

우리별 3호 지구관측 카메라 개발 및 운용 현황

이준호[†]

한국과학기술원 인공위성연구센터 지구관측탑재체 개발실

☎ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1

유상근

(주)한비전

☎ 305-348 대전시 유성구 화암동 62-1 KAIST 첨단기술사업화센터

(2001년 6월 21일 받음, 2001년 9월 4일 수정본 받음)

1999년 5월 26일 발사되었던 우리별 3호 인공위성에는 지구관측 전자광학 카메라가 탑재되어 있다. MEIS는 직경 95 mm Mangin 망원경으로 고도 720 km에서 13.8 m의 지상화소로 48 km의 폭을 3개의 서로 다른 광 대역에서 관측한다. 본 논문에서는 우리별 3호 카메라의 설계와 제작/조립 및 시험결과를 비교 분석하고, 발사후의 운용에 관련된 문제점을 논하였다.

분류코드 : SM.020.

I. 서 론

우리별 3호 주 탑재체인 지구관측 전자광학카메라(MEIS, Multispectral Earth Imaging System)는 한국과학기술원 인공위성연구센터와 남아프리카 공화국의 Stellenbosch 대학간의 국제 공동 프로젝트를 통하여 개발되었으며, 1999년 5월 26일 발사되어 현재까지 운용되고 있다.¹⁾⁻³⁾ 그림 1은 우리별 3호의 3차원 조립도이며, 우리별 3호상의 MEIS의 위치가 나타나 있다.

MEIS는 Green(520-620nm), Red(620-690nm), Near-Infrared(730-900 nm)의 관측 대역을 가지며, 720 km의 위성고도에서 약 13.8 m의 지상 화소 크기(Ground Sampling Distance)를 갖는 3개의 선형 CCD를 가지고 위성의 진행 방향으로 영상을 획득한다. 3개의 선형 CCD는 각 3456개의 소자를 가지고 있으며, 기계적으로 분리되어 있으나 광학적으로는 프리즘을 통하여 한 순간에 동일한 지상면을 바라보도록 정교하게 정렬되어 있다. 따라서 MEIS는 지상면적 약 48km를 3개의 주파수 영역의 정보를 얻으며 휩쓸고 지나 가며 사진을 찍는다(그림 2).

촬영된 영상 정보는 전자회로(Camera Flight Processor)에 전달되며, 전달된 영상 데이터는 SRAM 대용량 메모리에 저장됨과 동시에 운영모드에 따라 실시간 H/W Quick Look 전송 또는 저장 데이터를 전송하게 된다(그림 3).

본 논문에서는 이러한 MEIS의 광학설계와 제작/조립후의 시험결과를 비교 분석하고 1999년 5월 26일 발사이후의 운영결과 및 문제점에 대하여 검토하였다.

II. 광학계-설계

MEIS의 광학계는 반사/굴절형(Catadioptric) 망원경중 Mangin

타입으로 남아공화국의 CSIR(Council for Scientific Industrial Research)이 개발한 상용 렌즈인 Telemacro-3를 기본 모델로 재 개발하였다. 광학계는 유효 직경 95 mm의 주반사경, 보조 반사경, 앞단 렌즈, 경통, 내부 Baffle, 프리즘 블록, 보정 렌즈 및 CCD로 이루어져 있는 Mangin Type 망원경으로, 주반사경 및 보조 반사경 모두 Mangin 반사경을 사용하고 있으며,

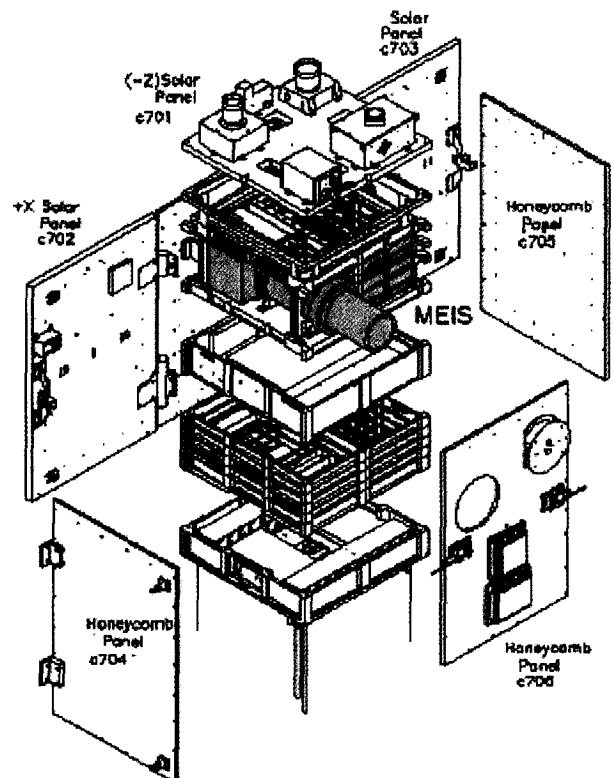


그림 1. 우리별 3호 및 카메라(MEIS)의 위치.

[†]E-mail: jhl@satrec.kaist.ac.kr

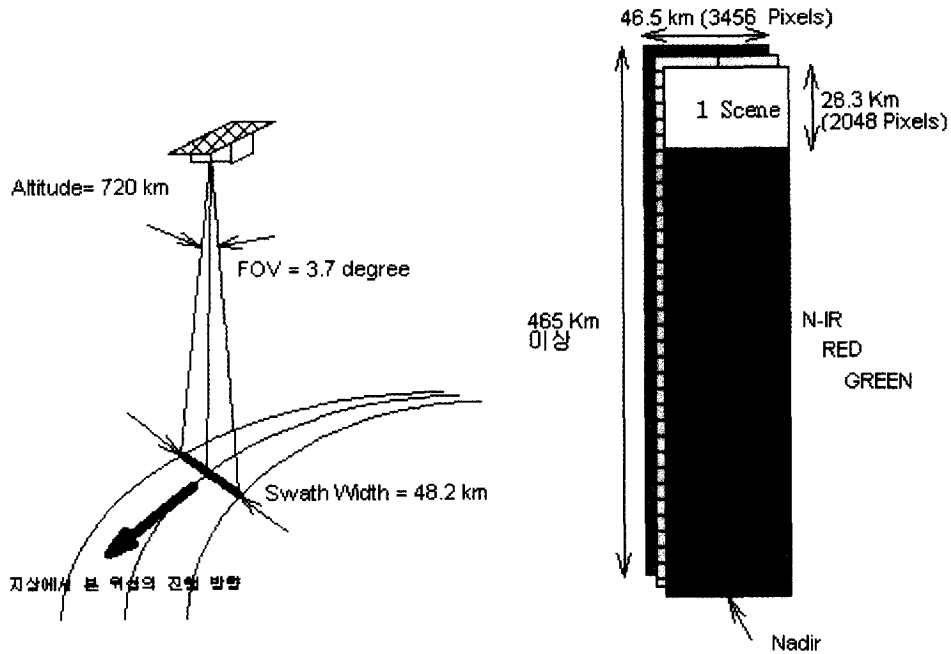


그림 2. 우리별 3호의 영상 획득 방식.

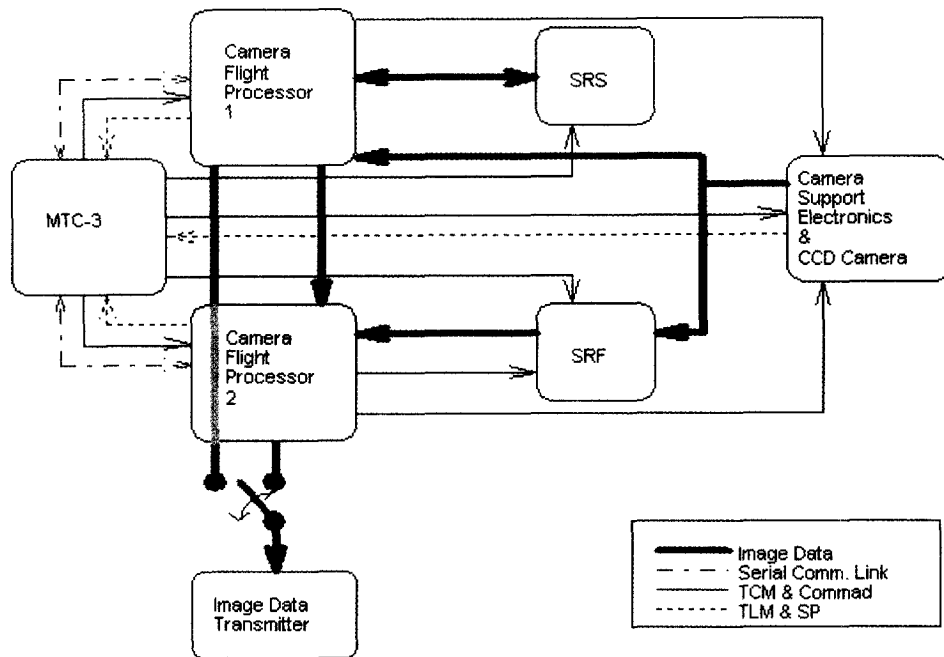


그림 3. MEIS의 System Block Diagram (MTC: Modal Telemetry Controller, SSR: Solid-State Recorder SRAM, SRF: Solid-State Recorder Flash Memory).

모든 광학면은 구면으로 설계되어 있다(표 1, 그림 4, 5).
 굴절 광학계는 하나의 유리로 제작되었을 경우, 색수차가 발생하게 되고 이것을 제거하기 위하여 다른 성질의 유리를 사용함으로써 제거할 수 있으나,^{14,5)} MEIS의 경우 우주방사선과 온도 변화에 강한 Fused Silica를 주경 및 부경을 포함한 모든 유리에 사용하였다. 따라서, MEIS는 색수차 보정보다는 우주 환경(방사선)에 광학적인 특성의 변화가 적게 설계되었으

며,¹⁶⁾ 광기계 구조물에 300°K에서 Fused Silica와 거의 유사한 열팽창 계수를 가지고 있는 Invar(LR-35)(그림 6)을 사용하여 비열화(Athermalization) 설계를 고려하였으나 광학계의 크기가 작은 것을 고려하여 경통도 Fused Silica(Low grade)로 제작하였다.¹⁷⁾ 우주 궤도상의 우리별 3호의 온도 변화에 따른 광학 성능의 변화 및 Heating Coil을 이용한 능동제어 가능성은 다른 논문에서 다루고자 한다.¹⁸⁾

표 1. MEIS 광학 설계(단위, mm)

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		
1	Standard	Front Baffle	Infinity	200		108.2312
STO	Standard	STOP	Infinity	0		95
3	Standard	First Element	594.01	12	Silica	102
4	Standard	First Inner Baff	Infinity	35		102
5	Standard		Infinity	111.8		102
6	Standard		-287.649	6	Silica	102
7	Standard	Slot Baffle	Infinity	12	Silica	102
8	Standard	Main Mirror	-499.06	-12	Mirror	102
9	Standard		Infinity	-6	Silica	102
10	Standard	2 nd Inner Baff	-287.649	-29.75		102
11	Standard		Infinity	-82		83.30
12	Standard	First Innfer Baff	Infinity	-28.5		60.648
13	Standard		-185.626	-6	Silica	44
14	Standard	Second Mirror	-372.059	6	Mirror	44
15	Standard		-185.626	111.75		40
16	Standard		Infinity	0		30
17	Standard		-116.12	28.5	Silica	34
18	Standard	Thru Main Mirror	-287.649	18	Silica	34
19	Standard	Focus Wedges	-499.06	10.9	Silica	36.68
20	Standard	Prism Cluster	Infinity	29.02082	Silica	36.77
21	Standard	Absorb Filter	Infinity		1, 1.535, 53.0	37.04
22	Standard	CCD Window	Infinity	0.6	BK7	37.05
23	Standard		Infinity	0.1881089		37.05218
24	Standard		Infinity	0		

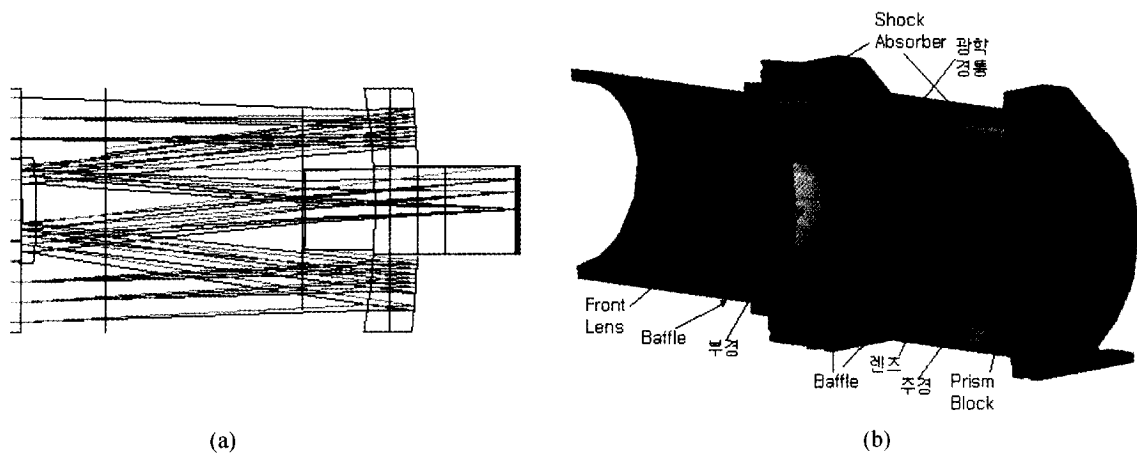


그림 4. MEIS의 단면도.

CCD로의 직접적인 광의 입사를 막기 위하여 내부 및 외부에 광학 Baffle을 설치하였다. 이 때 Baffle에 따른 비축광량 차폐(Vignetting)가 있으며, 부경에 의한 빛가림까지 고려하였을 경우 입사각에 따라 30~50%의 빛이 가려지며, 수직 방향의 관측과 제일 바깥 쪽 관측과는 동일한 영상에 대하여 37%의 광도 차이를 보인다(그림 7).

프리즘 블록에는 여러 겹의 간섭 필터들이 조합되어 있어 각 파장대역을 선택하도록 되어 있어, 각 CCD로 다른 파장의 빛이 도달하게끔 되어있으며(그림 8), Baffle과 경통의 안쪽, 그리고 주반사경 뒤쪽 및 프리즘 블록에는 무반사(Matt Finish) 에폭시(Epoxy) 페인트를 칠하여 빛의 난반사를 최소화 했다.

III. 광학계-제작/조립

주경, 부경, 앞단 렌즈 및 보정 렌즈가 먼저 광학적으로 정렬 결합되고, 세 개의 CCD가 3µm이내로 정렬된 프리즘 블록과 결합한다. 접착이 필요한 모든 면에는 가스 발생이 적은 UV-cured cement(NOR88)를 사용하였으며, 이 접착제는 정확한 정렬을 위하여 장시간 동안의 작업 시에 안정적으로 굳어지지 않다가 최종 정렬이 끝나고 나서 UV를 쬐어 줌으로써 순간적으로 굳어지는 특성이 있다. 그림 9는 MEIS의 조립된 사진을 보여주고 있다.

3개의 선형 CCD는 한 순간에 동일한 지상면을 바라보도록

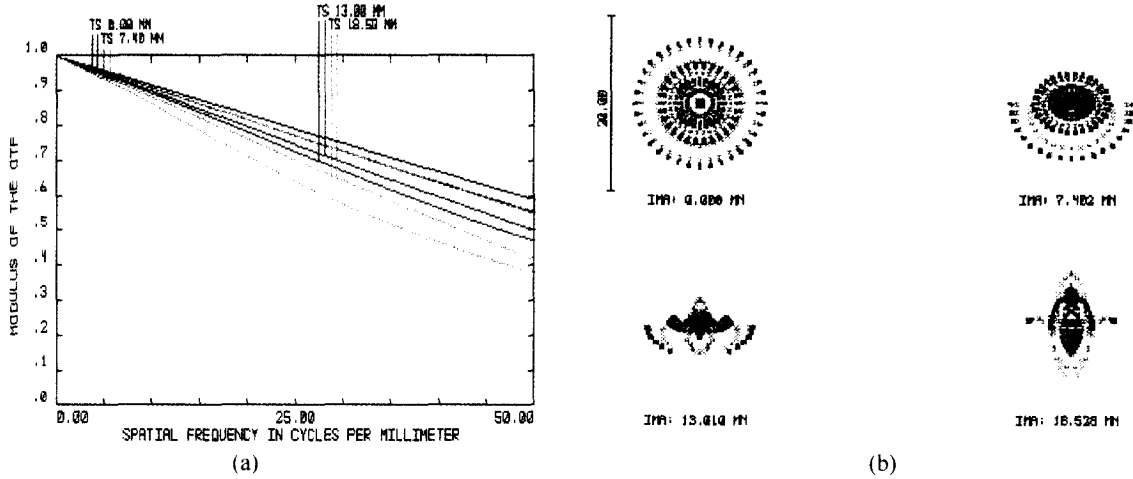


그림 5. 광학성능.

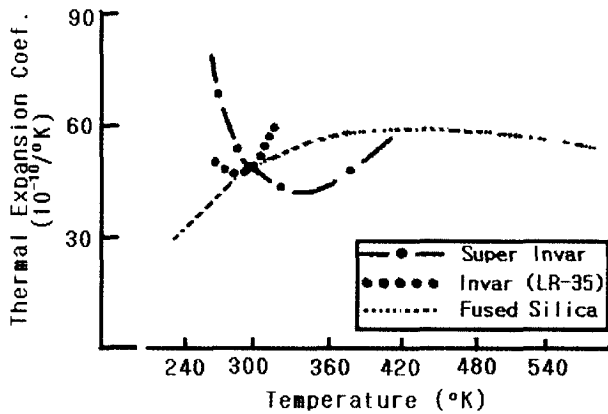


그림 6. Fused Silica 및 Invar의 열 팽창 계수.^[7]

하기 위하여, 동일 지표면 정보를 촬영하는 화소는 모든 채널에서 0.3화소(3.2 μ m) 이내로 정렬되어야 한다. CCD를 μ m 단위의 정밀도로 정렬하기 위하여 45° 프리즘 및 렌즈계로 이루어진 정렬 현미경을 사용한다. 현미경과 프리즘 사이에 각 채널별 필터를 삽입하여 채널별로 정렬된 위치를 따로 확인할 수 있으며, 일단 하나의 채널을 고정시키고 나서 다른 하나의 채널과 1:1로 교정을 한다(그림 10).

그림 4에서 보여지듯이 MEIS는 기계적으로 광학계(Optics group)와 외부 기계 구조물과 Shock Absorber를 통하여 분리되어 있기에, 위에서 언급한 바와 같이 광학적 정렬 및 조립이 끝난 후 기계 구조물과 결합한다. 광학계의 안은 Thermal Cycle 실험 시 광학면에 물방울이 맺히는 것을 방지하기 위하여 아르곤 가스로 밀봉되었다.

IV. 시 험

4.1. 균일성(Uniformity) 측정

MEIS는 Baffle의 설계에 따라 비축상으로 갈수록 결상되는 빛의 양이 줄어들며(그림 7), 이에 덧붙여 각 채널로 빛을 나누는 필터의 특성과 CCD 및 전자부의 특성이 모두 차이

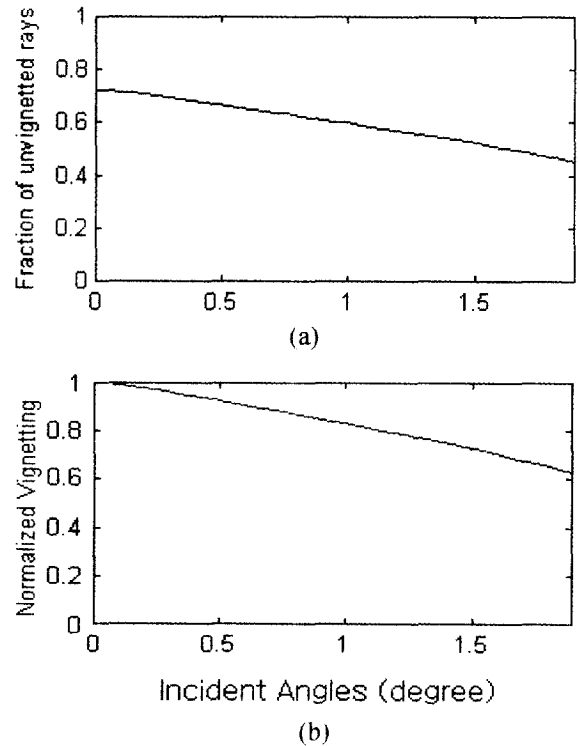


그림 7. Normalized 비축광량차폐(Vignetting).

가 있기에, 이를 모두 고려한 균일한 빛의 입사에 대한 각 CCD 화소의 값을 측정하여야 실 관측영상을 보정할 수 있다. 제작 및 조립 단계상의 균일성은 적분구를 사용하여 측정하였다.

그림 11는 적분구를 이용하여 측정한 CCD의 값으로부터, 동일한 광도의 입사광에 대하여 동일한 전기적 신호를 갖기 위한 각 CCD 화소의 이득(gain) 값을 보여주고 있다. 광학계만을 고려한 값(그림 7)과 비교하면, 최고 바깥쪽 화소에서 약 11%의 차이가 있으며, 이러한 값의 차이는 각 파장에 대한 광학 필터와 CCD의 반응 차이로 이해된다.

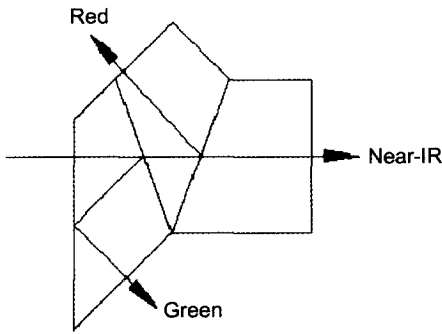


그림 8. 프리즘 블록.

4.2. MTF

전자 광학계의 전체 최종 MTF는 CCD, 광학계, 전자부의 MTF값의 곱으로 표현되며, MEIS의 각 단계별 및 종합 MTF는 따로 측정되어졌다.

CCD는 3456개의 화소 수를 가지는 선형 CCD로 Texas

표 2. MEIS(Pre-flight Model)의 MTF 값

Cycles (/mm)	CCD	Diff.	Optics (설계치)	CCD × Optics (설계치)	측정
23.3	0.87	0.77	0.65	0.57	0.56
46.7	0.63	0.49	0.36	0.23	0.22

Instruments사에서 판매하는 TC104를 사용하였으며, 제작사에서 제공한 MTF는 Nyquist 주파수(46.7lines/mm) 및 0.5~0.7 μm의 파장대역에서 63%를 가진다. Green Channel(520-620 nm)에 대한 단색광 MTF 실제 측정치는 58~63%(그림 12)로 CCD 자체는 측정치와 원래 데이터는 아주 근사하게 일치하는 것으로 나타났다.

광학계와 전자부를 포함한 MEIS의 MTF 측정되었으며, 측정치에 대하여 표 2에 정리되어 있다. CCD의 Nyquist Frequency (46.7 lines/mm)에서 설계 및 측정에서 각각 0.23 및 0.22가 나와 측정오차(5%)를 고려하면, 측정 값은 예상 값에서 크게 벗어나지 않았다.

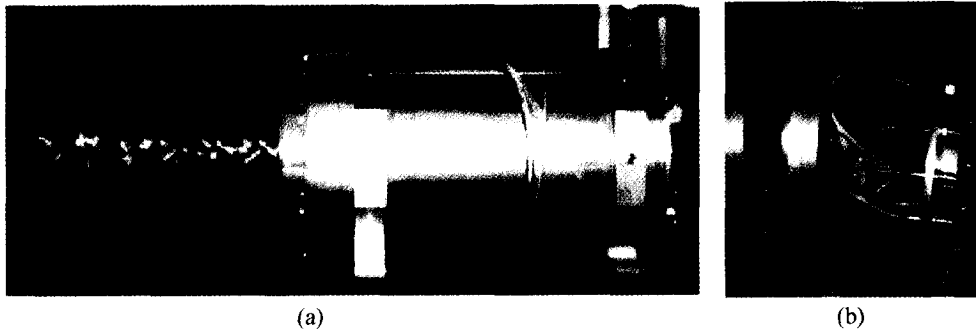


그림 9. MEIS 광학계 사진.

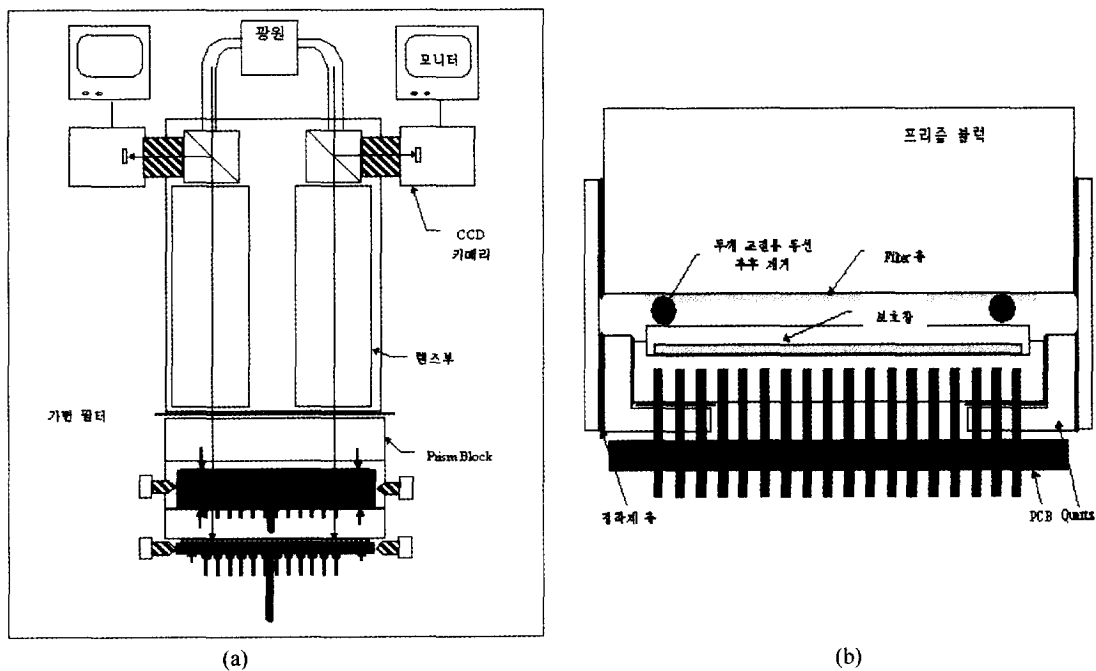


그림 10. 프리즘과 CCD의 정렬 및 결합.

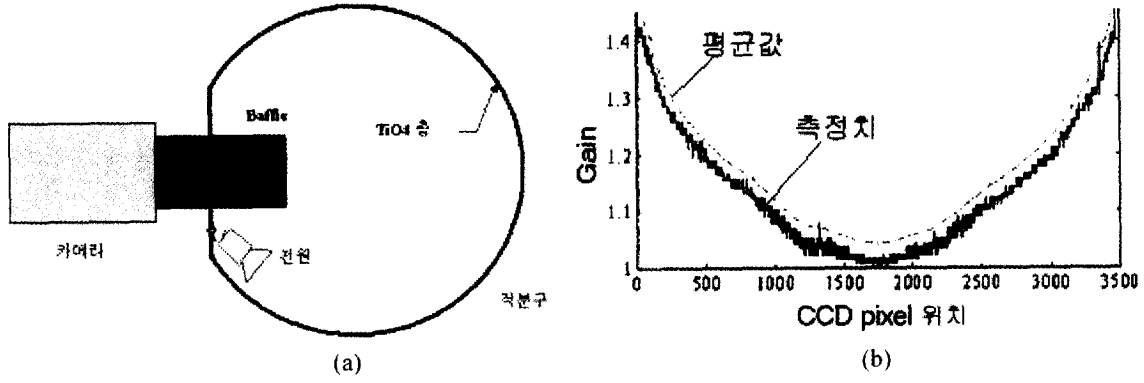


그림 11. MEIS 균일도 측정.

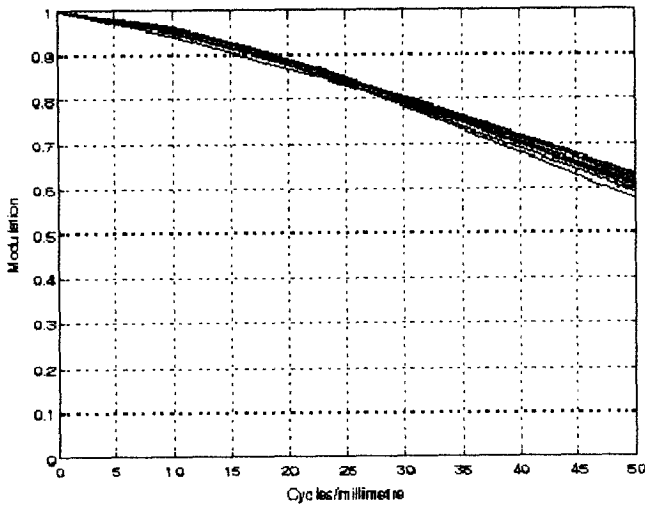


그림 12. CCD의 MTF 측정 값.

V. 운용현황 및 문제점 검토

5.1. 촬영 및 활용

카메라는 발사 후 위성 상태와 운용 계획에 따라 준비모드, 촬영모드(그림 13), 보정모드, 안전모드, 청소모드, 발사모드로 구분된다. 촬영모드는 카메라가 정상적인 동작을 하며 원하는

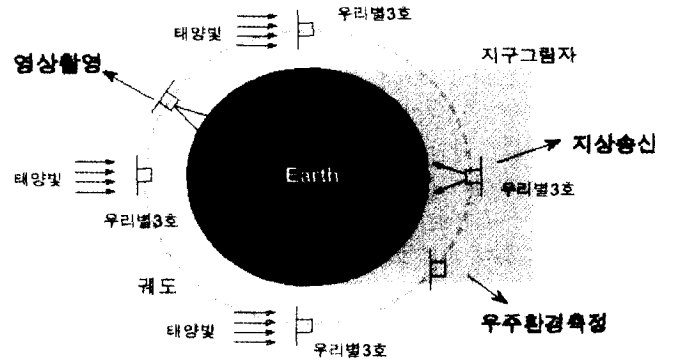


그림 13. 우리별 3호 촬영 모드.

지역의 영상을 출력하는 모드로, 출력되어진 영상은 전자부를 거쳐 실시간으로 메모리에 담기게 된다. 이 때에 채널 당 출력속도는 초당 약 1.6 MB 정도가 되며, 총 5 MB 정도가 출력된다. 촬영된 영상의 한 Scene은 46.5 km×26.7 km로 이뤄져 있으며, 한번에 12 Scene까지 연속적으로 촬영/저장할 수 있다. 촬영된 영상은 토지 분류등에 적용되고 있으며, 현재까지 촬영된 영상에 대하여는 인공위성연구센터의 홈페이지(<http://satrec.kaist.ac.kr>)내의 '우리별 영상 검색'을 이용하여 검색할 수 있다. 그림 14은 1999년 7월 14일 촬영된 Cairo의 영상 및 우리별3호 영상을 이용한 토지 분류의 예를 보여주고 있다.

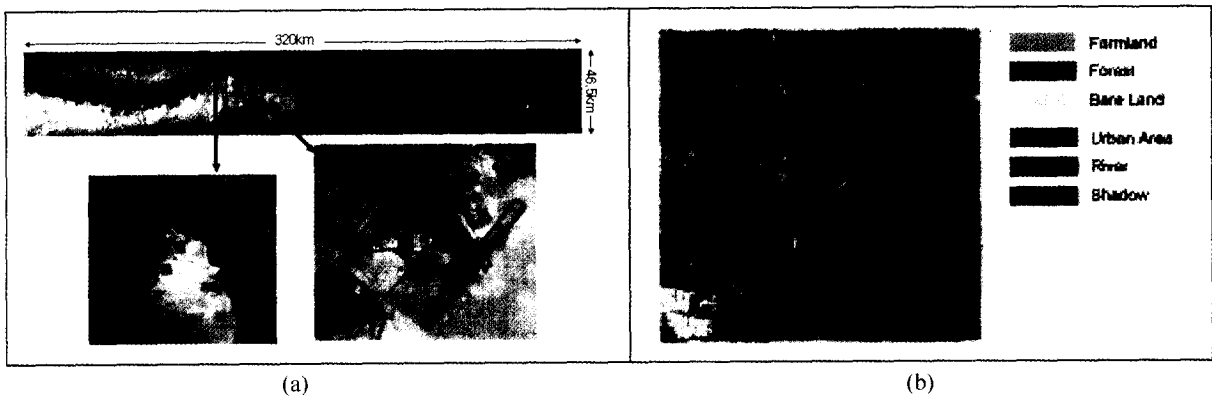


그림 14. MEIS 촬영 영상 및 영상의 활용.

5.2. 문제점

MEIS의 영상 보정은 기본적으로 촬영영상에 대하여 수행되어지고 있으며, 발사 전 측정된 교정(calibration) 값을 이용하였다. 실제 운영 시 방사선 노출 및 전자부품의 자연 성능 저하에 따라, 사막지역의 촬영 등의 방법으로 주기적 교정을 수행하고 이를 영상 해석에 반영했어야 하나, 실제적으로 이를 수행하지 못하고 있다.

또한, MEIS는 지상의 상태에 따라 지표면상에서 반사되어지는 광량에 큰 차이가 있기에 CCD의 포화방지 및 최적 신호 발생을 위하여 8개의 이득 단계를 회로상에서 구현하고 있는데, 이 단계 단위의 검증 시험이 이루어 지지 않아 화각(Field)에 따른 광량의 상대적 정확도가 떨어지고 있다. 실제로, 바깥쪽 영상이 지나치게 보정되어 중앙보다 밝게 나타나는 경우가 발생하기도 하였다.

VI. 결 론

우리별 3호의 광학계인 MEIS는 남아공화국 Stellenbosch 대학과 인공위성연구센터의 국제 공동 프로젝트로 개발된 Mangin형의 카메라로, 모든 광학 렌즈 및 내부 경통을 Fused Silica로 제작하여 우주방사선과 온도 변화의 따른 온도 변화가 적게끔 설계 되었고, CCD 및 전자부를 포함하였을 때 Nyquist 주파수에서 22%의 MTF를 보임으로써 설계 값(25%)에 가까운 값을 보였다. 발사 후 MEIS는 46.5 km(26.7 km의 Scene을 기본 단위로 하여 지상 촬영을 하였고, 촬영 후 광학계 및 CCD의 파장에 따른 특성 변화를 보상하기 위하여 각 CCD 화소 단위로 보정을 한 후 원격탐사에 이용되고 있다. 현재 운영상의 문제점으로는 CCD 화소의 교정을 주기적 및 단계별로 수행하지 않아 각 화각 및 파장에 대한 광량의 비가

얼마가 변했는지 확인되지 않고 있으며, 이로 인하여 영상이 지나치게 보정되는 현상이 발생하기도 하였다.

지구관측카메라 개발의 성공을 위해 발사 후 운영상에서 얻은 결과를 최대한 카메라 개발에 반영하는 작업이 필요하고, 이는 위성 카메라의 최종 목표인 지상 촬영 데이터의 과학적 의미를 갖기 위해서는 반드시 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 유상근, 장현석, 이흥규, 최순달, "우리별 3호 탑재 고해상도 CCD 카메라 시스템 개발," 한국원격탐사학회지, 한국원격탐사학회, 12권 2호, pp. 97-110, 1996.
- [2] Sungdong Park, Taejin Chung, Hyunwoo Lee, Yunhawang Jeong, Jinjoon Kim, Younghoon Shin, Dan Keun Sung, and Soon Dai Choi, "KITSAT-3 launch and initial operations," *Small Sat. Symposium, Japan, Oct., 1999.*
- [3] Wonkyu Park and Soondal Choi, "Application of KITSAT-3 images: automated generation of fuzzy rules and membership functions for land-cover classification of KITSAT-3 images," *ISRS, 1999.*
- [4] E. K. Kaprelian and W. E. Mimmack, US Patent 4061420, 1997.
- [5] O. Shuji, US Patent 4264136, 1981.
- [6] P. R. Yoder, *Opto-Mechanical Systems Design* (Marcel Dekker Inc., 1992), pp. 66-70.
- [7] S. F. Jacobs, "Unstable Optics," *Proc. SPIE*, vol. 1335, ed. R.A. Paquin, pp. 20-44, 1990.
- [8] 이준호, 유상근, 김도형, 임태경, 이완술, 조지현, "Active optics using thermal heaters in the KITSAT-3 optical Camera," in preparation.

Development of KITSAT-3 camera and current status of the operation

Jun Ho Lee[†]

KAIST Earth Observation Payload Development Unit, Daejeon 305-701, KOREA
[†]E-mail: jhl@satrec.kaist.ac.kr

Sang Keun Yoo

Han-Vision Ltd., Daejeon 305-346, KOREA

(Received June 21, 2001 ; revised manuscript received September 4, 2001)

KITSAT-3, launched at May 26 1999, has an earth observation optical payload named MEIS (Multi-spectral Earth Imaging System). The MEIS is a Mangin mirror telescope of aperture size of 95mm, and it images the ground with the ground sampling distance of 13.8m over 48km at the altitude of 720km using three different observations bands. This paper first presents the design and then the optics, relating results of manufacturing, integration and test. Finally it briefly discusses the current status of MEIS operation.

Classification code : SM.020.