

技術論文

2.5m 해상도 지구관측 카메라 MAC 비행모델의 지상 MTF 성능 측정

김도형*, 최영완*, 양호순**

MTF Measurement for Flight Model of MAC, a 2.5m GSD Earth Observation Camera

Eugene D. Kim*, Young-Wan Choi* and Ho-Soon Yang**

ABSTRACT

The Flight Model of MAC (Medium-sized Aperture Camera), a 2.5m GSD class earth observation camera has been aligned and assembled. Topics discussed in this paper include the ground MTF performance of the MAC system, and the alignment of the focal plane assembly. MTF was measured by a knife-edge scanning technique, and a 450 mm diameter Cassegrain collimator with diffraction-limited performance was made and used for the MTF measurements. System MTF was used as the figure-of-merit to find the best focus of the focal plane assembly.

초 록

해상도 2.5m 급 지구관측 카메라인 MAC(Medium-sized Aperture Camera)의 비행모델이 정렬 및 조립되었다. 본 논문에서는 지상에서 측정된 MAC의 시스템 MTF 성능, MTF를 이용한 초점면부의 정렬 등에 대해 논의한다. 칼날주사방식을 이용하여 MAC의 시스템 MTF를 측정하였고, 이를 위해 회절한계 성능의 구경 450 mm 급의 카세그레인 시준기를 만들어 사용하였다. 시스템 MTF를 이용하여 CCD 검출기 초평면부의 최적의 초점에 정렬하였다.

Key Words : Space Camera MTF Measurement (위성용 카메라 MTF 측정), Focal Plane Assembly Alignment (초점면부 정렬), Earth Observation Camera (지구 관측 카메라)

1. 서 론

위성용 광학 카메라의 공간 주파수 반응 (spatial frequency response) 요구조건은 통상적으로 나이퀴스트 (Nyquist) 주파수 등의 특정 공간 주파수 상에서의 변조전달함수 (modulation transfer function)로 주어지며, 최종 조립 후 요구조건을

맞추기 위해 설계 단계에서부터 고려한다. 카메라의 망원경부만의 MTF를 측정하기 위해서는 망원경부를 이중통과 (double-pass) 구조로 설치하고 간섭계를 이용하여 파면오차를 측정된 후, 이를 자기상관법 (autocorrelation)으로 MTF를 구하는 비교적 간단한 방법을 쓸 수 있다. 그러나 카메라의 MTF 요구조건은 일반적으로 망원경부에 검출기, 신호처리부 등의 전자부가 포함된 카메라의 시스템 MTF로 주어진다. 지상에서의 시스템 MTF의 경우, 각 부분 별 MTF의 단순 곱으로도 (MTF cascading) 표현할 수 있으나 (수식 1), CCD나 신호처리부 등의 MTF 특성이 명확히 알려지지 않은 경우, 카메라의 시스템 전체

† 2005년 3월 9일 접수 ~ 2005년 8월 29일 심사완료

* 정희원, (주)셋트레이

연락처, e-mail : edk@satreci.com

대전시 유성구 전민동 461-26

** 한국표준과학연구원

를 포함하여 MTF를 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

$$MTF_{Design} \times MTF_{Telescope} \times MTF_{Detector} \times MTF_{Signal_elec} = MTF_{System}$$

수식 1. MTF cascading for a camera system

지상에서 위성용 광학계의 시스템 MTF를 측정하는 방법으로는 여러 가지가 있으나 서브픽셀 단위로 정밀한 날퍼짐함수(edge-spread function)를 이용하는 칼날주사(knife-edge scanning) 방법이 많이 쓰인다.¹⁾ 그림 1은 MAC의 MTF 측정에 이용한 칼날주사방법의 개념도를 나타낸다. 이 방법에서는 직접 카메라의 CCD 및 신호처리부를 이용할 수 있기 때문에 카메라의 시스템 MTF를 구할 수 있다. 칼날주사시험에서는 측정시, 시준기(collimator)에 의한 MTF 저하를 최소화 하기위해 회절한계(diffraction-limited) 성능을 가지고, 시험하고자 하는 카메라보다 최소한 같거나 큰 구경의 시준기를 이용한다. 또한, 시준기의 초점길이가 시험하고자 하는 카메라의 초점길이 보다 길면 길수록 시준기의 초점에서 움직이는 칼날의 진동 등에 의한 노이즈를 카메라의 CCD 상에서 최소화하는 데 유리하다.

시준기를 이용하여 시준기의 초점에서 칼날을 주사하여 칼날의 상이 시험하고자 하는 카메라의 CCD의 임의의 한 픽셀에서 움직이며 형성하는 날퍼짐함수를 얻고, 이를 미분하여 선퍼짐함수(line-spread function)를 구하고, 이를 다시 푸리에(Fourier) 변환하여 원하는 공간주파수 영역에서의 MTF 곡선을 구할 수 있다.

이와 같이 지상에서 측정한 MTF는 나이퀴스트 주파수에서 요구조건을 확인하는데 이용하고, 또한 초점면부의 초점이 가장 잘 맞을 때 MTF가 가장 높기 때문에 초점면부를 정렬하는데 이용할 수 있다. 또한, MTF 곡선은 이와 같은 카메라 시스템이 있는 경우, 알고 있는 영상이 얼마나 나빠질 수 있는지 예측하는데 이용할 수 있다.

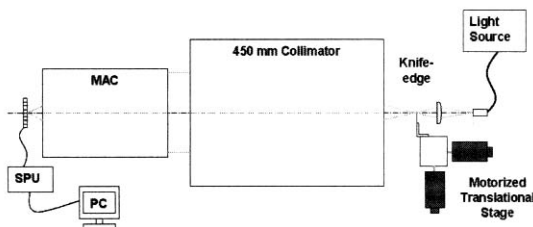


그림 1. Knife-edge scanning method for system MTF measurement

본 논문에서는 현재 우리나라의 (주)썬트렉아 이와 말레이시아의 ATSB社가 공동으로 개발 중인 200kg 급 소형 지구관측 위성 RazakSAT (前 MACSAT²⁾)의 주탑재체인 MAC (Medium-sized Aperture Camera)의 비행모델 개발과정에서 적용한 MTF 측정, 실험 장치, MTF 계산을 위한 노이즈 제거, MTF를 이용한 초점면부 정렬 등에 대해 논하고, 실제 지상에서 측정된 MAC 비행모델의 음향진동시험 후의 카메라 시스템 MTF 결과를 정리한다. (MAC 시스템 및 광학계에 대한 전반적인 사항은 이미 소개된 바 있다.^{3),4)} 2005년 3월 현재, MAC은 비행모델까지의 조립/시험이 끝나고 본체 버스와 조립되어 2005년 하반기 발사를 목표로 최종 기능 시험 중에 있다.

II. 본 론

2.1 MAC 시스템 MTF 성능 측정

칼날주사방식을 이용한 MAC 비행모델의 시스템 MTF를 측정하기 위해서 그림 2와 같은 구경 450 mm 크기의 시준기를 사용하였다. 이전 모델인 인증모델의 MTF 측정 시에는 초점거리가 4m인 비축포물면경(off-axis paraboloid)을 이용하였다. 초점거리 때문에 시준기와 광원사이가 4m 가량 떨어져 있어야 했기 때문에 공기유동 등에 의한 노이즈 문제로 카세그레인(Cassegrain) 방식 시준기를 국내에서 설계/제작하여 사용하였다.

카세그레인 방식의 시준기는 더 긴 초점거리를 가지면서도 (MAC 초점거리의 3배 이상) 광학테이블 상의 공간 효율성을 높여 공기 유동 문제를 줄여준다. 시준기의 주/부 반사경은 한국표준과학연구원에서 RMS 파면오차 1/24λ의 정밀도로 가공/측정하였고⁵⁾, 썬트렉아에서 광학/광기계 설계, 조립 및 정렬을 담당하였다.⁶⁾ 그림 3은 완

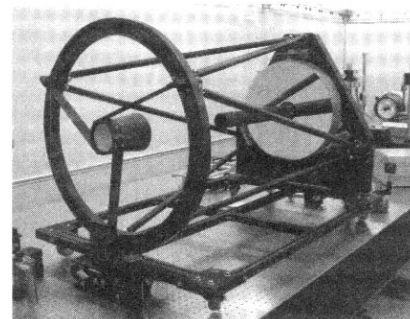


그림 2. 450 mm diameter Cassegrain collimator

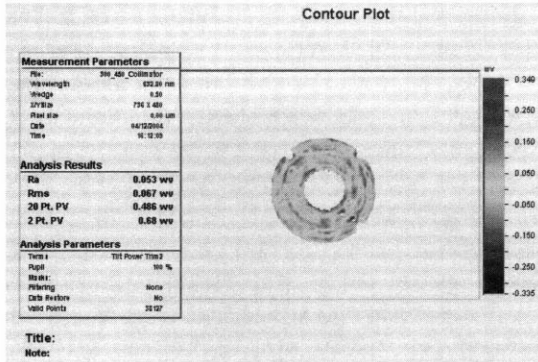


그림 3. Diffraction-limited RMS wavefront of the assembled collimator



그림 4. MAC system MTF measurement setup

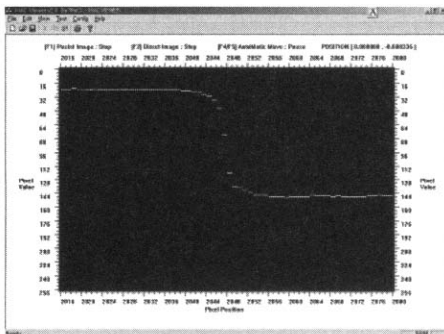


그림 5. Edge-spread function (ESF) captured from MAC C C D

성된 시준기의 RMS 파면오차가 HeNe 633nm 파장에서 0.067λ로 회절한계 성능을 가짐을 보여준다.

그림 4는 광학실에서 시준기와 MAC이 마주보고 있는 시스템 MTF 측정 장치를 보여준다. 칼날은 시준기의 초점에 배치하고, 광축에 수직 방향으로 주사할 수 있도록 2축 선형 구동기를 설치하였다. 공기의 유동에 의한 효과를 최소화하

기 위해 텐트를 2중으로 설치하였다. 광원은 600W 퀴츠-텅스텐-할로겐 램프를 이용하였다. 측정 환경은 방진 시스템을 갖춘 열진공 챔버 안에서의 시험이 이상적이나, 아직 국내에는 기반 시설이 갖춰져 있지 않는 관계로 본 실험은 15°C의 항온 항습 광학실에서 수행하였다.

MAC의 CCD에 맺힌 칼날의 상을 잡기 위해 MACVIEWER라는 프로그램을 자체 제작하여 CCD에서 받아들이는 광량을 디지털 숫자로 표시하였다(그림 5). MACVIEWER 상에서 선형 구동기를 구동시켜 칼날을 광축에 수직 방향으로 주사시켜 임의의 픽셀에서 날퍼짐함수 데이터를 측정하였고, 이렇게 얻은 날퍼짐함수를 미분하여 선퍼짐함수를 계산하였다(그림 6).

이 때, 공기의 유동, 칼날주사부의 진동 등에 의해 생긴 날퍼짐함수에서의 미세한 진동이라도 이를 미분한 선퍼짐함수에는 크게 작용함을 알 수 있다. 그림 7은 이와 같은 미세한 진동이 포함된 날퍼짐함수를 보여주고, 그림 8은 선퍼짐함수를 보여준다. 이와 같이 급격히 변하는 선퍼짐함수를 푸리에 변환하면 역시 MTF 곡선도 단순

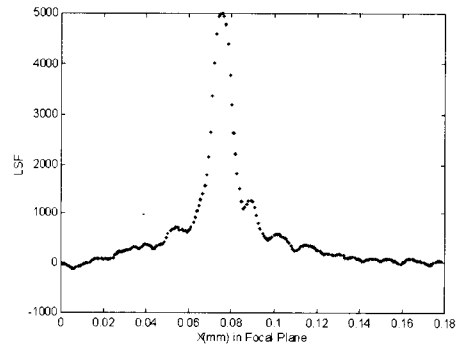


그림 6. Line-spread function differentiated from ESF

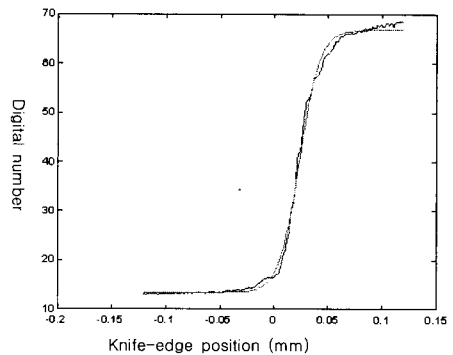


그림 7. Raw and fitted edge-spread function

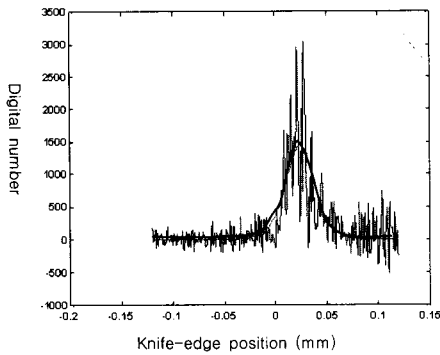


그림 8. Line-spread functions (LSF) from raw and fitted ESF

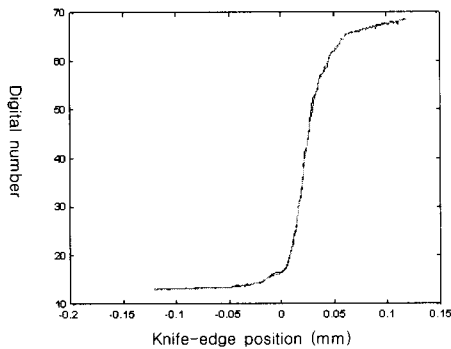


그림 9. Raw and smoothed ESF

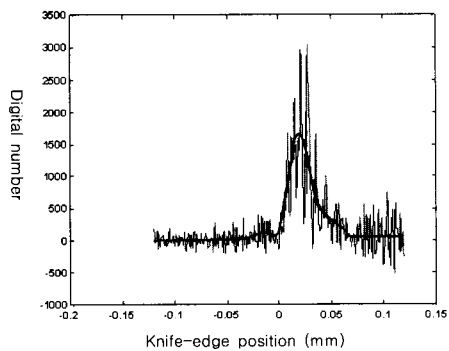


그림 10. LSFs from raw and smoothed ESF

감소하지 않고 나이퀴스트 주파수 근처에서 다시 증가하거나 주기적으로 변하기 때문에 날퍼짐함수의 노이즈를 줄여야 한다.

노이즈를 줄이는 방법으로 날퍼짐함수에 대한 fitting과 smoothing을 이용하였다. Fitting은 hyperbolic tangent 함수를 이용하였는데, 날퍼짐함수의 전체적인 형상을 잘 따라가지 못 함을 알 수 있다(그림 7). 이를 미분하여 구한 선퍼짐함수

(그림 8)로 푸리에변환한 MTF 곡선은 단조감소하는 매끄러운 곡선을 얻을 수 있지만, 나이퀴스트 주파수에서의 MTF가 비현실적으로 낮은 0에 가까운 수치여서 쓸 수 없었다. Smoothing은 spline smoothing을 이용하여 원 날퍼짐함수의 형상을 살렸다(그림 9).

Smoothing 시, smoothing tolerance에 따라 원래 날퍼짐함수의 전체적인 형상에도 영향을 미치기 때문에 최종 MTF 곡선에 영향을 주는데, 원래 날퍼짐함수의 노이즈를 최소화하면서도 전체적인 형상의 변형도 최소화하는 tolerance를 찾아야 한다. 그림 10은 원래 선퍼짐함수와 날퍼짐함수 smoothing을 한 후 얻은 선퍼짐함수를 보여준다.

2.2 MTF를 이용한 초점면부 정렬

MAC의 시스템 MTF 측정 방법이 정립된 후, 이를 이용하여 초점면부(Focal Plane Assembly)를 최적의 초점에 정렬하였다. MAC은 전 채널이 같은 광학계를 이용하는 방식을 이용한다. 따라서 한 평면 상에 선형 CCD를 모두 놓고 보기 때문에 다른 설계에 비해 상대적으로 (상하) 시야가 크고, 초점면부의 크기도 80 mm × 40 mm로 넓다. 따라서 초점면부의 정렬 시, 초점면부의 중앙 뿐 아니라 상하좌우 끝 부분들도 모두 초점을 맞추어야 한다.

초점면부를 정렬하기위해 우선 초점면부 중앙에서의 초점을 맞추었다. 최적의 초점을 찾는 방법으로는 MAC 초점 근처에 초점면부를 놓고, 칼날 주사 위치를 시준기의 축상에서 이동시키면서 각 위치마다 MTF를 측정한 후 특정 주파수 상에서 가장 좋은 MTF를 주는 칼날의 축상 위치를 찾았다. 시준기와 MAC의 초점거리를 이용한 전체 광학계의 종배율로 MAC 초점면부가 축상으로 움직여야 할 거리를 계산하였다. 그림 11

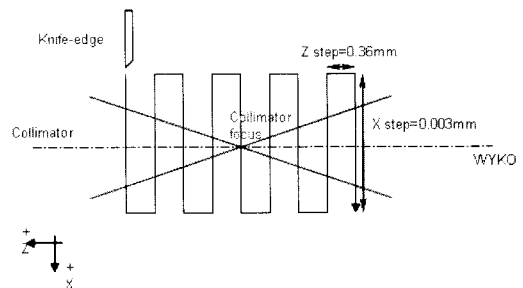


그림 11. Knife-edge scanning scheme near the focus of collimator to find best focus at MAC

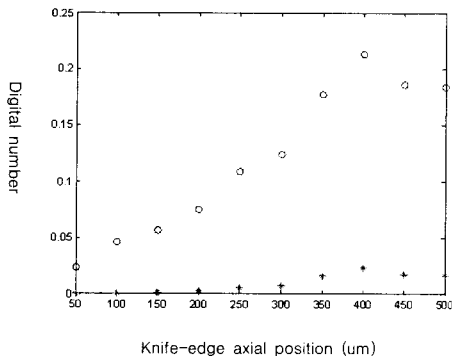


그림 12. MTF measured at different knife-edge scanning axial-positions

은 시준기 초점 근처에서 MACVIEWER와 선형 모터를 이용하여, 자동으로 칼날을 주사시킨 모습을 보여준다. 그림 12는 주사한 칼날의 축 상 위치에 따른 임의의 주파수에서 측정된 MTF 값들을 보여준다. 특정 축상 위치에서 최대치를 가짐을 볼 수 있다. 이로부터 MAC의 초점면부의 축상오차를 계산하여 보정해줌으로써 초점면부를 정밀하게 정렬할 수 있다.

이와 동일한 방식으로 상하좌우 4곳에서의 MTF를 측정하여 초점면부의 기울기를 조절하여 최적의 위치에 초점면부를 정렬하였다.

2.3 MAC 비행모델 시스템 MTF 결과

MAC의 초점면부를 정렬한 후, 초점면부의 채널별, 광축 및 비축 시야별 MTF를 측정하였다. 그림 13은 CCD 상에서 측정된 총 15 곳의 위치를 보여준다.

MAC 비행모델의 초점면부 조립 후, RazakSAT 인증모델과 조립하여 음향진동시험을 한국항공우주연구원에서 실시하였다. 이전 모델인 MAC 인증모델의 경우, 진동시험 후 부경이 들어지는 문제가 있었으나 MAC 구조물의 보강 후 비행모델에서는 이런 문제가 발생하지 않았

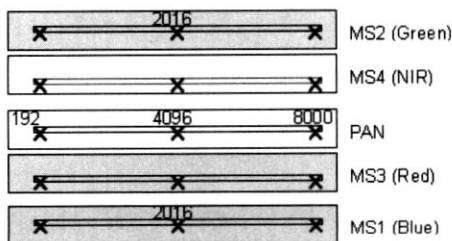


그림 8. CCD layout and MTF measurement points

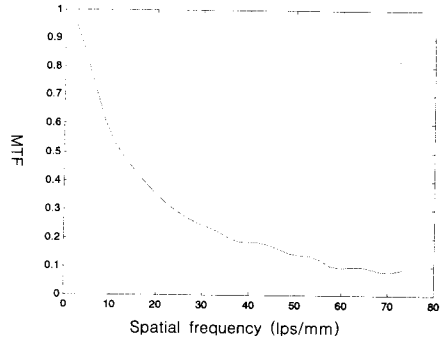


그림 14. MAC Flight Model MTF at PAN (0.0908 @ 73.2 lps/mm)

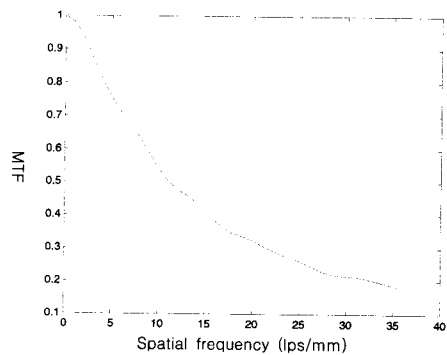


그림 15. MAC Flight Model MTF measured at MS2 0.1824 @ 35.5 lps/mm

다. 또한, MTF 측정 결과도 FM acceptance acoustic test 전과 후의 결과가 거의 변화가 없는 것으로 측정되었다. (시험 전 0.1853, 시험 후 0.1824 @Nyquist frequency, MS2, on-axis field)

MAC 비행모델의 음향 진동 시험 후 MTF를 측정된 결과, 그림 13 상의 모든 위치에서 MTF가 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다. 그림 14와 그림 15는 각각 PAN 채널과 MS2 채널중앙에서의 MTF 곡선을 보여준다. 각각 나이퀴스트 주파수보다 약간 높은 주파수에서도 지상에서의 카메라 시스템 MTF 요구조건 (모든 시야에서 PAN ≥ 8%, MS ≥ 15%)을 만족함을 알 수 있다.

III. 결 론

해상도 2.5 m 급 지구관측 카메라 MAC의 비행모델의 시스템 MTF를 지상 광학실 환경에서 측정하였다. 구경 450 mm의 카세그레인 시준기를 만들어 MAC에 평행빔을 입사시키고, 시준기의 초점에서 칼날주사방법을 이용하여 MTF 곡

선을 추출하였다. 날퍼짐함수는 (따라서 MTF 곡선은) 환경적 요인, 특히 공기유동과 진동에 민감함을 알 수 있었다. 칼날주사에 의한 날퍼짐함수의 형상에서 노이즈를 줄이기 위해 날퍼짐함수의 fitting 및 smoothing 등을 적용하였는데, smoothing이 더 적합함을 알 수 있었다. 정립된 MTF 측정방법을 이용하여 MAC 초점면부를 정렬하였다. MAC 초점면부의 정렬/조립 후, MAC 비행모델의 음향진동시험을 거치고 다시 시스템 MTF를 측정하였는데, 채널 별 (5개 채널), 주시야 별 (채널 당 3개) MTF 측정에서 모두 지상 요구 조건을 만족 시킴을 확인하였다.

MAC 비행모델이 성공적으로 발사된 후에는 우주 궤도상에서 지상의 표적을 찍어 MTF를 측정할 예정이다. 지상의 알려진 대비(contrast)가 큰 표적 등을 사용하여 날퍼짐함수/점퍼짐함수 등을 구하고, 지상에서의 MTF 계산법과 유사한 방식으로 시스템 MTF를 구한다.⁷⁾ 향후 이와 유사한 지구관측 카메라를 개발 시, 더 향상된 지상에서의 위성용 광학탐재체 MTF 성능 측정을 위해 방진 시스템을 갖춘 열진공 챔버 등 측정 환경 개선이 필요하다.

규모는 작으나 실제로 MAC 비행모델의 MTF 측정 방법을 정립함으로써, MAC에서의 경험이 향후 이와 유사한 위성용 지구관측 카메라의 국내 개발 시, MTF 측정에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) B. P. Canova, et al, "Modulation transfer function testing of a time-delay-integrate charge-coupled-device imager using a flashlamp light source", SPIE Proc. Vol. 3750, 1999, pp. 368-374.
- 2) B-J Kim, S. Park, E-E Kim, et al., "MACSAT - A Mini-Satellite Approach to High Resolution Space Imaging", 17th AIAA/USU Conf. on Small Satellites, 2003, SSC03-VI-8.
- 3) E. D. Kim, Y-W Choi, M-S Kang, et al, "Medium-sized Aperture Camera for Earth Observation", Proc. of the 5th International Conf. on Space Optics, 2004, pp.137-140.
- 4) 김도형, 최영완, 강명석 외, "컴퓨터를 이용한 지구관측 카메라의 광학정렬", 한국항공우주학회지 제32권10호, 2004, pp.142-146.
- 5) 양호순, 김종운, 이윤우 외, "직경 450 mm Cassegrain 형태 시준장치의 제작 Development of diameter 450 mm Cassegrain tline collimator", 한국광학회지 v.15, n.3, 2004, pp.241-247.
- 6) 김종운, 강명석, 양호순 외, "구경 450mm Cassegrain Type 시준장치의 기계구조 개발", 한국광학회 하계학술발표회, 2004, pp. 234-235.
- 7) H-S Jang, D-J Jung, S-H Lee, "MTF analysis of KOMPSAT 1 from on-orbit image", Int. Symp. Remote Sensing, KSRS, 2004, 1703-12.