

연안 / 해양

및

달 탐사를

위한

E O / I R

광학계

개발

및

시험

검증

한국해양과학기술원

↑
5cm
↓

↑
7cm
↓

연안/해양 및 달탐사를 위한 EO/IR 광학계 개발 및 시험 검증

(20 포인트 중고딕체)

Development and verification of EO/IR opatical system for coastal/ocean monitoring and lunar exploration

(16 포인트 명조체)

주 의
(편집순서8)

(16 포인트 고딕체)

↑
7cm
↓

한국해양과학기술원

(20 포인트 중고딕체)

↓
7cm
↑

연안/해양 및 달탐사를 위한
EO/IR 광학계 개발 및 시험 검증

Development and verification of EO/IR optical system
for coastal/ocean monitoring and lunar exploration

한국생산기술연구원

제 출 문

한국기초과학지원연구원장 귀하

본 보고서를 “창의산업육성을 위한 첨단광분석장비 개발사업”의 위탁사업인 “연안/해양 및 달탐사를 위한 EO/IR 광학계 개발과 시험 검증”사업의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 12.

총괄연구책임자 : 김 건 희

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술원

위탁연구책임자 : 조 성 익

요 약 문

I. 과제요약서

고유번호	(D37500)	보안등급분류	보안(), 일반()	공개가능여부	가, 부
위탁과제명	연안/해양 및 달탐사를 위한 EO/IR 광학계 개발 및 시험 검증				
위탁연구 책임자	(성명) 조 성 익		(과학기술인등록번호) 1091 3320		
	(소속기관명) 한국해양과학기술원		(E-mail) sicho@kiost.ac	(전화번호) 031-400-7685	
	(지역) 경기도 안산시		(전공) 천문우주	(학위) 석사	

가. 연구목표

- 신속성과 다용성을 갖춘 무인항공기 탑재용 고해상도(<1m) 소형(<1.5kg) 전자 광학/적외선(EO/IR) 광학계 개발과 시험 검증

II. 연구개발의 필요성

가. 연구개발대상 기술의 경제적·산업적 중요성 및 연구개발의 필요성

<p>1. 연구개발대상 기술의 중요성</p> <p>○ 과학기술적 측면</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연안 지형과 생태환경 분포의 시간적 변화 및 인공구조물에 의한 영향 파악 등을 위한 기존의 연구 방법은 시·공간적으로 많은 현장조사가 필요하며 이는 많은 비용과 시간의 투자가 필요함. 그에 따라, 고해상도 광학위성을 이용한 연안/해양환경 연구가 진행 중이나, 위성영상의 촬영 주기 제한 (15일 이상)과 기상 상태에 따른 영상 획득 제한 등 연구 자료 획득에 많은 어려움이 나타남. - 현재, 사용자가 원하는 시기에 적은 비용으로 고해상도 영상자료를 확보할 수 있는 유·무인항공 시스템 활용의 필요성이 높아지고 있으나, 이에 최적화된 광학 센서의 개발은 미미한 실정임. 따라서 인공위성을 활용한 자료 획득의 한계 극복과 연안 환경의 효율적 관리를 위해 유·무인항공 시스템 기반의 다중 광학 센서 개발의 중요성이 대두되고 있음 <p>○ 사회경제적 측면</p> <ul style="list-style-type: none"> - 최근 지구 온난화와 인위적 변화로 인하여 연안/해양환경은 빠르게 변화하고 있으며, 특히 국내의 경우 지속적인 간척사업으로 인하여 조류 흐름 변동에 따른 갯벌 지형의 급격한 변화 및 연안 식생의 변화가 일어나고 있음 - 갯벌 지형과 생태환경 변화는 기후변화와 연안/해양 지역에 형성된 인공

구조물의 영향을 평가하는데 활용이 가능함. 따라서 갯벌 퇴적물 특성과 식생의 지속적인 변화에 대한 심도있는 연구가 필요함

2. 연구개발의 필요성

- 연안/해양 재난·재해의 빈번한 발생 등 현안 대응 측면과 달표면, 극지 탐사와 같은 기초과학적 목적을 달성하기 위하여 사용자 맞춤형 광학계 필요성이 점차 대두됨
- 최근 선진국의 달탐사 프로젝트에서 적외선 대역 이미징을 통한 달지질/자원 탐사가 주요 목적을 이루며, 2017년 발사될 한국형 시험궤도선에서 관련 탑재체의 개발이 요구됨
- 또한, 지표의 원격탐사에 있어선 시·공간 제약 없이 공간정보의 획득이 가능한 유·무인항공기 활용 연구가 증가되고 있으나, 이에 최적화된 광학 센서 개발은 미미함
- 현재 과학기지 및 위성 중심의 연안/해양 감시의 기술적 한계를 효과적으로 보완하기 위해서는, 현안 발생 시 신속 대응이 가능한 고해상도의 유·무인항공기 탑재 광학 센서 개발은 물론 이에 적합한 자료처리 기술 확보가 필수적임

나. 연구개발대상 기술의 국내·외 현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
NOAA	무인항공기용 탑재체 개발	양식장 관리, 산불 관측, 오염된 공기 침투의 감시, 연안 침식 모니터링, 빙하의 경로 모니터링 등

III. 연구개발의 내용 및 범위

구분	연도	연구개발의 목표	연구개발의 내용 및 범위
1차년도	2014	항공탑재용 EO/IR 광학계 요구사항(URD) 설정 및 상세설계 수행	1. 해상도, 관측범위, 탑재 중량 등을 고려한 사용자 요구사항 설정 2. EO/IR 광학계의 예비/상세 설계 수행 3. 상용 센서를 통한 사전 관측 및 검증 시험 수행
2차년도	2015	EO/IR 광학계 제작 및 원격탐사기술 개발	4. EO/IR 광학계 상세설계 후 제작 공정 지원 5. 고해상도 소형 센서 기반 연안/해양 원격탐사 기술 고도화 수행 6. 현장 관측을 통한 원격탐사 기술 정확도 향상

3차년도	2016	EO/IR 광학계 설계 최적화 및 성능평가	7. EO/IR 광학계 설계 최적화 수행 8. EO/IR 광학계 제작 공정 및 조립/정렬 지원 9. 제작된 EO/IR 광학계 성능평가 수행
4차년도	2017	EO/IR 광학계 Straylight 영향분석	10. EO/IR 진단광학계 Straylight 영향분석 11. EO/IR 분광계 Straylight 영향분석

IV. 연구개발성과

가. 학술발표실적

번호	구분 (학술지게재, 학회발표)	논문명	저자명	저널명	일시	구분 (국내, 국외)	SCI (JCR%)	발생 차수
1	학회발표	Performances of CAA Algorithms for Alignment State Estimation Simulations for Three-mirror Anastigmat Earth Observation Optical System	강혁모, 오은송, 현상원, 김건희, 박영제, 김석환	한국우주과학회지	2014.10.	국내	-	1차 년도
2	학회발표	Development Progress of Ocean Color Sensor Based on UAV : Design and Performance of TMA Optical System	오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 김석환	한국우주과학회지	2014.10.	국내	-	1차 년도
3	학술지게재	연안원격탐사를 위한 비축 삼반사경 설계와 성능분석	오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 최종국, 김석환	한국광학회지	2015.06.	국내	-	2차 년도
4	학회발표	Design and performance analysis of front end optical instrument for coastal water remote sensing	오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 최종국, 김석환	SPIE	2015.05	국외	-	2차 년도
5	학회발표	Alignment performance comparison between MFR and MDCO for aTMA optical system	강혁모, 오은송, 현상원, 김건희, 김석환	SPIE	2015.08	국외	-	2차 년도
6	학회발표	Ray tracing based ISRD (inter-slot radiometric discrepancy) simulation tool for GOCI	안기범, 조성익, 오은송, 박영제, 김석환	SPIE	2015.08	국외	-	2차 년도
7	학회발표	Finishing Characteristics for SiC Optics of 3 Reflected	한정열, 오은송, 김진호, 이종건, 한성엽, 남오원,	한국정밀공학회지	2015.12.	국내	-	2차 년도

		Optical System using MRF	장비호, 장정균, 김건희					
8	학회발표	Design and Development Status of Precise off-axis TMA for Hyperspectral Remote Sensing based on UAV	오은송, 안기범, 조성익, 현상원, 김건희, 박영제	한국정밀 공학회지	2015.12.	국내	-	2차년도
9	학술지게재	Development of an Off-Axis TMA Telescope for Coastal Water Remote Sensing	Min-Woo Jeon, Sang-Won Hyun, Ji-Yong Bae, Byeong-Joon Jeong, Eun-Song Oh, Hyuk-Mo Kang, Young-Je Park, Chan-Pil Park, Geon-Hee Kim	IJPEM	2016.05.	국내	-	2차년도
10	학회발표	Development of ultra precision optical system based on the freeform optical devices and modules	안기범, 조성익, 오은송, 박영제	한국정밀 공학회지	2016.10.	국내	-	3차년도
11	학회발표	Form Error Analysis for Freeform Aluminum Mirrors using DTM	정병준, 김건희, 조성익, 안기범, 정의식, 명태식, 박준섭, 최환진, 여인주	한국정밀 공학회지	2016.10.	국내	-	3차년도
12	학회발표	Design of ultra precision processed off-axis TMA based freeform optical system	KIBEOM AHN, Seongick CHO, Eunsong OH, Seon-yeong Jeong, Young Je Park	ISGMA	2017.06.	국외	-	4차년도

나. 특허출원실적

특허명	발명자	출원일	출원번호	출원국가
초분광 검출용 비축 반사 광학계 설계	오은송, 박영제, 강혁모, 김건희, 현상원	2014.11.17	10-2014-0160031	대한민국
웨이퍼 에지 노광용 시준기 설계	오은송	2014.10.31	10-2014-0150459	대한민국

V. 연구개발결과의 활용계획

- 무인항공기 플랫폼에 장착 가능한 EO/IR센서의 개발로 갯벌, 퇴적지의 퇴적상 분포 연구, 갯벌 주제도를 기반으로 한 생태 지도 작성 및 갯벌 지역의 염생 식물 및 미세저서조류 분포 연구 등 연안/해양 환경 특성 분석이 가능하며 연안/해양의 환경 모니터링 등의 연구 수행 가능
- 무인항공기 장착 광학계의 분광 특성 분석을 통해 열대 연안의 산호초 분포 특성(산호, 갈피 산호사 등)을 분석하고 영상 분석 결과와 현장 조사 자료의 비교를 통해 미세한 산호 서식 환경 분포도를 작성
- 산호 분포 지역에 대한 주기적인 고해상도 영상 획득을 통해 장기간의 산호 서식환경 변화를 모니터링 할 수 있음
- 연안/해양 지역을 포함한 다양한 분야의 재난/재해 모니터링, 극지환경 분석에서의 활용 등 다양한 활용분야가 존재

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발 목적 및 필요성	1
제 2 절 연구개발 추진전략	3
제 2 장 국내외 기술개발 동향	6
제 1 절 국내외 개발현황	6
제 2 절 연구진 기존 연구 현황	7
제 3 절 향후 전망	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절 연구개발 목표	9
제 2 절 연구개발 내용 및 결과	10
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 추진전략	48
제 1 절 연구개발목표 달성도	48
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	51
제 1 절 기대성과	51
제 2 절 활용방안	52
제 6 장 참고문헌	53

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발 목적 및 필요성

1. 연구개발 필요성

- 가. 연안/해양 재난·재해의 빈번한 발생 등 현안 대응 측면과 달표면, 극지 탐사와 같은 기초과학적 목적을 달성하기 위하여 사용자 맞춤형 광학계 필요성이 점차 대두됨
- 나. 최근 선진국의 달탐사 프로젝트에서 적외선 대역 이미징을 통한 달지질/자원 탐사가 주요 목적을 이루며, 2017년 발사될 한국형 시험궤도선에서 관련 탑재체의 개발이 요구됨
- 다. 또한, 지표의 원격탐사에 있어선 시·공간 제약 없이 공간정보의 획득이 가능한 유·무인항공기 활용 연구가 증가되고 있으나, 이에 최적화된 광학 센서 개발은 미미함
- 라. 현재 과학기지 및 위성 중심의 연안/해양 감시의 기술적 한계를 효과적으로 보완하기 위해서는, 현안 발생 시 신속 대응이 가능한 고해상도의 유·무인항공기 탑재 광학 센서 개발은 물론 이에 적합한 자료처리 기술 확보가 필수적임

2. 연구개발의 과학기술, 사회경제적 중요성

가. 과학기술적 측면

- (1) 연안 지형과 생태환경 분포의 시간적 변화 및 인공구조물에 의한 영향 파악 등을 위한 기존의 연구 방법은 시·공간적으로 많은 현장조사가 필요하며 이는 많은 비용과 시간의 투자가 필요함. 그에 따라, 고해상도 광학위성을 이용한 연안/해양환경 연구가 진행 중이나, 위성영상의 촬영 주기 제한 (15일 이상)과 기상 상태에 따른 영상 획득 제한 등 연구 자료 획득에 많은 어려움이 나타남.
- (2) 현재, 사용자가 원하는 시기에 적은 비용으로 고해상도 영상자료를 확보할 수 있는 유·무인항공 시스템 활용의 필요성이 높아지고 있으나, 이에 최적화된 광학 센서의 개발은 미미한 실정임. 따라서 인공위성을 활용한 자료 획득의 한계 극복과 연안 환경의 효율적 관리를 위해 유·무인항공시스템 기반의 다중 광학 센서 개발의 중요성이 대두되고 있음

나. 사회경제적 측면

- (1) 최근 지구 온난화와 인위적 변화로 인하여 연안/해양환경은 빠르게 변화하고 있으며, 특히 국내의 경우 지속적인 간척사업으로 인하여 조류 흐름 변동에 따른 갯벌 지형의 급격한 변화 및 연안 식생의 변화가 일어나고 있음
- (2) 갯벌 지형과 생태환경 변화는 기후변화와 연안/해양 지역에 형성된 인공 구조물의 영향을 평가하는데 활용이 가능함. 따라서 갯벌 퇴적물 특성과 식생의 지속적인 변화에 대한 심도있는 연구가 필요함

제 2 절 연구개발 추진전략

1. 추진전략 및 방법

가. 국내 관측기기의 개발 분야와 원격탐사 분야 전문가 인력으로 효과적인 추진 체계 구성

- (1) 해양원격탐사 분야 권위자로서 연안/해양 관측 연구 노하우를 기반으로 EO/IR 설계의 사용자 요구사항 설정 및 관측 영상 처리 등 연구 수행 (박영제, 최종국 책임연구원, 조성익 선임연구원)
- (2) GOCI-II 탑재체 개발 설계 선행 연구, GMT 설계 및 성능 분석 연구, GOCI의 궤도상 광학성능 분석 등 기존 연구 능력을 기반으로 연안/해양 용 광학계 설계 및 제작 지원 수행 (오은송, 안기범 연구원)
- (3) CAA 알고리즘 개발 및 관측 기기 개발 관련 실무 연구, GOCI 등 위성탑재체 개발 경험을 바탕으로 광학계 제작 지원 (오은송, 강혁모 연구원)
- (4) 설계 및 제작된 EO/IR 센서를 이용하여 연안/해양 관측을 수행, 센서의 성능 시험과 항공 촬영을 수행하고, 원격탐사 기술의 고도화 수행 (이윤경 박사)

2. 연구개발 추진체계

가. 아래 추진 체계를 기준으로 2014년부터 위탁과제를 추진할 계획이며, 주된 EO/IR 센서의 설계 및 개발 연구 및 핵심 내용은 총괄인 오은송 연구원이 수행할 것이며, 기술의 가치 및 활용에 대한 큰 사업의 방향에 대한 자문과 원격탐사 연구 전반에 대한 기술적 자문을 참여연구원들과의 논의를 통해 수행할 예정임



그림 1 연구개발 추진체계

3. 연구추진계획

연구내용		추진일정												연구비 (천원)	비고			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
1 차 년 도	- 해상도, 관측범위, 탑재 중량 등을 고려한 사용자 요구사항 설정						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	10,000	
	- EO/IR 광학계의 예비 설계 수행																10,000	
	- 상용 센서를 통한 사전 관측 및 검증 시험 수행						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	10,000	
2 차 년 도	- EO/IR 광학계 상세설계 후 제작 공정 지원	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	20,000	
	- 고해상도 소형 센서 기반 연안/해양 원격탐사 기술 고도화 수행	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	20,000	
	- 현장 관측을 통한 원격탐사 기술 정확도 향상					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	10,000	
3 차 년 도	- 사용자 요구사항 만족을 위한 EO/IR 광학계 설계 최적화	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	15,000	
	- 최적화된 EO/IR 광학계 제작 공정 및 조립/정렬 지원	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	15,000	
	- 제작된 EO/IR 광학계의 성능평가 수행	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	20,000	
4 차 년 도	- EO/IR 전단광학계 Straylight 영향분석	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	10,000	
	- EO/IR 분광계 Straylight 영향분석	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	10,000	

제 2 장 국내외 기술개발 동향

제 1 절 국내외 개발 현황

1. 국내·외 개발 현황

- 가. 현재까지 국내에서는, 항공기 원격탐사 자료 획득이 어려우므로 연안 퇴적환경과 위성자료 간 관계 분석을 통한 연안 환경 모니터링 연구가 진행됨
- 나. 또한, 연안/해양 연구를 위한 유·무인항공기 활용은 미미하며, 항공 플랫폼 제작 기술은 한국항공우주연구원의 연구 개발과 국내 무인항공 업체의 활동으로 발전하고 있으나 연안/해양 모니터링 극대화를 위한 광학 센서 디자인 및 활용기술 개발은 미미한 실정임
- 다. 선진국의 예시로써, NOAA 에서는 양식장 관리, 산불 관측, 오염된 공기 침투의 감시, 연안 침식 모니터링, 빙하의 경로 모니터링 등 UAV를 활용하여 각종 환경모니터링을 통하여 즉각적인 대비하는 중임
- 라. 유·무인 항공기 탑재용 EO/IR 센서는 주로 군수용으로 제작된 형태가 대부분이며, 그 가격이 수 억원대에 이르기에 연구용 또는 상시 관측용으로 사용하기는 적합하지 않음
- 마. 또한, 상용화로 개발된 센서들의 경우, 가시광 대역에 특화되어 있는 경우 또는 적외선 대역에 특화되어 있는 실정이기에, 가시광 대역과 적외선 대역을 동시에 관측할 수 있어야 하는 연안/해양 관측용으로 대체하기에 무리가 있음

				
	12DS/TS200	Micro STAR II	POP200/300	Quad-1
Stabilization	2 axis Stabilization level < 35 urad rms/axis	2 axis Fiber-optic Gyro Stabilization : 50	2 axis Stabilization level < (30-40) urad rms/axis	2 axis Stabilization level <35 urad rms/axis
Resolution	IR: 256x256 InSb FPA CCD: 480 lines	IR: 320x240 InSb FPA CCD: 270(NTSC), 460(PAL)	IR: 320x240 InSb FPA CCD: N/A	IR: 320x240 InSb FPA CCD: 500 lines
Magnification	IR: 4 FOV (25~2.2) CCD: 20x	IR: 10 Cont. or 3 FOV (21.7~2.2) CCD: 72x	IR: 4 FOV (22~1.7) CCD: 45X	IR: Cont. (27~2.2) CCD: 75x
Human Detection Range	N/A	3.5 km	4~5 km	5.4 km
Weight(kg)	Turret: 20.87 SIU: 4.08	Turret: 13 ECU: 3.4	Turret: 10.4 PEB: 5.9	Turret: 21.5 PEB: 3.4
Size(cm)	371 x 305	343 x 229	380 x 260	430 x 305
Endurance	Shock: 10g, 11msec -15°C~55°C, 4,572m, 270knot	MIL-STD-810/ DO-160D -20°C~+55°C, 4,572m, 270knot	Shock: 20g, 11msec MIL-STD-810E, Method 509.3, Procedure 1 -30°C~+55°C 4,572m, 300knot	MIL-STD-810F, 514.5, 15g, 11msec -20°C~+50°C 4,572m, 180knot
Option(s)	IRI	LP, SSI, LI	AVT, LP, LRF	AVT, LP, LRF

그림 2 국외 무인항공기용 EO/IR 광학계 현황

제 2 절 연구진 기존 연구 현황

1. 연구진 기존 연구 현황

가. '2012년도에 한국해양과학기술원 주요연구사업으로 수행되었던 “무인항공시스템을 이용한 연안/해양 원격관측기술개발 기획연구”를 통해 연안/해양 관측용 EO/IR 센서의 필요성과 개발 가능성을 분석하였음

나. 소형 멀티콥터 용 'COTS 기반 VIS/NIR 센서 개발'을 수행하여 기본적인 센서의 개발 경험을 확보하였음



그림 3 COTS 기반 VIS/NIR 센서 개발

다. 세계 최초 정지궤도 해양관측위성(GOCI)의 개발 참여 및 현재 해양관측위성 2호(GOCI-II)의 개발에서 설계 및 광학 성능 분석 등을 수행함으로써 센서의 설계부터 조립/정렬까지 개발의 모든 단계의 경험을 갖추고 있음

라. 해양위성의 운영 및 활용 연구에서 위성/항공 영상 처리에 대한 원천 기술을 지니고 있음

제 3 절 향후 전망

1. 향후 전망

- 가. 유·무인항공시스템을 기반으로 한 연안/해양 환경의 원격관측기술은 관할 해양의 효율적 관리를 위한 과학적 근거자료가 되며, 정밀 주제도를 기반으로 장단기 모니터링 시스템을 구축함으로써 연안환경 보전과 해양안전 확보 기능 고도화에 기여할 수 있음
- 나. 비행체/탑재체 분야의 기술 발전 추세 상 소형화/단순화 시스템의 수요가 급증할 것으로 보이며, 연안/해양 환경에 특화된 센서 개발 시 국내·외 연구진은 물론 해양수산부 산하 현업 지원 기관과 해군, 해경 등에서도 활용이 가능할 것으로 보임
- 다. 더 나아가 ‘달탐사 프로젝트’의 탑재체 개발의 선행 기술 연구는 물론 적외선 대역 촬영 기술, 장비 제조 기술 등의 원천기술 확보는 우주 기술 강국으로 나아가는 초석이 될 것으로 보임

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발 목표

1. 연구개발목표

가. 최종목표: 신속성과 다용성을 갖춘 무인항공기 탑재용 고해상도(<1m) 소형 (<1.5kg) 전자광학/적외선(EO/IR) 광학계 개발과 시험 검증

나. 연차별 목표

- (1) 1차년도: 항공탑재용 EO/IR 광학계 요구사항(URD) 설정 및 상세설계 수행
- (2) 2차년도: EO/IR 광학계 제작 및 원격탐사기술 개발
- (3) 3차년도: EO/IR 광학계 설계 최적화 및 성능평가
- (3) 4차년도: EO/IR 광학계 Straylight 영향분석

3. 연차별 개발내용

가. 1차년도

- (1) 해상도, 관측범위, 탑재 중량 등을 고려한 사용자 요구사항 설정
- (2) EO/IR 광학계의 예비/상세 설계 수행
- (3) 상용 센서를 통한 사전 관측 및 검증 시험 수행

나. 2차년도

- (1) EO/IR 광학계 상세설계 후 제작 공정 지원
- (2) 고해상도 소형 센서 기반 연안/해양 원격탐사 기술 고도화 수행
- (3) 현장 관측을 통한 원격탐사 기술 정확도 향상

다. 3차년도

- (1) EO/IR 광학계(전단광학계, 분광계) 설계 최적화 수행
- (2) 최적화된 EO/IR 광학계 제작 공정 및 조립/정렬 지원
- (3) 제작된 EO/IR 광학계 성능평가 수행

다. 4차년도

- (1) EO/IR 전단광학계 Straylight 영향분석
- (2) EO/IR 분광계 Straylight 영향분석

제 2 절 연구개발 내용 및 결과

1. 세부 개발내용

가. 1차년도

(1) 해상도, 관측범위, 탑재 중량 등을 고려한 사용자 요구사항 설정

(가) 목표 관측 환경 : 연안 해역, 갯벌 등

- ① 갯벌의 퇴적상, 함수율 분포, 미세저서조류 환경 분석
- ② 약 30여 미터 정도의 고랑형태의 갯벌 지형 다수
- ③ 퇴적상의 분포 및 분류를 위해서는 수 cm 정도의 해상도 필요

(나) 현재 보유하고 있는 무인항공기 기준 운영환경 고려

- ① Vision-1000 (DJI사)
- ② 운영 고도 : 300 ~ 500m
- ③ 관측시간 : 약 10 ~ 30분
- ④ 탑재중량 : 1.5 ~ 2.0kg

(다) 운영환경 요구조건 도출

Parameter	Specification
Field of View (FOV)	4.0 degree
Spectral range	400 nm ~ 900 nm
Spatial resolution (GSD)	≤ 0.3 m
MTF requirement	> 0.3 @ Nyquist frequency
SNR requirement	> 100 @ 660nm
Permitted weight	≤ 1.5 kg
Permitted volume size	$\leq 120 \times 100 \times 150$ mm
Operation height	300 ~ 500 m

(라) 광학설계 요구조건 도출

Parameter	Specification
Effective Focal Length	350 mm
Entrance Pupil Diameter	70 mm
Pixel size	26 μm
Optical MTF requirement	> 0.75 @ Nyquistfrequency (660 nm)
RMS wavefront error	$\leq 1/15 \lambda$
Distortion	$\leq 0.1 \%$

(마) 광학성능 요구조건 도출

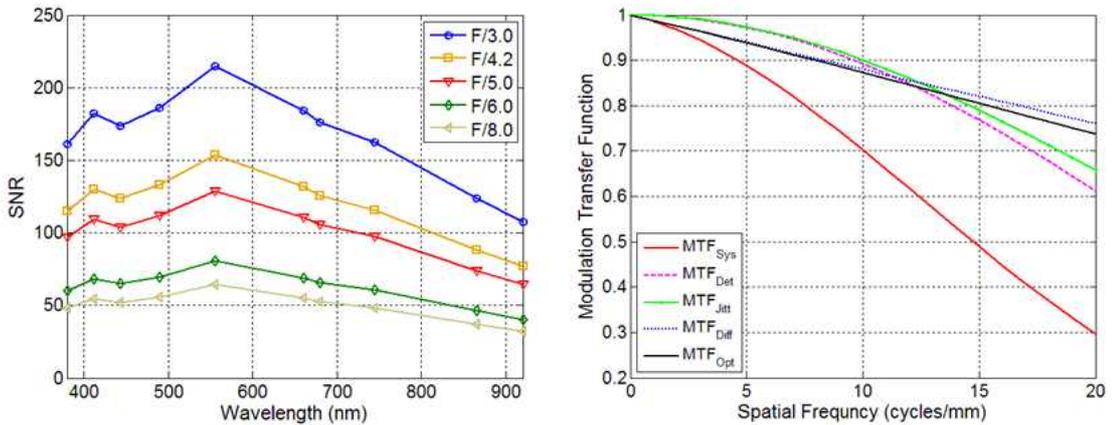


그림 4 광학성능 요구조건 도출 (SNR, MTF)

(2) EO/IR 광학계의 예비/상세 설계 수행

(가) TMA 전단광학계 설계

- ① F/5.0 & EPD 70mm 기준으로 TMA 형태 반사광학계 설계
- ② Slit 부 후단의 Spectrometer(Offner type)에 대한 개념 설계 수행
- ③ Spectrometer 설계는 2차년도에 계속 진행할 예정

(나) TMA 진단광학계 설계 주요 사양

Effective Focal Length	350 mm
F-number	5.0
Wavelength	400 ~ 900 nm
CCD pixel size	26 um
Field of view	4.0 degree

(다) TMA 진단광학계 설계값

Surface	Radius	Thickness	Conic	Diameter	Note
OBJ	-	Inf			
M1	-739.1±0.4	-139.2	-4.71	90	DY : -61
M2	-237.9±0.4	139.2	-0.77	50	STOP surface
M3	-362.1±0.4	-125.0	0	80	DY : 61
FM	Inf	166.0	0	45	
IMG	-	-	-	20	Slit position

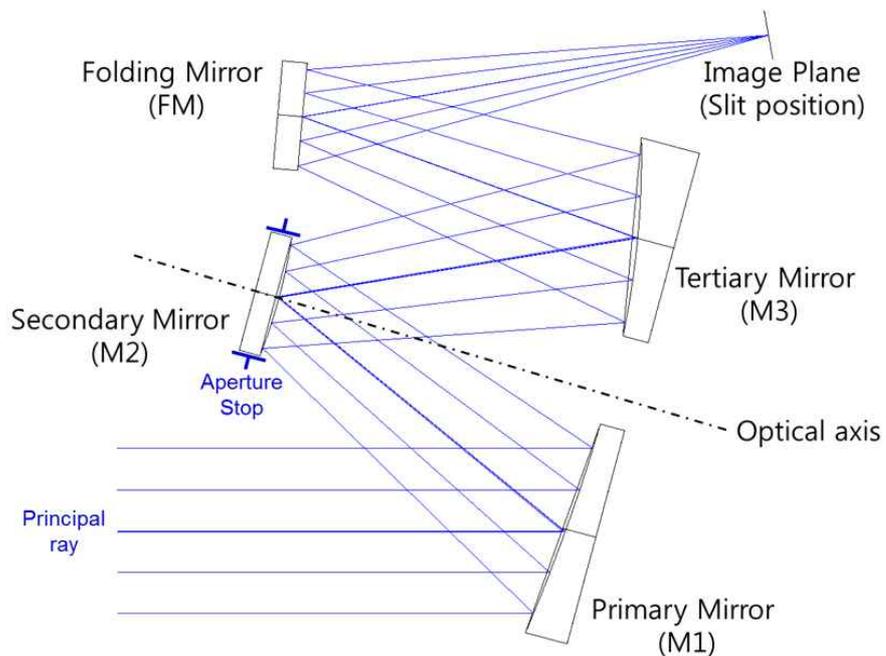


그림 5 TMA 진단광학계 설계 Layout

(라) TMA 진단광학계 성능분석

① Spot diagram : RMS radius는 2.8 μm 이하로 충분한 성능을 보이고 있음

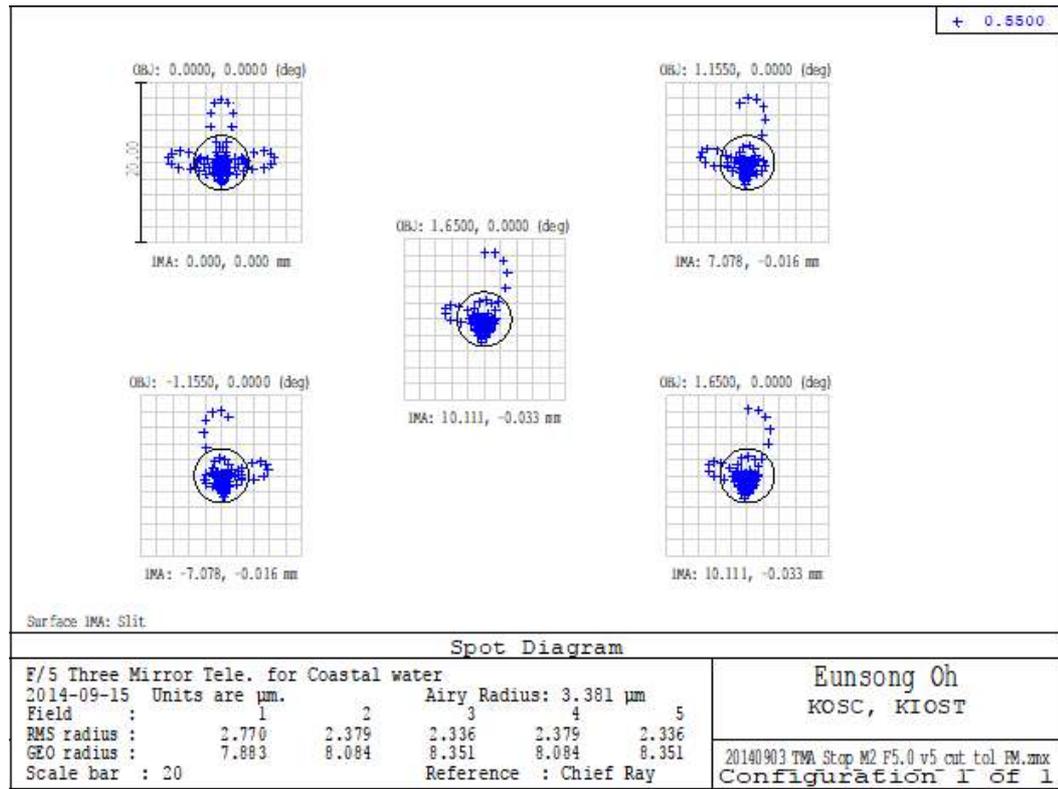


그림 6 TMA 진단광학계 Spot diagram

- ② RMS Wavefront error : 1.65 degrees의 field에 대하여 물리적 한계값이 diffraction limit 이하의 값을 보이고 있음

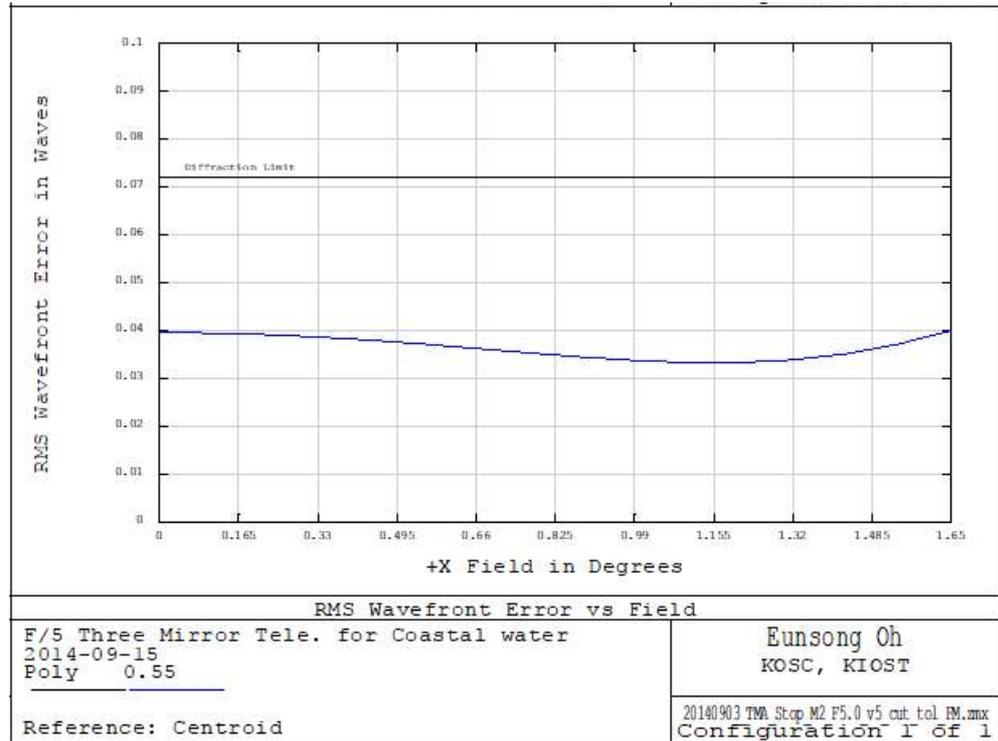


그림 7 TMA 전단광학계 RMS WFE vs Field

- ③ MTF : 설계조건에 대하여 0.7 이상의 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있음

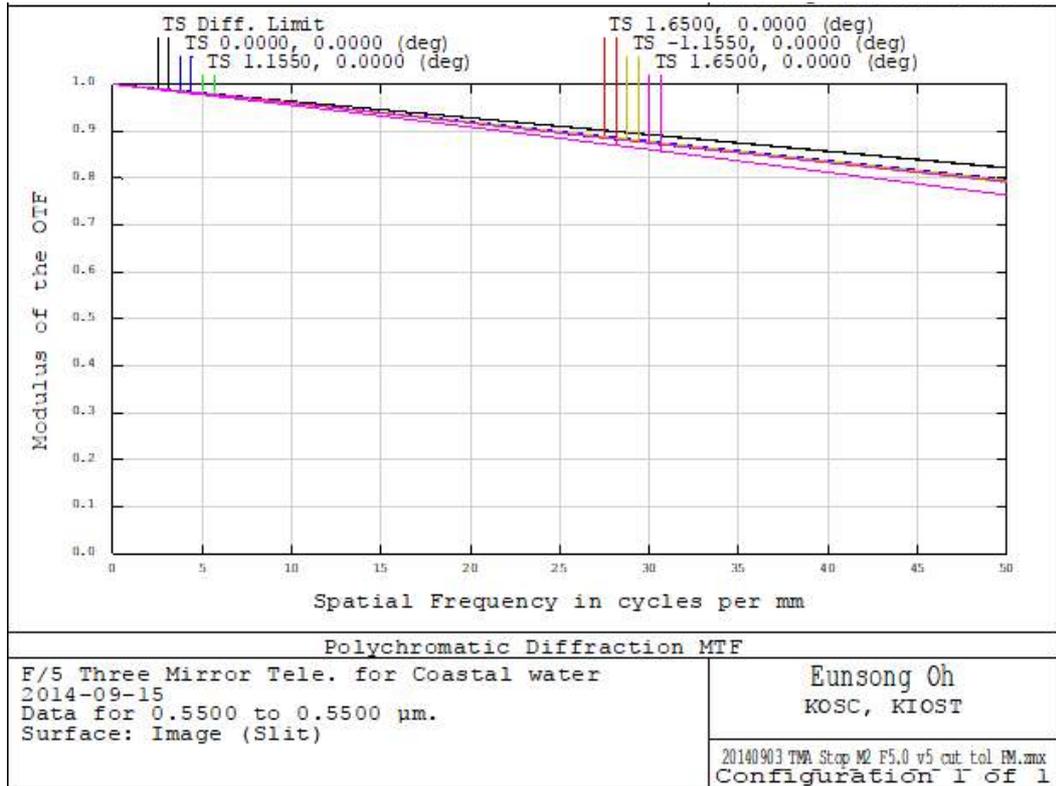


그림 8 TMA 전단광학계 MTF

(마) TMA 광학계 대상 정렬 예측 수치모사

- ① 정렬상태 예측 알고리즘의 적용 및 구현
- ② MATLAB과 Zemax의 상호 연동을 이용

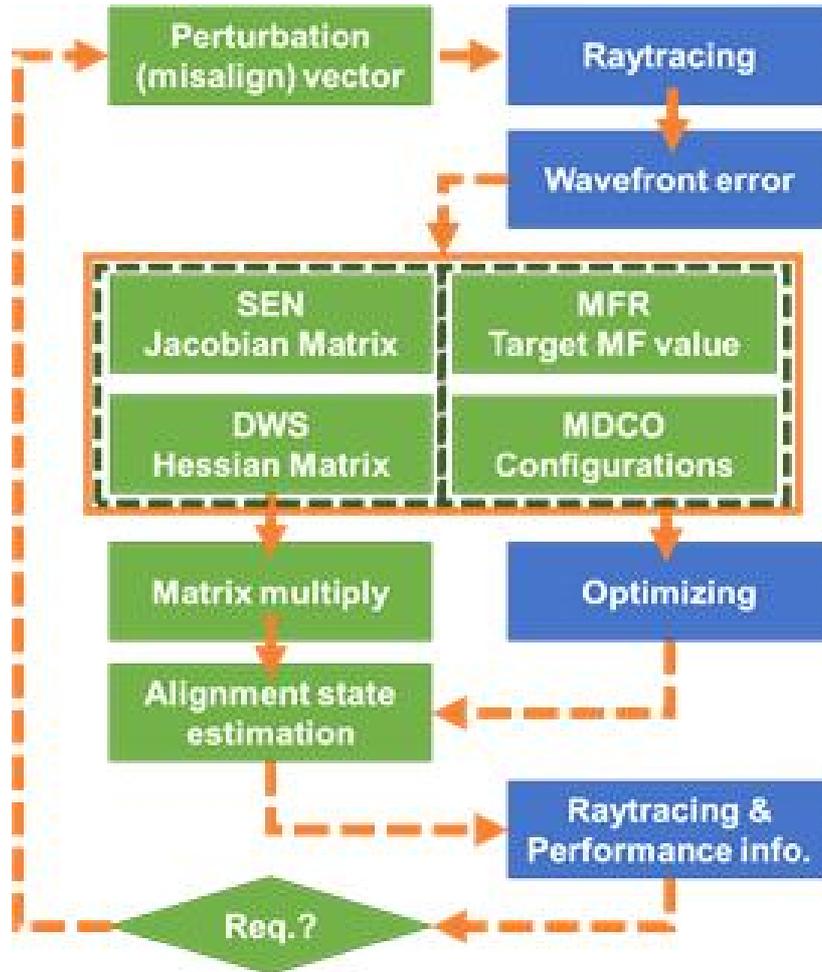


그림 9 정렬상태 예측 알고리즘 모식도

(바) 정렬실험 수치모사 및 가능여부 판단

- ① 실제 실험에서 발생할 수 있는 4가지 경우를 가정하여 상태예측 수행
- ② SEN, MFR, MDCO 알고리즘 & M3 보상자 활용가능확인

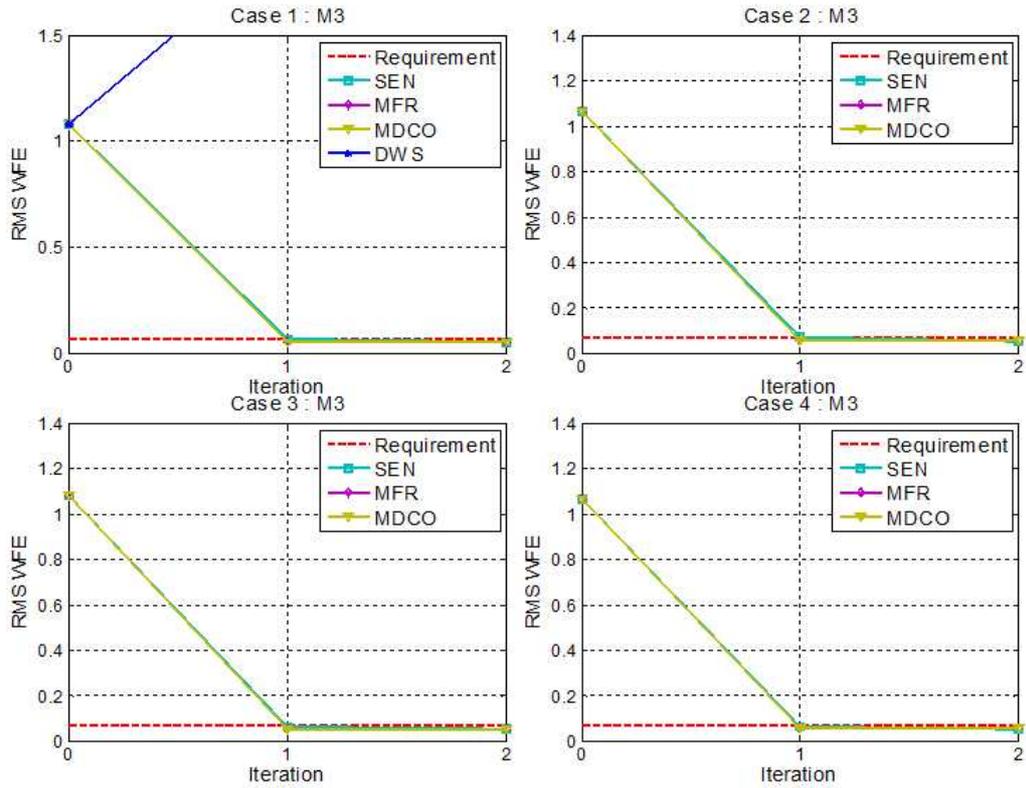


그림 10 정렬실험 수치모사 비교 분석 결과

(3) 상용센서를 통한 사전관측 및 검증 시험 수행



그림 11 사전관측 및 검증 시험 수행을 위한 회전의 및 고정익 무인항공기



그림 12 사전관측 대상 지역 및 항공기 이동경로

구분	기능
고정의 무인항공기	캐논 S95 카메라 탑재, 카메라 선택의 한계점
회전의 무인항공기	캐논 6DDSLR 탑재, 다양한 고해상도 광학 및 적외선 카메라 탑재 가능
Li-Po Battery	리튬 폴리머 배터리로 무인항공기 기체 전력 공급
IMU data logger	무인항공기 위치정보 및 pitch, roll yaw 데이터 획득
Main Controller	무인항공기 기체 수동 컨트롤
3축 짐벌 마운트	장착된 고해상도 카메라 렌즈의 직하방향 고정

그림 13 사전관측 기기(고정의 및 회전의 무인항공기) 기능

(가) 상용센서를 통한 사전관측 및 검증 시험 수행 결과

- ① 수치표고모델(DEM) 생성
- ② 연구지역 : 인천 옹진군 소이작도 별안해수욕장

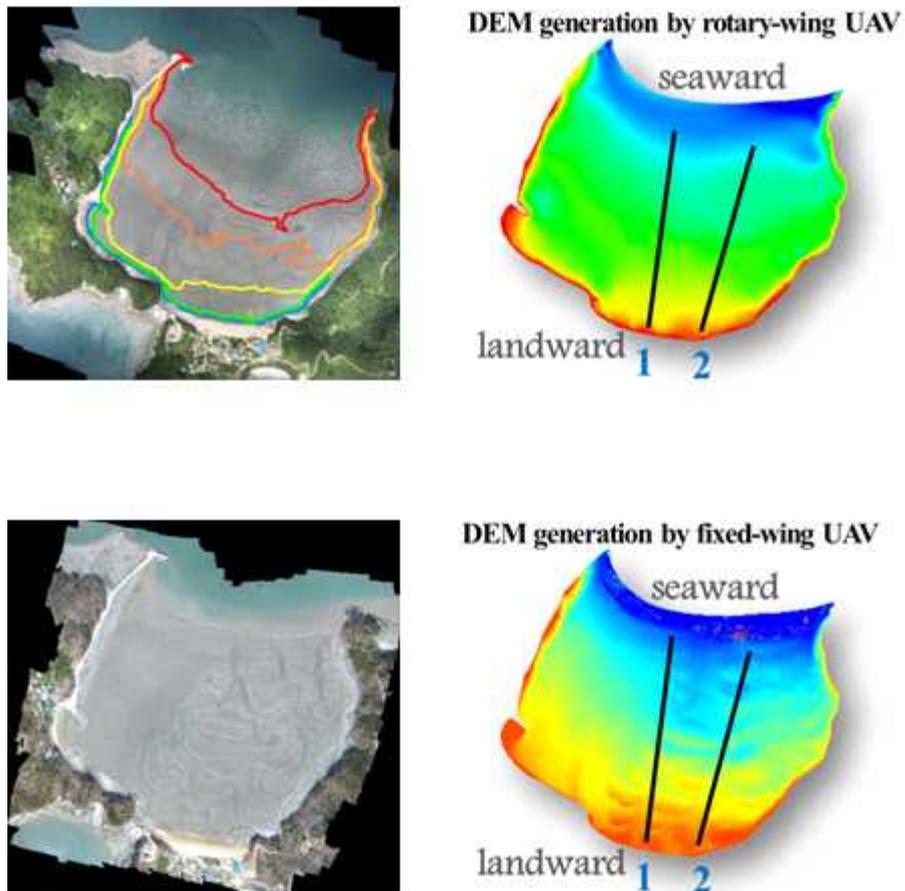


그림 14 연구지역 촬영 무인기 촬영사진 및 획득한 수치표고모델(DEM). 회전의(상) 및 고정의(하)

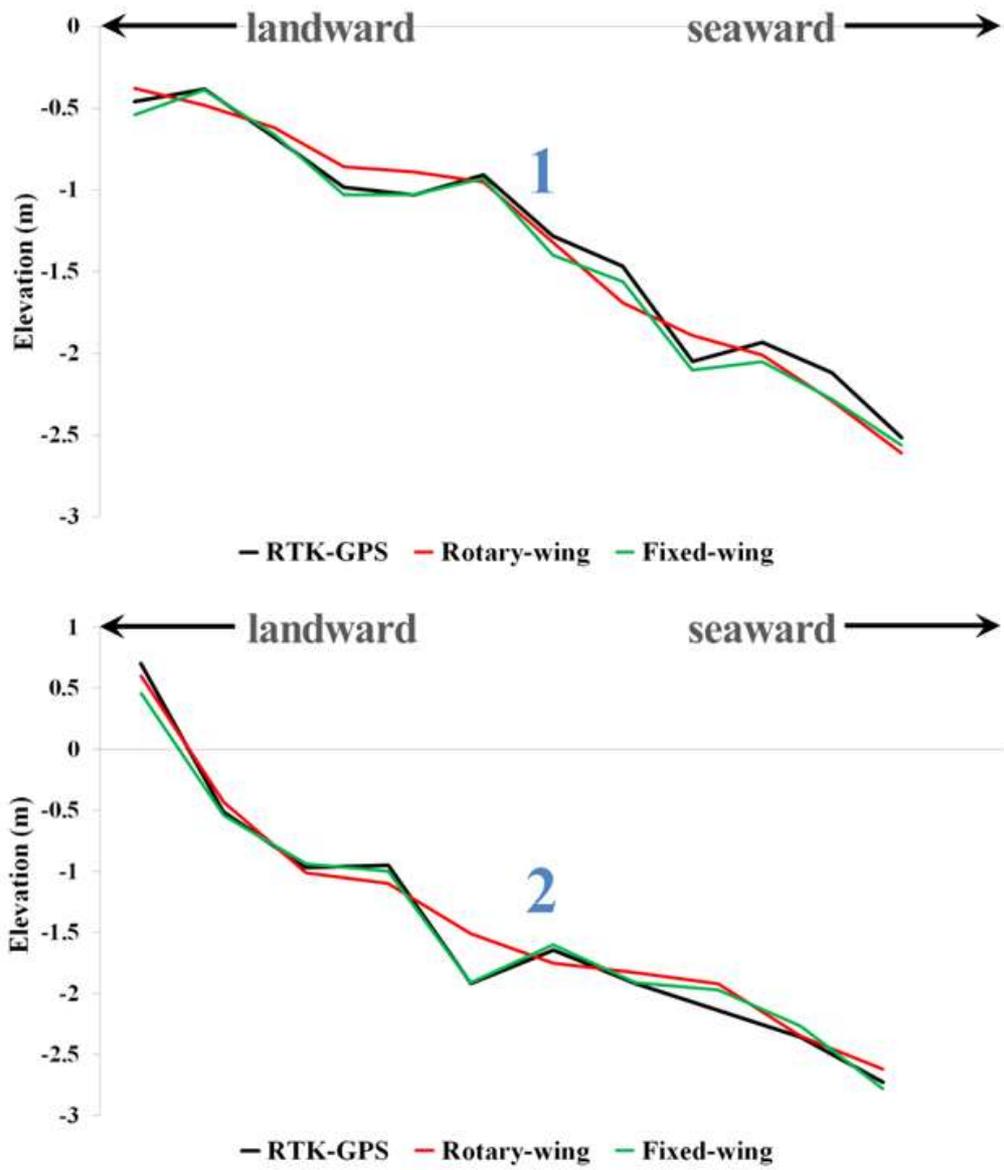


그림 15 회전익과 고정익 무인기를 통해 획득한 수치표고모델(DEM) 비교

나. 2차년도

(1) TMA 전단 광학계 제작 공정 지원

(가) TMA 광학계 대상 정렬 예측 수치모사

① MDCO 알고리즘에 대한 케이스 스터디 수행

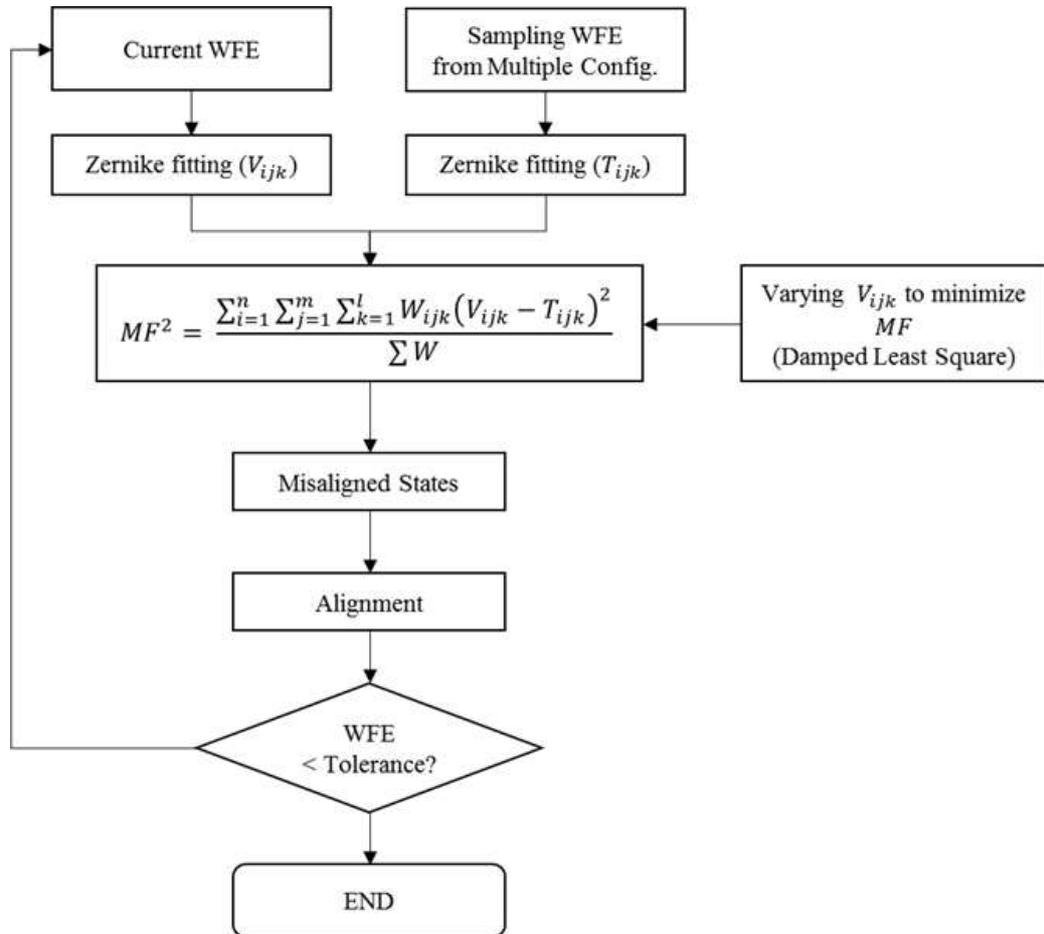


그림 16 MDCO 알고리즘에 대한 케이스 스터디 도식도

② MDCO 알고리즘에 대한 케이스 스터디 결과

(a-M2, b-M3)

- Mirror positioning error
- Interferometer measuring error

(c-M2, d-M3)

- Mirror positioning error
- Micrometer transfer error
- Interferometer measuring error

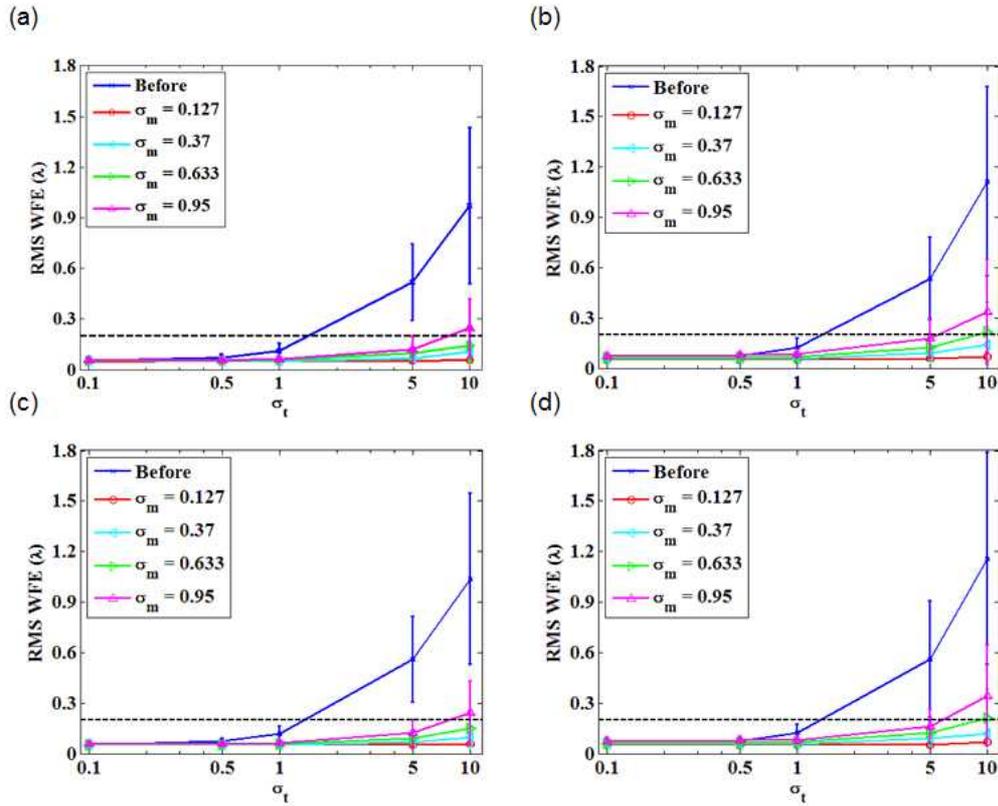
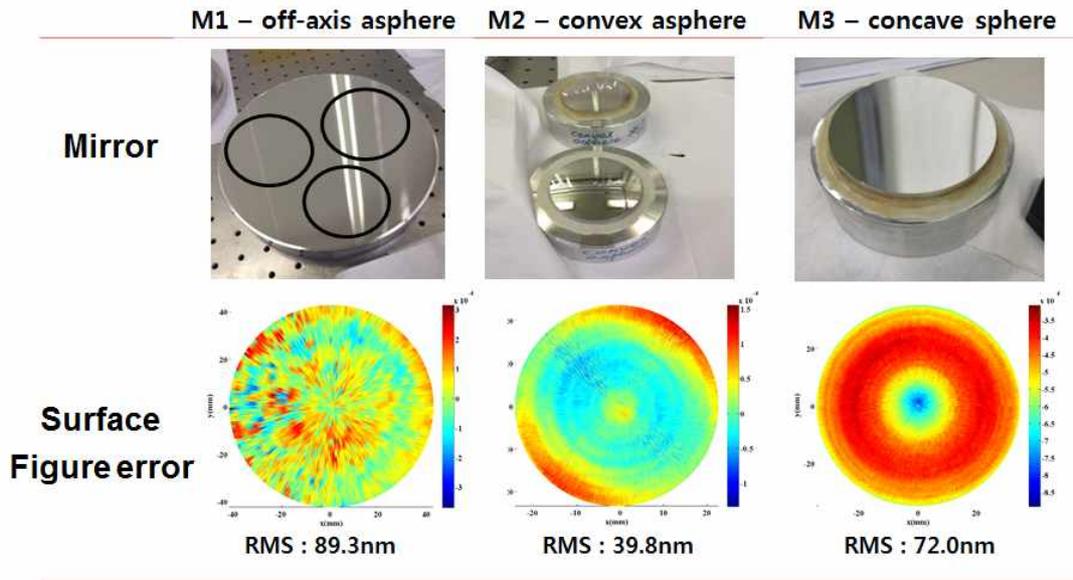


그림 17 MDCO 알고리즘에 대한 케이스 스터디 결과

(나) TMA 전단광학계의 제작 현황



*Measured by UA3P profilometer

① TMA 광학계 광기계부 설계 및 제작 수행

- 현재 1차 시제품의 광기계부 설계 및 광기계부 제작 완료
- 2차 시제품의 광기계부 설계 중

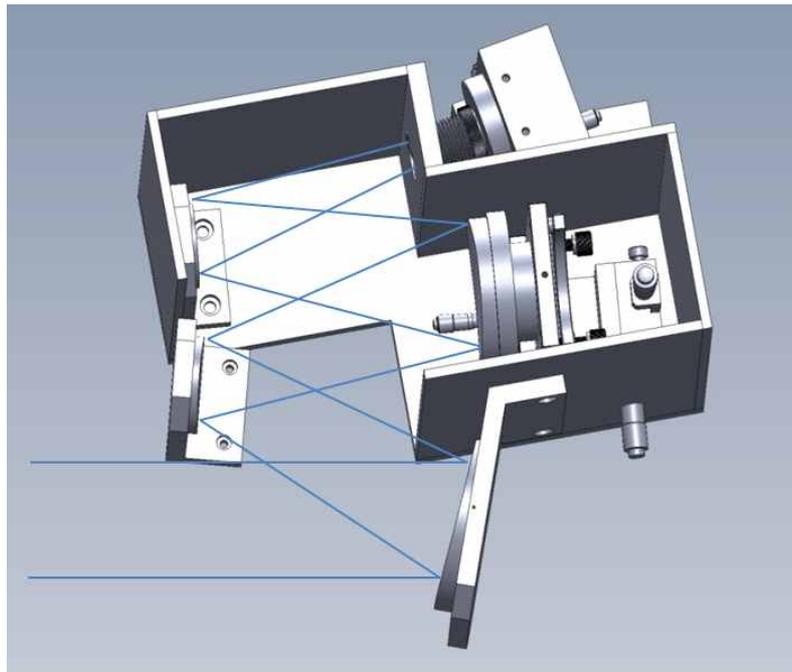


그림 19 TMA 광학계 광기계부 설계 3D 모델링

② TMA 광학계의 정렬 수행 중

- 하트만센서를 이용한차 정렬 완료 (1 pixel spot 확인)
- 인터페로미터와 3차원 측정기를 사용하여 미세 정렬 수행 중

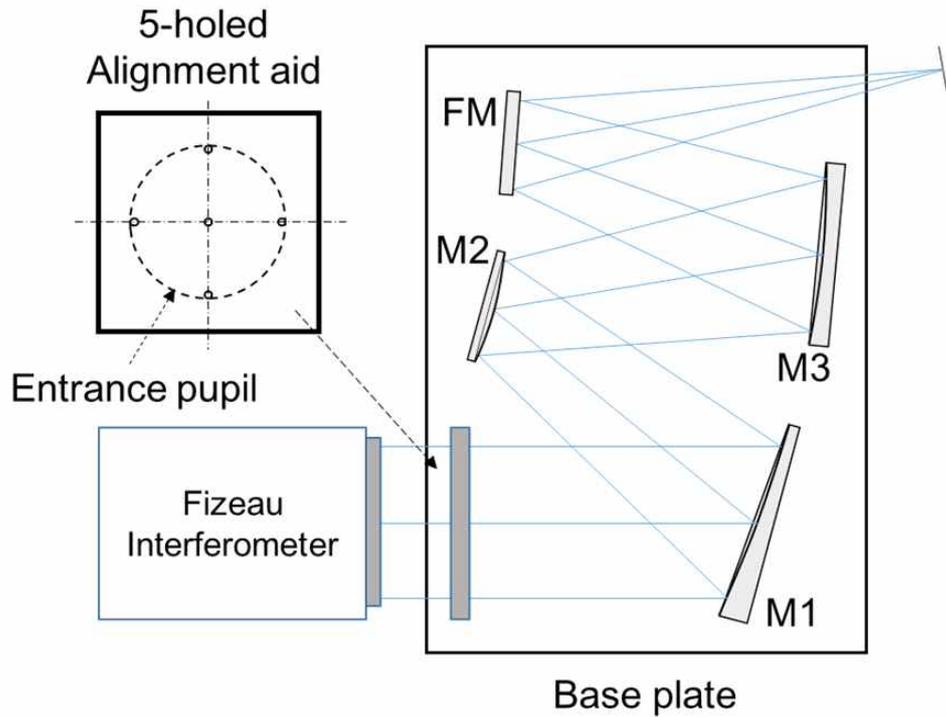


그림 20 TMA 광학계의 정렬 모식도

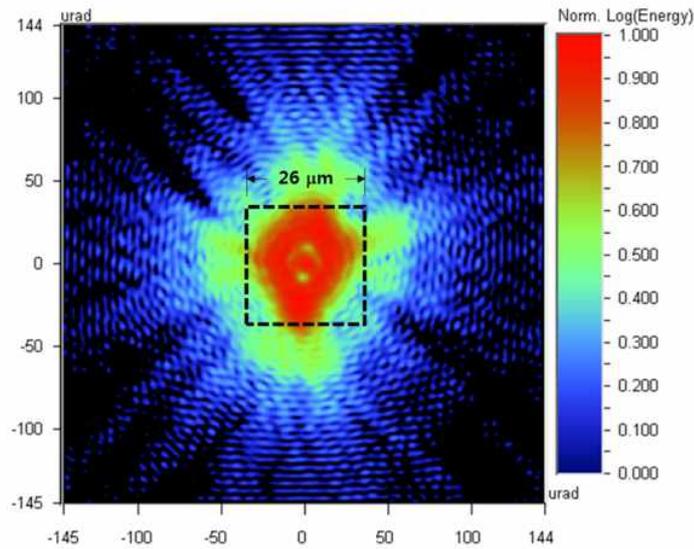


그림 21 TMA 광학계 정렬 후 스팟 및 검출기 픽셀 사이즈

(2) 소형 경량화 광학계 신규 설계 수행

(가) 소형 경량화 광학계 설계 주요 사양

Effective Focal Length	100 mm
F-number	4.0
Wavelength	400 ~ 900 nm
CCD pixel size	25 um
Field of view	3.0 degree

(나) 소형 경량화 광학계 설계값

Surface	Radius	Thickness	Conic	Diameter	Note
OBJ	-	Inf			
M1	-238.8±0.1	-60.0	-2.007	36	DY : -18.5
M2	-82.0±0.3	60.0	0	16	STOP surface
M3	-105.1±0.1	-72.6	0.196	28	DY : 18.0
IMG	-	-	-	20	Slit position

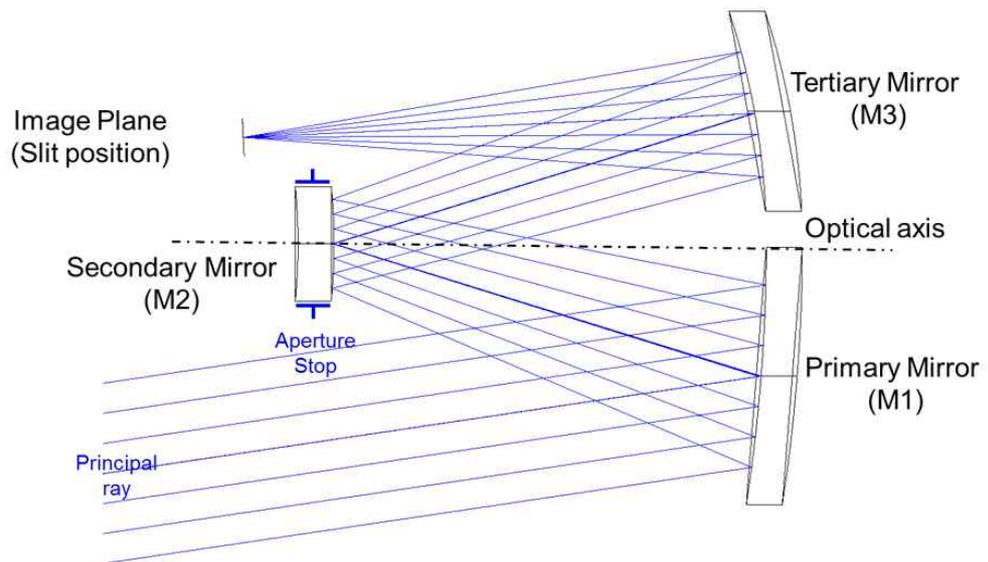


그림 22 소형 경량화 광학계 설계 Layout

(다) 소형 경량화 광학계 성능분석

① Spot diagram : RMS radius는 1 μm 이하로 충분한 성능을 보이고 있음

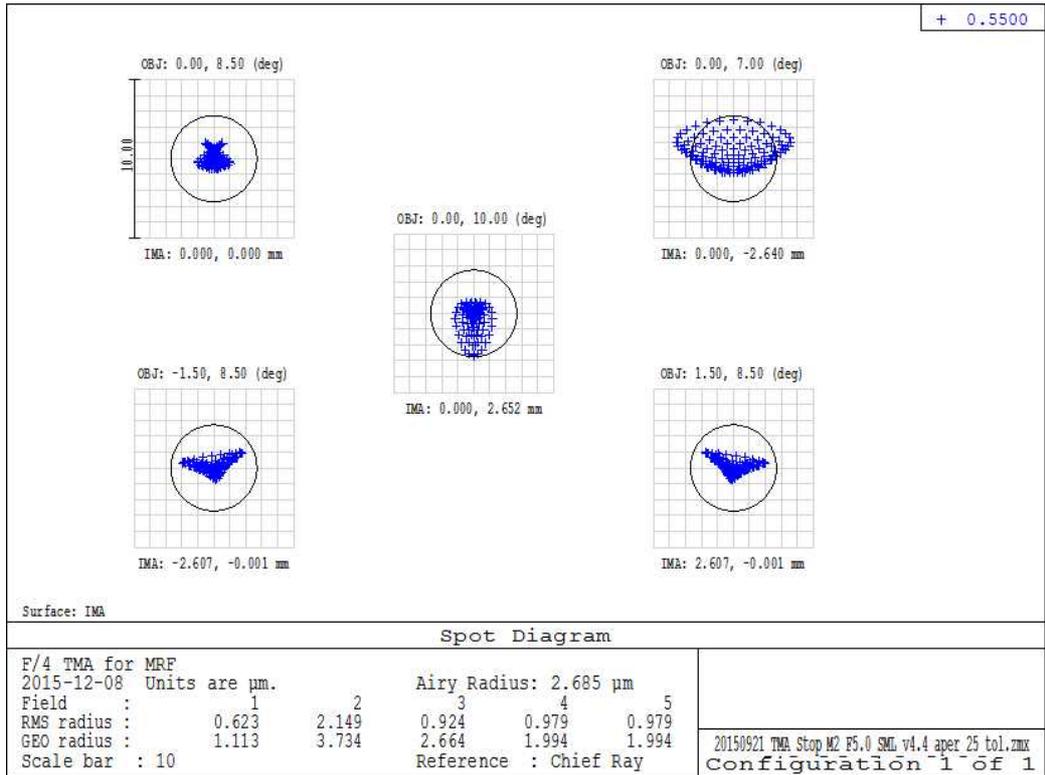
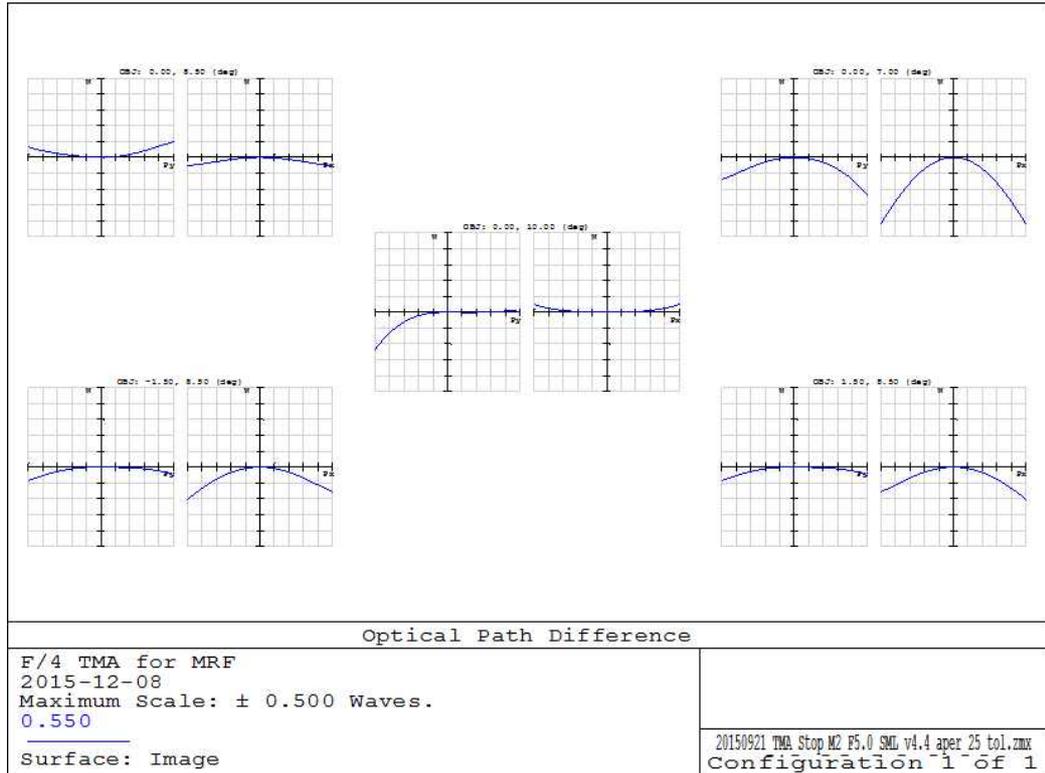


그림 23 소형 경량화 광학계 Spot diagram

- ② Optical path difference : 전체 Field of View에 대하여 OPD 값이 ± 0.2 waves 이내에 들어옴을 보이고 있음



- ③ MTF : 설계조건에 대하여 0.9 이상의 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있음

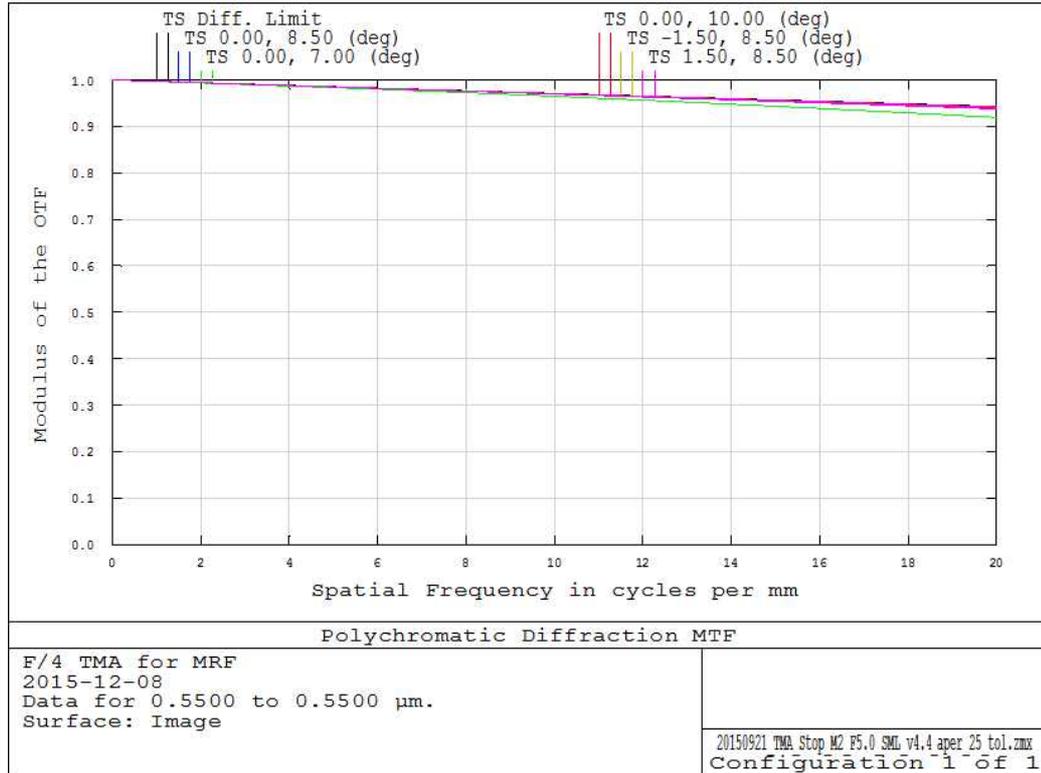


그림 25 소형 경량화 광학계 MTF

(3) Spectrometer 설계 수행

(가) Offner type 형태의 spectrometer 설계 수행

- ① 연안/해양 관측(ex. 갯벌) 용도로 높은 SNR 값 요구
- ② Ocean PHILLS, HICO 와 같은 NASA에서 진행 중인 해양용 spectrometer 참고

(나) Spectrometer 설계 주요 사양

Effective Focal Length	762.2 mm
F-number	2.5
Wavelength	380 ~ 750 nm
CCD pixel size	26 um
Field of view	20.0mm * 3.3mm

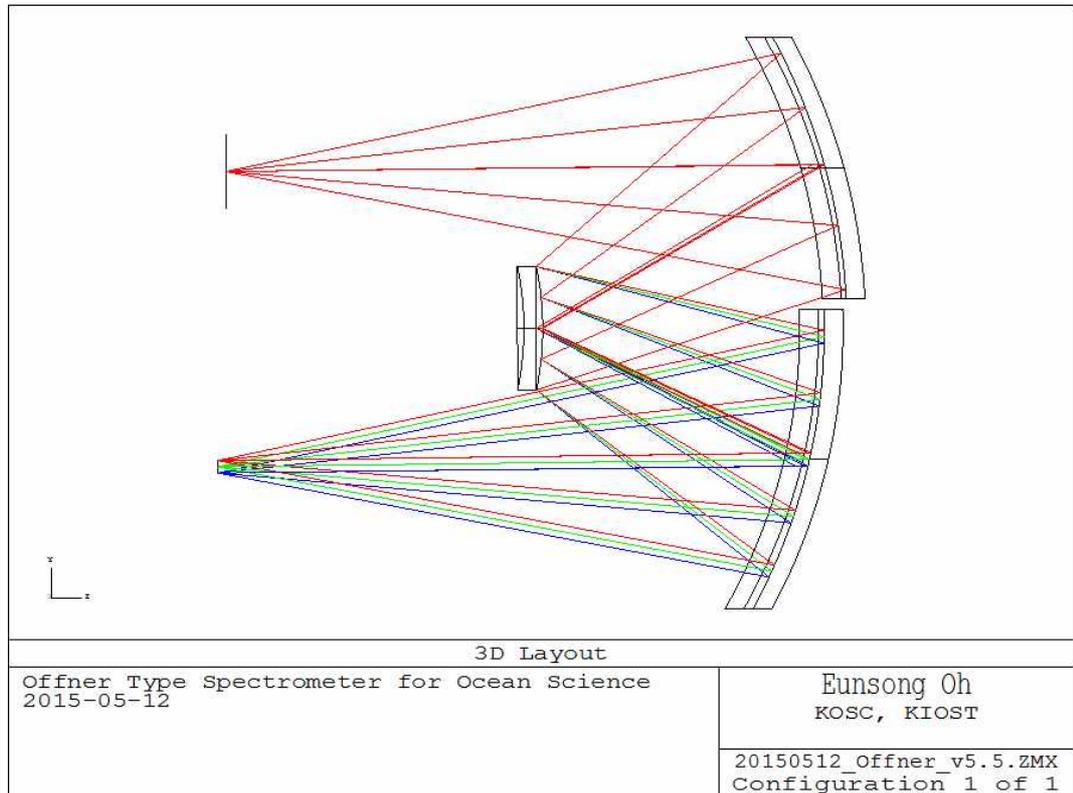


그림 26 Spectrometer 설계 Layout

(다) Spectrometer 설계 Spot diagram

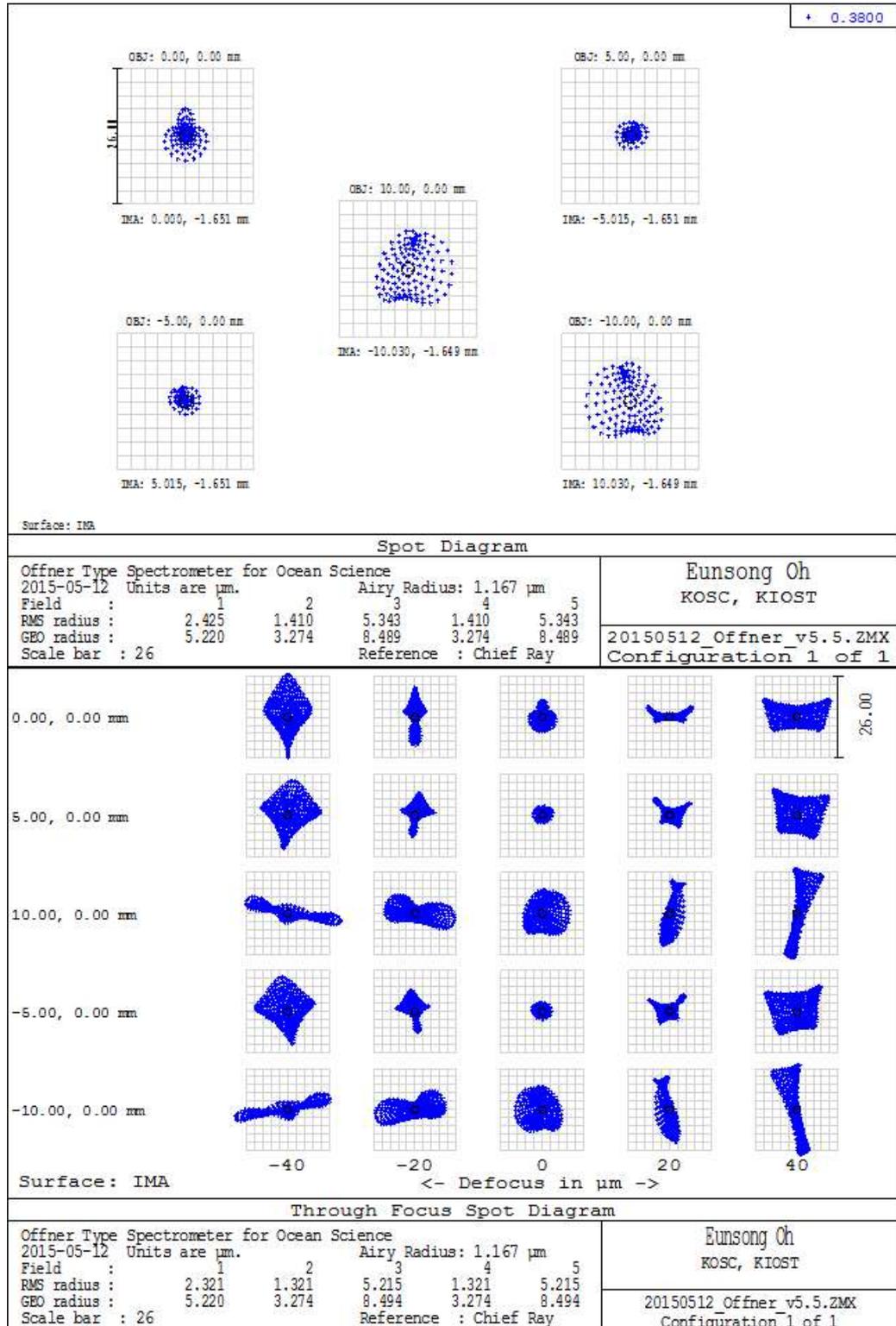


그림 27 Spectrometer Spot diagram (380 nm) : Field & Defocus

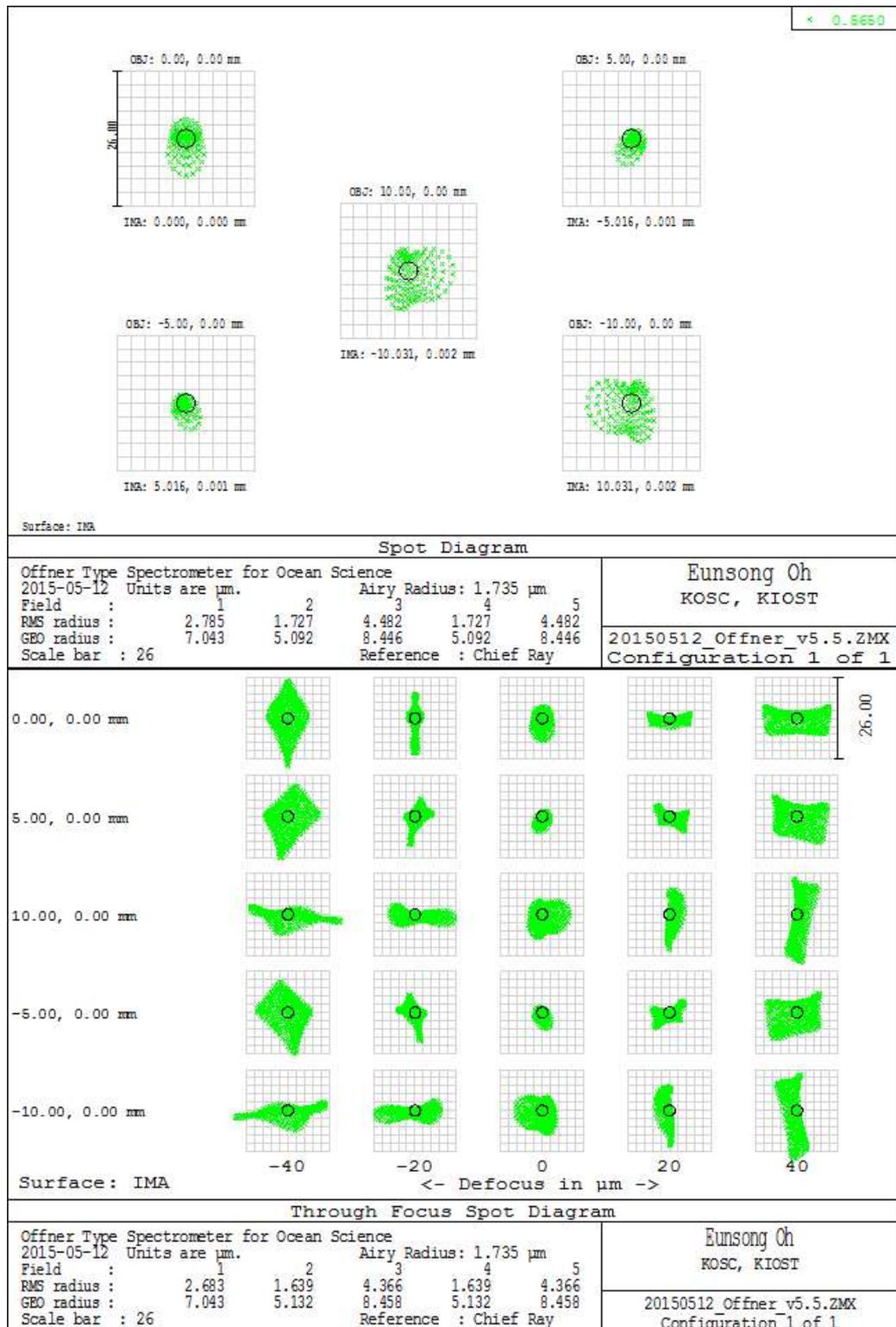


그림 28 Spectrometer Spot diagram (565 nm) : Field & Defocus

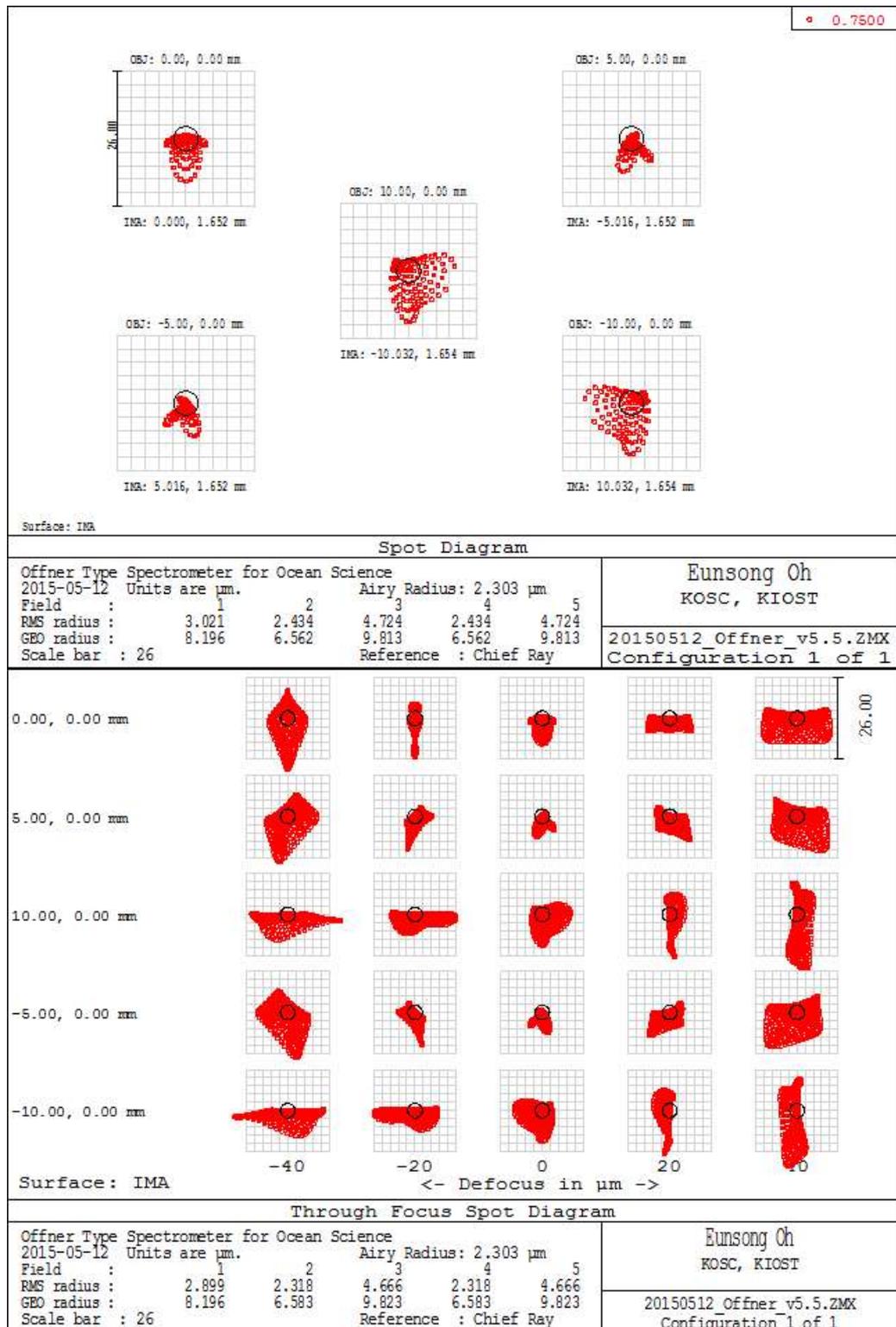


그림 29 Spectrometer Spot diagram (750 nm) : Field & Defocus

다. 3차년도

(1) EO/IR 광학계 설계 최적화 (Spectrometer)

(가) 설계 최적화를 위한 검출기 선정



그림 30 검출기 모델 및 QE

Model number	DU920P
Sensor options	<ul style="list-style-type: none"> • BU: Back Illuminated CCD, UV-Enhanced, 350 nm optimized • BU2: Back Illuminated CCD, UV-Enhanced, 250 nm optimized • BVF: Back Illuminated CCD, Vis-optimized and anti-fringing • OE: Open Electrode CCD
Active pixels *2	1024 x 255
Pixel size	26 x 26 μm
Image area	26.7 x 6.7 mm with 100% fill factor
Minimum temperatures *3	Air cooled Coolant recirculator Coolant chiller, coolant @ 10°C, 0.75 l/min
Max spectra per second *4	144 (OE - Full Vertical Bin) 273 (Full Vertical Bin) 1,149 (OE - Crop Mode - 20 rows) 1,612 (Crop Mode - 20 rows)

그림 31 검출기 스펙

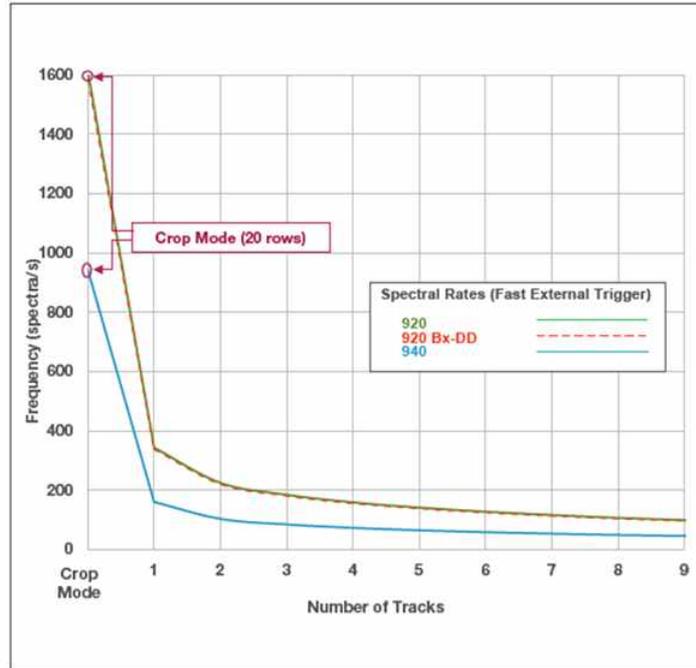


그림 32 검출기 Readout rate 및 speed

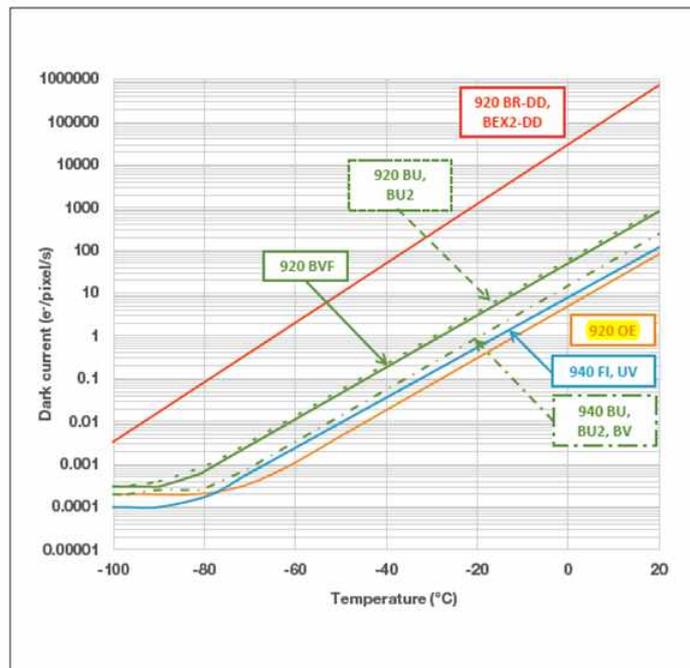


그림 33 검출기 Dark current

(나) Offner type Spectrometer 설계 최적화 수행

① Offner type Spectrometer 설계 parameter

Parameter	Value
Spectral range	400-800 nm
Design wavelength	600 nm
Pixel size	26 um
Spatial image size	26.7 mm
Spectral image size	6.7 mm
Grating density	320 lines/mm
Diffraction order	1

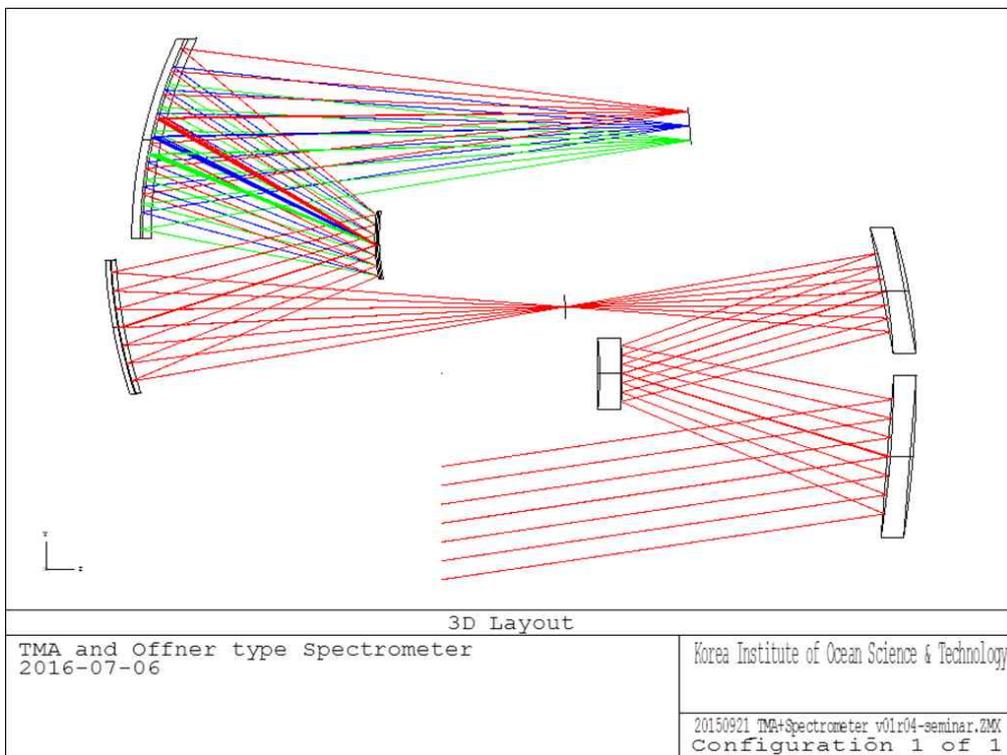
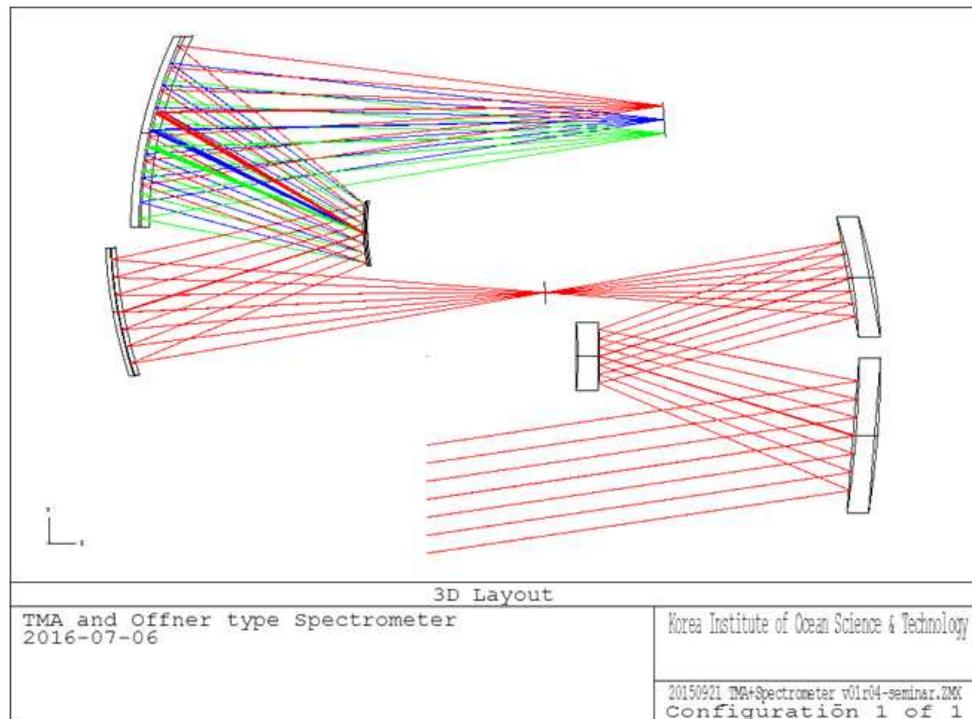
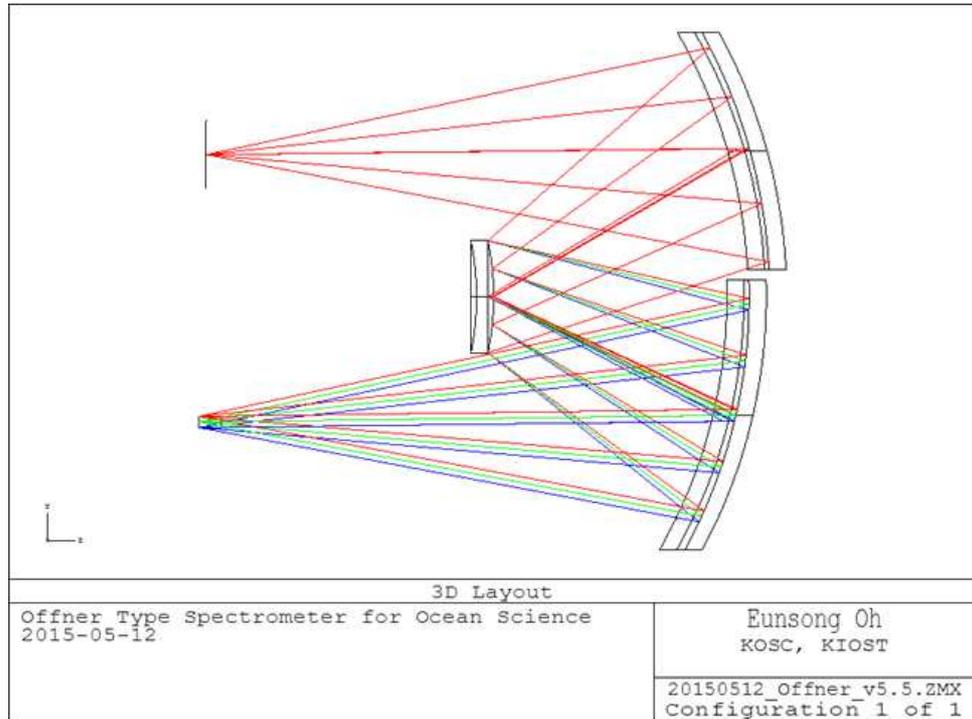
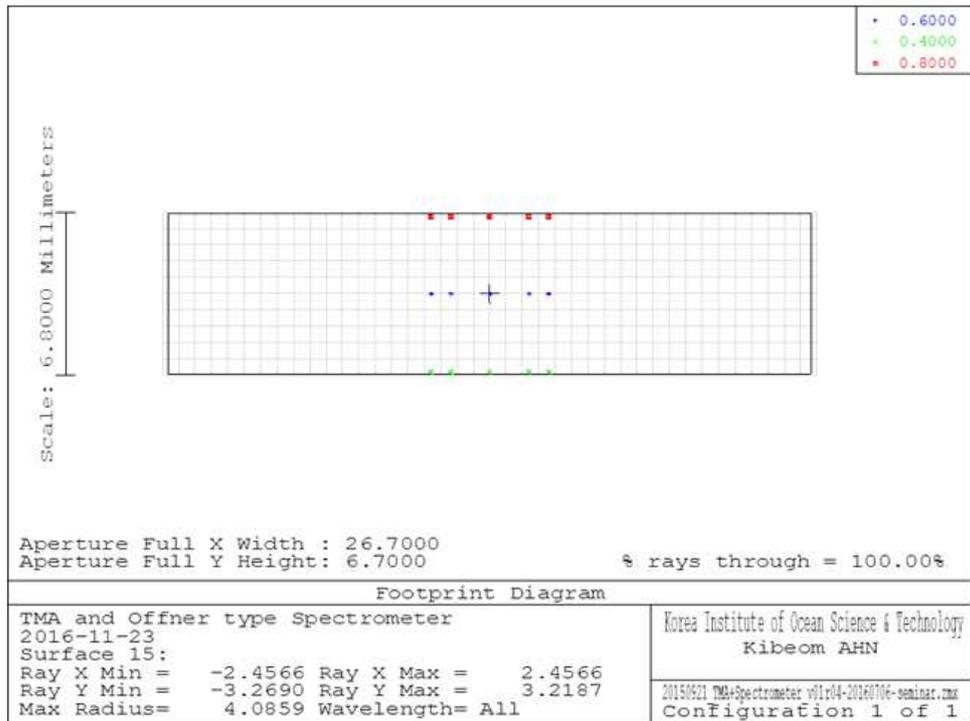
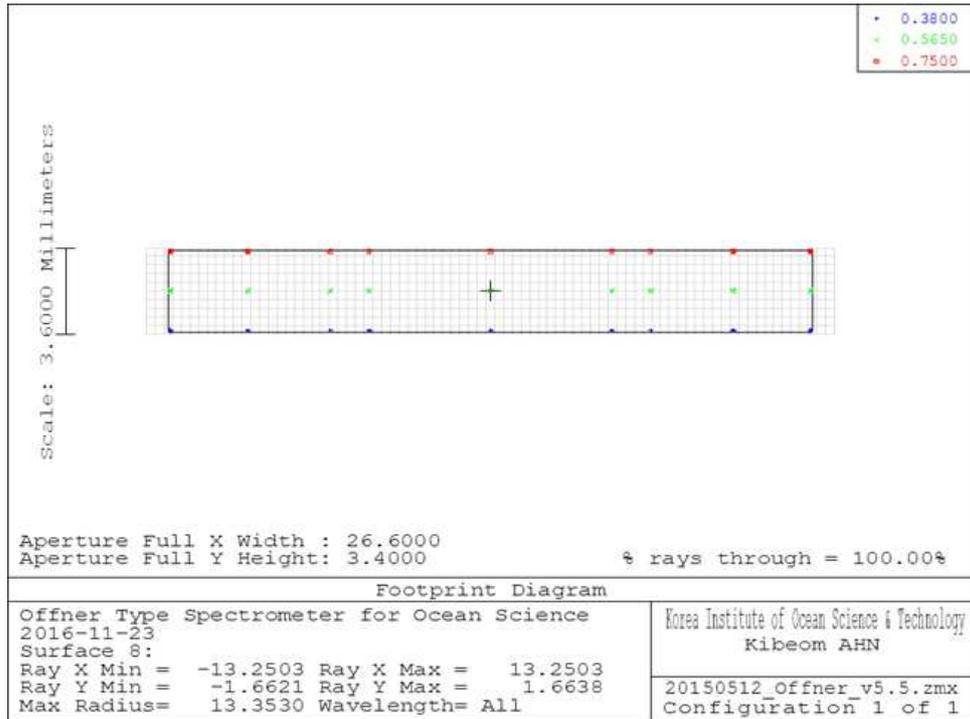


그림 34 Offner type Spectrometer 설계 Layout

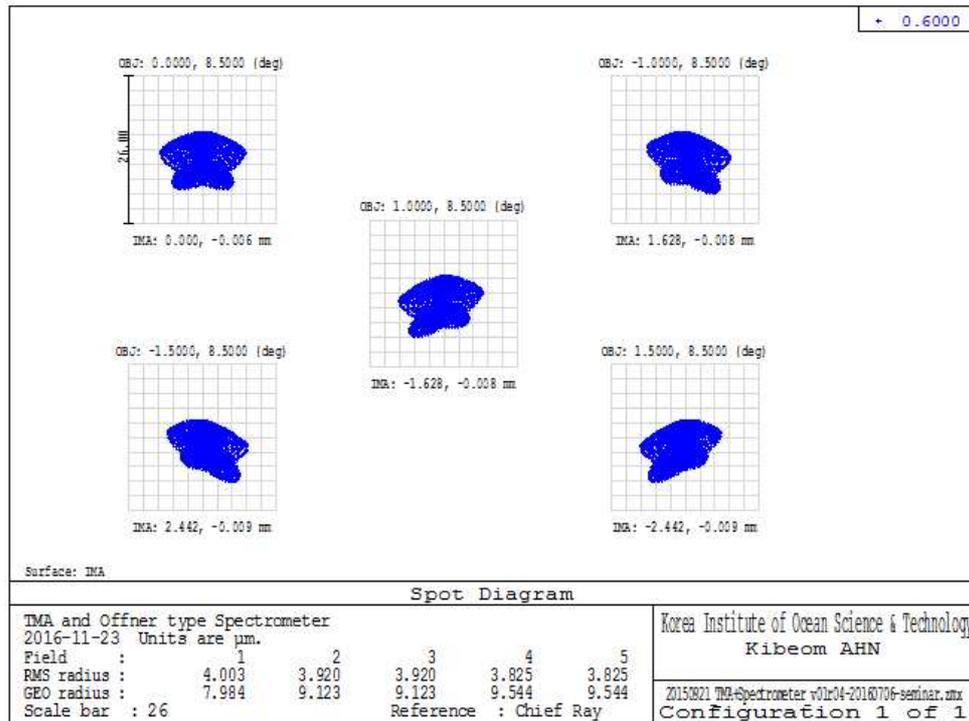
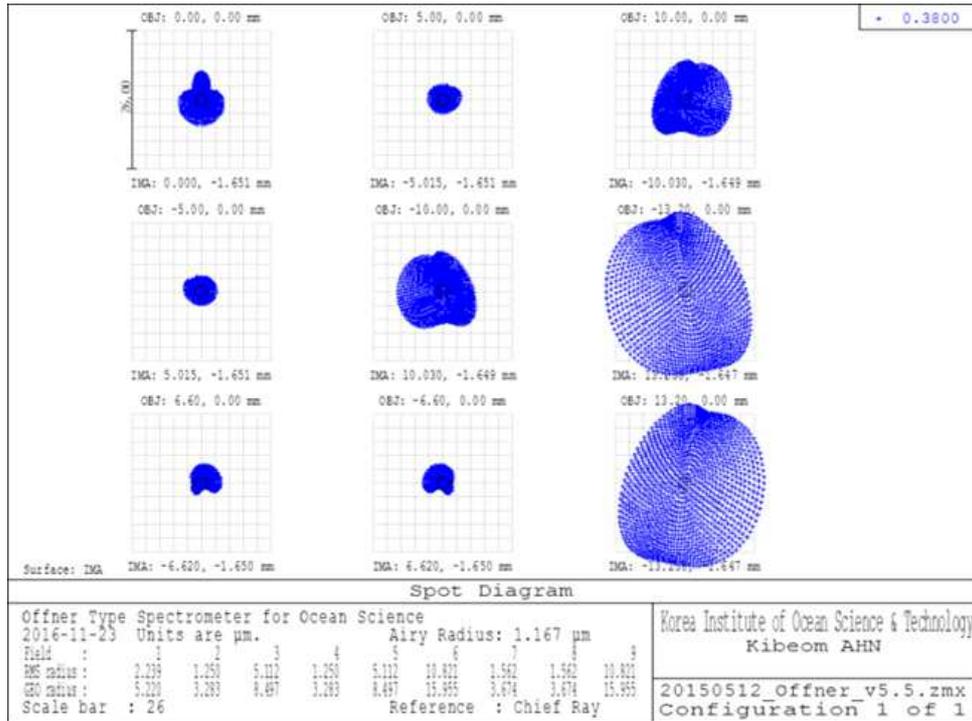
② Offner type Spectrometer 설계 최적화 수행



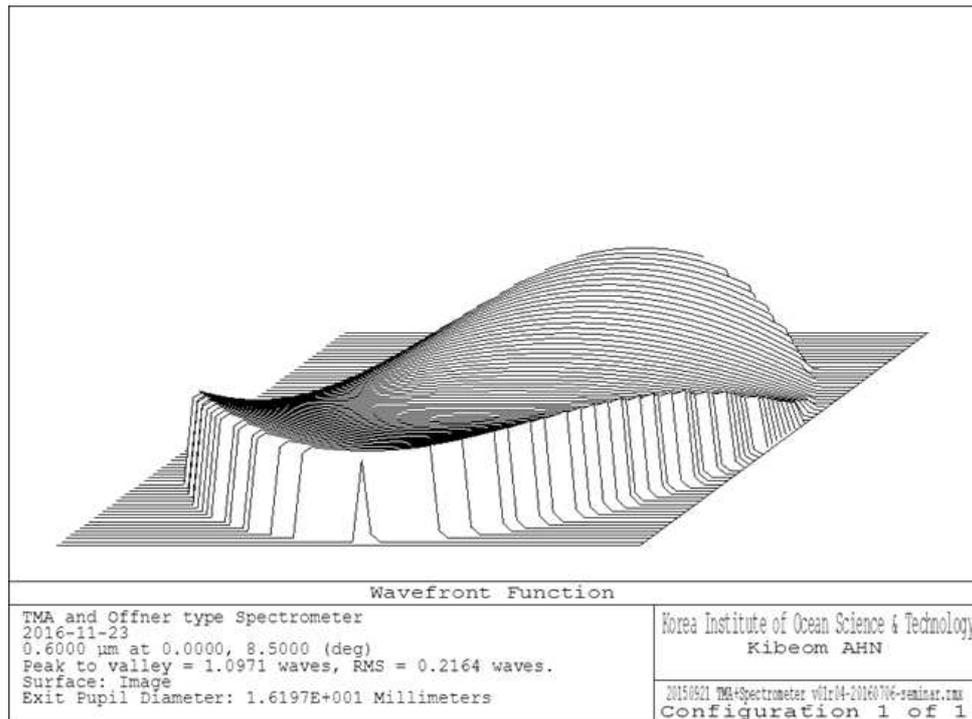
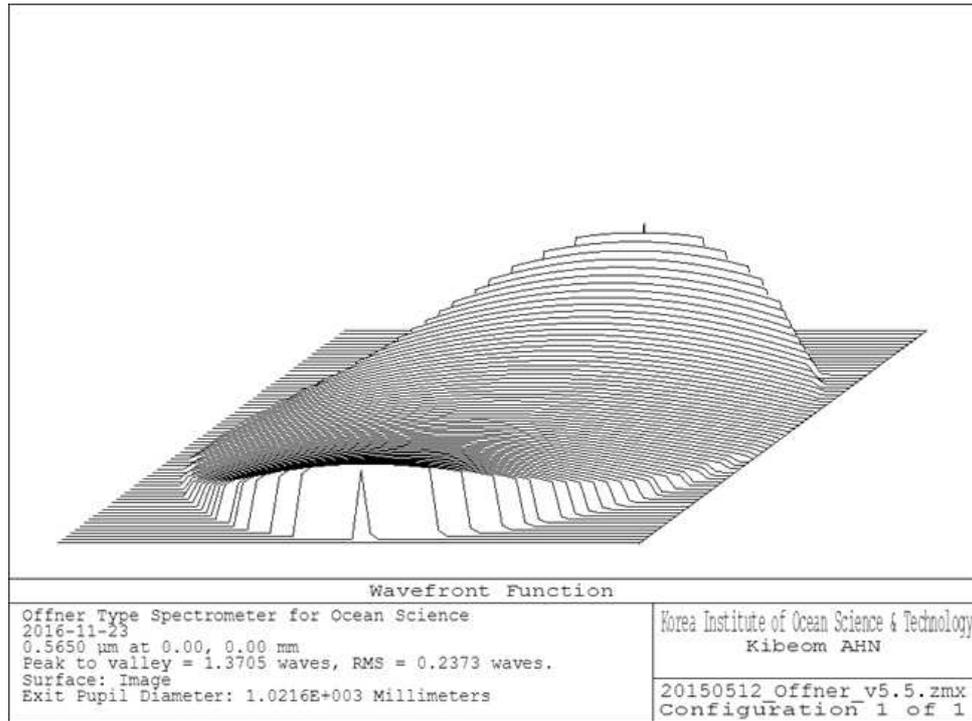
③ Offner type Spectrometer 설계 최적화 수행



④ Spot size 최소화 : 최대 RMS radius 사이즈 [10.8 um] → [3.8 um]



⑤ Wavefront Error 최소화 : RMS [0.2373 waves] → [0.2164 waves]



(1) EO/IR 광학계 조립/정렬 및 성능평가 지원

(가) EO/IR 광학계 조립/정렬 후 성능 : Spot size

- ① Off-axis 광학계가 갖는 astigmatism 성향으로 인해 찌그러진 형태의 Spot shape 를 보임
- ② Spot이 detector 1 pixel(26 μm) 내에 들어옴을 확인함
- ③ Spot size : Maximum spot size [17.5 μm]
 - Spot size = PSF size(rad) x focal length(350 mm)
 - Minimum spot size (y-direction) : 7 μm
 - Maximum spot size (x-direction) : 17.5 μm

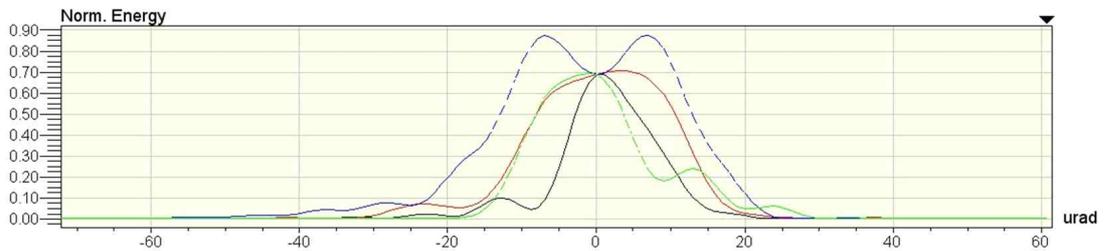


그림 39 EO/IR 광학계 조립/정렬 후 PSF

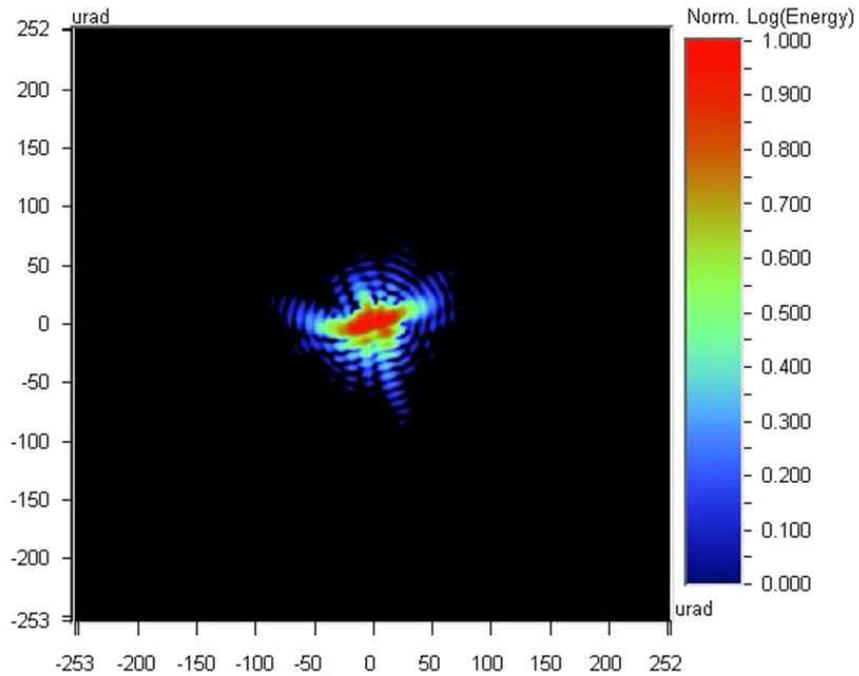


그림 40 EO/IR 광학계 조립/정렬 후 스팟 모양

(나) EO/IR 광학계 조립/정렬 후 성능 : MTF

- ① Off-axis 광학계가 갖는 astigmatism 성향으로 인해 MTF 가 방향에 따라 다름
- ② 실제 분광기와 조립 시에는 0 deg에 Slit 이 위치하게 됨

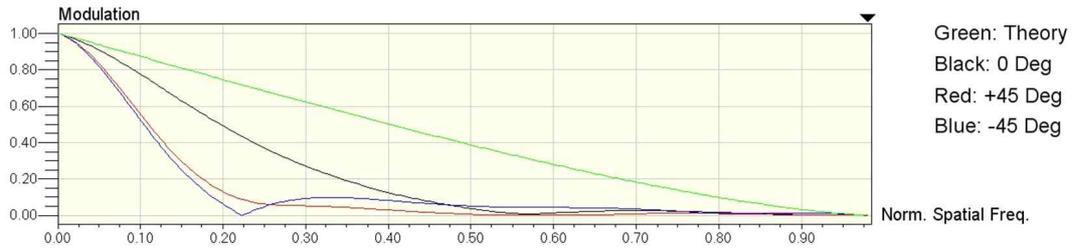


그림 41 EO/IR 광학계 조립/정렬 후 MTF

라. 4차년도

(1) EO/IR 광학계 Straylight 영향 분석 및 베플 설계수행

(가) EO/IR 광학계 Straylight 분석 시스템 개발

- ① EO/IR 광학계 잡광 분석을 위한 3D 모델링 기반 광선추적 분석코드 개발 수행
- ② 기존 광학계의 잡광 분석 방법에는 임계 물체(critical object) 조사를 위한 역방향 광추적과 조사 물체(illuminated object) 획득을 위한 정방향 광추적이 있음
- ③ 하지만 기존 방식은 정확한 결과 도출을 위해서는 입사각도를 최대한 많이 설정하여 분석을 수행하여야 되므로, 많은 시간과 인력이 소요됨
- ④ 이에 대하여 한번의 분석을 통하여 검출기 한 픽셀에 도달하는 잡광 분석 시스템을 개발함

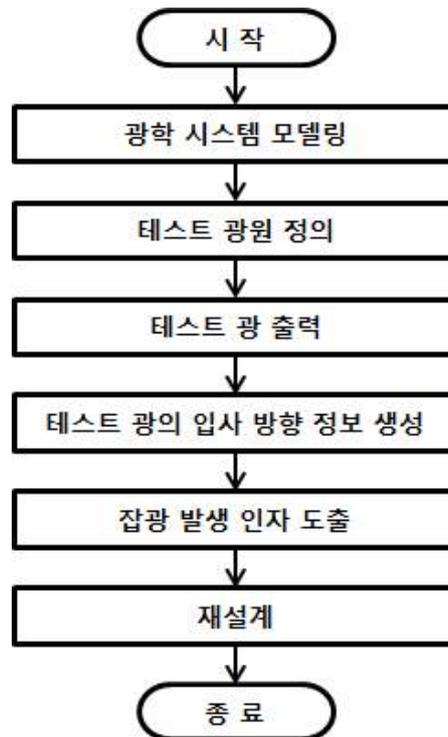


그림 42 EO/IR 광학계 잡광 분석 시스템 흐름도

(나) EO/IR 광학계 Straylight 분석 수행

① 잡광분석요소

Structure scatter model	Ultra Black Harvey (TIS 0.05)
Optics scatter model	Lambertian (TIS 0.05)
Level	5

② EO/IR 전단광학계가 TMA 구조로 광학계 내부가 open 된 형태로 straylight에 취약함

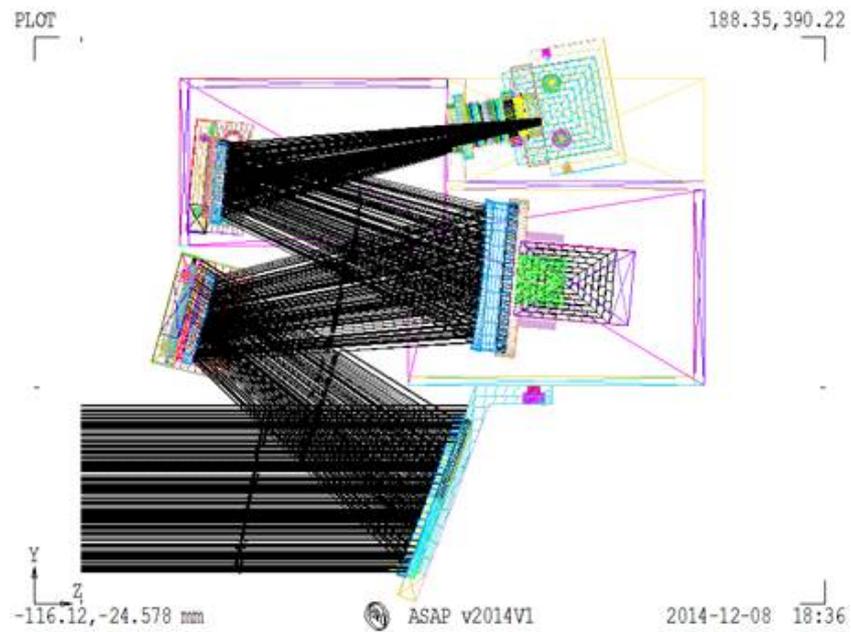


그림 43 초기 EO/IR 광기계부에 대한 잡광분석 수행

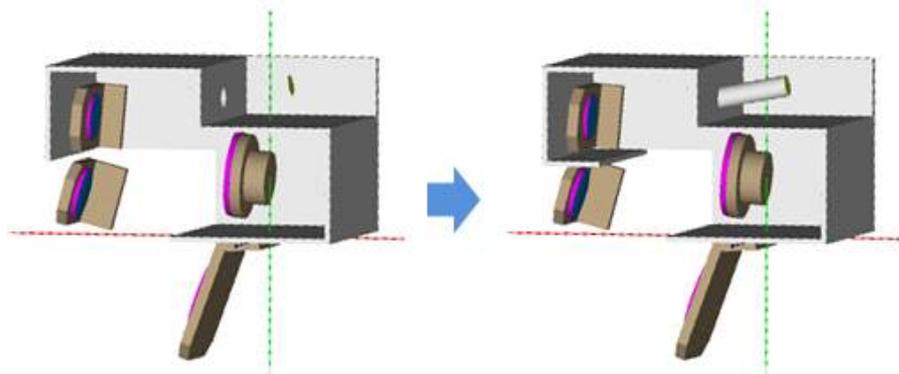
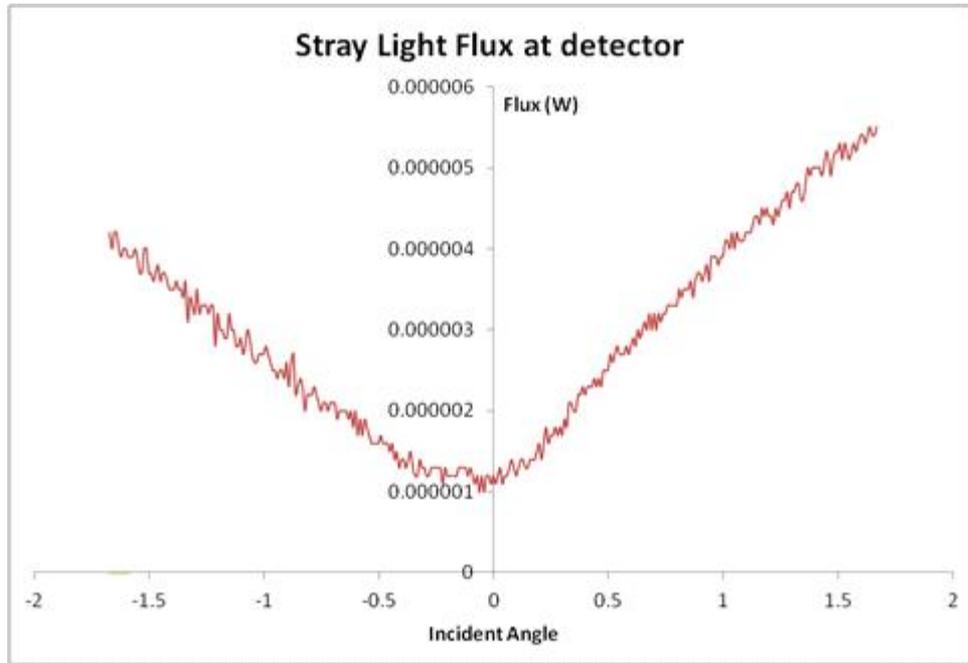
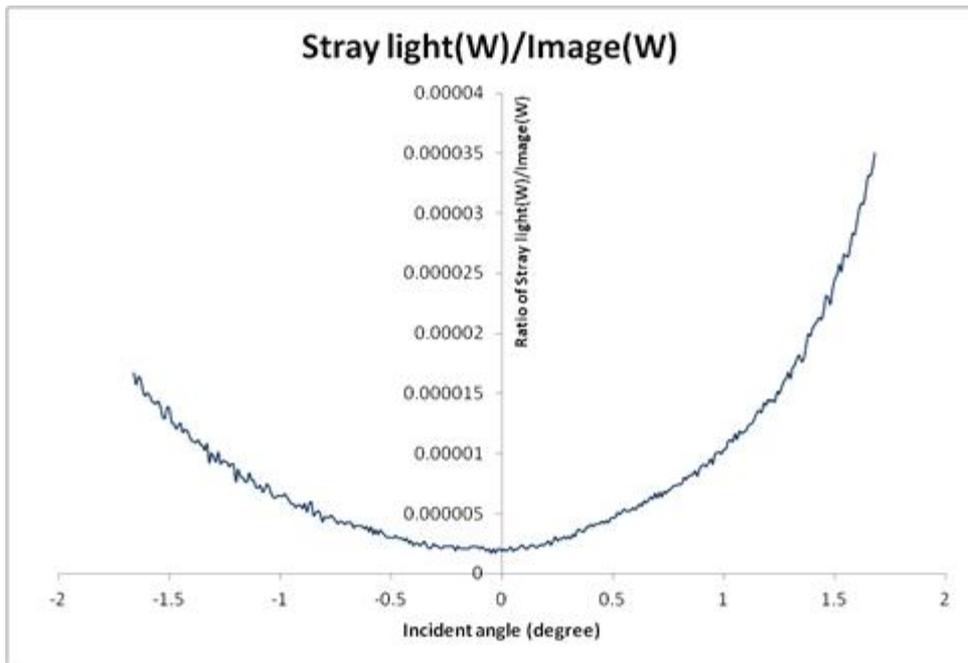


그림 44 초기 EO/IR 광기계부에 대한 잡광분석 결과에 따른 베플 설계

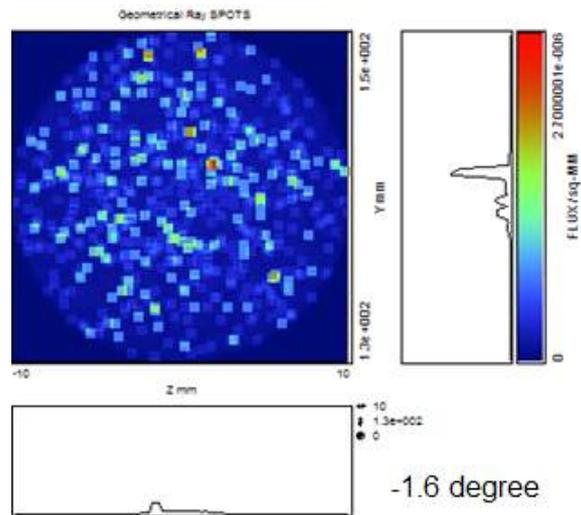
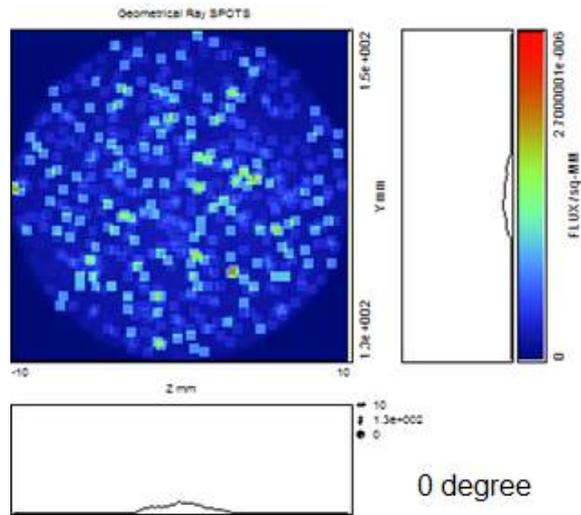
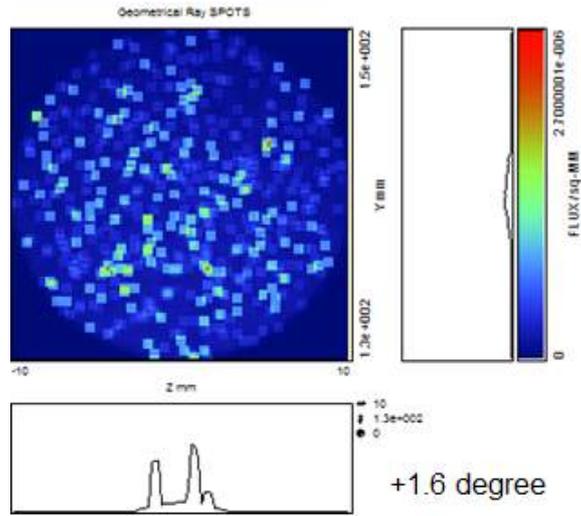
③ 입사각에 따른 Straylight flux 분석



④ 입사각에 따른 Straylight ratio 분석



⑤ 입사각에 따른 Straylight 분포



(나) 최종 EO/IR 광학계 Straylight 분석 및 배플 설계 수행

① 최종 EO/IR 광학계 Straylight 분석

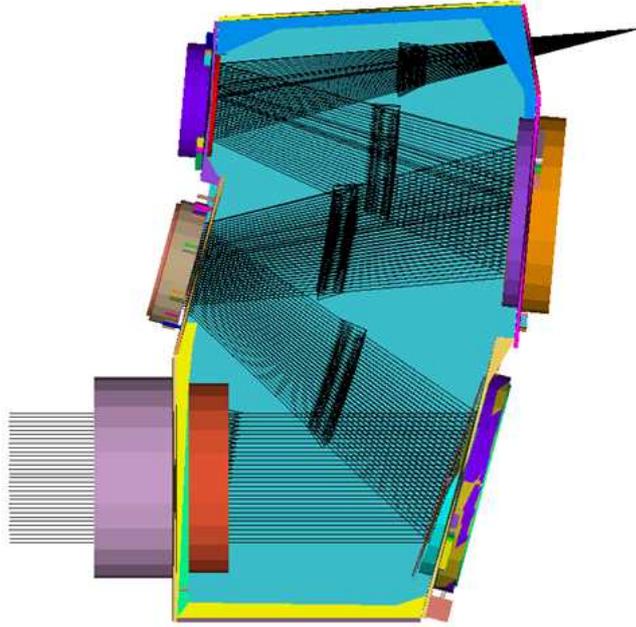


그림 50 최종 EO/IR 광학계 3D 모델링 및 Layout

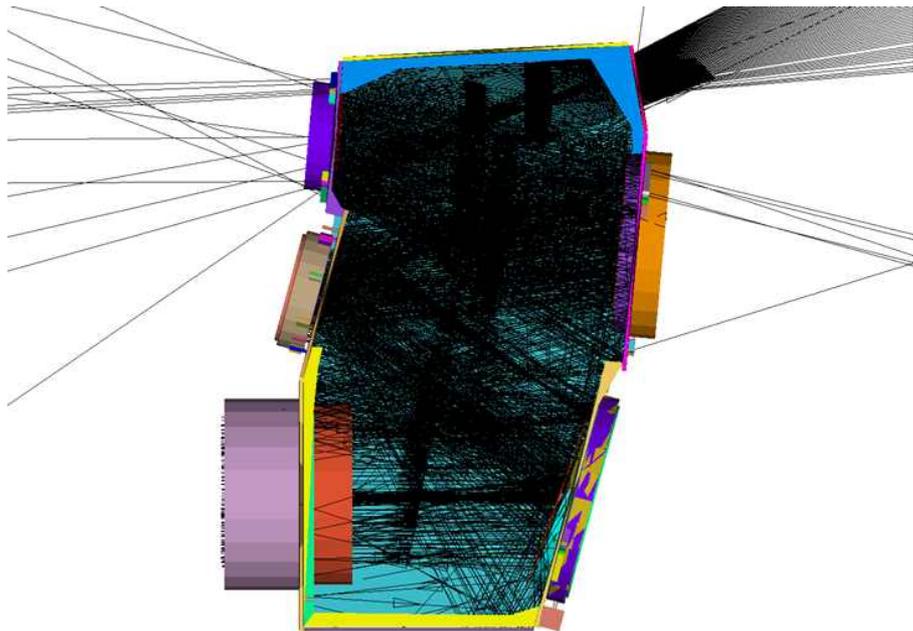


그림 51 최종 EO/IR 광학계 잡광 분석 결과

① 최종 EO/IR 광학계 배플 설계 수행

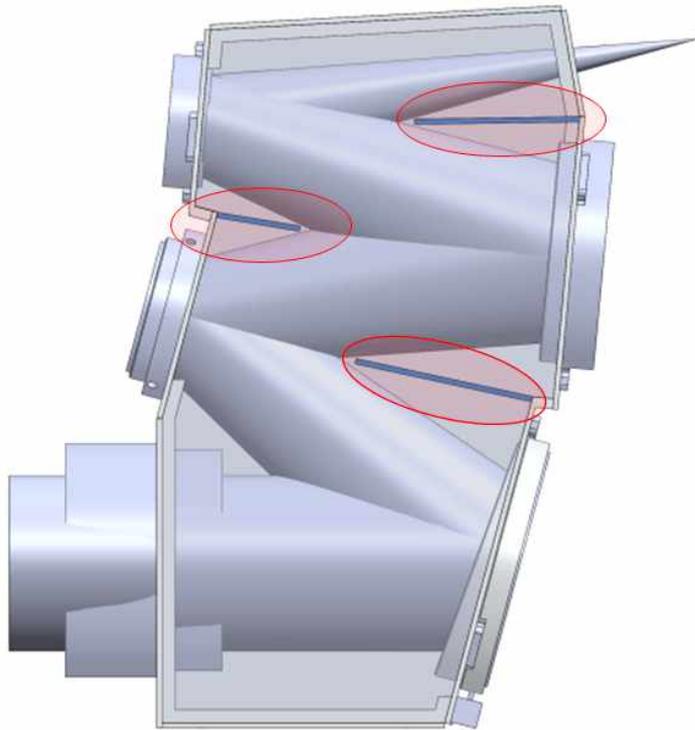


그림 52 최종 EO/IR 광학계 배플 설계안

제 4 장 연구개발목표 달성도

제 1 절 연구개발목표 달성도

1. 정량적 목표 대비 달성실적

가. 연구개발목표 대비 연구 성과

구분	연구개발목표	연구성과	달성도 (%)
1차년도 (2014)	항공탑재용 EO/IR 광학계 요구사항(URD) 설정 및 상세설계 수행	1. 해상도, 관측범위, 탑재 중량 등을 고려한 사용자 요구사항 설정 2. EO/IR 광학계의 예비/상세 설계 수행 3. 상용 센서를 통한 사전 관측 및 검증 시험 수행	100
2차년도 (2015)	EO/IR 광학계 제작 및 원격탐사기술 개발	4. EO/IR 광학계 상세설계 후 제작 공정 지원 5. 고해상도 소형 센서 기반 연안/해양 원격탐사 기술 고도화 수행 6. 현장 관측을 통한 원격탐사 기술 정확도 향상	100
3차년도 (2016)	EO/IR 광학계 설계 최적화 및 성능평가	7. EO/IR 광학계 설계 최적화 수행 8. EO/IR 광학계 제작 공정 및 조립/정렬 지원 9. 제작된 EO/IR 광학계 성능평가 수행	100
4차년도 (2017)	EO/IR 광학계 Straylight 영향분석	10. EO/IR 전단광학계 Straylight 영향분석 11. EO/IR 분광계 Straylight 영향분석	100

나. 학술발표실적

번호	구분 (학술지 게재, 학회발표)	논문명	저자명	저널명	일시	구분 (국내, 국외)	SCI (JCR%)	발생 차수
1	학회발표	Performances of CAA Algorithms for Alignment State Estimation Simulations for Three-mirror Anastigmat Earth Observation Optical System	강혁모, 오은송, 현상원, 김건희, 박영제, 김석환	한국우주과학회지	2014.10.	국내	-	1차년도
2	학회발표	Development Progress of Ocean Color Sensor Based on UAV : Design and Performance of TMA Optical System	오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 김석환	한국우주과학회지	2014.10.	국내	-	1차년도

3	학술지 게재	연안 원격탐사를 위한 비축 삼반사경 설계와 성능분석	오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 최종국, 김석환	한국광학회지	2015.06.	국내	-	2차년도
4	학회 발표	Design and performance analysis of front end optical instrument for coastal water remote sensing	오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 최종국, 김석환	SPIE	2015.05	국외	-	2차년도
5	학회 발표	Alignment performance comparison between MFR and MDCO for aTMA optical system	강혁모, 오은송, 현상원, 김건희, 김석환	SPIE	2015.08	국외	-	2차년도
6	학회 발표	Ray tracing based ISRD (inter-slot radiometric discrepancy) simulation tool for GOCI	안기범, 조성익, 오은송, 박영제, 김석환	SPIE	2015.08	국외	-	2차년도
7	학회 발표	Finishing Characteristics for SiC Optics of 3 Reflected Optical System using MRF	한정열, 오은송, 김진호, 이종건, 한성엽, 남오원, 장비호, 장정균, 김건희	한국정밀공학회지	2015.12.	국내	-	2차년도
8	학회 발표	Design and Development Status of Precise off-axis TMA for Hyperspectral Remote Sensing based on UAV	오은송, 안기범, 조성익, 현상원, 김건희, 박영제	한국정밀공학회지	2015.12.	국내	-	2차년도
9	학술지 게재	Development of an Off-Axis TMA Telescope for Coastal Water Remote Sensing	Min-Woo Jeon, Sang-Won Hyun, Ji-Yong Bae, Byeong-Joon Jeong, Eun-Song Oh, Hyuk-Mo Kang, Young-Je Park, Chan-Pil Park, Geon-Hee Kim	IJPPEM	2016.05.	국내	-	2차년도
10	학회 발표	Development of ultra precision optical system based on the freeform optical devices and modules	안기범, 조성익, 오은송, 박영제	한국정밀공학회지	2016.10.	국내	-	3차년도
11	학회 발표	Form Error Analysis for Freeform Aluminum Mirrors using DTM	정병준, 김건희, 조성익, 안기범, 정의식, 명태식, 박준섭, 최환진, 여인주	한국정밀공학회지	2016.10.	국내	-	3차년도
12	학회 발표	Design of ultra precision processed off-axis TMA based freeform optical system	KIBEOM AHN, Seongick CHO, Eunsong OH, Seon-yeong Jeong, Young Je Park	ISGMA	2017.06.	국외	-	4차년도

다. 특허출원실적

특허명	발명자	출원일	출원번호	출원국가
초분광 검출용 비축 반사 광학계 설계	오은송, 박영제, 강혁모, 김건희, 현상원	2014.11.17	10-2014-0160031	대한민국
웨이퍼 에지 노광용 시준기 설계	오은송	2014.10.31	10-2014-0150459	대한민국

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 기대성과

1. 기술적 측면

- 가. 유·무인항공기에 장착 가능한 광학계의 개발로 원격탐사 관측 자료 정확도의 획기적 증가 예상, 고해상도 영상 자료의 전처리 기술 개발 능력 향상 및 갯벌 주제도 작성, 갯벌 환경 변화 분석 기술 개발 등 국제 수준의 기술 선도
- 나. 시간 해상도가 높은 정밀 침식/퇴적 주제도 작성, 정밀 생태환경 공간 주제도 작성, 고해상도 영상자료를 이용한 국내 연안개발에 따른 연안 환경 변화 규명 등 국제 수준의 연구 성과 도출 유도
- 다. 연안/해양 관측에을 위한 비행체, 탑재체, 운영기술, 활용기술 분야를 아우르는 ‘수요에 맞는 최적화된 시스템’ 개발에 기여함
- 라. ‘달탐사 프로젝트’의 필수 기술 중 하나인 탑재체 개발 기술의 일환으로 우주 강국으로서의 기초 기술을 확보할 수 있음

2. 경제·산업적 측면

- 가. 연안/해양 탐사에 효과적인 광학계의 개발로 무인항공기의 활용 효율성 증가, 갯벌 복원 및 보전을 위한 기초 자료 제공 등 무인항공 시스템 활용 활성화
- 나. 연안/해양 환경 관리에 대한 지침 마련 및 법령화 기반 구축으로 국내 갯벌의 가치 및 효용성 제고
- 다. 유·무인항공기를 이용한 실시간 감시 체계를 구축하여 연안에서의 각종 활동 보호 및 구조에 활용
- 라. 소형 EO/IR 개발의 원천 기술 확보를 통한 우주 산업의 활성화에 기여

제 2 절 활용방안

1. 활용방안

- 가. 무인항공기 플랫폼에 장착 가능한 EO/IR센서의 개발로 갯벌, 퇴적지의 퇴적상 분포 연구, 갯벌 주제도를 기반으로 한 생태 지도 작성 및 갯벌 지역의 염생 식물 및 미세저서조류 분포 연구 등 연안/해양 환경 특성 분석이 가능하며 연안/해양의 환경 모니터링 등의 연구 수행 가능
- 나. 무인항공기 장착 광학계의 분광 특성 분석을 통해 열대 연안의 산호초 분포 특성(산호, 잘피 산호사 등)을 분석하고 영상 분석 결과와 현장 조사 자료의 비교를 통해 미세한 산호 서식 환경 분포도를 작성
- 다. 산호 분포 지역에 대한 주기적인 고해상도 영상 획득을 통해 장기간의 산호 서식환경 변화를 모니터링 할 수 있음
- 라. 연안/해양 지역을 포함한 다양한 분야의 재난/재해 모니터링, 극지환경 분석에서의 활용 등 다양한 활용분야가 존재

제 6 장 참고문헌

- [1] 오은송, 강혁모, 현상원, 김건희, 박영제, 최중국, 김석환, 연안원격탐사를 위한 비축 삼반사경 설계와 성능분석, 한국광학회지 제26권 3호, (2015).
- [2] Min-Woo Jeon, Sang-Won Hyun, Ji-Yong Bae, Byeong-Joon Jeong, Eun-Song Oh, Hyuk-Mo Kang, Young-Je Park, Chan-Pil Park, Geon-Hee Kim, Development of an off-axis TMA telescope for coastal water remote sensing, IJPEM, Vol. 17, Iss. 5, pp 685 - 689, (2016).
- [3] W. A. Hovis, D. K. Clark, F. Anderson, R. W. Austin, W. H. Wilson, E. T. Baker, D. Ball, H. R. Gordon, J. L. Mueller, S. Z. El-sayed, B. Sturm, R. C. Wrigley, and C. S. Yentsch, "Nimbus-7 Coastal zone color scanner: System description and initial imagery," Science 210, 60-63 (1980).
- [4] C. R. McClain, "A decade of satellite ocean color observations," Ann. Rev. Mar. Sci. 1, 5-42 (2009).
- [5] J.-H. Ryu, H.-J. Han, S. Cho, Y.-J. Park, and Y.-H. Ahn, "Overview of Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and GOCI Data Processing System (GDPS)," Ocean Sci. J. 47, 223-233 (2012).
- [6] J.-H. Ryu, J.-K. Choi, and Y.-K. Lee, "Potential of remote sensing in management of tidal flats: A case study of thematic mapping in the Korean tidal flats," Ocean & Coastal Management 102, 458-470 (2014).
- [7] G. Vane, R. O. Green, T. G. Chrien, H. T. Enmark, E. G. Ganse, and W. M. Porter, "The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)," Remote Sens. Environ. 44, 127-143 (1993).
- [8] K. L. Carder, P. Reinersman, R. F. Chen, F. M. Karger, C. O. Davis, and M. Hamilton, "AVIRIS calibration and application in Coastal oceanic environments," Remote Sens. Environ. 44, 205-216 (1993).
- [9] Z. Lee, K. L. Carder, R. F. Chen, and T. G. Peacock, "Properties of the water column and bottom derived from Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data," J. Geo. Res. Oceans. 106, 11639-11651 (2001).
- [10] Z. P. Lee, B. Casey, R. Parsons, W. Goode, A. Weidemann, and R. Arnone, "Bathymetry of shallow Coastal regions derived from space-borne hyperspectral sensor," Proc. MTS/IEEE, 2160-2170 (2005)
- [11] P. J. Mumby, J. R. M. Chisholm, C. D. Clark, J. D. Hedley, and J. Jaubert, "A bird's-eye view of the health of coral reefs," Nature 413, 36 (2001).
- [12] C. O. Davis, J. Bowles, R. A. Leathers, D. Korwan, T. V. Downes, W. A. Snyder, W. J. Rhea, W. Chen, "Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and

- calibration," *Opt. Express* 10, 210-221 (2002).
- [13] R. L. Lucke, M. Corson, N. R. McGlothlin, S. D. Butcher, D. L. Wood, D. R. Korwan, R. R. Li, W. A. Snyder, C. O. Davis, and D. T. Chen, "Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: instrument description and first images," *Appl. Opt.* 50, 1501-1516 (2011).
- [14] J.-K. Choi, J.-H. Ryu, J. Eom, S.-M. Roh, and J. H. Noh, "Analysis on the sedimentary environment and microphytobenthos distribution in the Geunso bay tidal flat using remotely sensed data," *J. Wetlands Res.* 12, 67-78 (2010).
- [15] K. Kim, J. Eom, J.-K. Choi, J.-H. Ryu, and K. Y. Kim, "Application of hydroacoustic system and Kompsat-2 image to estimate distribution of Seagrass Beds," *The Sea* 17, 181-188 (2012).
- [16] J.-E. Min, J.-H. Ryu, J.-K. Choi, and H.-S. Park, "Coral reef habitat monitoring using high-spatial satellite imagery : A case study from Chuuk Lagoon in FSM," *Ocean and Polar Res.* 32, 53-61 (2010).
- [17] R. Sandau, *Digital Airborne Camera: Introduction and Technology* (Springer, Berlin, Germany, 2009), Chapter 4.
- [18] J. Fisher and W. C. Welch, "Survey and analysis of fore-optics for hyperspectral imaging systems," *Proc. SPIE* 6206, 62062R-1-11 (2006).
- [19] J. U. Lee, "Analytic design procedure of three-mirror telescope corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and petzval field curvature," *J. Opt. Soc. Korea* 13, 184-192 (2009).
- [20] X. L. Li, M. Xu, X. D. Ren, and Y. T. Pei, "An optical design of off-axis four-mirror anastigmatic telescope for remote sensing," *J. Opt. Soc. Korea* 16, 243-246 (2012).
- [21] X. L. Li, M. Xu, and Y. T. Pei, "Optical design of an off-axis five-mirror-anastigmatic telescope for near infrared remote sensing," *J. Opt. Soc. Korea* 16, 343-348 (2012).
- [22] P. Mouroulis, R. G. Sellar, D. W. Wilson, J. J. Shea, and R. O. Green, "Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy," *Opt. Eng.* 46, 063001-1-9 (2007)

주 의

1. 이 보고서는 한국기초과학지원연구원 위탁연구기관에서 수행한 연구 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국기초과학지원연구원에서 수행한 위탁연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.