

고해상도 광학탐재체용 광구조부품 국내기술동향

글 / 장 홍 술 hsjang@kari.re.kr, 이 응 식, 정 대 준, 육 영 춘, 이 덕 규, 이 승 훈

한국항공우주연구원 위성기술사업단 위성광학기술팀

초 록

상용 위성탐재카메라를 이용한 지표면의 고해상도 영상획득은 1990년대부터 세계 각국에서 많은 노력과 투자를 하고 있다. 미국은 이미 해상도 1m급의 IKONOS, Orbview 및 Quickbird 등을 운용하고 있으며 최근에는 해상도 0.5m급 이하의 위성탐재 카메라를 개발하고 있는 것으로 알려졌다. 러시아, 프랑스, 이스라엘, 일본 등도 1m급 탐재카메라를 개발 중이거나 운용중이며 우리나라도 다목적 실용위성 시리즈의 탐재카메라 개발을 통해 고해상도 위성 카메라를 운용 및 개발 중이다. 이러한 개발동향에 따라 고해상도 위성카메라의 광학부품과 구조부품에 대한 기술적 연구와 개발에도 많은 노력이 이루어지고 있는데, 국내에서도 향후 계속되는 국가의 위성탐재카메라 개발계획에 따라 요구되는 핵심 광구조 부품 개발을 위해 대구경 광학 부품이나 구조물에 대해서 단계적인 국내개발을 시작하고 있다. 우선적으로 한국항공우주연구원과 한국표준과학연구원은 연구원간 협력프로그램으로 대구경 우주급 반사경조립체에 대한 국내개발을 진행하고 있으며 우주환경에서의 광학시험에 필요한 관련 시설을 구축하고 있으므로 국내의 위성관련 광구조부품 개발 기술도 획기적으로 향상될 것으로 기대된다.

주제어 : 고해상도 위성탐재카메라, 광학탐재체, 광구조부품

1. 서 론

1.1 국내의 위성용 광학탐재체 개발

국내의 위성탐재용 광학탐재체의 개발은 1992년 8월에 발사된 과학실험용 위성인 우리별 1호에 장착된 지구표면 촬영 카메라를 시작으로 하였다. 이후 우리별 2호와 3호가 개발되었으며 1999년 발사된 우리별 3호에는 해상도 15m를 구현 가능한 탐재체가 장착되어 본격적인 지구 촬영 탐재체 개발이 시작되었다[1]. 실험용이 아닌 실용위성으로는 1999년 발사된 다목적실용위성 1호의 전자광학카메라(EOC,

electro-optical camera)가 6.6m 해상도를 구현하였으며, 이후 2006년 발사에 성공한 다목적실용위성 2호의 과학관측용 고해상도카메라(MSC, multi-spectral camera)는 상용 위성으로는 최고급의 해상도인 1m 해상도를 가지며 촬영한 영상의 판매까지 시작하였다.

우리별시리즈와 다목적실용위성 시리즈가 각각 인공위성연구센터와 한국항공우주연구원이라는 학교 및 국가연구소에서 주관하여 개발하였다면, 국내 기업으로는 (주)세트랙아이에서 광학계 구경 300mm급의 탐재카메라를 개발하였다[2].

국내에서 개발된 지상촬영용 위성탐재카메라의 해상도와 각 광학계의 유효 구경은 표1과 같은데 최근

의 세계적인 추세와 비교해 보면 다목적2호의 MSC가 본격적인 고해상도 지상관측 위성탑재 카메라로 분류 될 수 있다.

기타 해양이나 대기 관측용 해양관측탑재체와 지상관측탑재체는 통신해양기상위성에 탑재될 예정으로 한국항공우주연구원에서 2007년 현재 개발이 진행 중이고[3], 지상관측외의 천문 관측 탑재체로는 과학위성 시리즈로 원자외선 분광기(과학기술위성1호에 탑재), 진공자외선 태양카메라(과학기술위성2호에 탑재) 등이 개발되었다.

이상과 같이 과학실험용과 상용의 고해상도 카메라, 해양 및 대기 관측 카메라, 천체 관측 카메라 등 다수의 위성탑재카메라 시스템은 개발되었고 소형 광구조 부품은 국내에서 제작되었으나 고해상도 카메라에 적용되는 대형 정밀 광구조물의 개발 측면에서는 본격적인 국내개발이 이루어지지 않았는데, 한국항공우주연구원과 한국표준과학연구원은 우주급 800mm 구경 반사경과 지지구조물의 국내개발을 시작으로 광구조부품 국내 개발 관련 연구를 수행하고 있다.

표 1. 국내의 위성탑재 지상관측 카메라 개발현황

위성	개발기관	해상도	유효구경
다목적2호 MSC	한국항공우주연구원	1m	0.6m
다목적1호 EOC	"	6.6m	0.12m
MACsat 탑재체	세트랙아이	2m	0.3m
우리별3호 탑재체	인공위성연구센터	15m	-
우리별2호 탑재체	"	-	-
우리별1호 탑재체	"	-	-

1.2 각국의 위성용 고해상도 광학탑재체

위성 탑재용 광학탑재체는 다양하지만 상용 고해상도 지상관측 탑재체를 고려하면 프랑스의 SPOT 시리즈를 시작으로 IKONOS, Orbview, QuickBird 및 최근의 GeoEye-1까지 이어지고 있다[4], [5]. 상용위성 외에 국방 및 정보 수집용 위성을 고려하면 더 많은 고해상도 탑재체들이 개발중이거나 운용중에 있는데 주요 고해상도 탑재카메라의 개발은 표2와 같다. 최근의 추세에 따라 지상해상도 1m 내외를 고해상도로 분류 한다면 현재 운용되고 있는 고해상도 위성은 우리나라의 다목적실용위성 2호 (KOMPSAT2)를 포함하여 5기 내외이다.

표 2. 각국의 고해상도 카메라 탑재 위성 개발현황

위성	국가	발사년도	해상도
GeoEye-1	미국	예정	0.4m(흑백), 1.65m(칼라)
WorldView1	미국	예정	0.4m(흑백)
Pleiades	프랑스	예정	0.7m(흑백)
QuickBird 1	미국	실패	1m(흑백), 4m(칼라)
QuickBird 2	미국	2001	0.6m(흑백), 2.4m(칼라)
IKONOS 1	미국	실패	1m(흑백), 4m(칼라)
IKONOS 2	미국	1999	1m(흑백), 4m(칼라)
Orbview 4	미국	실패	1m(흑백), 8m(칼라)
Orbview 3	미국	1997	1m(흑백), 4m(칼라)
KOMPSAT2	한국	2006	1m(흑백), 4m(칼라)
EROS B1	이스라엘	2003	0.87m(흑백), 3.5m(칼라)
EROS A1	이스라엘	2002	1.8m(흑백)
EROS A	이스라엘	실패	1.8m(흑백)
SPOT 5	프랑스	2002	2.5m(흑백), 10m(칼라)
EarlyBird	미국	실패	3m(흑백), 15m(칼라)

상용(또는 준상용) 지상촬영 광학탑재체 외에 정찰 및 정보 수집용 광학탑재체나 천체관측용 망원경 탑재체의 경우 허블망원경[6]과 같이 광학계의 유효구경이 2m 이상인 초대형 광학계가 이미 적용되었으며 현재 미국의 NASA에서 개발되고 있는 차기 우주관측 망원경(James Webb Space Telescope)은 다수의 반사경으로 구성된 6.5m의 주반사경을 가진다[7].

광구조부품 측면에서는 현재 운용중인 지상해상도 1m 내외의 탑재카메라는 주반사경의 유효구경이 0.6m~0.8m 정도이며 현재 개발중인 GeoEye-1의 경우 최대 구경이 1.1m로, 우주망원경이나 정보위성에 비해서는 작은 구경이나 차기 고해상도 탑재체의 유효구경은 1m 이상 급으로 예상된다.

2. 광구조 부품의 기술동향

2.1 광구조부품의 구성과 특성

위성탑재체용 카메라에는 많은 광학 부품과 구조 부품 및 전자 부품이 필요한데, 이들 중 광구조 부품은 광학부품과 구조부품이 조립된 형태이거나 또는 광학부품의 성능에 영향을 많이 미치는 구조부품으로 정의 할 수 있으며, 탑재카메라의 광구조부 설계에 따라 차이가 나지만 반사경 광학계를 적용하는 대

구경 탑재체의 경우 그림1의 예와 같이 반사경관련 부품과 경통(metering structure)관련 부품 및 초점면 광구조물 등으로 분류 할 수 있다.

반사경 조립체는 반사경과 반사경을 지지하는 구조물(flexure) 그리고 반사경과 지지구조물이 조립된 반사경을 지지하는 지지대(optical bench, bezel, mount 등)로 구성된다.

경통 조립체는 경통과 경통을 지지 구조물에 부착시키는 구조물(브라켓 등), 제 2 반사경 등을 경통에 부착시키는 스파이더 등으로 구성된다.

기타 구조물로 불용광(stray light) 차단구조물은 반사경이나 경통 및 디텍터 부근에 부착되어 불용광을 차단하는 구조물로 경통의 내부에 부착되는 베인(vane)과 반사경에 부착되는 배플(baffle) 등으로 구성된다.

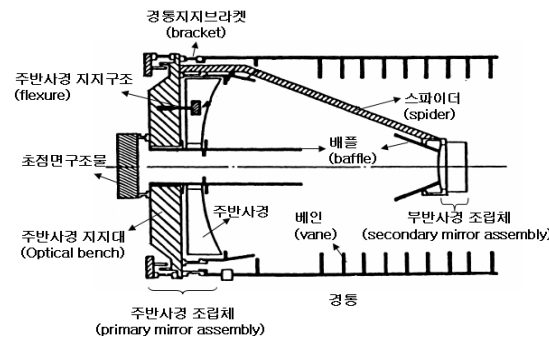


그림 1. 대구경 위성탑재카메라의 광구조부품 예(8)

초점면 광구조부품은 광신호를 전자신호로 바꾸어 주는 디텍터근처에 설치되는 부품으로 그림 2의 예와 같이 주로 필터 또는 광분리기와 관련 지지 구조물 등으로 구성된다.

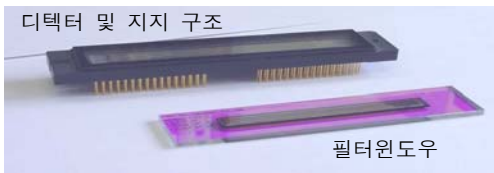


그림 2. 초점면 광구조부품 예

대부분의 고해상도 광학탑재체는 렌즈를 장착하지 않지만 필요에 따라 렌즈류를 장착한다면 렌즈와 지지 마운트도 광구조물에 포함된다.

프랑스의 고해상도 지표면 관측 탑재체인 그림 3의 Pleiades탑재체와 그림 4의 우주관측용 SNAP탑재체는 3반사경식 광학계의 전형적인 광구조적 형태를 보여주는데 SNAP 탑재체에서는 불용광 차단구조물인 배플과 베인의 형태를 볼 수 있다.

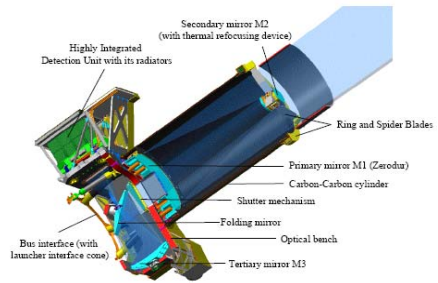


그림 3. Pleiades 탑재체의 광구조 형상(9)

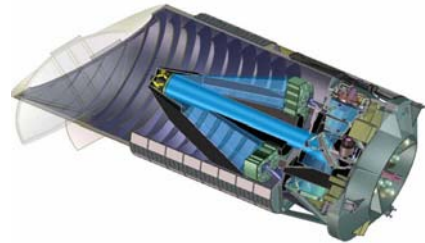


그림 4. SNAP 탑재체의 광구조 형상(10)

카메라의 광학적 형태에 따라 구성되는 광구조 부품의 형태나 기술적 난이도 또한 약간씩 차이가 나는데, 최근의 세계적인 동향에 따르면 비교적 제작과 조립이 용이한 2반사경식 광학계보다 성능이 향상된 3반사경식이 선호되고 있으며 광학계의 열구조적 안정성을 높이는 구조물이 적용되고 있다.

탑재카메라의 광구조적 규모를 나타내는 일반적인 지수중의 하나가 광학계의 유효구경이다. 이는 유효구경으로 카메라 성능의 중요한 지표인 지상해상도를 예상할 수 있으며 또한 제작되는 반사경의 크기와 규모를 알 수 있기 때문이다. 이러한 반사광학계의 유효구경은 주로 제1반사경(Primary Mirror)의 유효구경과 동일하데, 관측고도와 광학계의 구경 그리고 지상 해상도는 두 개의 점광원(목표물)을 분해할 수 있는 이론적 회절한계인 식(1)과 같이 표시되어 광학계의 초기 설계 기준으로 많이 이용된다.

$$\text{해상도} = 1.22 * \text{파장} * \frac{\text{관측고도}}{\text{광학계의구경}} \quad (1)$$

식(1)을 적용해 현재 각국에서 개발한 해상도 1m 급의 지상관측 탑재카메라와 최고의 해상도를 가지며 개발중인 GeoEye-1위성을 적용해보면 그림 5와 같은 분포를 볼 수 있다. QuickBird를 제외한 대부분의 고해상도 지표면촬영 위성이 680km내외의 태양 동기궤도에서 가시광선 대역으로 촬영하므로 680km 고도와 650nm 파장대역을 식(1)에 적용하여 비교하였다. 각 위성마다 운용 고도와 관측파장 대역이 약간씩 다르고 실제 설계 과정에서는 광학계의 구경에 대한 최적화 설계가 진행되므로 다소 차이가 날 수는 있지만 680km고도에서 해상도 1m내외를 구현할 경우, 유효구경이 1m를 넘지 않지만 해상도가 0.5m 내외로 내려갈 경우 유효구경 역시 1m 수준으로 증가할 것으로 예상된다.

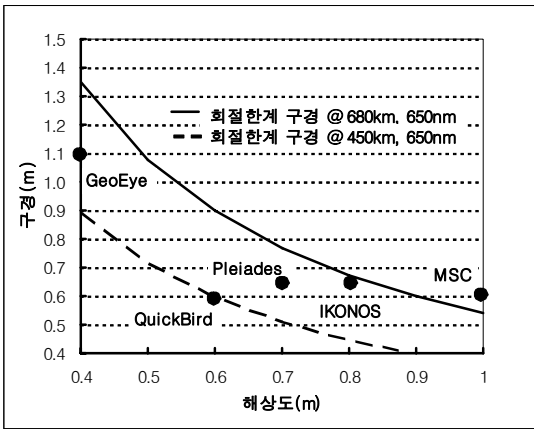


그림 5. 고해상도 탑재체의 구경과 해상도

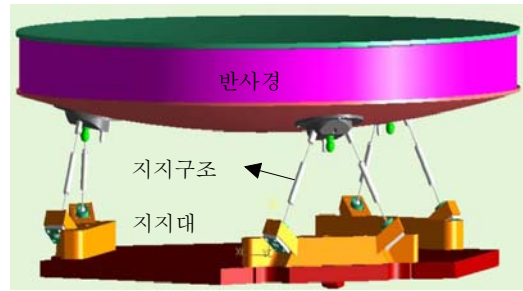


그림 6. 반사경 조립체의 구성 예

반사경의 광학적 특성은 파면오차로 나타내는데 그 구조적 형상은 설계, 제작과 시험기술 및 열구조적 특성에 따라 결정된다. 기본적인 형태는 그림 7에서 볼 수 있듯이 반사경의 절단면 형태에 따라 아치형(arch type), 샌드위치형(sandwich type) 및 뒷면열린형(open-back type)등으로 구분할 수 있으며, 아치형의 경우 가장 간단하고 뒷면 가공이 쉬우나 중량대비 물리적 특성이 떨어진다. 샌드위치형의 경우 우수한 물리적 특성을 구현할 수 있으나 제작이 까다롭고, 뒷면 열린형의 경우 샌드위치형에 대해 다소 성능이 떨어지나 제작이 용이하다.

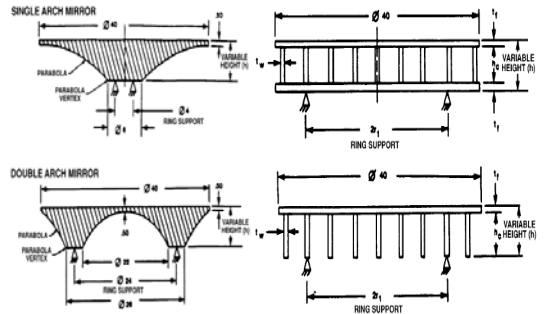


그림 7. 반사경의 단면형태 (좌상 : 단일아치형, 좌하 : 이중아치형, 우상 : 샌드위치형, 우하 : 뒷면열린형)(11)

2.2 반사경 조립체

고해상도 탑재카메라는 대부분 반사광학계로 구성되므로 반사경 조립체가 가장 중요한 광구조 부품이다. 설계방식에 따라 반사경자체의 형상이나 지지구조물의 형상 그리고 재질이 다르게 적용이 되는데 일반적인 구성은 그림 6과 같이 반사경, 지지용 구조물 및 지지대 이다.

현재 알려진 바에 따르면 유럽의 경우 구경 1m 미만의 위성 탑재카메라에는 뒷면열린형이나 뒷면반열린형(semi-open back type)등이 많이 이용되고 있으며 그림 8이 전형적인 예이다. 현재 운용중인 다목적실용위성2호의 MSC나 Pleiades등에 적용되는 형태이며, 국내개발이 진행중인 구경 0.8m 반사경도 뒷면 반열린형 구조를 가진다.

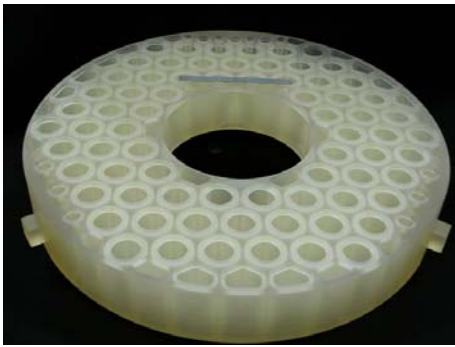


그림 8. 뒷면 반열림형 반사경 예

그림 9는 기존의 여러 가지 반사경의 구경과 중량의 분포와 경향을 나타내는데 현재 널리 이용되고 있는 재질인 Zerodur나 ULE 등의 일반적인 경량화 반사경(샌드위치 또는 열린뒷면형)과 초경량 재료인 베릴륨반사경의 중량차이를 쉽게 확인해 볼 수 있다. 그림9의 해상도와 구경비를 참고로 할 경우 국내에서도 차세대에는 구경 1m급의 경량화 반사경을 제작해야 하는데, 일반적인 재료로 경량화하면 100kg 내외가 되지만 베릴륨으로 가공할 경우 20kg내외이므로 향후 베릴륨 등을 이용한 초경량화 반사경 제작 기술도 요구될 것으로 예측된다.

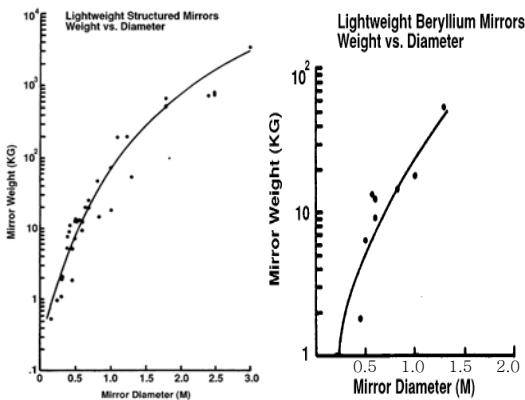


그림 9. 일반경량화 반사경(좌)과 베릴륨반사경(우)의 중량차이[12]

반사경은 크기와 종류, 운용 환경 등에 따라 다양한 재료를 이용해 만드는데, 고해상도 지표면 촬영용 카메라의 경우 구경이 1m 이하이며 일반적으로 유럽에서는 Zerodur를 적용하고 미국에서는 ULE를 이용하고 있으며, 두 재질의 물리적 특성은 큰 차이가 없다.

또한 최근에는 SiC(Silicon Carbide)을 이용해 반사경을 제작하기도 하는데 ROCSAT2에 구경 600mm규모로 적용되었다[13]. 각 재료의 주요 물성치는 표 3과 같다.

반사경의 지지구조물(flexure)은 반사경을 지지하면서 변형과 진동에 대한 내구성을 높이고 열적 특성을 우수하게 유지시켜주는 역할을 한다. 반사경의 모양과 지지방법(mounting method)에 따라 결정이 되는데 그림7에서 보여준 아치형은 뒷면 돌출부에 지지구조물이 장착되고 샌드위치형태에서는 반사경의 측면이나 뒷면에 장착되며 열린뒷면형태는 주로 그림 8처럼 반사경의 측면에 돌출부를 만들고 그 돌출부에 지지구조물이 장착된다. 지지구조물은 방전가공과 열처리 및 표면 도금처리를 통해 제작되는데 국내 기업에서도 보편적으로 보유하고 있는 기술이므로, 국내에서도 제작이 가능한 부품이다.

고해상도 지표면 촬영 광학계에서는 그림 10의 샌드위치형 반사경을 뒷면에 지지하는 방식과 그림11와 같이 반사경의 측면에 돌출부를 만들어 지지하는 방법이 널리 이용된다. 현재 국내에서는 Bipod형 flexure를 가지는 측면 지지형 반사경 조립체가 주로 적용되고 있다.

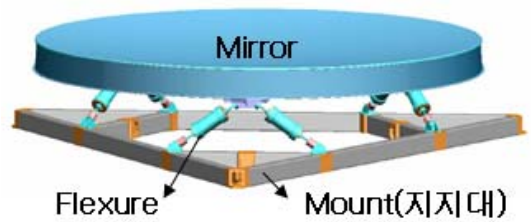


그림 10. Bipod 지지구조(뒷면지지) 예[14]

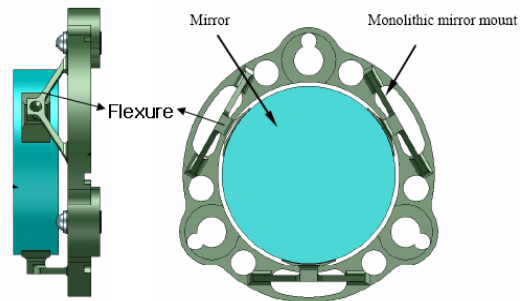


그림 11. Bipod 지지구조(측면지지) 예[15]

표 3. 주요 반사경 재료의 물성치

물성치	Zerodur	ULE	SiC
강성(GPa)	90.3	679	420
강도(MPa)	5	5	200
밀도(g/cm ³)	2.53	2.2	3.2
열팽창율(ppm/K)	±0.02	0.015	2
열전도율(W/mK)	1.46	1.3	180
강성/밀도	36	30	131
열전도/열팽창률	73*10 ⁶	86*10 ⁶	90*10 ⁶
생산업체	Schott	Corning	BOOSTEC

자료 : 한국항공우주연구원 내부기술자료

반사경의 지지대는 반사경 지지구조물이 장착된 반사경을 고정시켜주는 관구조물로 반사경 뿐 만 아니라 경통 및 기타 구조물 그리고 카메라의 초점면 장치 등이 장착되는 중요한 구조물이다. 역시 경량화가 적용되며 열적 및 구조적 안정성이 중요한데, 허니콤 형태의 구조물이 주로 적용된다. 그림 12처럼 허니콤 구조에 반사경이 장착될 부분에는 인서트(insert)구조물을 넣는다. 주요 구조는 복합재구조물로 제작되는데 국내에서는 아직 우주급 재료를 이용한 본격적인 제작은 시도되지 않았으며 반사경 조립체의 완전한 국내 개발을 위해서는 별도의 연구를 통해 반드시 개발되어야 할 부품중의 하나이다.

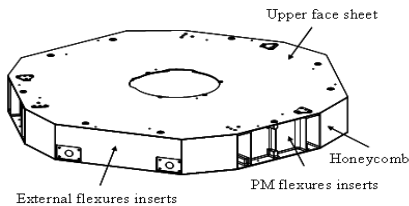


그림 12. 반사경 지지대(optical bench) 형상 예

2.3 경통 조립체

경통구조물은 광학계의 뼈대에 해당하는 구조물로 그림 13처럼 여러 가지 방식이 적용된다. 구조적 특성도 우수해야 하며 열적 특성 또한 우수해야 하는데 이는 대부분의 고해상도 지상관측 카메라가 제1반사경과 제2반사경 사이의 거리 변화의 안정성이 매우 중요한 형태인 2반사경식 내지는 3반사경식 설계를

적용하기 때문으로, 우주환경에서 수마이크로미터 수준의 거리 안정성이 요구된다.



그림 13. 다양한 형태의 경통구조물 형태(좌 : 실린더형, 중 : 트러스트+실린더, 우 : 바(bar)형)

현재 운용되는 고해상도 카메라는 대부분 실린더 형태의 경통을 이용하는데 높은 강성이 가능하고 불용광 차단 등에 용이하다.

실린더 형태의 경통은 주로 복합소재로 제작이 되는데 국내에서는 아직 0.5m 이상의 대구경으로 제작된 경험이 없고 난이도가 높은 기술이지만, 상용이나 방산 복합재료 구조물 제작기술을 활용하여 꾸준한 연구개발 할 경우, 국산화가 가능하리라 예측된다.

3. 광구조 부품의 시험

광구조부품의 지상시험은 일반적인 광학 부품이나 구조부품의 지상시험과 동일하다. 현재 대구경 반사경을 측정할 수 있는 장비와 시설은 한국표준과학연구원과 한국항공우주연구원 등에 구비되어 있으며 주요 광구조부품인 반사경조립체의 지상시험은 그림 14와 같이 간섭계 등을 이용하여 측정한다. 이러한 측정 및 관련기술은 국내에서 확보되어 있는 상태이며, 대구경 반사경의 경우 중력에 의한 영향이 크기에 비례하는데, 중력의 영향을 고려한 수직형(타워형) 지상 시험장비의 경우 한국표준과학연구원에 구축중이다.

구조 부품의 경우 특별히 열적 특성 시험이 필요한데, 경통과 같이 길이 방향의 변형이 중요한 부품의 경우 열팽창률 측정 등이 요구된다. 현재 국내에는 위성탑재 카메라의 경통용으로 개발된 열팽창률 측정 장비는 없지만, 필요시 장비 개발에 어려움은 없을 것으로

예상된다.

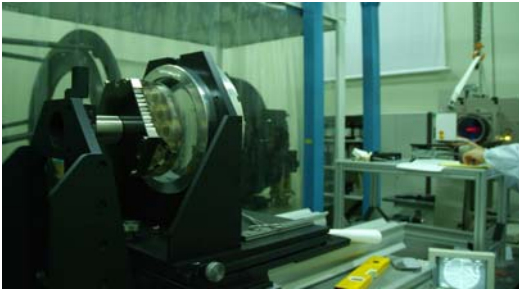


그림 14. 간섭계를 이용한 반사경 측정

위성용 광구조부품의 경우 우주환경에서의 시험이 중요한데, 한국항공우주연구원에서는 2008년 완공을 목표로 우주환경을 구현할 대형 열진공체임버 안에서 광학 성능을 측정할 수 있는 시설과 장비를 구축하고 있다. 그림 15와 같이 열진공 우주환경이 구현되는 대형체임버 내부에 외부의 진동과 분리된 광학테이블이 있으며 광구조 부품 또는 카메라 시스템을 시험 및 측정할 수 있다.

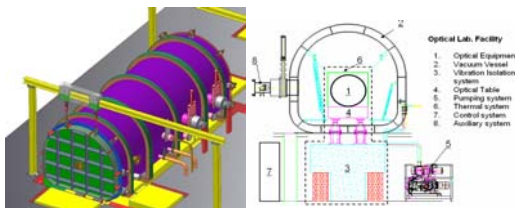


그림 15. 열진공 광학시험시설(좌 : 조감도, 우 : 절단면)

4. 결론

국내의 위성탑재용 대구경 카메라의 광구조물 개발은 이제 시작단계이다. 다행히 가장 중요한 광구조 부품중의 하나인 반사경조립체를 국내에서 개발하고 있으므로 많은 발전이 있으리라 기대된다. 또한 광구조 부품의 우주환경시험 시설도 구축되고 있으므로 우주급 광구조 부품의 제작에서부터 조립 및 최종 시험까지 국내에서 실현될 것으로 예상된다. 따라서 반사경 조립체와 함께 현재 국내개발을 계획 중인 경통 등의 고안정구조물도 국내개발이 이루어진다면 위성카메라를 구성하는 광구조 부품과 광구조 조립체 시스템을

본격적인 국내개발도 가능할 것으로 예상된다.

한편, 대구경 반사경 등은 부품 개발에 요구되는 기술수준의 특수성과 수요의 한정성으로 인해 기업의 적극적인 참여가 부족하고 정부출연연구소에 의해 개발되고 있는 실정이나 정부출연연구소로부터의 기술이전과 함께 우주개발 프로그램에 따른 점진적인 수요의 증가가 예상되므로 관련 기업의 참여 활성화도 예상된다. 또한 이러한 기업체의 참여와 함께 최근에 진행된 광구조 부품의 설계와 해석에 관한 연구 결과 [16], [17]가 광학부품의 개발과 결합되어 광학부품과 구조부품의 설계로부터 제작과 시험을 포함한, 전과정의 국내 개발이 가능하리라 예상된다.

참고문헌

1. <http://satrec.kaist.ac.kr>
2. <http://www.satreci.com>
3. <http://www.kari.re.kr>
4. 장홍술, “초고해상도 지구관측 카메라 기술동향”, 항공우주산업기술동향지 1권1호, 2003.
5. <http://www.geoeeye.com/>
6. <http://hubble.nasa.gov>
7. <http://www.jwst.nasa.gov>
8. P.R. Yoder, “Opto-mechanical systems design”, 2nd edition, p580
9. 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.
10. M.Lampton, et al, “SNAP telescope”, Proc. SPIE, 5166, 2002.
11. T.M. Valente, D., Vukobratovich, Proc. SPIE, 1167, 1989.
12. T.M. Valente, Proc. SPIE 1340, 1990.
13. <http://www.boostec.com/rocsat.htm>
14. http://optics.nasa.gov/tech_days/tech_days_2005/docs/04%20NASA%20OTA%20for%20TPF-C.pdf
15. F. M. Topas, et al, “High bandwidth fast steering mirror”, Proc. SPIE, 5877, 2005.
16. “SRI(고해상도 영상기기) 개발과 활용을 위한 핵심기술 연구”, 연구보고서, 한국항공우주연구원, 2006.
17. “위성탑재카메라 광구조부품의 설계 및 해석”, 한국항공우주연구원-한국과학기술원 위탁연구보고서, 2007.