

위성 광학 탑재체 기술

이 글에서는 위성용 지구 관측 광학 카메라에 대하여 소개하고 기계공학적 관점에서의 탑재체 개발 기술에 대하여 소개하고자 한다.

이 용 식 / 한국항공우주연구원, 선임연구원

e-mail : eslee@kari.re.kr

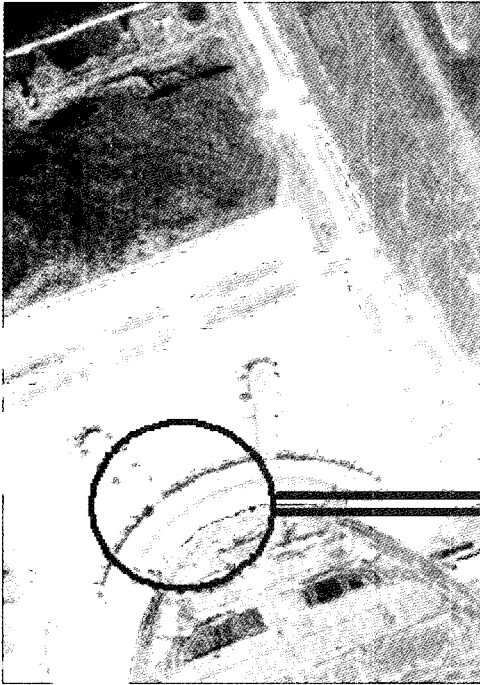
바야흐로 디지털 카메라의 시대다. 이 새로운 도구의 위력은 실로 대단해서 요즘 세상은 디지털 카메라가 있는 사람과 없는 사람으로 구분되고 국가간에도 이러한 이분법이 존재하는 듯하다. 지구상의 몇몇 국가만이 소유하고 있고 많은 국가들이 갖고 싶어하는 조금은 투박한 디자인의 디지털 카메라가 있다. 바로 지구 밖에서 지상을 촬영할 수 있는 위성용 지상 관측 카메라다. 지구상의 디지털 카메라가 빠르게 발전하고 사라지는 것처럼 지구 밖의 카메라도 계속 고성능과 기술이 향상되고 있다. 1990년대 후반부터는 미국 등의 기술 선진국이 군사 및 안보 기술로 분류하였던 해상도 1m급 카메라를 상용으로 개발하기 시작하면서 상용 고해상도 지구 관측 카메라 개발 경쟁이 가속화되었다. 현재 운영 중인 미국의 아이코노스(IKONOS)와 퀵버드(QuickBird) 위성이 대표적인 해상도 1m 급의 상용 지상 관측 카메라이며, 이는 지상의 1m 정도의 크기를 갖는 물건까지 식별 가능한 사진을 찍을 수 있다. 즉 지상 685km 우주 공간에서 우리 집을 찍으면 우리 집 앞에 세워둔 우리 차의 모습까지 구별할 수 있을 정도다. 현재 가장 발전된 위성용 카메라는 미국의 첩보 위성 키홀(KH)로 직경 3m의 반사경을 장착하여 약 15cm 크기의 지상 물체를 구분하는 능력을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다.

우리나라는 1992년 해상도 400m의 우리별 1호의 성공을 시작으로 1999년 발사된 우리별 3호에는 해상도 13.5m의 광학 카메라가 탑재되었다. 미국의 TRW사와 공동 개발하여 1999년 발사된 다목적 실용 위성 1호에는 해상도 6.6m의 카메라

가 탑재되어 현재까지 운영되고 있다. 다목적 실용 위성 2호에 탑재될 해상도 1m의 MSC 카메라가 이스라엘의 엘롭사와 공동 개발하여 금년 말 발사를 예정으로 막바지 시험 중에 있다.

아이코노스 카메라의 구성 개념도. 주/부반사경 및 삼반사경에 의하여 모아진 빛을 초점면에 위치한 CCD가 전자 신호로 변환한다.

위성용 고해상도 카메라는 지상 물체로부터 입사되는 빛을 초점면에 모으는 반사경과 렌즈들로 구성된 광학부와 입사된 빛을 전기 신호로 변환하는 검침기와 관련 전자부 그리고 이들 광-전자 요소들을 안정적으로 지지하는 기계구조부로 크게 구성되어 있으며, 광학, 전자, 기계 기술이 융합된 시스템 장치이다. 위성용 고해상도 카메라에 널리 적용되는 카메라 형태는 2반사경식인 카세그레인 또는 이의 변형 방식, 무차폐 3반사경식 및 아이코노스에 구현된 코쉬방식(Korsh)이라 불리는 두 형태를 응용한 부분 차폐 3반사경식 등이 있다. 카세그레인 형태는 광학 정렬이 상대적으로 용이하나 중앙 차폐에 의하여 광학 성능이 다소 감소하고 넓은 시야각 확보에 어려움이 있으며, 무차폐 3반사경식은 시야각이 커서 넓은 관측폭을 구현하는 데 유리하나 광학 조립 및 정렬이 어렵다. 카메라의 초점면에 위치한 검침기는 CCD 또는 CMOS 소자가 사용되며 면적 CCD를 사용하는 휴대용 디지털 카메라와는 달리 위성용 고해상도 카메라에는 선형 CCD를 사용하는 푸쉬부름(pushbroom) 방식이 일반적인 형태이다. 기계 구조부는 광-전자 요소들을 발사 환경으로부터 보호해주고 광학 요소 특히, 주반사경과 부반사경 사이의

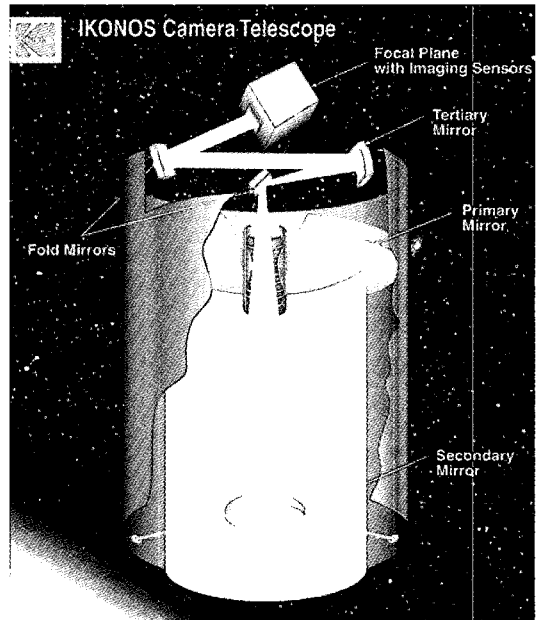


해상도 6.6m인 다목적 실용위성 1호가 촬영한 영상(좌)과 해상도 1m의 아이코노스가 촬영한 영상(우). 금년 말 발사 예정인 다목적 실용위성 2호에는 아이코노스와 동등 성능을 갖는 광학 카메라 MSC가 탑재될 예정이다

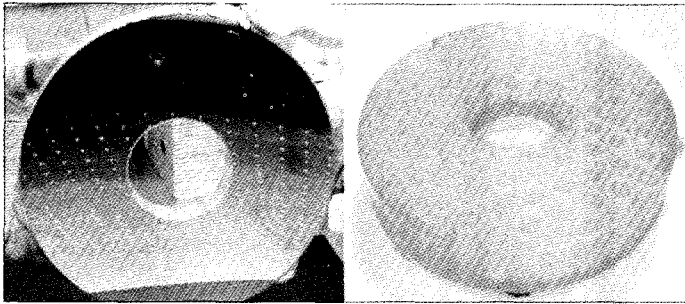
상대 위치를 우주 환경하에서 안정적으로 유지시켜 주는 역할을 한다. 주반사경과 부반사경의 위치 변화는 카메라 성능에 민감하게 영향을 미치며 수 μm 이내로 항상 유지되어야 한다. 우주 환경 하에서 이러한 조건을 만족하기 위해서는 복합재료 열팽창 계수가 매우 작은 값을 갖도록 설계하여 열 변화에 둔감한 구조물을 구성하거나 고강성 재료인 실리콘카바이드를 사용하고 카메라의 온도를 일정하게 제어하는 방법이 사용된다. 반사경 경량화, 고안정 카메라 구조물 제작, CCD 등 고해상도 광학 탑재체 개발의 주요 기술에 대하여 좀더 자세히 살펴보자.

반사경 경량화

685km 높이의 우주 상공에서 지상 1m 크기의 물체를 구별할 정도의 성능을 갖으려면 반사경의 파면 오차(WaveFront Error)가 20nm(RMS) 이하의 값을 갖도록 가공되어야 한다. 이는 카메라 반사경의 크기 60cm를 지구 크기로 확대했을 때 서울에서 LA를 가는 동안 축구공 크기 정도의 돌출

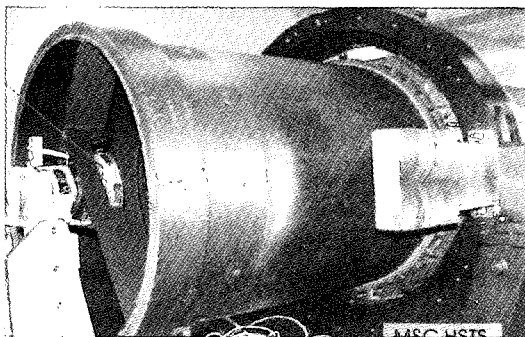


아이코노스 카메라의 구성 개념도. 주/부반사경 및 삼반사경에 의하여 모아진 빛을 초점면에 위치한 CCD가 전자 신호로 변환한다



MSC 주반사경. 반사면은 오목 거울 형태로 알루미늄이 코팅되어 있고 뒷면은 파면 오차(WFE)를 고려하여 발집 형태로 경량화 설계되어 가공된 구조이다

부만을 경험하는 표면 형상 정밀도이다. 위성용 카메라는 중력 하의 지상 실험실에서 제작 시험 후, 무중력 상태의 우주 궤도상에서 운용된다. 이러한 변화는 중력 가속도 1g 하중에 의한 표면 형상 변형을 야기한다. 또한 우주 궤도 상의 열적 환경으로 인한 온도 변화는 물질의 열팽창 계수에 비례하여 반사경의 형상 변형을 야기한다. 이러한 무중력 및 열적 환경 하에서 반사경이 광학적 허용 값 이내의 파면 오차값을 유지시켜주고 무게를 최소화하기 위한 경량화 설계가 필수적이다. 반사경의 무게가 증가하면 이를 안정적으로 지지해야 하는 기계 구조부의 질량도 따라서 증가하기 때문에 반사경의 무게는 카메라 전체 무게를 결정하는 가장 중요한 요인이다. 반사경 경량화는 열팽창 계수가 매우 작아 열적 변화에 안정적인 제로도(zerodur)나 유엘이(ULE) 등의 그라스 재료를 사용하여 형상 최적화 하는 방법과 고강성 특성을 갖



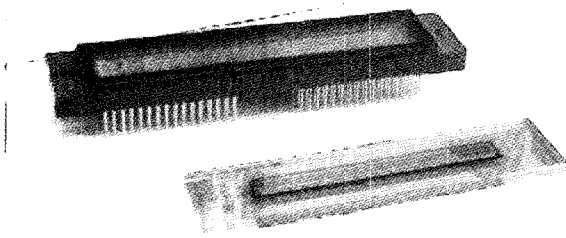
MSC의 고안정 카메라 구조부. 주반사경과 부반사경이 최적화된 정렬 상태를 우주 환경 속에서 안정적으로 유지되도록 지지하는 구조부이다

는 실리콘카바이드(SiC)나 베를리움(Be) 등의 재질을 사용하여 경량화 비율을 높이고 반사경의 온도 변화를 엄격히 제어하는 방법 등이 사용된다. 유효 구경이 60cm로 동일하고 제로도와 실리콘카바이드로 제작된 MSC와 록셋(ROCSAT-2)의 주반사경 무게는 각각 15.5kg과 11.6kg으로 실리콘카바이드 반사경이 30% 정도 경량화되어 제작되었

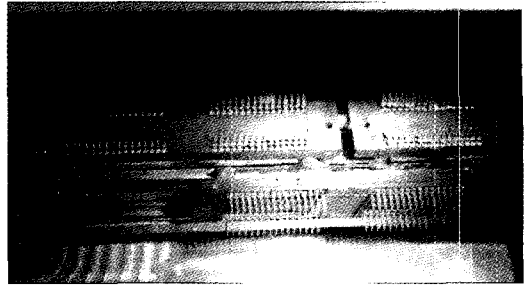
으나 가공 및 폴리싱(polishing) 기간이 두 배 이상 소요되는 단점이 있다. 최근에는 복합재를 사용하여 강성을 최대화한 반사경 구조물에 얇은 제로도 반사경을 접착하는 복합재 반사경과 반사경 뒷면에 액츄에이터를 장착하여 반사면을 원하는 형상으로 능동 제어하는 적응 광학 반사경 등의 경량화 기법에 대한 연구가 미국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 복합재 반사경은 유효 구경 60cm인 경우 5kg 이하로 제작 가능한 것으로 알려져 있다.

고안정 카메라 구조

위성용 고해상도 카메라에 주로 사용되는 카세그레인 방식이나 코쉬 방식은 두 번째 반사경인 부반사경의 위치 변화가 카메라 성능에 큰 영향을 주므로 초기 정렬 상태에서부터 보통 2~3 μ m 이내의 변위 오차만이 허용한다. 주반사경과 부반사경을 연결해 주는 부분을 특히 미터링 구조(metering structure)라 부르며 우주 환경 하에서 카메라의 광학 성능을 좌우하는 중요한 구조이다. 위성용 카메라는 지구 복사열, 태양 광선 및 절대 온도에 가까운 우주 심연 환경에 노출되어 있어 열적인 환경 변화가 심하게 발생하며 이는 열팽창 계수에 비례하여 미터링 구조의 변형을 야기한다. 변형을 최소화하기 위해서는 열팽창 계수를 매우 작은 값을 갖도록 하여야 하며 미터링 구조의 열팽창 계수에 상응하여 허용 온도 범위가 결정된다. 일반적으로 열팽창 계수가 작은 인바 봉이나 이를 조절할 수 있는 복합재료를 사용하여 경통 또는 트러스 형태로 미터링 구조를 제작한다. 최근에는 다른 재질에 비하여 단위 질량 당 강성 계수가 월등히



MSC에 사용된 선형 CCD(좌)와 3개의 CCD를 조립한 검침기 블록(우). 해상도가 높아지고 관측폭이 넓어질수록 많은 수의 CCD를 정렬해야하는 어려움이 있다



큰 실리콘카바이드를 사용하고 전체 구조를 1~2℃ 이내로 매우 세밀하게 온도 조절하는 방법을 사용하기도 한다. 복합재료를 사용하는 경우 수지의 흡습과 탈습에 의하여 변형이 발생할 수 있으며 이를 최소화하기 위하여 흡습 팽창 계수를 작은 값으로 설계하고 사이아나이트(cyanate) 같은 저흡습 특성을 가진 수지를 사용한다. 프랑스에서 개발 중인 플레이아드(pleiades)는 흡습 영향을 제거하기 위하여 탄소-탄소 복합재료를 사용하기도 하나, 고강성 섬유를 사용한 섬유강화 복합재료에 비하여 강성이 떨어져 무게가 증가하는 단점이 있다. 미터링 구조가 충분한 성능을 발휘하지 못하여 광학 요소 사이의 정렬이 흐트러지는 경우를 대비하여 대부분의 위성용 카메라는 초점 조절 장치를 백업으로 장착한다. 모터를 사용하여 초점 보정 렌즈나 부분사경 등을 직접 이동하는 방법, 부분사경의 온도를 조절하여 곡률 반경을 변화시켜 초점을 조절하는 방법, 열팽창 계수가 다른 물질로 부분사경의 하우징을 제작하여 온도 변화에 의하여 초점을 조절하는 방법 등이 사용된다.

CCD

검침기는 카메라의 초점면에 위치하여 반사경이 모은 빛을 전자 신호로 변화시켜주는 장치로서 CCD 또는 CMOS 센서가 사용되나 지상 관측에는 대부분 CCD 소자를 사용한다. 위성 카메라는 고속으로 이동하기 때문에 밝은 영상을 얻기 위해서는 반사경의 직경을 키우는 방법 외에 노출 시간을 증가시키는 방법이 사용된다. 노출 시간을 증가시켜 전자 신호 획득량을 높이기 위해서 진행 방향으로 시간 지연 적분법(TDI : Time-Delay Integration)을 적용하

고, 빛의 양에 따라서 TDI 레벨을 가변적으로 선택한다. MSC는 32 TDI 단계를 지원하는 CCD를 사용하며 현재는 100 이상의 TDI 단계를 지원하는 우주용 CCD가 개발되었다. 선형 CCD의 화소수는 해상도 및 관측폭에 의하여 결정된다. 해상도 1m 관측폭 15km 인 MSC는 15,000화소이고 해상도 0.6m 관측폭 16.5km인 미국의 퀘버드 위성은 27,000개의 화소수를 가진다. 현재 제작 가능한 단일 선형 CCD의 최대 화소수가 13,000개 정도이고 당분간 15,000화소 이상의 단일 CCD 제작은 어려울 것으로 판단된다. MSC는 5,000화소 선형 CCD 3개, 프랑스에서 2008년 발사를 목표로 개발 중인 플레이아드는 6,000화소 선형 CCD 5개를 조립 정렬하여 사용한다. 몇 개의 CCD를 연결하여 이를 조립 및 정렬하는 기술이 높은 해상도 및 넓은 관측폭을 갖는 카메라 개발에 있어 주요 기술로 분류된다.

위성 탑재 고해상도 카메라는 0.6m 해상도의 퀘버드의 성공으로 항공 촬영 해상도인 0.2~0.3m 수준과의 차이를 점점 줄이고 있으며, 현재 0.5m인 미국이 규제가 완화되면 항공사진 해상도에 근접한 0.5m 이하 급의 초고해상도 카메라도 상용으로 개발이 추진될 것으로 보인다. 또한 공간 해상도 향상과 촬영 주기를 높이고 촬영 폭을 넓히는 기술도 지속적으로 개발될 것으로 보이며 여러 대의 위성으로 촬영 망을 구성하는 기술도 예상된다. 지구상의 많은 나라가 갖고 싶어 하는 지구 밖의 디지털 카메라는 더 자세히, 더 넓게 그리고 더 자주 촬영 가능한 형태로 빠르게 발전해 나아가고 있다.