

# 통신해양기상위성의 해양탐재체 광학계 설계 해석

## Verification of the GOCI optical design analysis in COMS

김성희\*, 윤형식 (한국항공우주연구원 해양기상탐재체그룹)  
 김석환 (연세대학교 천문우주학과)  
 Kim Seonghui\*, Youn Heong-Sik (KARI)  
 Kim Sug-Whan (Yonsei University)

### 1. 서 론

통신해양기상위성(COMS)의 해양탐재체(GOCI)는 한반도 주변의 실시간 첨단 수산 정보 제공을 위한 가시광선 및 근적외선 영역의 관측을 목적으로 한다. 통신해양기상 위성은 통신, 해양 및 기상 탐재한 복합형태의 정지 궤도 위성으로 고도 36786 km에서 항상 한반도 관측이 가능하다.

해양탐재체는 위와 같은 목적을 위하여 한반도 주변 영역 2500 km × 2500 km에 대하여 500 m의 해상도를 갖는 광학계가 요구된다. 본 논문에서는 이러한 요구사항을 만족시키도록 설계된 광학계의 특성을 분석하고 그 목적을 달성할 수 있는지 여러 가지 해석을 하였다.

### 2. 광학계의 특징

광학계는 TMA 방식으로 설계되어 색수차를 완전히 제거하였으며 공간을 적게 차지하여 효율적인 기기 배치가 가능하다(그림 1). 또한 스캔(scan) 방식으로 지향 미러(pointing mirror)를 움직이는 방법을 사용하여 넓은 시야를 가지는 광학계의 성능 한계를 극복하였다. 설계된 광학계는 표 1과 같은 특징을 가진다.

광학계의 구성은 이미지 스캐닝을 위한 포인팅 미러(pointing mirror)와 광학계의 방향을 변화시켜주는 폴딩 미러(folding

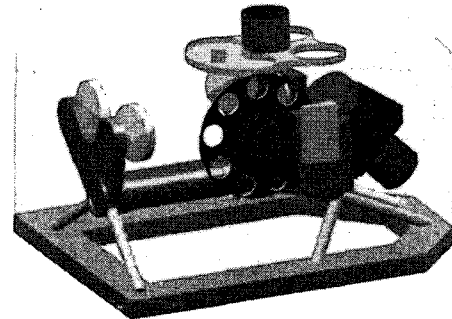


그림 1 GOCI 모의 디자인 결과

표 1 GOCI 광학계의 특징

대상	내용
방식	TMA (Three mirror anastigmat)
초점거리	1171 mm
구경	140 mm
시야각	± 0.7 deg
Pixel	14.81 μm × 11.53 μm
초평면	21 mm × 16.5 mm

mirror), 필터를 포함하여 그림 2와 같이 구성된다. 각 광학 부품의 형태와 크기는 표 2와 같다.

지상 해상도 500 m 요구사항은 검출기의 나이퀴스트 주파수(nyquist frequency)에서 광학계의 MTF값이 0.3 이상이어야 한다. 설계된 광학계의 각 채널별 이상적인 성능은 다음 표 3 과 같다. 이상적인 성능은 MFT값이 0.59 ~ 0.78 정도로 매우 높으며,

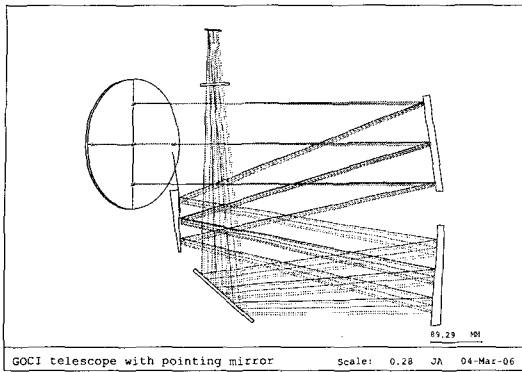


그림 2 Optical layout

표 2 GOCI 광학계 구성 요소

대상	광학면	크기
PM	flat	D = 220 mm
( pupil	-	D = 140 mm )
M1	conic	D = 162.8 mm
M2	conic	D = 102.9 mm
M3	sphere	D = 165.6 mm
FM	flat	D = 133.1 mm
filter	flat	T = 4 mm
detector window	flat	T = 2 mm

표 3 GOCI 광학계의 설계 성능

파장	MTF EW (34/mm)	MTF NS (44/mm)
412 nm	0.830	0.780
443 nm	0.820	0.770
490 nm	0.800	0.750
555 nm	0.780	0.720
660 nm	0.750	0.680
680 nm	0.740	0.670
745 nm	0.710	0.640
865 nm	0.670	0.590

파장이 길수록 회절의 효과가 크게 작용하여 값이 낮아지는 경향을 보인다.

GOCI에서 사용되는 검출기는 픽셀이 직사각형의 형태를 가지고 있기 때문에 시야의 동서 방향과 남북 방향의 나이퀴스트 주파수가 달라진다. 따라서 MTF값은 가로

방향(동-서)과 세로 방향(남-북) 방향에 대하여 다른 값을 갖는다.

### 3. 광학계의 공차 분석

GOCI 광학계는 나이퀴스트 주파수 (nyquist frequency)에서 모든 파장 영역에서 0.3 이상의 MTF 성능을 가져야 한다. 광학계의 이상적인 설계상의 성능은 다음 표 3과 같다. 검출기의 픽셀이 직사각형의 형태를 가지고 있기 때문에 시야의 동서 방향과 남북 방향의 나이퀴스트 주파수가 다르고 이에 따른 MTF값이 달라진다.

시스템 전체의 MTF 값은 광학계와 검출기, 번짐 효과(smearing)에 의한 MTF 값의 곱으로 계산되어진다. 본 논문에서는 검출기와 번짐 효과는 주어진 모델에 따른 값을 사용하고, 광학계에 의한 성능 저하 현상만을 고려하여 분석하였다.

MTF 0.3의 오차는 다음 표 4과 같이

표 4 GOCI 광학계의 허용오차

세부분류	값
광학계 설계값	17 nm
광학계 가공 오차	30 nm
광학계 조립 오차	20 nm
광학계 정렬 오차	12 nm
중력에 의한 변형	10 nm
탑재체 안정도	20 nm
검출기 윈도우	10 nm
필터 가공 오차	10 nm
필터 조립 오차	5 nm
필터 고정 안정도	10 nm
초점 부정확도	26 nm
전체 허용 오차	<b>57 nm</b>
할당량	<b>60 nm</b>
여유분	5.3 %

각 오차 요인별 요구사항에 따라 전체 광학계 파면오차 60 nm로 구성되었다.

이와 같은 광학계의 오차는 각 광학계 면

의 위치 오차(position error)와 가공 오차(fabrication error)로 나타난다. 위치 오차는 광학계의 5자유도에 해당하는 것으로 조립 및 정렬, 변형 등의 원인으로 발생하며 가공 오차는 가공 시 발생하는 광학계 면의 벗어남 정도이다. 이러한 광학계 오차를 분석하기 위하여 광학면의 파면오차를 임의로 생성해 주는 방법을 사용하였다. 이 과정은 다음과 같이 수행되었다.

1) Zernike polynomial 로 대변된 광학계의 각 구성원 pupil 에 무작위 값을 주어 전체 파면 오차(total wavefront error)가 60 nm가 되도록 한다.

2) 이와 같이 생성된 광학계의 MTF를 측정한다.

3) 이러한 과정을 반복하여 무작위로 설정된 광학계의 오차 값을 가진 MTF의 값을 얻어낸다.

위와 같은 과정을 200회 거친 후 통계적으로 95% 이상의 확률을 가지게 되는 MTF값은 다음 표 5와 같다.

최종 MTF값은 위 표 5의 결과와 Detector, Smearing을 고려하여 표 6와 같이 계산된다. 표 6에서는 남북 방향의 MTF값만이 고려되었으며, 동서 방향의 MTF 값은 표 4, 5에서 보이는 것과 같이 남북 방향보다 큰 값을 가지게 되어 고려하

표 5 광학계 공차 분석 결과  
(95 % 확률분포)

파장	MTF EW (34/mm)	MTF NS (44/mm)
412 nm	0.636	0.508
443 nm	0.626	0.508
490 nm	0.624	0.509
555 nm	0.623	0.504
660 nm	0.606	0.500
680 nm	0.604	0.493
745 nm	0.597	0.491
865 nm	0.568	0.461

지 않아도 된다. 표 6을 통하여 최종적으로 예측되는 성능(performed MTF)은 허용오차(GOCI allocation) 이내임을 확인할 수 있다. 여유분은 412 nm에 해당하는 파장 대역을 제외하고 약 5 % 이상이다. 따라서 표 4에서 제시하였던 60 nm 파면오차의 할당량이 적합함을 확인할 수 있었다.

광학계 가공 오차 30 nm는 광학계의 곡률 반경 오차와 표면 불균일 오차로 나뉘어진다. 곡률 반경 오차는 다음 표 7과 같이 주어지며, 표면 불균일 오차는 다음 표 8과 같이 10-15 nm로 주어진다. 표 8의 수치들은 가공 후의 변형에 의한 영향을 고려한 것으로 미리 각각의 가공 과정이 끝났을 때 측정된 파면오차는 RMS 5 nm이하가 되어야 한다.

표 6 GOCI 광학계의 최종 분석 결과 (남북 방향의 경우)

Spectral Band	Optical MTF	Detector MTF	Smearing MTF	Performed MTF	GOCI Allocation	Margin
412 nm	0.508	0.700	0.854	<b>0.304</b>	0.300	1.2 %
443 nm	0.508	0.690	0.854	<b>0.299</b>	0.284	5.4 %
490 nm	0.509	0.680	0.854	<b>0.296</b>	0.275	7.5 %
555 nm	0.504	0.670	0.854	<b>0.288</b>	0.265	8.8 %
660 nm	0.500	0.650	0.854	<b>0.278</b>	0.252	10.2 %
680 nm	0.493	0.640	0.854	<b>0.269</b>	0.243	10.9 %
745 nm	0.491	0.630	0.854	<b>0.264</b>	0.234	12.9 %
865 nm	0.461	0.610	0.854	<b>0.240</b>	0.222	8.2 %

표 7 미러 제작 시 곡률반경 허용오차

Mirror	ROC(mm)	Tolerance(mm)
Pointing mirror	infinity	-
Mirror 1	- 1810.43	± 0.9
Mirror 2	+ 626.36	± 0.3
Mirror 3	- 1071.48	± 0.4
Flat mirror	infinity	-

표 8 미러 제작 시 표면 균일도 허용오차

Mirror	WFE(nm RMS)
Pointing mirror	15
Mirror 1	15
Mirror 2	15
Mirror 3	12
Flat mirror	10

#### 4. 결 론

통신해양기상위성의 해양탐재체(GOCI)의 설계 검증을 위하여 광학계의 공차분석을 수행하였다. 주어진 광학계의 오차(표 3)에 대한 무작위 에러에 대하여 통계적인 MTF 결과 수치를 얻어내었으며 이를 통하여 원하는 GOCI 광학계의 성능을 만족시킴을 확인하였다.