 역할을 한다. 반사경의 모양과 지지방법 따라 결정이 되는데, 반사경의 외곽 테두리에서 지지하는 방법과 반사경의 뒷면을 바로 지지 하는 방법이 있다. 일반적으로 1m 이하의 반사경은 테두리 지지 방법을 적용하고 대형 반사경의 경우 뒷면 지지 방법을 적용한다.

우주용 대구경 반사경 조립체의 시험

대구경 반사경의 지상시험은 일반적인 광학 부품시험과 동일하나 진동, 열 및 진공 시험이 추가된다.

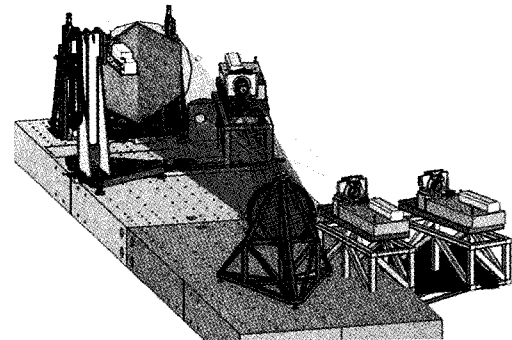


그림 24. JWST 주반사경 측정 개념도



그림 23. 반사경 뒷면 지지구조물(JWST)



그림 25. JWST 열진공 시험

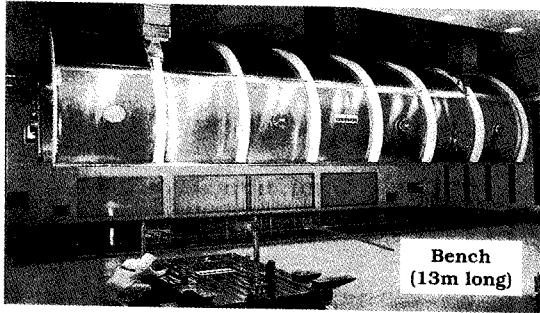


그림 26. 프랑스 알카텔사의 열진공광학시험시설

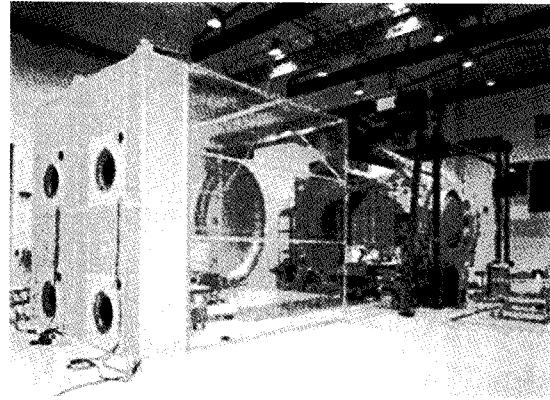


그림 27. 벨기에 CSL의 열진공광학시험시설

우주환경을 모사한 열진공 시험 시설은 반사경 뿐 만 아니라 카메라나 우주망원경 자체의 최종 조립과 시험에도 필수적인 시설인데, 미국과 프랑스를 포함한 대부분의 우주개발 선진국들은 자체 시설을 보유하고 있으며 우리나라도 2008년, 장비와 시설이 한국항공우주연구원에 구축되었다.

열진공 환경시험을 위해서는 측정 대상이 열진공 챔버에 들어가야 하므로 대형 열진공 챔버가 필요하며 진공 및 열환경을 모사 할 수 있어야 할 뿐만 아니라 외부의 진동으로부터 효과적으로 차단이 되어야 한다.

국내의 우주용 대구경 반사경 연구 개발

국내에서는 1995년 한국항공우주연구원에서 다목적실용위성 탑재카메라 개발을 시작하면서 대구경, 고정밀, 비

구면 반사경의 설계와 제작을 수행해왔으며, 최근에는 한국항공우주연구원과 한국표준과학연구원 및 관련 대학이 협력하여 위성탑재 카메라 부품을 위한 구경 800mm의 대구경 반사경 제작을 시도하고 있다.

마무리

우주용 대구경 반사경이 활용되는 분야를 크게 두 가지 분야로 구분해 보면 지상관측용 위성카메라와 우주관측용 망원경이다. 위성카메라의 경우, 현재 최대 구경 1.1m까지 탑재 되어 운용중이며 우주망원경은 6.5m 반사경을 목표로 제임스웹우주망원경이 개발되고 있다. 반사경의 크기를 늘리면서 더 좋은 성능을 구현하기 위해 새로운 반사경의 재질 개발과 함께 설계 및 가공기술 개발, 시험 기술 개발 등이 진행되고 있다. 구경 1m 내외의 반사경에는

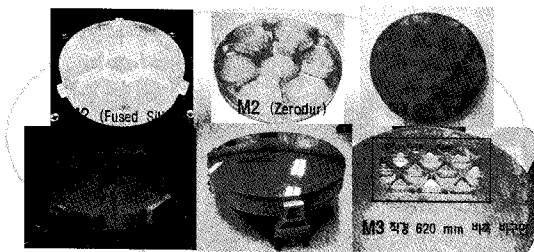


그림 28. 제작된 다양한 형태의 부분사경(200mm 구경)

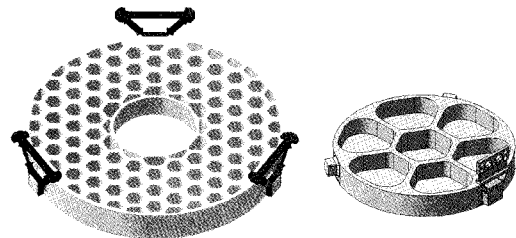


그림 29. 경량화 설계된 주반사경(좌)과 부분사경(우)

Zerodur나 ULE 등의 유리 재질이 많이 적용되고 있으며, 우주망원경용 대형 반사경의 초경량화를 위해서 실리콘카바이드나 베릴륨 등, 가공이 어려운 재료를 이용하는 기술이 개발되고 있다.

국내에서도 다목적실용위성의 탑재카메라 개발을 통해 습득한 기술과 경험을 바탕으로 우주급 반사경의 설계, 제작 및 시험 기술 확보에 많은 노력을 기울여 오고 있는데, 한국항공우주연구원과 한국표준과학연구원에서 위성탑재 카메라용 Zerodur 반사경을 개발하고 있으며 열진공 환경에서 광학시험이 가능한 시설과 장비도 구축되었다.

개발규모가 크고 기술 발전의 속도가 너무 빠른 우주망원경 분야를 선진국 수준으로 따라가기에는 아직 갈 길이 멀지만, 위성탑재카메라용 1m 급의 대구경 반사경 국내 개발은 수 년 안에 이루어질 전망이다.

참 고 문 헌

(1) <http://earth.google.com>
 (2) <http://satrec.kaist.ac.kr>
 (3) <http://www.satreci.com>
 (4) <http://www.kari.re.kr>
 (5) http://launch.geoeeye.com/launchsite/about/fact_sheet.aspx
 (6) <http://www.ssd.itt.com/heritage/jwst.shtml>
 (7) <http://www.jwst.nasa.gov/mirrors.html>

(8) <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=16>
 (9) <http://www.boostec.com/real.htm>
 (10) The Hubble Space Telescope Optical Systems Failure Report, 1990, NASA-TM-104443
 (11) T.M. Valente, Proc. SPIE 1340, 1990
 (12) P.R. Yoder, "Opto-mechanical systems design", 2nd edition.
 (13) J.-L.Lamard, et al, "Design of the high resolution optical instrument for the pleiades HR earth observation satellite", 2004, 5th International conference on space optics, Apr. 2004.
 (14) 장홍술, "초고해상도 지구관측 카메라 기술동향", 항공 우주산업기술동향지 1권1호, 2003.
 (15) 장홍술, 이응식, 정대준 외, "고해상도 광학탑재체용 광구조부품 국내기술동향", 항공우주산업기술동향 5권 2호, 2007, pp. 51~57
 (16) 이응식, 장홍술, 정대준 외, "우주용 대구경 반사경 조립체의 광기계 설계", 한국항공우주학회 춘계 학술발표회 논문집, pp. 1033-1036, (2008)

약 력



장홍술

• 학력 :
 1993년 연세대학교 천문대기학과 대학원 졸업
 1993년~1999년 삼성항공 항공우주연구소 위성개발팀
 1999년~2000년 한국항공우주산업
 2000년~현재 한국항공우주연구원

• 연구 분야
 위성탑재체 광학설계 및 해석, 시스템 성능 해석, 탑재체 광학 조립 및 시험