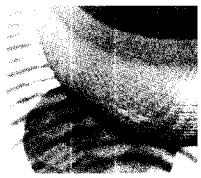

특집 | SPACE OPTICS

다목적 실용위성의 전자광학 탑재체

김영수*, 백홍열*

1. 개괄

인공위성은 자원탐사, 해양, 기상, 환경, 통신, 방송, 정찰 등에 활용되고 있으며, 그 활용도는 재난, 구조, 원격진료, 신소재 및 신의약품 개발 등으로 갈수록 증가하고 있다. 우주기술이 핵심기술의 하나로서 주도하는 21세기에 들어와서, 우리 나라도 우주개발에 적극적으로 참여하고 있다. 1992년에 발사된 우리별 1호를 시작으로 과학 위성들이 개발되었으며, 1995년부터 통신 방송위성인 무궁화 위성들이 발사되어 상업적으로 이용되고 있다. 한국항공우주연구원은 1999년에 다목적 실용위성(KOMPSAT: Korea Multi-Purpose SATellite) 1호를 성공적으로 발사하여 현재 지상 해상도 6.6m급의 지상 영상을 지속적으로 얻고있다. 이로서 우리나라는 세계 18위의 인공위성 보유국이 되었으며, 앞으로도 독자적인 우주개발 능력을 확보하기 위하여 많은 노력을 경주하고 있다.[1] 또한, 국제우주정거장 등에 참여하여 국제협력을 꾀하고 있다.

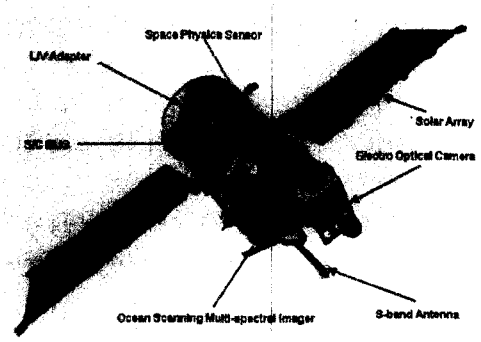

그림 1. 다목적 실용위성 1호

이 글에서는 한국항공우주연구원에서 주관하여 개발하였던 다목적 실용위성 1호 (그림 1)와 현재 개발중인 2호의 광학 탑재체들에 대해서 기술한다. 그리고, 향후 개발 계획에 대해 소개한다.

2. 다목적 실용위성 1, 2호의 광학 탑재체

다목적실용위성 1호에는 지상을 촬영하는 전자광학카메라 (EOC: Electro-Optical Camera)와 해수 색깔을 촬영하는 해양관측카메라 (OSMI: Ocean Scanning Multi-spectral Imager)의 2가지의 광학 탑재체와 우주관측을 위한 탑재체가 있다. 이들은 1996년부터 1999년까지 미국의 TRW사에 의해 개발되었으며, 항우연 (한국항공우주연구원)의 연구원들이 현장 교육방식으로 기술을 전수 받았다.[2, 3]

현재 개발 중인 다목적 실용위성 2호의 탑재체는 고해상도 카메라(MSC: Multi-Spectral Camera)로서, 지상해상도 1m인 흑백영상과, 4개의 가시광선 및 근적외선 영역에서 4m 해상도를 가진 칼라영상을 얻을 수 있다. 이는 2000년부터 이스라엘 EL-OP사와 공동개발 중인데, 현재 설계를 완료하고 제작과 조립단계에 있다.

2.1. 전자광학 카메라

전자광학카메라는 가시광선 영역(510~730nm)에서 흑백 영상을 얻는데, 이 영상의 지상 해상도는 위성의 고도 685km에서 연직 방향으로 봤을 때에 6.6m

* 한국항공우주연구원

다목적 실용위성의 전자광학 탑재체

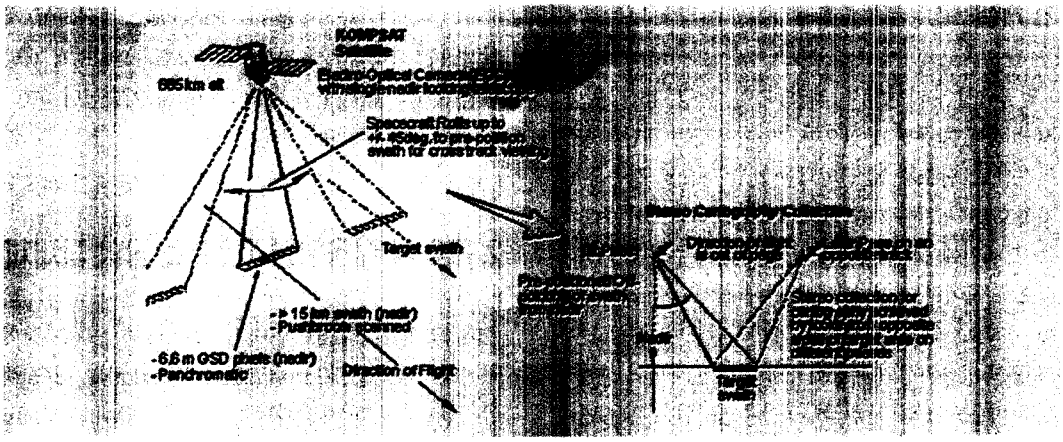

그림 2. 전자광학 카메라의 운용 개념도. 고도 685km에서 연직 방향으로 봤을 때에 지상해상도는 6.6m, 관측 폭은 15km이상이다. 위성의 비행 방향에 대하여 직각 (roll)으로 ±45도까지 자세제어를 하여 촬영이 가능하며, 같은 표적을 양쪽에서 촬영하면 입체영상을 얻을 수 있다.

표 1. 전자광학 카메라의 성능과 제원

관측 파장	510 ~ 730 nm
지상 해상도 / 관측 폭	6.6 m / 17 km @고도 685 km (연직방향)
초점 거리 / 초점 비 / 시계각 (FOV)	1,045 mm / F 8.3 / 1.42°
센서 / 주사방법 / 픽셀 수	CCD / Pushbroom / 2,592 Pixels
MTF / SNR	>10 % at Nyquist Frequency / ≥ 50
수명 / 신뢰도 / Duty Cycle	3년 / > 0.9 / 2분 (지상거리 800 km)
제 원	무게 34 kg, 소비전력 46 W

이다. 이 카메라는 그림 2와 같이 관측 폭 17㎞를 동시에 촬영하는 pushbroom 방식으로 scan하며, 궤도당 2분의 연속촬영이 가능하여서 한반도 남단에서 북단까지를 한 번에 촬영할 수 있다. 표 1에는 전자광학 카메라의 주요 사양과 제원을 수록하였으며, 그림 3은 위성에 탑재된 전자광학 카메라의 모습이다.[4]

그림 3. 제작 완료된 전자광학 카메라. 왼쪽 상자는 전자 유닛으로 크기는 230mm×170mm×250mm이고, 오른 쪽은 광학계와 센서 유닛으로 540mm×660mm×330mm이다.

이 카메라는 광학센서 유닛과 전자 유닛의 두 개의 상자로 구성되어있는데, 광학센서 유닛은 위성의 플랫폼의 윗면에 장착되었고 전자 유닛은 같은 플랫폼의 아래면에 붙였다(그림 2 참조). 광학센서 유닛은 세 장의 반사경으로 이루어진 망원경과, 위성의 비행 방향에 직각으로 배열된 2592개 화소의 CCD가 초점면에 위치해 있다. 광학계는 비축상에 3장의 반사경과 folding mirror로 구성되어 있는데, 초점 비 8.3, 초점거리 1,045mm으로 설계되었다. 이는 제작과 조립 시 광 정렬의 어려움이 있지만, 넓은 시계각 (FOV: Field Of View)에 대해서 좋은 광학성능을 가지고 있다. 광학계의 MTF (Modulation Transfer Function)는 Nyquist 주파수인 50 cycles/mm에서 35 % 이상이 되도록 설계되었다. 관측파장 영역인 510 ~ 730nm에서 전체 광학계의 투과율은 각 반사경의 반사율 및 CCD 앞의 광학 필터의 투과율을 포함하여 66 % 이상이 되도록 하였다.

전자광학카메라의 개발을 통하여 항우연은 전자광학카메라의 시스템 엔지니어링 및 개발관리 기술, 카

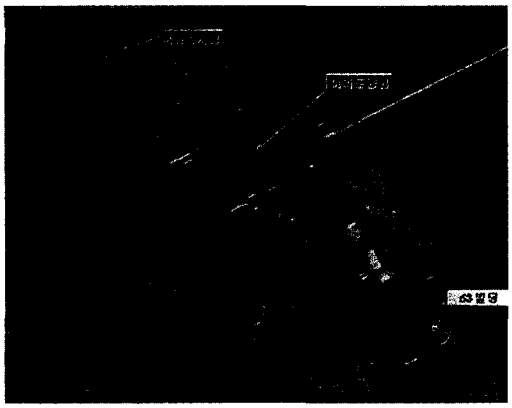

그림 4. 전자광학 카메라로 촬영한 여의도의 영상

그림 5. 항우연의 광학시험실에서 광학계를 시험하는 모습

메라의 설계 기술, 위성본체-탑재체간 접속기술 등을 익혔다. 또한 전자광학카메라의 성능시험 기술과 탑재체 품질인증사항 관리기술, 그리고 위성의 발사 후 초기운용을 통하여 탑재체 운용기술도 습득하였다. 그림 4는 전자광학 카메라로 촬영한 여의도의 영상이다.

또한, 항우연은 1998년 초에 전자광학 탑재체를 조립 및 시험할 수 있는 시설을 갖추었다. 이 시험실은 청정도 100 및 1000의 우주급 방진, 청정 시험시설로서 주로 프랑스의 세소(SESO)사로부터 장비들을 도

표 2. 해양관측 카메라의 성능과 제원

지상해상도	0.85km at Nadir, 1 km at edges
파장 영역	400~900nm (6개 영역)
FOV	6.83 degrees
초점비 / 초점 거리	F 6 / 128.94 mm
MTF / SNR	~20 % / 350 ~ 450
센서 / 주사방법 / Pixel	CCD / Whiskbroom scan / 96 Pixels
관측폭	800km (Crosstrack Scan Sweep) x 96km (Intrack)
임무 주기	19.6분 (궤도주기의 20 %, 지상거리 8000 km)
제원	무게 18kg, 소비전력 30W

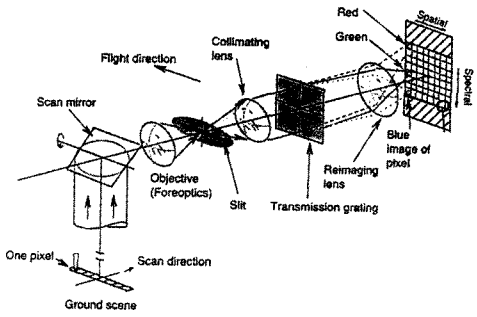

그림 6. 해양관측 카메라의 광학계 구성도

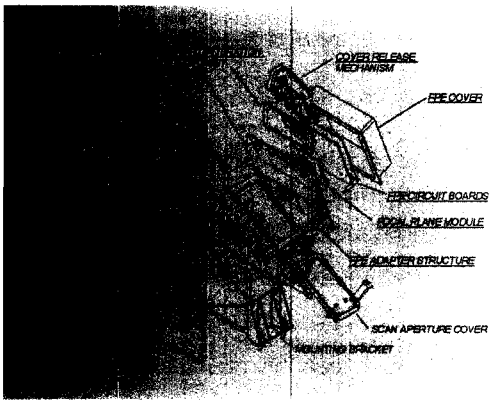

그림 7. 해양관측 카메라 전체구성도

그림 8. 해양관측 카메라로 관측한 태풍 절라왓

입했다. 그림 5는 항우연의 장비를 이용한 광학계 시험장면이다.

2.2 해양관측 카메라

해양관측 카메라 (OSMI: Ocean Scanning Multispectral Imager)는 해수색 관측을 통한 생물학적 해양지도 작성의 임무를 가지며, 관측자료는 전세계 해양 자원 및 해양환경 관측에 활용된다. 해양관측 카메라는 whiskbroom scan 방식으로 지상거리 800km의 폭을 96km씩 685km 고도에서 1km 이하의 지상 해상도로 관측하는데, 400~900nm 내에서 6개의 파장영역을 선정하여 영상을 수집하고 이를 전자신호로 바꾸어 지상으로 전송한다. 해양관측 카메라의 상세한 성능 및 제원은 표 2와 같다.[4]

해양관측 카메라의 구성은 그림 6과 같다. Scan mirror는 위성의 비행 방향에 대하여 직각 (roll) 방향으로 좌우 ±30°까지 구동하여, 관측폭 800km의 범위의 영상을 수집할 수 있게 한다.

조립된 해양관측 카메라의 전체 구성도를 그림 7에 도시하였다. 이 카메라의 많은 부품들은 국내 업체들에 의해 제작되었다. 그림 8은 이 카메라로 관측된 태풍 절라왓의 영상이다.

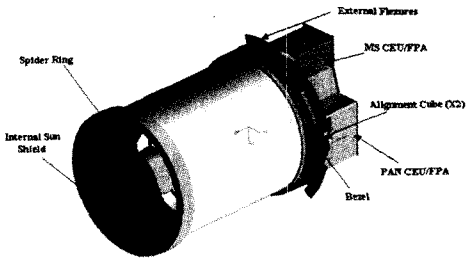

그림 9. 망원경의 외형. Ritchey-Chretien type의 망원경이며, 경통의 안쪽에 태양빛에 의한 열변형을 줄이는 sunshield가 있다. 주반사경은 bezel에 의해 지지되며, 위성의 플랫폼에는 3개의 external flexure에 의해 고정된다. 위성체와의 정렬은 alignment cube를 이용한다. CCD를 포함한 센서 유닛(MS CEU/FPA, PAN CEU/FPA)들이 bezel의 뒤에 붙어있다.

2.3 고해상도 카메라

다목적 실용위성 2호기에 탑재될 고해상도 카메라 (MSC: Multi-Spectral Camera)는 한번에 관측 폭 15Km로 길이 1000Km 영역을 지상해상도 1m로 정밀 관측하게 된다.[5,6] 이러한 고해상도 카메라는 현재 상업용 위성으로는 세계적으로 2개만이 운영되고 있

표 3. 고해상도 카메라 규격

항 목	제 원
흑백 영상 (PAN) 파장 영역	500 ~ 900nm
칼라 영상 (MS) 파장 영역	4 밴드 (450~520, 520~600, 630~690, 760~900 nm)
지상 해상도 / 관측폭 / 시계각	PAN≤1m, MS≤4m / 15km / 1.23도
최소 운용 기간 / 신뢰도 / 운용 주기	3 년 / 0.9 / 20%
MTF / SNR / Radiometric resolution	PAN 15%, MS 20% / 100 / 10 bits
질량 / 최대 소비 전력	145 kg / 340 W

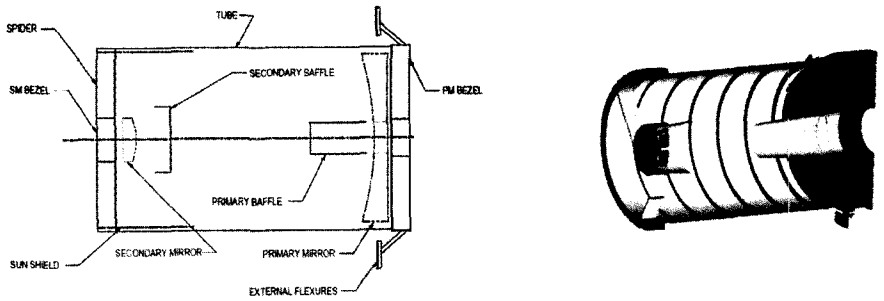

그림 10. 망원경 구조의 개략도와 내부 모습

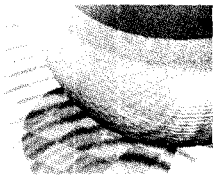

표 4. 고해상도 카메라의 광학부 사양

항 목	PAN 채널	MS 채널
유효초점거리 / 초점비	9,000 mm / F 15	2,250 mm / F 3.75
Obscuration ratio	41%	
Distortion	2% 이하	
Polarization	5% 이하	
무게 / 최대 전력	73 kg / 40 W	
크기	ø 800 mm x 1,350 mm	

는 매우 성능이 좋은 위성용 카메라이다. 고해상도 카메라에는 2가지 관측을 동시에 할 수 있다. 즉, 흑백 영상을 촬영하는 동시에, 400~900nm 영역 내의 4개 밴드로 지상해상도 4m의 칼라 영상 촬영이 가능하다. 흑백 (PAN: panchromatic) 채널과 칼라 (MS: multi-spectral) 채널은 같은 망원경으로부터 off-axis에 설치되어 있는데, 위성의 진행방향에 대하여 PAN은 +0.3도, MS는 -0.6 ~ -0.7도 벗어나 있다. 이 카메라의 개발 규격은 표 5에 있으며, 망원경의 외형과 내부 모습은 그림 9와 같다. 망원경의 구조의 개략도와 내부 모습은 그림 10에 보였다.[6,7]

광학부의 사양을 표 4에 수록하였다. 광학부는 주반사경과 부반사경, field corrector lens (FCL) 유닛 (PAN, MS), beam splitter (PAN), beam sharer (MS), 필터들로 구성되어 있다. FCL 유닛에는 초점을 조정할 수 있는 focusing mechanism도 장착되어 있다.

주반사경은 유효 지름 600mm, 초점비 1.5이며 재료는 zerodur이다. 표면은 enhanced Al coating이 되어있고, 뒷면은 무게를 줄이도록 제작되었다. 부반사경은 유효 지름이 180mm이고, 마찬가지로 enhanced Al coating과 무게 경량화를 하였다. 이렇게 제작된 단품들과 조립한 후 CGH (Computer Generated Hologram) 검사를 하게 되는 데, 파면오차 (wavefront error) 요구 값은 PAN 채널에서 $\lambda/14$로서, 이는 환경 조건까지 포함한 수치이다.[8] 그림 11과 12에 주반사경과 부반사경을 찍은 사진이 있다.

3. 발전 방향

현재 개발 중인 고해상도 카메라는 2003년에 완성될 예정이다. 앞으로는 광학부의 단품들과 이를 지지하는 기계 구조부의 부품들을 제작완료하고 조립하게 된다. 조립하는 동안과 그 이후에 성능시험을 비롯하여 환경시험 등을 시행하게 된다. 그 중에서, 광학 단품 및 조립 후의 파면오차 측정은 항우연에 설치된 광학시험실에서 시행될 예정이다.

그리고, EL-OP사와 공동 개발하면서 습득한 기술을 토대로 engineering model을 제작하고 있다. 여기에는 한국과학기술원의 인공위성연구센터와 한국표준과학연구원이 함께 참여하고 있다. 다목적 실용위성 3

그림 11. 제작 완료된 고해상도 카메라 주반사경의 모습

그림 12. 고해상도 카메라의 부반사경

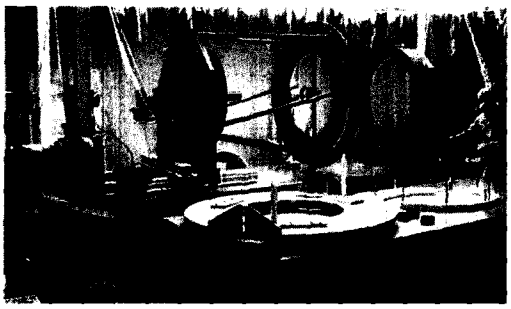

그림 13. 라미나 텐트 안에 설치된 collimator (왼쪽)와 평면 기준경 (오른쪽), 광 정열 작업을 하는 모습이다.

호기에는 지상해상도 80cm급의 광학 망원경(SRI: Super Resolution Imager)이 탑재될 예정이다. SRI는 2호기에 실리는 고해상도 카메라의 발전된 형태로, 더욱 정밀한 기술이 요구된다. 이러한 기술의 확보를 위하여 지상해상도 80cm급 망원경의 시제를 제작하고 있다. 이와 연계하여, 항우연은 고해상도 카메라를 시험하기 위하여 필요한 collimator를 구비하였는데, SRI의 시험도 할 수 있도록 지름 80cm의 대구경 collimator를 설치하였다. 이 collimator의 전체 길이는 1.4m이고, 파장영역 400nm ~ 12 μm에서 투과율은 75%이상이며, 파장 633nm에서 측정된 파면오차는 λ/40 rms이다. 그리고, 지름 80cm의 평면 기준경도 구비하였는데, 표면 정밀도는 λ/10 peak-to-valley, λ/40 rms이다. 재질은 zerodur이고 반사율은 가시광선과 12 μm까지의 적외선 영역에서 85% 이상이다.[8] 그림 13은 청정도 100의 라미나 텐트 안에 설치된 모습이다.

그 외에도 HSI (Hyper-Spectral Imager)와 적외선 망원경도 개발하려고 준비 중에 있다. 이들은 통신방송기상위성의 기상과 해양 탑재체와도 연관이 많다. 통신방송기상위성은 2008년에 정지궤도에 발사될 예정으로, 현재 개발 준비 단계에 있다. 기상용 광학 탑재체로는 가시광선과 적외선 영역에서 관측하는 Imager와 Sounder가 있는 데, Imager는 보통 5개 정도의 밴드를 사용하고 있고, Sounder는 10~20개의 밴드를 가지고 있다. 그러나 차세대 탑재체들 중에는 *interferometer*를 이용하여, 100개에서 1,000여개의 밴드를 가지는 탑재체를 개발하고 있어서, 이러한 기술도 조만간 개발해야 할 것으로 보인다. 또한, 국제우주정거장에도 우리의 탑재체를 설치할 기회가 있을 것으로 보인다. 항우연에서는 우주개발 중장기 계획에 의거하고 수요에 부응하기 위하여 우주용 광학 탑재체들을 국내외의 관련 기관들과 협력하여 계속 개발할 것이다.

참고 문헌

(1) 과학기술부, 국방부, 정보통신부, 우주개발 중장기 기본계획, 2000.
(2) 한국항공우주연구원, 다목적실용위성1호 개발사업 백서, 권희석, 김영수, 윤용식, 이동한, 이상률, 이윤신, 이호형, 장영근, 전재승, 진의민, 최해진, 황도순 편집 (고려문화사, 대전, 2001).
(3) 한국항공우주연구원, 한국항공우주연구원 10년사, 김종윤, 강광호, 김기행, 김종범, 윤민수, 이해창, 이호성, 임효숙, 최홍식 편집 (신광사, 대전, 2001).
(4) 김병교 외, 다목적실용위성 시스템 설계 및 개발, 과학기술부, 산업자원부, 정보통신부, 2000.
(5) 한국항공우주연구원, Contract for the Satellite Multi-Spectral Camera (MSC) System for the KOMPSAT-2 Program, KARI-99-T07, 1999.
(6) EL-OP, MSC Critical Design Review, 2001.
(7) 백홍열 외, 다목적실용위성 2호 과학관측용 고해상도 카메라 개발사업 (II), 과학기술부, 2001.
(8) 백홍열 외, 다목적실용위성 2호 과학관측용 고해상도 카메라 개발사업 (III), 과학기술부, 2002.

약 력

김영수

2000~현재 한국항공우주연구원 다목적실용위성2호 고해상도카메라 시스템엔지니어
1999~2000 European Southern Observatory
1998년 University College London 물리천문학과(박사)
1986년 연세대학교 천문우주학과 (석사)
1980년 연세대학교 천문우주학과 (학사)
E-mail:ykim@kari.re.kr, yskim311@hanmail.net
관심분야: 대구경광학, 광학시험

백홍열

1995~현재 한국항공우주연구원 위성운영센터 센터장
1985~1995 국방과학연구소
1985년 Cornell university 응용물리학 (박사)
1983년 Cornell university 응용물리학 (석사)
1975~1981 국방과학연구소
1975년 서울대학교 응용물리학 (학사)
E-mail: phy@kari.re.kr
관심분야: 위성탑재체 개발, 위성운영, 원격탐사