

[www.kiost.ac.kr](http://www.kiost.ac.kr)

# 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발에 관한 연구

Development of ultra precision optical system based on the  
freeform optical devices and modules

## 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발에 관한 연구” 과제의  
연차보고서로 제출합니다.

2021. 02.

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원

총괄연구책임자 : 조 성 익

참 여 연 구 원 : 박 영 제

“ : 김 광 석

## 보고서 초록

과제고유 번호	PE99871	해당단계 연구기간	2020.01.01. ~ 2020.12.31.	단계 구분	5차년도
연구사업명	중사업명	주요사업(국가사회현안대응과제)			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발			
	세부과제명	자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발			
연구책임자	조성익	해당단계 참여연구원수	총 : 3 명 내부: 2 명 외부: 1 명	해당단계 연구비	정부: 100,000천원 기업:        천원 계 : 100,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 :        명 내부:        명 외부:        명	총 연구비	정부:        천원 기업:        천원 계 :        천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양위성센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>■ 연구개발 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자유형상 광부품 초정밀 가공 공정 기술과 장비에 대한 신뢰성 평가 및 활용 기술을 위한 우주급 초정밀 광학계 개발</li> </ul> <p>■ 연구수행 내용</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계</li> <li>- SiC 미러 구조 설계</li> <li>- 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가를 위한 실험실 구축</li> <li>- 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가</li> <li>- 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가</li> </ul> </li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	자유형상, 초정밀 가공, 우주급 광학계, 신뢰성 평가			
	영 어	Freeform, Ultra Precision Processing, Space optics, Performance reliability assessment			

# 요 약 문

## I. 제 목

자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발의 목적

자유형상 광부품 초정밀 가공 공정 국산화 및 상용화를 위해, 가공 상의 신뢰성 확보 및 가공 정밀도 향상을 위해, 과학기술정보통신부 국가과학기술연구회의 예산지원으로 한국기초과학지원연구원(KBSI) 및 한국핵융합연구소(NFRI)와 공동으로 응모한 출연연간 공동연구과제인 창의형융합연구(CAP)과제의 기관부담금(매칭펀드) 과제임. 주관기관인 KBSI에서 신개념의 대면적 자유곡면 고속 측정기 및 나노미터급 미세표면 검사기를 개발하고, 2세부과제를 수행하는 NFRI에서 차세대 가공 공정으로서 상압 플라즈마/이온빔 가공공정을 개발하여, 3세부과제를 수행하는 한국해양과학기술원(이하 KIOST)는 상기 가공 검사장비의 검증을 겸한 차세대 초정밀 해양관측위성 독자개발을 목적으로 해양관측위성 및 무인기 광학계 등에 모과제(국가과학기술연구회 CAP과제)의 개발결과물(초정밀 가공, 검사장비) 기술 적용을 통하여 해당장비의 신뢰성을 검증하고 장비를 상용화하는 한편, 기술이전이 거의 불가능한 초정밀 우주급 광학계 국산화 개발을 달성하는 것을 그 목적으로 함

### 2. 연구개발의 필요성

해양수산부의 예산지원으로 해양과학기술원이 개발에 참여하고, 10년 넘게 운영하고 있는 천리안 해양위성 1호 및 '20년 2월에 발사된 천리안 해양위성 2호 해양관측 위성탑재체는 SiC 기반 초정밀 자유형상 광학계로 구성되어 있음. 이는 낮은 열팽창률(CTE) 및 우수한 강성으로 인해, 위성시스템 개발의 핵심 소재로 각광받고 있으나, 제작과 가공이 매우 어려울뿐만 아니라, 방산물자로 지정되어 있어 국산화개발이 필요함. 해당 기술은 2020년 현재까지 국내 기술자립화가 달성되지 못하여, 국내주도개발이 예정된 천리안 3호 해양위성 개발과 연계한 국내기술 확보가 매우 시급함. 특히, 천리안 해양위성 성공 이후, 중국과 인도를 중심으로 정지궤도 지구관측위성 개발이 가속화되고 있으며, 이미 중국은 2015년에 천리안 해양위성 1호보다 해상도가 100배 우수한 50m급 고해상도 정지궤도 지구관측위성(Gaofen-4, 중국 2015) 발사에 성공하였으며, 인도는 2020년 발사를 목표로 초다분광 정지궤도 지구관측위성(GISAT, 인도 2020 예정) 발사를 준비하고 있는 상황을 고려할 때, 2030년대 발사 예정인 천리안 해양위성 3호 위성의 고해상도 해양탑재체 국내주도개발 달성을 위해서는 우주급 초정밀광학계 핵심기술 개발이 시급함.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

#### 1. 연구기간

2020년 1월 1일 ~ 2020년 12월 31일

#### 2. 연구개발의 내용 및 범위

구분	년도	세부연구목표	연구내용
5차년도	2020년	초정밀 광학계 조립/정렬/성능평가 및 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가	○ 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가(100% 완료) - 본 과제에서 개발된 가공장비로 제작된 광학계의 조립/정렬 및 성능평가 수행
			○ 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가 (100% 완료) - 본 과제에서 개발된 가공장비로 제작된 광부품의 우주환경시험을 통하여 신뢰성 평가 수행

### IV. 연구개발결과

- 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계
  - 구경 200mm 자유형상 광부품 기반 비축-비구면 우주급 초정밀 광학계 설계
  - 구경 300mm 자유형상 광부품 기반 비축-비구면 우주급 초정밀 광학계 설계
  - 구경 300mm 자유형상 광부품 기반 광축-비구면 우주급 초정밀 광학계 설계
  - 구경 600mm 자유형상 광부품 기반 비축-비구면 우주급 초정밀 광학계 설계
  - 국내 특허 출원 및 등록
  
- 초정밀 광학계 분석 및 광구조물 최적화
  - 구경 200mm 비축-비구면 광학계 straylight 분석 및 광구조물 설계 최적화
  
- 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 개발
  - 초정밀 광학계 잡광 분석을 위한 3D 모델링 기반 광선추적 분석코드 개발
  - 국내 특허 출원 및 등록
  
- 초정밀 광학계 평가 시스템 구축을 위한 기본설계
  - 국제수준 신뢰성 평가(환경시험) 요구사항 도출
  - 신뢰성 평가 시험 계획 및 시험 인프라 구축 방안 수립
  
- 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가를 위한 실험실 구축
  - 고성능의 초정밀 광학계 조립/정렬을 위한 간섭계(Interferometer) 구축
- 해양 나노위성용 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가기술 고도화

- 초정밀 광학계 조립/정렬 공차분석
  - 레퍼런스 광학계 형상오차 측정
  - 널 렌즈를 이용한 반사경의 형상오차 측정
  - 우주용 특수소재 SiC(실리콘 카바이드) BRDF 특성모델 개발
- 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가 시험 수행(AI 광학계 기반)
- 간섭계를 활용한 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 성능평가.
- 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가
- 정적하중시험 계획 수립 및 검증시험
  - 발사환경시험 방안 수립
  - 우주환경시험 전후 신뢰성검증용 변조전달함수(MTF) 측정방안 수립
  - 우주환경시험 기반 신뢰성 평가 방법 검증 수행
  - 열주기 시험을 성공적으로 수행함
  - 열주기 시험 전후 광학계의 변화형상 없음을 확인함으로써 우주환경에서의 신뢰성을 확보함
- 우주급 초정밀 광학계 최적 설계 및 실제 인공위성 개발기회 확보 성공
- 부산광역시 : 해양과기원(3세부기관)이 제안한 초정밀 해양관측카메라 개발을 핵심으로 하는 총 사업비 182억원의 해양 나노위성 개발 사업 시작(2019~2021)
  - 해양경찰청 : 해양과기원이 제안한 초정밀 해양관측카메라 개발을 정지궤도 통신위성에 이은 해양경찰청의 2단계 위성개발사업으로 선정하여, 21년 착수를 목표로 총 490억원 규모로 20기의 해양관측 초소형위성 개발을 위한 신규 연구개발사업 적극 추진 중
  - 해양과기원은 부산광역시와 해양경찰청 등 급증하는 국내 공공분야 초소형 해양 나노위성 수요에 맞춰, 본 과제 연구성과로 개발이 가능한 직경 170mm급 고해상도 초정밀 해양관측을 위한 인공위성 카메라용 광학계 설계를 완료하였음

## V. 연구개발 활용계획

1. 국방 및 산업계 전반의 파급효과가 큰 SiC 기반 초정밀 광학계 설계/시험기술 국산화에 따른 국내 산업계 기술이전 및 해당분야 창조경제 생태계 형성 기여할 것으로 기대됨
- 1.1. 이미 2019년부터, 본 과제 연구성과를 바탕으로 부산광역시 주도의 다분광 해양 나노위성 개발사업(총 연구비 182억원) 진행 중
2. 천리안 해양위성 3호 및 차세대중형위성, 초소형위성용 고정밀 광학탐재체 개발 기여함
3. 해양경찰청 및 해양수산부의 무인이동체 개발사업의 세부과제로 포함된 초다분광센서 개발 등 초정밀 광학센서 국내개발에 기여함
4. 수입에 의존하는 해양분야 광학관측기기 국산화 선도를 위한 핵심기술 개발함

# 목 차

제 1 장 서론 .....	13
제1절 연구개발의 필요성 .....	13
1. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성 .....	13
제2절 연구개발 목표 및 내용 .....	14
1. 연구개발의 목표 .....	14
2. 당해연도 주요연구내용 .....	14
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	15
제1절 국내동향 .....	15
1. 대면적 자유형상 측정기술 .....	15
2. 나노미터급 미세표현 및 형상 측정/검사기 .....	16
3. 하이브리드 연삭/연마기 .....	16
4. 초정밀 이온빔 연마 기술 개발 .....	17
5. 대기압 플라즈마 SiC 연마 기술 .....	17
6. 플라즈마 표면 처리 장치 .....	17
제2절 국외동향 .....	17
1. 주요국의 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화 .....	17
2. 대면적 자유형상 측정기 .....	18
3. 하이브리드 연삭/연마기 .....	20
4. 초음파 진동 보조 가공 공정 및 장비 개발 .....	20
5. 레이저 보조 연마 가공 공정 및 장비 개발 .....	21
6. 나노미터급 미세표면 및 형상 측정/검사기 .....	22
7. 초정밀 이온빔 연마 기술 개발 .....	22
8. 대기압 플라즈마 SiC 연마 기술 선진국 연구 동향 .....	23
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	24
제1절 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가 .....	24
1. 초정밀 광학계 조립/정렬 검증을 위한 레퍼런스 광학계 .....	24
2. 초정밀 광학계 조립/정렬 공차분석 .....	27
3. 레퍼런스 광학계 형상오차 측정 .....	30
4. 널 렌즈를 이용한 반사경의 형상오차 측정 .....	32
5. 우주용 특수소재 SiC(실리콘 카바이드) BRDF 특성모델 개발 .....	35
제2절 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가 .....	40
1. 정현파 진동시험 .....	42
2. 랜덤 진동시험 .....	43



<b>제 4 장 연구개발목표 달성도</b> .....	60
제1절 연차별 목표 대비 달성도 .....	60
1.정량적 목표 달성도 .....	60
제2절 정량적 목표달성도 .....	61
1.정량적 목표 달성도 .....	61
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획</b> .....	62
제1절 연구개발결과의 활용방안 .....	62

## 그림 차례

그림2-1-1. 고영(주)이 Dual Protection 특허기술 .....	15
그림2-1-2. SNU프리시전(주)의 PSIS .....	15
그림2-1-3. 인텍플러스(주)의 Dual Projection 특허기술 .....	15
그림2-2-1. 국가별 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화 .....	18
그림2-2-2. Zygo의 형상측정기 제품 .....	18
그림2-2-3. Akrometrix의 형상측정기 제품 .....	19
그림2-2-4. Dkantec Dynamics의 형상측정기 제품(Q-400, DIC) .....	19
그림2-2-5. Dantec Dynamis의 형상측정기 제품(Q-300, ESPI) .....	19
그림2-2-6. Orbotech의 형상측정기 제품(Ultra Discovery VAOI) .....	19
그림2-2-7. KLA-Tenco사, Teron 640 검사장비 .....	22
그림2-2-8. NTG사, IBF 1500 ion beam figuring 장비 .....	23
그림3-1-1. 자유형상 광부품 조립/정렬 고도화용 나노위성급 레퍼런스 광학계 Optical Layout .....	25
그림3-1-2. 자유형상 광부품 조립/정렬 고도화용 나노위성급 레퍼런스 광학계 MTF .....	26
그림3-1-3. 실제작 레퍼런스 광학계 Optical Layout .....	27
그림3-1-4. 광학계의 6자유도 .....	28
그림3-1-5. 제작된 주경 및 부경 .....	31
그림3-1-6. ASI 장비로 측정된 (a) 주경과 (b) 부경의 형상오차 .....	31
그림3-1-7. 널 렌즈를 사용한 주경 형상오차 측정 방법 광경로 .....	32
그림3-1-8. 첫번째 널 렌즈 앞면(a) / 뒷면(b) 형상오차 .....	33
그림3-1-9. 두번째 널 렌즈 앞면(a) / 뒷면(b) 형상오차 .....	33
그림3-1-10. 제작된 널 렌즈 경통 부품들 .....	34
그림3-1-11. 널 렌즈 및 경통 부품 분해도 .....	34
그림3-1-12. (a) ASI와 (b) 널 렌즈를 이용하여 측정된 주경의 형상오차 .....	35
그림3-1-13. BRDF 측정장비(Mini-Diff v2) 주요 사양 .....	36
그림3-1-14. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 세팅 .....	37
그림3-1-15. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (0 deg) .....	37
그림3-1-16. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (20 deg) .....	38
그림3-1-17. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (40 deg) .....	38
그림3-1-18. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (60 deg) .....	39
그림3-2-1. 정적 하중에 대한 부경의 위치 변이 측정 결과 .....	40
그림3-2-2. 정현파 진동시험 조건 .....	42
그림3-2-3. 랜덤 진동시험 조건 .....	43
그림3-2-4. 2차 폴리싱/코팅 후 반사경(M1) 형상 오차 측정 결과 .....	45
그림3-2-5. 2차 폴리싱/코팅 후 반사경(M1) 표면 거칠기 측정 결과 .....	46
그림3-2-6. 초정밀 해양관측시스템 2차 폴리싱/코팅 후 재조립/제작 중인 우리 원 청정 실험실 전경 .....	47

그림3-2-7. 재조립/정렬작업이 진행중(11월초 기준)인 우주급 초정밀 해양관측시스템 .....	47
그림5-1-1. 세계 각국의 초대형 우주망원경 개발 현황(주경 비교) .....	62
그림5-1-2. MODE렌즈 원리 및 설계 예 .....	63
그림5-1-3. 초대형 우주망원경 Nautilus 개발 개념도 .....	63

## 표 차례

표3-1-1. 검증용 광학계 Lens Data .....	27
표3-1-2. 보상자가 사용된 광학계의 민감도 분석표 .....	28
표3-1-3. 공차 분석 과정에서 검출면의 광축상 위치 변화 .....	29
표3-1-4. 몬테-카를로 해석을 통해 예측된 RMS 파면오차 .....	30
표3-1-5. 공차 해석을 통해 구한 광학계 정렬 공차 .....	30
표3-1-6. 레퍼런스 광학계 부품 주요 측정 사양 .....	31
표3-1-7. 널 렌즈 제작 조건 및 제작된 널 렌즈 측정 사양 .....	32
표3-2-1. 정적 하중에 대한 반사경의 위치 변이 측정 결과 .....	41
표4-1-1. 연차별 목표 대비 달성도 .....	60
표4-2-1. 정량적 목표달성도 .....	61

# 제1장 서론

## 제1절 연구개발의 필요성

### 1. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

#### 가. 기술적 측면

자유곡면 광학계는 높은 광효율과 낮은 수차, 경량화/소형화가 가능하다는 큰 장점을 갖고 있으나 가공 및 측정의 어려움과 평가의 기준이 될 수 있는 기준면이 구면 광학계와 같이 명확히 정의되지 않아 실제 산업계에 적용되는 사례는 드물었다. 본 사업을 통해 난삭재 자유곡면의 가공 장비 개발에서부터 공정기술, 측정기 개발 및 측정기술까지를 아우르는 전 과정에 대한 원천기술을 확보할 수 있어 광학제분야 및 나노/반도체/디스플레이 등의 다양한 전략산업 및 태양광/메디컬/바이오 등의 첨단 산업에 활용 가능한 고성능 광학 모듈 기술력 확보에 큰 보탬이 될 것으로 예상된다.

#### 나. 경제·산업적 측면

지금까지 정밀 광학 가공장비는 대부분 미국, 일본, 유럽 등의 선진업체에 의존하였으나 본 과제를 계기로 연삭·연마 장비의 국산화가 이루어지면 이에 따른 수입대체 및 국내 장비 시장의 질적 향상을 꾀할 수 있다. 특히 정밀 가공장비는 꾸준한 관리 및 업그레이드 작업이 중요한데, 이러한 점에서 국내 업체가 강점을 가질 수 있을 것으로 판단됨.

#### 다. 사회·문화적 측면

자유곡면 광학계 및 나노스케일 광학패턴의 가공 및 측정 기술은 산업적인 요구가 높은 기술일 뿐만 아니라 국방/보안 분야에서 핵심이 되는 고성능 광학계의 기반 기술로서 국민의 안전한 삶에 기여하는 바가 큰 기술임.

#### 라. 연구원 고유기능 발전과의 연관성

- (1) 해양위성 활용연구 및 대국민 서비스, 해양관측위성의 개발 등을 통한 기후변화 모니터링, 현업활용 연구는 해양과기원의 목적 「해양의 체계적인 연구와 개발, 관리와 이용」, 「국가해양과학기술의 발전과 국제적 경쟁력 확보」 달성에 기여함
- (2) 위성자료로부터 해양환경 정보를 추출해내는 원천기술 확보를 통해 주변 해역에서 일어나는 환경변화 및 기후변화를 관측하고, 우리나라에 대한 영향을 분석·대응함으로써, 해양과기원 경영목표 「해양기반·실용화 연구개발로 새로운 기술가치와 시장 창출」 성에 부합함
- (3) 해양관측위성의 개발과 위성자료 활용을 통한 장단기 해양환경변화 자료의 생산은 해양과기원 전략목표 「해양의 순환변동 연구를 통한 기후변화 예측 및 대응」에 부합함

## 제2절 연구개발 목표 및 내용

### 1. 연구개발의 목표

본 연구의 최종 목표는 아래와 같다.

자유형상 광부품 초정밀 가공 공정 국산화 및 상용화를 위해, 가공 상의 신뢰성 확보 및 가공 정밀도 향상을 위한 신개념의 대면적 자유곡면 고속 측정기 및 나노미터급 미세표면 검사기를 개발하고, 차세대 가공 공정으로서 상압 플라즈마/이온빔 가공공정을 개발하여, 해양관측 위성 및 무인기 광학계 등에 개발기술 적용을 통하여 신뢰성을 검증하고 장비 상용화 및 우주급 초정밀 광학계 개발 국내기술자립화 달성을 최종 목표로 함

### 2. 당해연도 주요연구내용

#### 가. 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가 최종 완료

- (1) 본 과제 주관(KBSI) 및 참여기관(핵융합연, 서울대 등)에서 개발한 가공장비로 제작된 광학계의 조립/정렬 및 성능평가 수행

#### 나. 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가 (100% 진행)

- (1) 본 과제 주관(KBSI) 및 참여기관(핵융합연, 서울대 등)에서 개발한 가공장비로 제작된 광학계(우주급 해양관측시스템용)의 우주환경시험 수행

## 제2장 국내외 기술개발 현황

### 제1절 국내 동향

#### • 대면적 자유형상 측정기술

- 국내에서 표면형상측정기는 고영(주), SNU프리시전(주), 인텍플러스(주) 등 중소기업이 반도체 제조 및 측정에 대한 기반 기술 개발을 주도하고 있음.

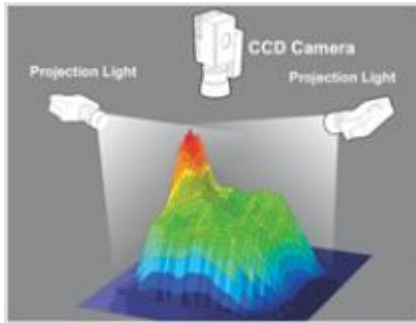


그림 2-1-5.



그림 2-1-6.

SNU프리시전(주)의 PSIS

- 고영(주)은 그림자무아레법을 기반으로 3차원납도포검사기 (Solder Paste Inspection) 등의 정밀측정검사장비를 개발하고 있음. 납도포의 형상 측정에서 문제가 되는 빛에 의한 그림자 및 난반사 문제를 해결할 수 있는 Dual Projection 기반의 특허를 보유하고 있음.

- SNU Precision (주)은 1998년 서울대에서 벤처로 출발하여 디스플레이 분야의 3차원 정밀 표면형상 측정장비를 생산하고 있음. LCD 산업의 핵심장비 중 하나인 PSIS(Photo Spacer Inspection System)는 세계시장의 70%를 점유하고 있음.

- 인텍플러스(주)는 반도체 제조관련 외관검사분야에 대한 연구개발을 수행하고 있으며, 광삼각법과 그림자무아레법에 대한 특허를 보유하고 있음.

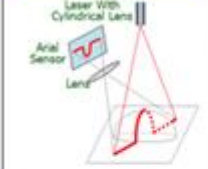


Laser Triangulation	Stereo Vision	Moire
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very Intuitive Principle</li> <li>• Simple Optics</li> <li>• Real 3D inspection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple Optics (2 Camera)</li> <li>• Fast inspection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real 3D Inspection</li> <li>• Fast 3D Inspection</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanical scanning required</li> <li>• Limitation of Laser spot size (Averaging effect)</li> <li>• Problem on shining surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D value for special point only</li> <li>• Correspondence problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complicate Optics</li> <li>• 2-PI Ambiguity</li> </ul>

그림 2-1-7. 인텍플러스(주)의 Dual Projection 특허기술

- 기술별로 개발현황을 보면, 95년 이후 국내등록 특허 기준으로 보았을 때 백색광 주사 간섭계(14개), 그림자무아레법(13개), 광삼각법(11개), 위상이동간섭계(11개) 기술의 발전이 주도적이며, 특히 최근('05년 이후)의 경향으로 보면 백색광 주사 간섭계와 그림자 무아레법에 대한

기술개발이 많이 이루어지고 있음을 알 수 있음.

- 국내 전자산업의 발전과 더불어 국내의 형상측정기술 및 산업 수준도 발전하였으나 반도체 및 디스플레이 분야의 공정 및 제조 관련된 부분만 특화되어 발전하고 있고 온도 및 습도가 변하는 환경에서도 형상을 측정할 수 있는 기술에 대한 연구는 미비한 상태임. 또한 특정산업에 대한 중소기업 위주의 수직 계열화적인 기형적 발전이다 보니 외국 대기업군 업체와의 경쟁에서 상대적 단점을 갖고 있음.

#### ● 나노미터급 미세표면 및 형상 측정/검사기

- 국내에서 미세 표면 및 패턴 검사 기술은 보통 SEM, TEM 및 AFM 등의 장비에 의존하고 있으며, 이 들 장비는 시료 크기 제한 및 특별한 환경 조건을 필요로 하는 장비이므로, 인라인 가공 공정에는 적합하지 않음. 현재 인라인 공정상에 적합한 장비와 기술에 대한 국내 기술은 전무한 실정임.

- 디스플레이/유연소자 정보통신분야는 국내가 세계적인 산업 경쟁력을 확보하고 있으며, 에너지·환경, 메디컬 분야에서도 적극적으로 연구개발 투자가 추진되는 바, 기반이 되는 나노 공정 및 측정 장비 분야에서도 연구 개발이 이루어지고 있음.

- 초고속 나노고주파 소자 적용을 위해, 탄소 나노구조 제작을 위한 중성자 빔 식각기술, 나노소재 저 손상 측정기술 개발이 진행되고 있음에 따라, 인라인상에서 공정에 대한 피드백을 수행할 검사장비의 필요성이 대두되고 있음.

- 국내 나노융합산업의 미성숙으로 현재까지는 나노 공정 및 측정 장비 시장이 활성화 되지 못하고 있는 실정임.

- 국내 장비에 대한 신뢰도 부족으로 반도체, 디스플레이, 태양전지 등에 사용되는 핵심 나노 공정 및 측정 장비가 대부분 해외에서 수입하고 있어, 국내 나노장비산업의 성장과 연구개발 재원의 확보가 어려움.

#### ● 하이브리드 연삭/연마기

- 뿌리산업인 제조 산업의 경쟁력 강화를 위해서는 하이브리드 제조 기술과 같은 기술 혁신을 통해 원가절감, 생산성 향상, 감성/기능성을 높일 수 있는 기술 확보를 통한 수익 극대화 전략이 필요함.

- 현재, 전 세계 하이브리드 제조 기술 분야는 성장 단계에 있으며, 가공 하이브리드 기술은 특허출원 건수가 많고, 적층 하이브리드기술의 질적 수준과 시장 확보력이 상대적으로 매우 높음. 하이브리드 제조분야에 많은 R&D를 통해 우수 기술을 발굴한다면, 시장 확보력을 높일 수 있으리라 판단됨.

- 특히, 전통적인 가공(Bulk 또는 형상) 보다는 감성/기능성을 증시킨 표면처리 기술에 대한 연구에 비중을 높인다면 선진국과의 기술경쟁에서 앞서나갈 수 있을 것으로 예상됨.

- 많은 회사들이 하이브리드 공정을 이용한 제품 제작을 화두로 하고 있으며 특히 다양한 설계, 기능을 위한 도전이 잦은 자동차 회사, 전자 회사 등이 하이브리드 공정에 관심이 많음.

- 내 모바일 기기의 경우 높은 강도, 내구성을 위하여 기존 성형 기술에 부식 방지 코팅, 정밀가공을 추가하여 여러 공정을 이용해 제작하는 사례가 많으며 하이브리드 공정을 개발하여 적용하는 사례 또한 증가하고 있음.

- 그러나 단편적인 개발에 관심은 있으나 하이브리드 가공 공정의 기초 연구와 공통되는 기술



을 다양한 산업에 적용하는 시도는 아직 국내에서 시도되지 않고 있음.

● **초정밀 이온빔 연마 기술 개발**

- 2005년 한국 원자력 연구원은 양성자 기반기술 개발 사업을 통해 정밀 금형 표면 이온빔 표면연마 기술을 개발하였고, 개발된 기술로 금형강의 거칠기를 180 nm까지 낮출 수 있었음. (D300, 15kV, 10mA Xe 빔, 80  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>)
- 상기 기술의 경우 대상의 표면 거칠기 측정을 통해 국부적으로 연마하는 기술이 아닌, 전체적으로 빔을 조사하는 방식임.
- 2005년 이후로는 국내에서 이온빔을 이용한 초정밀 연마 기술 개발 연구가 진행되지 않고 있음.

● **대기압 플라즈마 SiC 연마 기술**

- SiC는 Space mirror나 뛰어난 열적 안정성, 경도, 강성도 등으로 인해 차세대 광학부품으로 각광받고 있어, 국내에서도 SiC 세라믹 나노 가공 기술을 개발하였음.
- 가공은 전해 인프로세스 드레싱(ELID) 연삭법과 자성유체연마 등이 주로 이용되며, 대기압 플라즈마를 이용한 SiC 연마 기술에 관한 연구는 알려지지 않았음.

● **플라즈마 표면 처리 장치**

- 플라즈마 응용 표면처리 장치는 높은 개발 난이도에 따라 개발 비용이 상승하고 필요한 자원의 종류가 급속히 증가하는 추세임.
- 공정장치 개발은 개발업체와 수요업체 등을 중심으로 전략적 협업 체계를 구축하고 정부의 집중적 지원이 요구되고 있으며, 이는 제조 현장에 활용됨으로써 국내 산업의 경쟁력을 극대화할 수 있을 것으로 기대됨.

## 제2절 국외 동향

● **주요국의 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화**

- 유럽은 60년대까지 기술적 우위를 바탕으로 광학 카메라 세계 시장을 주도하였으나, 90년대 들어서면서 미국/일본 등의 경쟁에서 밀리면서 가격 경쟁력 및 기술 경쟁력을 상실함.
- 미국의 경우, 70년대 비구면 광학소자를 개발하는 등, 세계 최고 수준의 기술력을 과시하였으나, 가격 경쟁력 약화로 시장 점유율은 낮은 상태였음. 현재는 군사용, 천문용 대형 정밀 광학계 개발을 국가 주도로 실행되고 있음.
- 일본의 경우, 80년대 유럽/미국과 기술 경쟁을 통해, 세계 수준의 기술력을 확보함. 특히, 90년대 디지털화, 소형화 등을 통해 현재도 미국과 더불어, 최고 수준의 기술 경쟁력을 확보하고 있음.
- 중국의 경우, 90년대에는 대량생산을 통한 저가격화로 저가 광학계 시장을 주도하였으나, 2010년 이후 품질 고급화를 통해, 기술력도 미국/일본의 턱 밑 수준까지 쫓아옴.
- 한국의 경우, 90년대 중국과의 가격 경쟁력 심화와 기술력 저하로 인해 현저히 낮은 시장 점유율을 보이다가, 현재는 제품 차별화 및 틈새시장 공략을 통한 시장 점유율 점차 늘려가고 있는 상황임. 이에 기반 인프라 조성을 위한 국가 주도의 산업 육성책 및 연구기술 개발을 통한 원천기술 확보가 절실함.

국가	60년대	70년대	80년대	90~2000년대	2010이후
	광학카메라 개발 기술력 우위	가격 경쟁력 우위	해외법인화 글로벌 경영	가격 경쟁력 상실	
		비구면 광학소자 개발	경쟁력 약화 국가주도 개발	군사용, 대형위주 개발	
			초정밀 광학소자 개발	디지털화 소형화 아웃소싱 확대	
				정부의 육성 가격 경쟁력 심화	가격 경쟁력 우위 제품 차별화
				저가격화 광학기기의 세계공 장화	품질 고급화

그림 2-2-1. 국가별 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화

● 대면적 자유형상 측정기

- 국외에서의 주요 기업으로는 미국의 Zygo, Akrometrix, 덴마크의 Dantec Dynamics, 이스라엘의 Orbotech 등이 있음.
- Zygo는 계측사업부에서 3차원 형상측정장비를 위상이동간섭계 및 백색광 주사 간섭계 방법을 사용하여 연구개발함. 매우 높은 분해능을 갖지만은 기술의 특성상 대면적에는 적용하지 못함. 주요 적용 범위는 반도체 등의 세부 형상 측정에 이용됨.

	NewView™ 700 Series		NewView™ 7000 Series	
Model:	700p	700s	7200	7300
Core Technology:	Phase-Shifting Interferometry (PSI)		Scanning White-Light Interferometry (SWLI)	
Vertical Scan Speed:	n/a	≤ 15 μm/s	≤ 26 μm/s	≤ 135 μm/s
Maximum Step Height:	~ 138 nm	~ 150 μm	~ 20000 μm	
System Zoom:	Fixed		Manual	Automated
Z Stage:	Manual		Automated	
X/Y Stages:	Manual		Manual or Automated (optional)	
Field of View:	≤ 3.5 mm		≤ 14 mm*	
Objective Turret:	6-position, Manual or Automated			

\* A larger field of view is possible with the megapixel camera and/or stitching option.

그림 2-2-2. Zygo의 형상측정기 제품

- Akrometrix는 미국 Geogia Tech.에서 스핀오프 된 회사로 그림자모아레에 기초한 형상측정장비를 개발하고 있음. 실시간으로 온도(< 150 ° C)에 의한 변형을 측정할 수 있고 최대 600 mm까지 형상 측정이 가능함. 형상측정을 위해서는 확산면이 필수적으로 요구됨. Akrometrix는 빛의 입사각을 45° 사용하고 있어서 수직측정영역이 제한됨.



그림 2-2-3. Akrometrix의 형상측정기 제품

- 덴마크의 Dantec Dynamics는 DIC와 ESPI 기술을 이용한 형상 및 변형을 측정기 개발회사임. 적용분야는 반도체 뿐만 아니라 항공, 자동차, 바이오, 전기, 유압 등 다양함.



그림 2-2-4. Dkantec Dynamics의 형상측정기 제품(Q-400, DIC)



그림 2-2-5. Dantec Dynamis의 형상측정기 제품(Q-300, ESPI)

- Orbotech은 전자 및 디스플레이 분야의 자동형상측정(AOI: Automated Optical Inspection)장비를 개발함. 1981년에 설립되어 PCB등의 형상측정기를 개발에 주력해 왔음.

	Contact Probe	Noncontact Probe	Stitching Interferometer	대면적 자유형상 측정기	자유형상 고속 검사장비
측정 방식	Scanning contact probe	Scanning non-contact probe	Stitching interferometry (Fizeau)	Stitching interferometry (Twyman)	Phase-measuring deflectometry
측정 영역	500 x 500 mm	300 mm dia.	500 mm dia.	600 x 600 mm	300 mm dia.
표면 형상	Freeform (w/o symmetry)	Asphere (w/ symmetry)	Asphere (w/ symmetry)	Freeform (w/o symmetry)	Freeform (w/o symmetry)
측정 정밀도	< 100 nm	< 100 nm	< 1/20 λ (30 nm)	< 1/20 λ (30 nm)	< 1 μm
측정 속도	0.2-10 mm/s	2-10 mm/s	10 min. - 1 hr.	20 min. - 2 hr.	< 2 min.

## 그림2-2-6. Orbotech의 형상측정기 제품(Ultra Discovery VAO)

- 상기의 표는 단순 형상측정기를 넘어서 광학면에 적용 가능한 자유곡면 측정 기술의 최신 동향을 보여줌. 현재 상용화에 성공한 자유곡면 측정 기술은 크게 세가지 형태로 나뉘어지는데 접촉식 혹은 비접촉식 프로브를 이용한 스캐닝 타입의 측정기와 스티칭 간섭계가 있음.
- 접촉식/비접촉식 프로브를 이용한 스캐닝 타입의 광학프로파일 측정기는 Panasonic, Taylor-Hobson, Lumphos, Optipro 등의 업체에서 상용화하여 판매 중이며, 세계 시장에서 약 500 mm 이하의 측정영역 내에서 측정정밀도 50 nm 이하 수준의 제품으로 구성되어 있음.
- 스티칭 방식의 간섭측정기는 미국의 QED 사에서 상용화하여 판매 중으로 표준적인 Fizeau 간섭계로 도달할 수 있는 형상측정정밀도를 비구면에서 구현하도록 구성되어 있음. 현재까지 출시된 바로는 측정영역 직경 500 mm 이내에서 측정 정밀도 RMS 30 nm를 얻을 수 있는 장비임.

### ● 하이브리드 연삭/연마기

- 최근 연구(Yan and Tan, 2015)에서 난삭재 가공물과 다이아몬드 공구에 전압을 걸어 가공성을 향상시키는 형태의 융복합 연삭공정(electrical discharge machining, EDM)이 소개된 바 있음.
- 보통의 난삭재는 가공 파라미터에 대한 연구가 부족하며, 생산성의 척도인 재료제거율(Material Removal Rate, MRR) 또는 표면조도(Surface roughness) 중 하나에 대해서만 연구가 진행되어왔으나, 최근 연구(Agarwal, 2016)에 따르면 난삭재(Silicon Carbide)의 연삭 가공에서 가공 파라미터의 최적화를 통해 생산성과 표면조도를 동시에 향상시키는 연구를 진행한 바 있음.
- 연삭가공기술에서 숙련 노동자 부족을 해결하기 위하여 공작물 클램퍼 시스템, 연마공구 시스템, 센서 및 컨트롤러를 포함한 멀티 스테이션 회전 연마 로봇을 제안했으며, 생산 공정 자동화 및 알고리즘 최적화 방법 적용한 사례가 있음. (Li, et al., 2016)
- 더불어 연마 공정의 자동화와 숙련 연마 기술의 복제 시스템의 구축을 위해 직 병렬 메커니즘 제안하였음. 가공경로, 공구 위치와 연마 힘을 오픈루프 피드백을 통해 동시에 제어함. (Oba, et al., 2016)
- 연마 과정에 세차운동 메커니즘 에러(precession mechanism error)의 영향을 연구함. 세차운동 메커니즘 에러는 x, y 방향에만 영향을 미침. 연구 결과는 연마 장치를 최적화하기 위해 사용됨. 중력과 연마 힘에 의한 세차운동 메커니즘 에러 발생 가능성 고려. (Yang, et al., 2016)

### ● 초음파 진동 보조 가공 공정 및 장비 개발

- 마이크로 구조 표면을 악화시키지 않고 연마하기 위해 진동과 자성연마입자를 이용하여 새로운 연마 방법을 제안함. 자력은 자성연마입자와 표면이 접촉을 유지할 수 있도록 보장함. 구조 프로파일의 악화를 방지하기 위해 진동 방향을 마이크로 구조와 평행하게 정함. 이 새로운 연마 방법을 대규모에 적용 고려. (Guo, et al., 2016)
- 기존 연구(Ralchenko, et al., 2016)에 따르면 초음파 진동원을 이용하여, 다이아몬드 입자를 가공물 표면에 직접 충돌시키는 연마방법이 제안된 바 있음.
- 초음파 진동스테이지를 설계해서 비틀림 진동을 인가함으로써 연마 품질과 효율성을 향상시킨 연구가 보고된 바 있음. (Wang, et al., 2016)
- 금속 난삭재를 가공하기 위해 초음파 및 자성연마입자 사용한 하이브리드 연마 시스템 이

제안됨. 초음파 진폭이 표면 조도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고됨.(Jin and Kwak, 2015)

- 초음파가 부가된 연마재 워터제트 (waterjet) 연마방식을 통하여 난삭재의 가공성을 개선함. 가공물에 제트 충격을 가하면서 그와 수직인 방향으로 초음파 진동을 동시에 가함. (Lv, et al., 2015)

- 가공물에 진동을 인가하는 형태의 Ultrasonic vibration platform이 개발됨. 표면의 가공 품질을 최대화 하는 조건은 진동 방향과 연마 tool path가 동일할 경우, 절삭력을 최소화 하는 조건은 진동 방향과 tool path가 45도를 이루는 경우로 밝혀짐. (Han et al., 2017)

- Ultrasonic vibration assisted chemical mechanical polishing (UACMP) 을 개발하고 가공물에 타원형의 진동을 인가하면서 표면 품질의 저하 없이 가공성(재료제거율)을 증가시켰으며 수리 모델을 구축 하고 실험값과 일치함을 확인 함. (Liu, et al., 2017)

- 압전소자를 연마 공구에 부착하여 Megasonic assisted chemical mechanical polishing (MACMP, 1.7 MHz 진동수)을 개발하여 재료제거율을 기존 CMP보다 15-25% 감소시키고 표면조도 값을 0.509nm에서 0.387nm로 감소시킴. (Ke, et al., 2017)

- 2축 진동자가 연마 공구를 회전시키는 형태의 2D ultrasonically actuated polishing process 개발함. 이론분석과 실험을 통해 생산성 향상을 확인함. (Song, et al., 2016)

- 그라인딩 공정에 초음파진동자를 적용하고, 실리콘카바이드(SiC)를 다이아몬드입자 휠(wheel)에 달아 절삭력을 감소시키고 (최대 35%, tangential force) 표면 조도(Ra 값)를 3-10% 감소시킴. (Bhaduri, et al. 2017)

- 그라인딩 공정에 초음파진동자와 plasma electrolytic oxidation을 사용하여 절삭력을 normal 방향으로 60%, tangential방향으로 70% 감소시켰고, 표면 조도를 46% 감소시킴. 플라즈마 표면 처리를 함으로써 표면 강도가 감소하여 가공성이 향상됨. 하지만 초음파 진동자의 효과가 plasma electrolysis oxidation효과를 향상시켜 전체적인 효과가 더 컸음. (Li, et al. 2017)

#### ● 레이저 보조 연마 가공 공정 및 장비 개발

- 다양한 형태의 하이브리드 장비 및 공정이 개발되어 연구되고 있지만, 대부분의 경우 표면 품질을 향상시키기 위한 연구임.

- 연마 공정의 특성상 표면의 품질이 더욱 중요하기 때문에 생산성(재료제거율)은 고려하지 않는 것이 현재 실정임.

- 최근 들어, 레이저를 연삭/연마 공정에 적용하여 실리콘카바이드와 같은 난삭 재료를 가공하려는 연구가 점차 발표되고 있음.

- 레이저를 이용해 재료 표면에 구조를 변화시켜 절삭력을 줄임으로써 표면 조도를 향상시키는 연구가 수행된 바 있음. (X. H. Zhang et al., 2017)

- 레이저는 하이브리드 가공에서 가장 자주 사용되는 보조 모듈이지만, 레이저보조연마라는 개념 정도만 발표되거나, 연속공정으로 연구되고 있음.

- 대표적인 예로, 실리콘 카바이드 표면에 레이저를 조사하여 표면의 물리화학적 변화를 유도한 후, 이어지는 CMP 공정의 재료제거율을 향상 시킨 연구가 발표된 바 있음. (C. Wang et al., 2018)

- 열충격을 인가하여 실리콘 카바이드에 잔류응력을 낮추는 연구 (X. Yang et al., 2017) 그리고 laser shock peening 공정 후에 실리콘 카바이드의 경도를 증가시킨 연구 (S. Pratik et al.,

2017) 등 열에 의한 실리콘 카바이드의 물성변화에 대한 다양한 연구가 발표되고 있음.

- 현재까지 레이저 보조 연마는 발표된 바가 없으며, 슬러리(액체류)가 함께 사용되어 레이저를 동시에 사용하기 어려움이 있기 때문인 것으로 판단함.

#### ● 나노미터급 미세표면 및 형상 측정/검사기

- 미세 표면 형상을 제조하는 반도체, MEMS, LCD, Build-up PCB 등의 산업 분야에서 저비용, 고품질, 고속 가공이 가능한 새로운 개념의 측정 기술을 요구하고 있음.

- 나노스케일에서의 소자, 소재 등 물질의 역학적 특성을 측정하기 위한 기술인 복합 나노측정 기술, 나노측정 모델링 기술의 고속 자동화 시스템 개발이 추진되고 있음.

최근 KLA-Tenco사 반도체 표면 검사분야의 선두 업체로 부상하였으며, 최근 193 nm 파장의 광원을 사용한 표면 검사 장비를 시장에 내놓았으나, 장비 가격이 대당 300억원에 형성되어 국내에서는 일부 대기업에서만 생산 라인에 적용하고 있음. (ex. Teron 640e reticle defect inspection system)



그림 2-2-7. KLA-Tenco사, Teron 640 검사장비

#### ● 초정밀 이온빔 연마 기술 개발

- 일본의 경우 5축 IBF(Ion Beam Figuring) 설비를 2006년에 개발 하였으며, FWHM 4 mm, 1 mm 두개의 이온빔을 활용하여 직경 20 mm 시편에서 RMS 0.1 nm PV 0.6 nm 연마 성능을 보였고, 직경 90 mm 시편에 대해서는 0.2 nm 성능을 달성하였음.

- 이온빔 가공의 경우 정밀한 연마가 가능한 반면, 생산속도가 매우 늦은 단점이 있음. 그러나 최근에는 100 mm<sup>3</sup>/h 의 속도로 가공이 가능한 IBF 장치가 상업적(MicroSystems GmbH)으로 공급이 되고 있음. (100 mA, 2 kV 이온빔 소스의 경우 30 mm<sup>3</sup>/h 가공 가능)

NTG사에 개발한 IBF-100, 200, 300, 450, 500, 700, 1000, 1500 모델로 가공 영역에 따라, 다양하게 라인업되어 시장에 소개됨.



그림 2-2-8. NTG사, IBF 1500 ion beam figuring 장비

● 대기압 플라즈마 SiC 연마 기술 선진국 연구 동향

- 대기압 플라즈마를 이용한 SiC 연마의 경우 RAP (Reactive Atom Plasma, RAPTM, RAPT industries, 미국)라는 이름으로 알려져 있으며, 우주 관측을 위한 경량 비구면 SiC 거울 생산에 적용되고 있음. RAP의 경우 거울 가공 후 발생하는 응력을 완화하고, 원래의 자유표면상태를 회복하기 위해 SiC를 상압플라즈마를 이용하여 에칭함.
- 상기 회사의 경우 RAP 방법을 적용하여, 200 mm의 거울을 0.33 nm rms 로 3주안에 제작 할 수 있는 능력을 갖추고 있음.
- 일본의 경우 SiC 가공을 위한 새로운 기술로 물 플라즈마를 이용한 기술을 개발하고 있음. 가공이 매우 어려운 SiC를 물 플라즈마를 이용하여 산화를 시켜 가공성을 증대시켜 연마하는 기술임.
- SiC에 상압 플라즈마를 결합하여 연마하는 연구는 일본 오사카 대학 초정밀과학 연구센터의 Kazuya Yamaura 교수가 주로 수행하고 있음.
- 16년에는 일본의 표면기술 관련 전시회인 SURTECH에 출전하여 소개한 적이 있는바 올해도 출전이 예상됨. 이에 17년 2월에는 일본서 개최되는 SURTECH2017 (Tokyo Bigsite)에 참석하여 관련 기술 동향을 파악하고, 오사카 대학을 방문하여 관련 기술의 연구동향을 파악하고자 함.

## 제3장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제1절 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가

#### □ 연구내용 1-1. 해양 나노위성용 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가기술 고도화

본 광학계는 자유형상 광부품으로 구성된 인공위성 탑재용 광학계로 위성의 궤도는 고도 500 km의 Sun-synchronous orbit이 기준이며, 공간해상도(GSD, Ground Sampling Distance)는 10 m, 촬영폭은 40 km 이다. 표 1에 사용자 요구사항 및 그 외 분석자료에 대해 자세히 기술하였다.

표 1. 자유형상 광부품 광학계 사용자 요구사항 분석

<b>Mission</b>	
Altitude	~ 500 km
Orbit	Sun-synchronous
<b>Camera</b>	
GSD	10 m
FOV	40 km
Entrance Pupil Diameter	160 mm
Total Track Length	~ 170 mm
Channel	VIS, NIR (400 ~ 900 nm)
<b>Detector</b>	
Pitch size	8 $\mu$ m
Number of pixel	4,000

#### • 초정밀 광학계 조립/정렬 검증을 위한 레퍼런스 광학계

본 과제에서 개발하는 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학계의 조립/정렬 고도화를 위한, 레퍼런스 광학계는 3개의 보정렌즈를 포함한 Two-mirror system인 Ritchey-Chrétien telescope로 설계하였다. Entrance Pupil Diameter의 크기는 160 mm이며, Total Track Length는 170 mm로 매우 compact한 광학계로 조립/정렬의 난이도가 높은 특성을 가지고 있어, 초정밀 광학계의 조립/정렬 고도화 검증에 적합한 설계이다.

그림 1은 레퍼런스 광학계 Optical Layout으로 Total Track Length가 170.56 mm로 상당히 compact한 광학계로 조립정렬시 상당히 민감할 것으로 판단된다. 그림 2는 자유형상 광부품 광학계 MTF를 보여주고 있으며, 해당 검출기의 Nyquist frequency 62.5에 대한 MTF는 0.6 이상의 값을 나타냄을 알 수 있다.



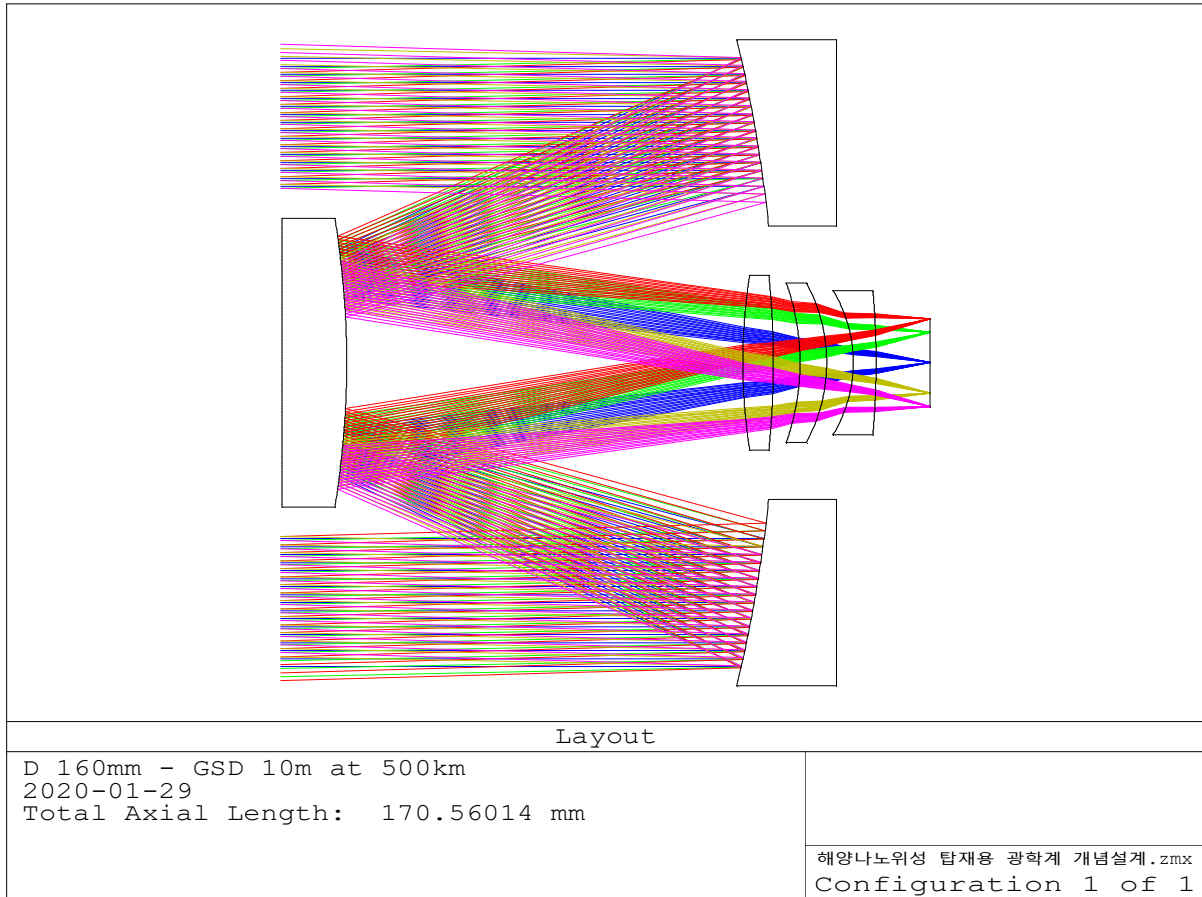


그림 3-1-1. 자유형상 광부품 조립/정렬 고도화용 나노위성급 레퍼런스 광학계 Optical Layout

표 2. 레퍼런스 광학계 Lens Data

Surf	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic	Comment
<b>OBJ</b>	Infinity	Infinity		0	0	
<b>1</b>	Infinity	130		167.4306	0	
<b>STO</b>	-353.094	-112.685	MIRROR	150	-1.27316	M1
<b>3</b>	-220.576	104.1091	MIRROR	70	-9.76899	M2
<b>4</b>	148.8543	8	N-PK51	46	0	CL1
<b>5</b>	-221.518	7		46	0	
<b>6</b>	-62.5314	7	FK51	42	0	CL3
<b>7</b>	-44.3773	7		42	0	
<b>8</b>	-36.355	6	N-SK4	38	0	CL4
<b>9</b>	-214.667	14.13647		38	0	
<b>IMA</b>	Infinity			23.13801	0	

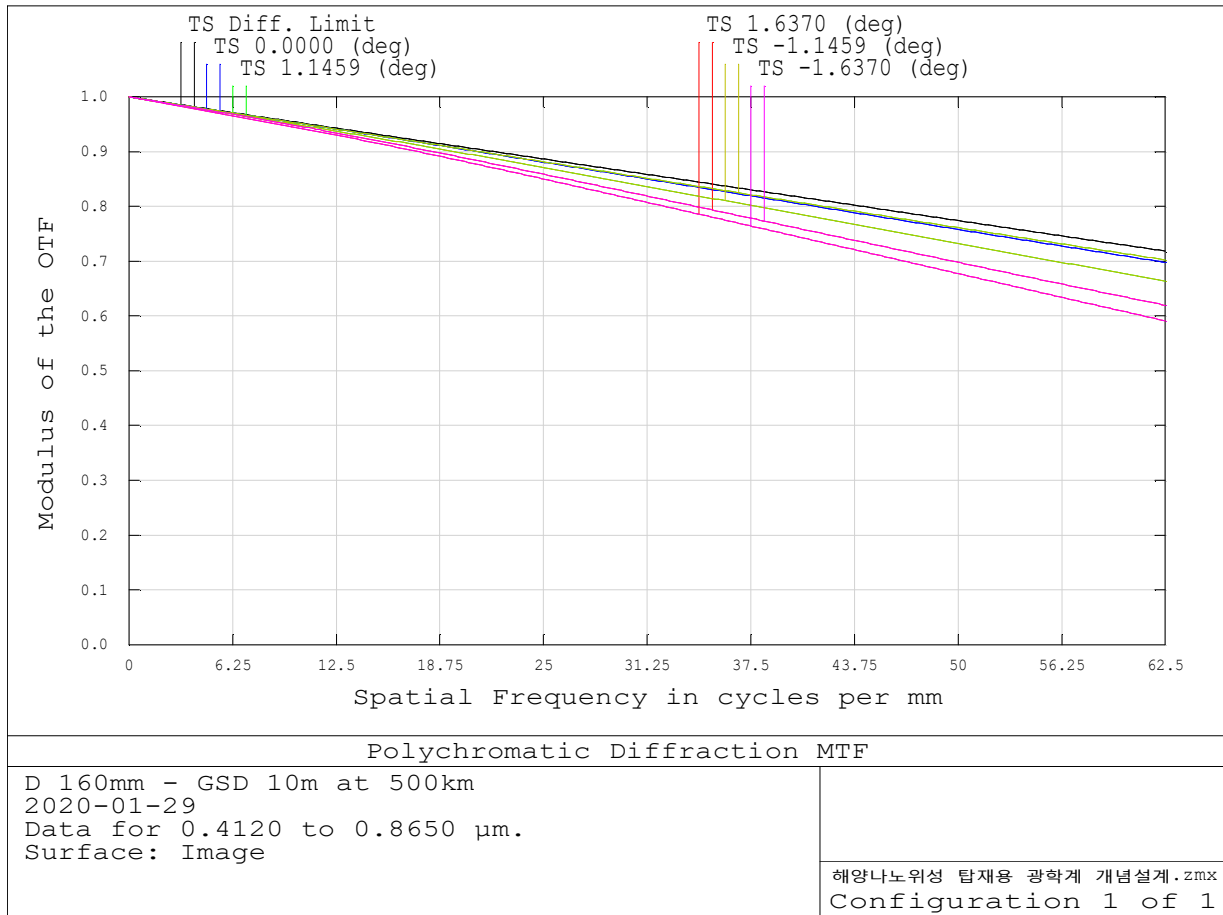


그림 3-1-2. 자유형상 광부품 조립/정렬 고도화용 나노위성급 레퍼런스 광학계 MTF

본 광학계는 3개의 보정렌즈를 포함한 Two-mirror system인 Ritchey-Chrétien telescope로 설계되었으나, 실제 조립시 3개의 렌즈로 구성된 렌즈군은 가공오차 범위로 기계적으로 주경 구조물과 결합이 되기 때문에 조립정렬 과정은 2개의 반사경으로 구성된 Ritchey-Chrétien telescope과 동일하다. 따라서 본 연구에서는 본 과제 대상 광학계가 존재하지 않기 때문에 2 반사경으로 이루어진 타 광학계를 사용하여 해당 과정을 검증하고자 한다.

검증용 광학계는 주경(Primary mirror, M1)과 부경(secondary mirror, M2)이 모두 쌍곡면(Hyperbola)으로 구성된 리치-크레티앙(Ritchey-Chrétien) 망원경을 사용하였다.

광기계 구조물의 공간을 고려하여 주경과 부경 사이 거리를 130 mm, 주경 뒷면에서 검출면까지 거리를 70 mm로 설계되었으며, 이에 따라 주경의 초점비(Focal ratio)는  $f/1.57$ 로 짧게 설계되었다.

그림 3은 실제 제작된 레퍼런스 광학계 Optical Layout으로 Total Track Length가 200 mm로 자유형상 광부품 광학계와 비슷한 형상을 보이고 있어 검증이 가능할 것으로 판단

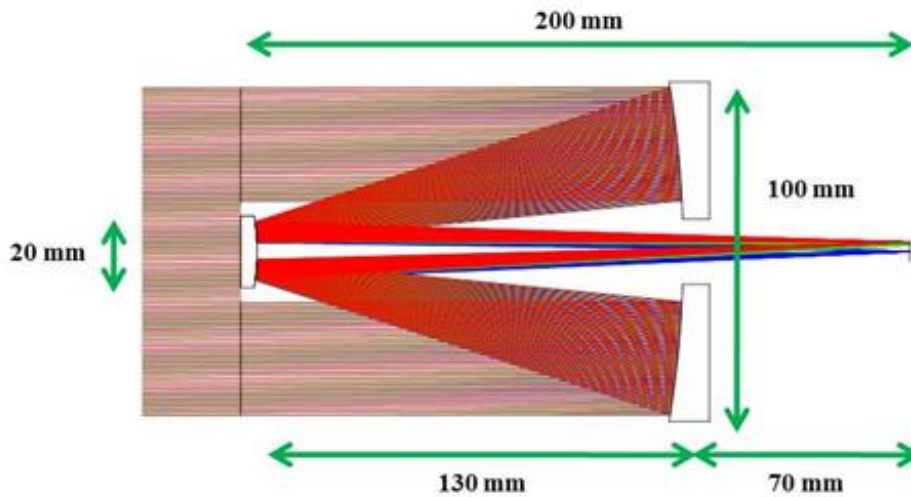


그림 3-1-3. 실제작 레퍼런스 광학계 Optical Layout

표 3-1-1. 검증용 광학계 Lens Data

면 번호	곡률반경(mm)	거리(mm)	재질	직경(mm)	비구면계수
물체	-	$\infty$	-	-	-
1(조리개)	-315.0	-130.00	거울	100	-1.01
2	-63.8	199.31	거울	20	-1.83
상	$\infty$	-	-	6	0

#### • 초정밀 광학계 조립/정렬 공차분석

광학계 조립정렬 전 정렬공차를 수행한다. 정렬 공차는 크고 무거운 주경을 기준으로 부경에 대해서 분석이 이루어지며, 아래와 같은 계산과정으로 분석을 수행한다.

1. 각 변수들 별로 민감도 표(Sensitivity table)을 작성한다.
2. 산출하고자 하는 제작 및 정렬 공차 변수값을 기본 공차값으로 설정한다.
3. 공차를 보정할 보상자(Compensator)를 정한다.
4. 민감도 표를 바탕으로 RSS(Root-Sum-Square) 방법과 몬테-카를로 해석(Monte-Carlo analysis)을 수행하여 광학계의 요구조건인 RMS 파면오차  $0.15\lambda$  를 만족하는 값을 도출한다.

제작 공차 요소에는 곡률반경(Radius of curvature), 비구면계수(Conic constant), RMS 형상오차가 있으며, 정렬 공차 요소에는 광축 Z 축에 대하여 X, Y 축 편심(Decenter), 초점 벗어남(Defocus), X, Y 축 경사(Tilt)가 있다. 광학계의 정렬 요소는 그림 4에 표현한 앞에

5가지와 Z축에 대한 회전(Rotation)까지 포함하여 6요소이나, 본 광학계는 축대칭 광학계 (Axially symmetric optical system)로 Z축에 대한 회전은 정렬 요소에서 사라지게 된다.

제작 및 정렬 공차 분석 과정에서 제작 및 정렬 한계로 인해 생기는 오차를 보상하기 위해 검증용 광학계에서는 보상자(Compensator)를 검출면의 광축상 위치(Zd)로 설정한다. 또한 정렬의 경우 광축에서 진행되므로 광축에 대해서만 공차 분석이 진행된다.

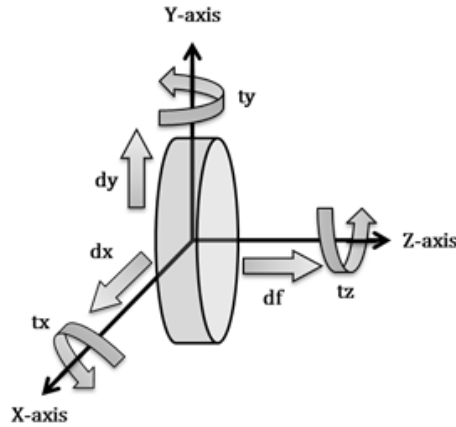


그림 3-1-4. 광학계의 6자유도

표 4는 본 광학계의 민감도를 분석한 표이다. 각 파트별 공차 요소들 별로 공차 값을 산출하며, 각 요소들의 공차에 의해 발생하는 RMS 파면오차가 표시되어있고 그 값은 검출면의 광축상 위치에 의해 보정된 결과값이다.

표 3-1-2. 보상자가 사용된 광학계의 민감도 분석표

변수	공차	RMS 파면오차	공차	RMS 파면오차
주경의 곡률반경	-0.3 mm	0.021	+0.3 mm	0.023
부경의 곡률반경	-0.3 mm	0.020	+0.3 mm	0.018
주경의 비구면계수	-0.01	0.029	+0.01	0.027
부경의 비구면계수	-0.01	0.005	+0.01	0.007
부경의 X축 편심	-0.02 mm	0.029	+0.02 mm	0.029
부경의 Y축 편심	-0.02 mm	0.029	+0.02 mm	0.029
부경의 X축 경사	-0.05°	0.034	+0.05°	0.034
부경의 Y축 경사	-0.05°	0.034	+0.05°	0.034
부경의 초점 벗어남	-0.05 mm	0.009	+0.05 mm	0.006
주경의 RMS 형상오차	1/30λ	0.026	1/30λ	0.026
부경의 RMS 형상오차	1/20λ	0.026	1/20λ	0.026

표 5는 공차 분석 과정에서 검출면의 광축상 위치를 나타낸 표로, 설계값인 199.31에서

최소 191.95, 최대 207.33까지의 위치 변화가 있음을 확인하였다. 따라서 최대 8 mm 이내의 초점면 이동을 통해 공차로 인해 발생하는 오차를 보정할 수 있으며, 검출기 지지 구조물을 설계할 때 이를 바탕으로 설계가 진행된다.

표 3-1-3. 공차 분석 과정에서 검출면의 광축상 위치 변화

변 수	검출면의 광축상 위치
설계치	199.31
최소값	191.95
최대값	207.33
평균값	199.43
표준편차	2.99

표 4의 민감도 분석표를 바탕으로 최종 기대되는 광학계의 성능을 RSS 방법과 몬테-카를로 해석을 사용하여 예측한다. RSS 방법은 각 부품의 공차가 통계적인 정규 분포를 따른다는 가정하에 아래 식 (1)과 같이 표현되며, dU는 예측값, T\_ASM는 dU의 제한값, T\_t는 각 공차 요소 별로 계산된 결과 값을 의미한다. 이러한RSS 방법으로 계산된 제작 및 정렬 공차로부터 예상되는 광학계의 RMS 파면오차는 0.088 λ 로 요구조건인 0.15 λ 를 만족한다.

$$dU = \sqrt{\sum_{i=1}^m (T_i)^2} \leq T_{ASM} \quad (1)$$

몬테-카를로 해석은 총 10000 번 수행하며, 각 주기마다 공차 변수들은 설계값 및 입력된 공차 범위를 기준으로 식 (2)의 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 따라 무작위로 선택된다.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), -2\sigma \leq x \leq 2\sigma \quad (2)$$

몬테-카를로 해석을 통해 예측된 RMS 파면오차를 표 6에 나타내었다. 10000번의 시뮬레이션 결과, 평균 RMS 파면오차 0.094 λ 가 나왔으며, 표준편차 0.075 λ 가 나왔다. 그리고 시뮬레이션 결과 98%의 결과가 0.136 λ 로 요구조건인 0.15 λ 를 만족함을 확인할 수 있다.

표 3-1-4. 몬테-카를로 해석을 통해 예측된 RMS 파면오차

몬테-카를로 해석 결과 분포	RMS 파면오차
98% ≤	0.136
90% ≤	0.112
50% ≤	0.086
10% ≤	0.064
2% ≤	0.053
평균값	0.094
표준편차	0.075

위 공차분석을 통해 도출된 광학계 정렬 공차는 표 7에 나타내었으며, 그 값은 각각 부경에 대하여 X, Y 축으로  $\pm 0.02$  mm의 편심,  $\pm 0.05$  degree의 경사,  $\pm 0.05$  mm의 초점 벗어남으로 정렬이 가능함을 알 수 있다.

표 3-1-5. 공차 해석을 통해 구한 광학계 정렬 공차

변 수	값
부경의 X축 편심	$\pm 0.02$ mm
부경의 Y축 편심	$\pm 0.02$ mm
부경의 X축 경사	$\pm 0.05$ degrees
부경의 Y축 경사	$\pm 0.05$ degrees
부경의 초점 벗어남	$\pm 0.05$ mm

• 레퍼런스 광학계 형상오차 측정

제작이 완료된 광부품은 광부품 단위에서의 형상오차를 측정하게 된다. 검증용 광학계의 광부품은 ASI(Aspheric Stitching Interferometer) 장비를 사용하여 측정하였으며, 측정된 주경 및 부경의 형상오차는 그림 6에 나타내었다.

측정된 주경과 부경의 형상오차의 RMS 값은 주경 11.43 nm( $0.018\lambda$ ), 부경 9.15 nm( $0.015\lambda$ )로 설계조건인  $1/30\lambda$ 와  $1/20\lambda$ 를 충분히 만족함을 볼 수 있다. 제작 완료된 주경과 부경 측정 사양은 표 8에 나타내었으며, 주경과 부경의 곡률반경 및 비구면계수, 형상오차 모두가 요구조건을 만족함을 확인할 수 있다.

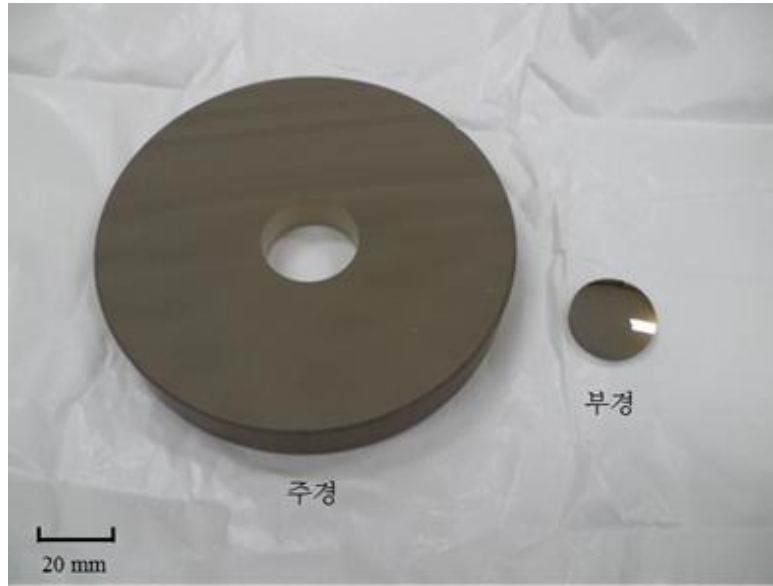


그림 3-1-5. 제작된 주경 및 부경

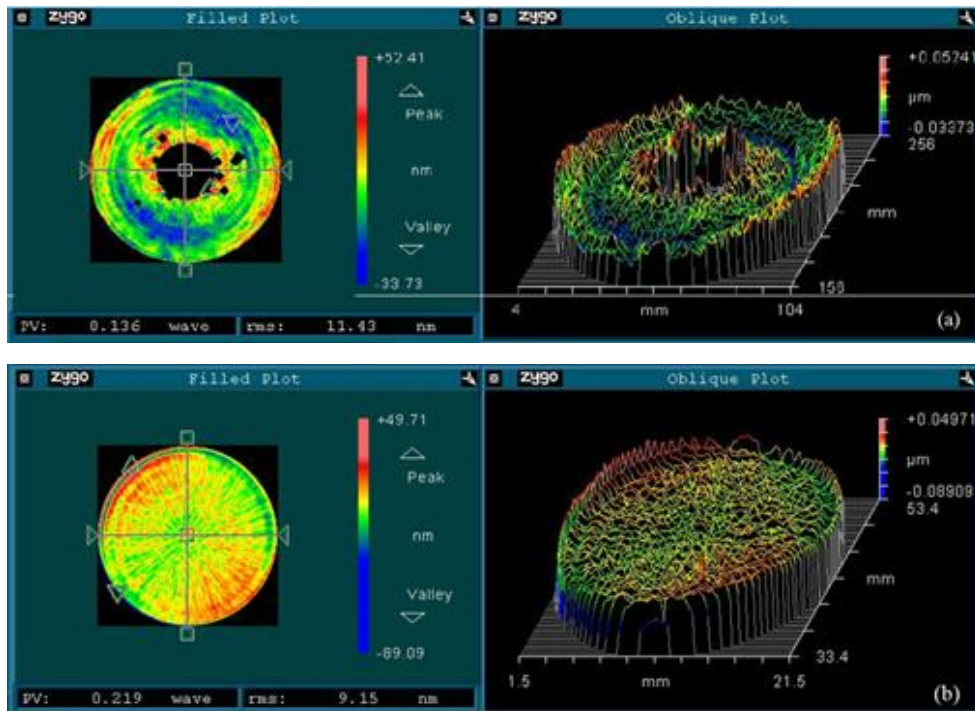


그림 3-1-6. ASI 장비로 측정된 (a) 주경과 (b) 부경의 형상오차

표 3-1-6. 레퍼런스 광학계 부품 주요 측정 사양

변 수	주 경		부 경		단 위
	설계값	측정값	설계값	측정값	
곡률반경	315.0±0.3	315.3	-63.8±0.3	-63.80	nm
비구면계수	-1.01±0.01	-1.02	-1.83±0.01	-1.83	-
RMS 형상오차	1/30	0.018	1/20	0.015	waves

• 널 렌즈를 이용한 반사경의 형상오차 측정

레퍼런스 광학계는 앞절에서 서술한 ASI를 사용한 측정 외 독립적인 측정 방법인 널 렌즈(Null lens)를 이용한 측정을 추가로 진행하였다. 널 렌즈를 이용한 측정은 제작이 상대적으로 쉬운 구면렌즈를 보정 광학계로 사용하여 비구면의 반사광을 구면파로 변환하여 위상이동간섭계(Phase shifting interferometer)를 통해 비구면의 형상오차를 측정하는 방법이다. 본 광학계의 주경은 초점비가  $f/1.57$ 로 짧기 때문에 자동무수차점 방식으로 정렬에 따른 오차가 상대적으로 작은 Offner type을 사용하여 측정한다.

그림 7은 설계된 널 렌즈를 사용한 주경 형상오차 측정 방법 광경로이다. 두 장의 널 렌즈로 구성되어 있으며, 널 렌즈로 입사되는 구면파를 주경의 비구면과 동일한 비구면파로 변환시켜주는 역할을 수행하게 된다. 제작 및 정렬이 용이하게 한쪽 면은 평면이며, 다른 쪽은 구면으로 구성되어 있으며, 재질은 두 렌즈 모두 BK7을 사용하였다. 표 9는 설계된 널 렌즈 제작 조건 및 제작된 널 렌즈 사양이며, 그림 8와 그림 9은 제작된 널 렌즈 앞, 뒷면의 측정된 형상오차를 보여주고 있다.

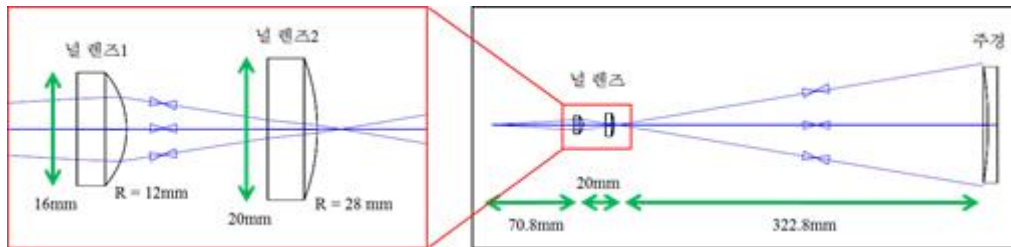
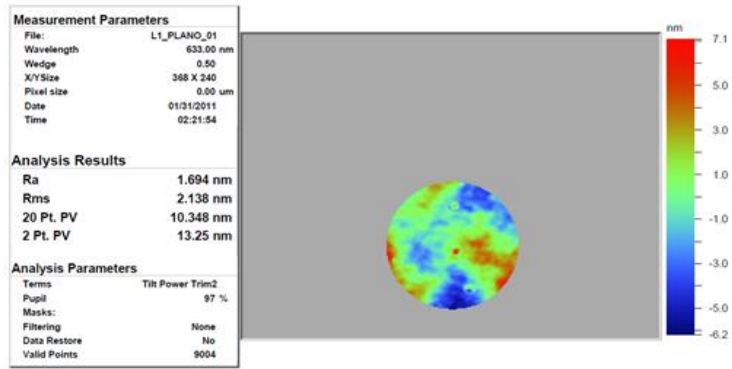


그림 3-1-7. 널 렌즈를 사용한 주경 형상오차 측정 방법 광경로

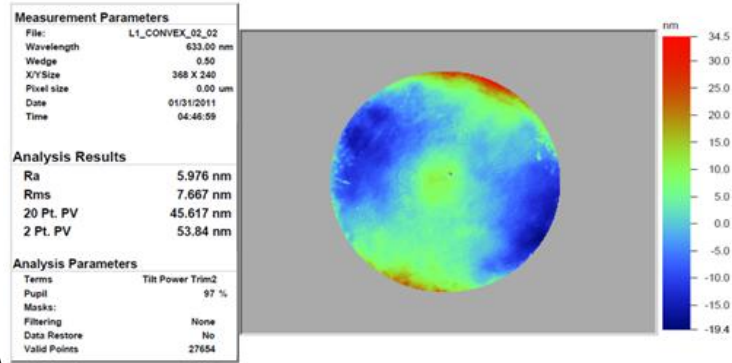
표 3-1-7. 널 렌즈 제작 조건 및 제작된 널 렌즈 측정 사양

변 수	널 렌즈1		널 렌즈2		단위
	요구값	측정값	요구값	측정값	
직경	16	15.96	20	19.97	mm
곡률반경(앞면)	$\infty$	-	$\infty$	-	
곡률반경(뒷면)	$-12 \pm 0.02$	-11.991	$-28 \pm 0.02$	-27.996	mm
두께	$7 \pm 0.02$	7.00	$7 \pm 0.02$	7.00	mm
편심	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$	mm
RMS 형상오차(앞면)	1/50	0.003	1/50	0.005	waves
RMS 형상오차(뒷면)	1/50	0.012	1/50	0.013	waves
재질	BK7	BK7	BK7	BK7	



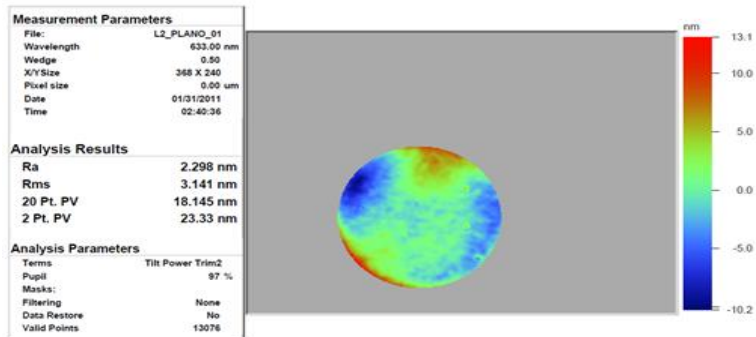


(a)

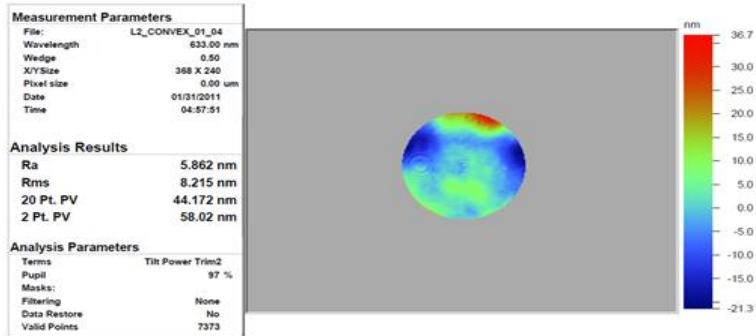


(b)

그림 3-1-8. 첫번째 널 렌즈 앞면(a) / 뒷면(b)  
형상오차



(a)



(b)

그림 3-1-9. 두번째 널 렌즈 앞면(a) / 뒷면(b)  
형상오차

제작된 널 렌즈는 그림 10에 제시된 경통 및 스페이서와 고정링을 사용하여 정렬이 이루어진다. 경통의 직경은 26 mm, 길이는 40.1 mm이며, 스페이서1, 3와 고정링1, 2의 두께는 3 mm, 스페이서2의 두께는 6 mm이다. 그림 11은 널 렌즈 및 경통 부품 분해도로 스페이서1과 스페이서2는 렌즈의 구면과 접하게 제작하였으며, 널 렌즈와 고정링 사이에 두고 스페이서 고정나사로 회전을 구속하여 고정링으로 고정시에 렌즈에 발생될 스트레스를 최소화하였다. 스페이서2는 널 렌즈2 앞에 위치하여 널 렌즈1과 널 렌즈2 사이의 거리를 조절하며, 정밀한 조정을 위해 하이트 게이지(Height gauge)를 사용하여 스페이서2의 두께를 조절하였다.



그림 3-1-10. 제작된 널 렌즈 경통 부품들

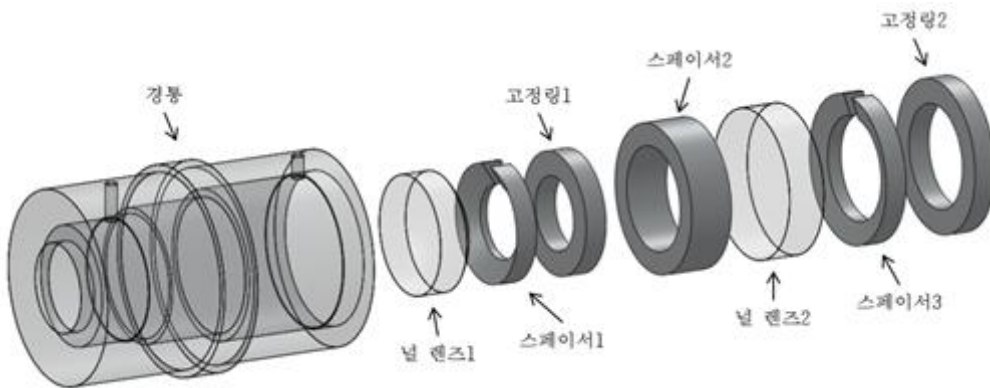


그림 3-1-11. 널 렌즈 및 경통 부품 분해도

이렇게 제작된 널 시스템을 사용하여 주경의 형상오차를 측정한다. 널 시스템과 주경에 광축에 대한 회전을 제외한 5자유도 스테이지(Stage)를 구성하여 측정을 진행한다.

우선 위상이동간섭계와 4인치인 F/3.5의 TS(Transmission Sphere)로 구면파를 생성하여 355.6 mm 뒤에 초점을 맺히게 한다. 초점에서 70.8 mm 뒤에 첫번째 널 렌즈의 앞면이 위치하도록 정렬을 한 후, 두번째 널 렌즈 뒷면에서 322.8 mm 뒤에 주경을 놓고 정렬을 진행한다.

측정된 RMS 형상오차는 각각 ASI 장비 11.43 nm, 널 렌즈 11.60 nm이며, PV(Peak to Valley)는 각각 ASI 장비 86.14 nm, 널 렌즈 105.60 nm로 비슷한 값을 보이고 있다.

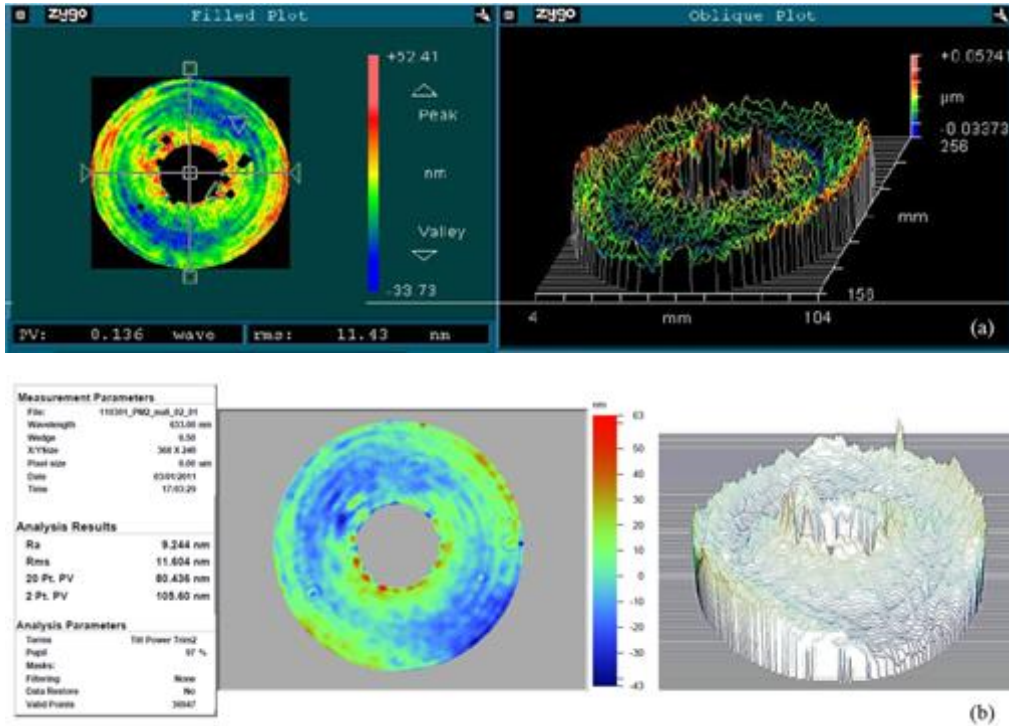


그림 3-1-12. (a) ASI와 (b) 널 렌즈를 이용하여 측정된 주경의 형상오차

- 우주용 특수소재 SiC(실리콘 카바이드) BRDF 특성모델 개발

CTE(Coefficient of Thermal Expansion) 등 기계적 특성이 매우 우수하여, 우주환경에서 팽창과 수축 없이 원래 제작된 형태를 거의 그대로 유지할 수 있는 실리콘 카바이드(SiC)는 천리안위성 1호와 2B호의 해양탐재체 개발을 통해, 그 우수성 및 우주에서의 활용가능성이 확실하게 입증되었다. 하지만, SiC 제작공정 특성상, 다공성 표면의 특성을 가지고 있기 때문에, 광학면을 얻기 위해서는, 약 300um 두께를 가지는 CVD 코팅 공정을 추가하는 것이 일반적이다. 실제로 우리 해양과기원이 운영하고 있는 천리안위성 1호 및 2B호 해양탐재체 제작에 사용된 SiC도 이러한 CVD 코팅이 포함된 SiC 재질을 기반으로 반사경을 포함한 핵심 광기계부가 제작되었다. 아이폰11 등 주요 스마트폰 카메라의 야간촬영에서 쉽게 확인할 수 있는 광학 고스트 현상은, 초정밀 우주급 해양관측시스템 개발에 있어서 중요한 성능 지표 가운데 하나로, 실제 사용자가 활용할 수 있는 우주급 해양관측시스템 개발에 가장 중요한 시험요소이다.

이러한 광학 고스트를 설계 단계에서 최대한 억제하고, 보다 효율적인 성능시험 모델 개발을 위해서는 각 파장대별 빛의 입사각별 SiC 표면의 반사 특성인 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function, 양방향 반사율 분포 함수)를 정확하게 측정하여, 사전에 특성모델을 보유하는 것이 반드시 필요하다.

본 과제에서는 실용급 우주용 해양관측시스템 개발을 위하여, CVD 코팅 적용 전후의 BRDF 특성을 모두 측정하여, 비교하고, 그 결과를 정리한 특성모델을 구현함으로써, 실제 사용자가 해양관측 연구에 활용할 수 있는 우주급 해양관측시스템 개발을 위한 성능을 검

증하였다.

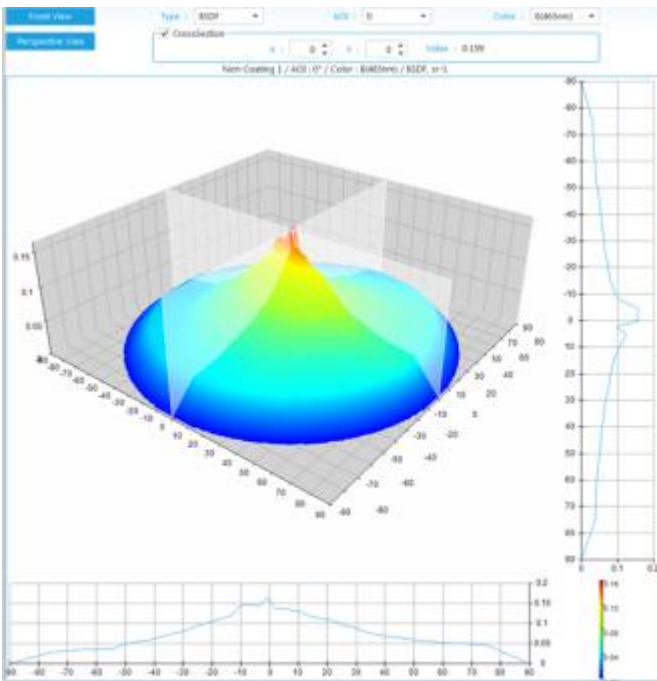


<b>Light Sources</b>	3 color collimated sources: Red, Green and Blue for RGB measurements. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Red: 630nm [<math>\Delta\lambda/2=25\text{nm}</math>]</li> <li>• Green: 525nm [<math>\Delta\lambda/2=35\text{nm}</math>]</li> <li>• Blue: 465nm [<math>\Delta\lambda/2=25\text{nm}</math>]</li> </ul>
<b>Angle of Incidence</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• For reflection measurements: 0°, 20°, 40° and 60°</li> <li>• [Optional] For transmission measurements: 0°, 20°, 40° and 60°</li> </ul>
<b>Dynamic Range</b>	$10^5$
<b>BPDF Accuracy</b>	< 5% (For Lambertian sample)
<b>BPDF Repeatability</b>	< 2% (For Lambertian sample)
<b>Color Accuracy</b>	Duv < 0.1
<b>Angular Aperture</b>	-75° to +75° - Hemispherical measurement
<b>Effective Measured Area</b>	$\Phi 1\text{ mm}$
<b>Angular Resolution</b>	1°
<b>Output Data</b>	3D BPDF, 3D Angular Resolved Scatter (ARS)
<b>Exportation File Format</b>	Exportation to optical simulation software (list available upon request)
<b>Package</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mini-Diff V2 measurement device</li> <li>• Standard reference materials (white and black)</li> <li>• Measurement and post processing software + factory calibration</li> <li>• USB cable</li> <li>• Storage box</li> <li>• User manual</li> <li>• [Optional]: BTDF module + Standard BTDF Reference + RJ11 Cable</li> </ul>
<b>Dimensions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Storage box: 355*130*441 mm</li> <li>• Mini-Diff V2 device: 100*100*300 mm</li> <li>• [Optional] BTDF Module: 100*100*100 mm</li> </ul>
<b>Weight</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mini-Diff V2 device: 2 kg</li> <li>• [Optional] BTDF Module: 0,5 kg</li> </ul>

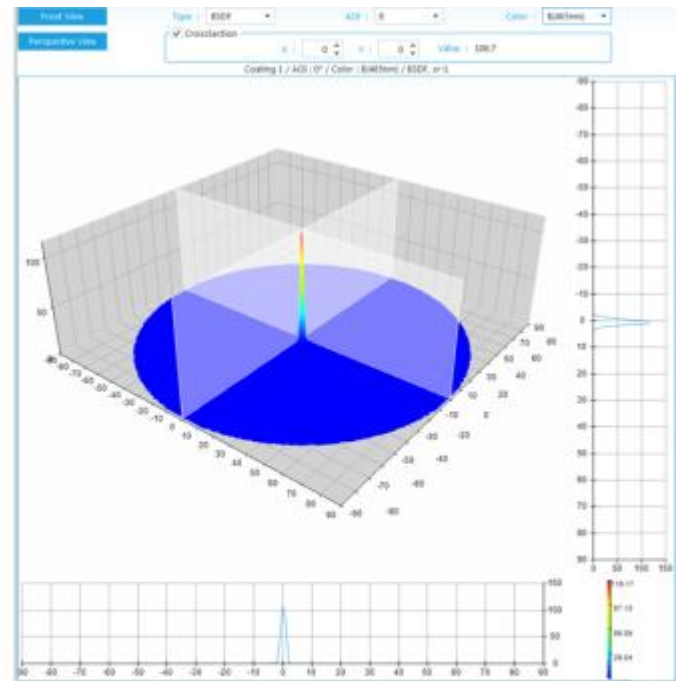
그림 3-1-13. BRDF 측정장비(Mini-Diff v2) 주요 사양



그림 3-1-14. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 세팅

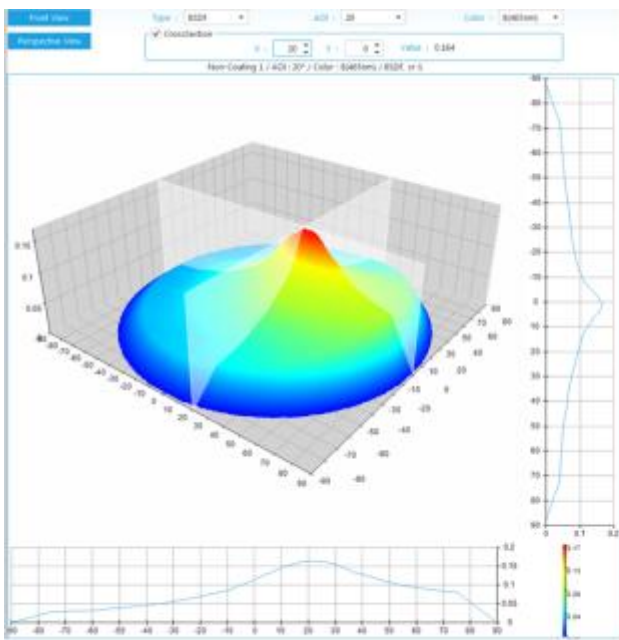


**SiC: Estimated TIS : 0.186**

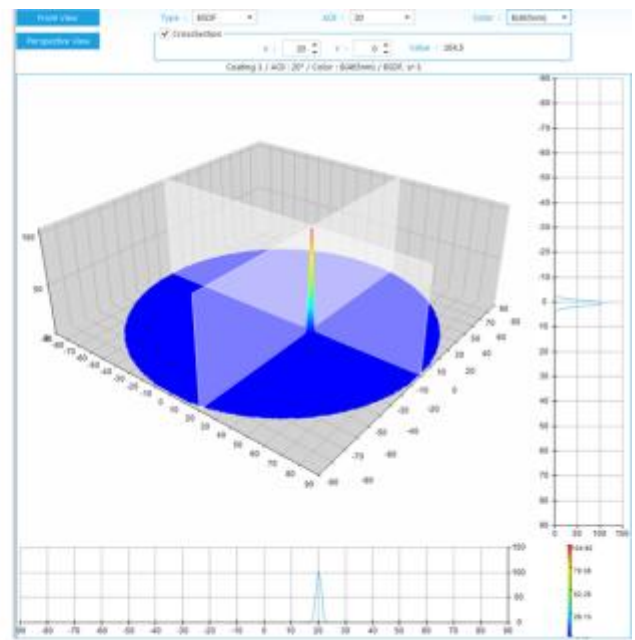


**CVD SiC: Estimated TIS : 0.227**

그림 3-1-15. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (0 deg)

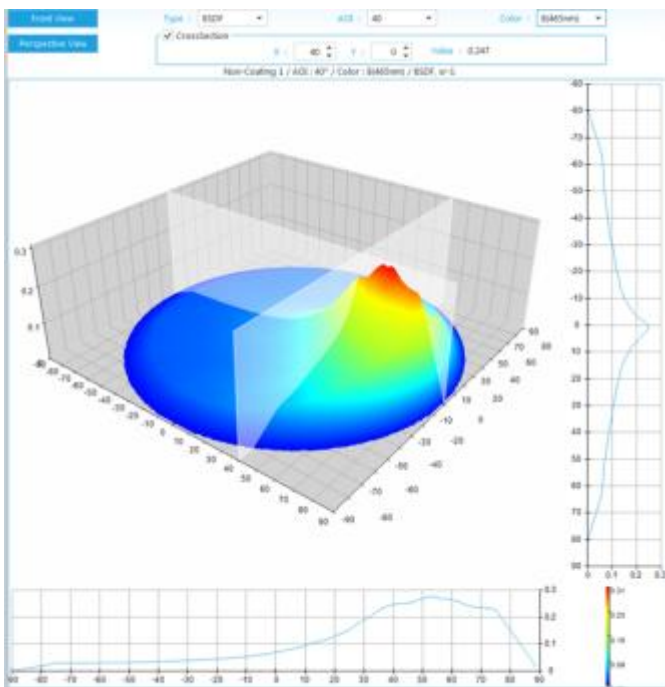


**SiC: Estimated TIS : 0.199**

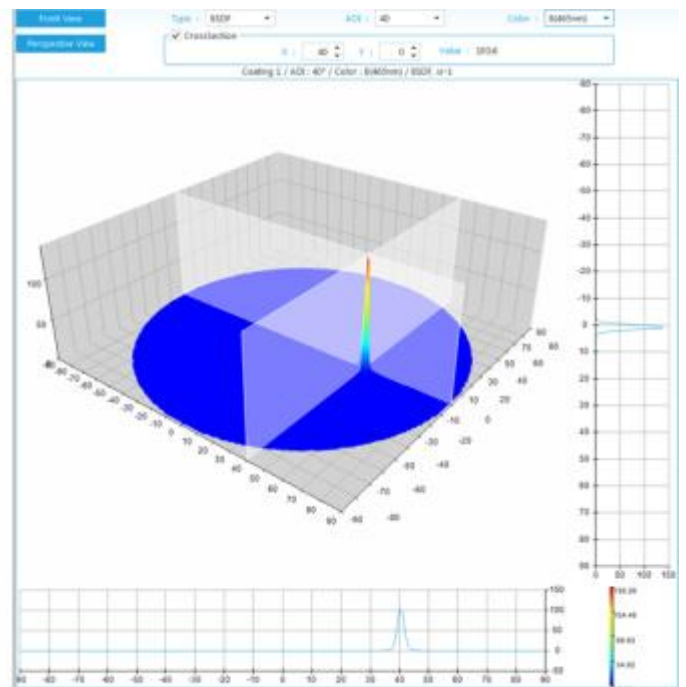


**CVD SiC: Estimated TIS : 0.256**

그림 3-1-16. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (20 deg)

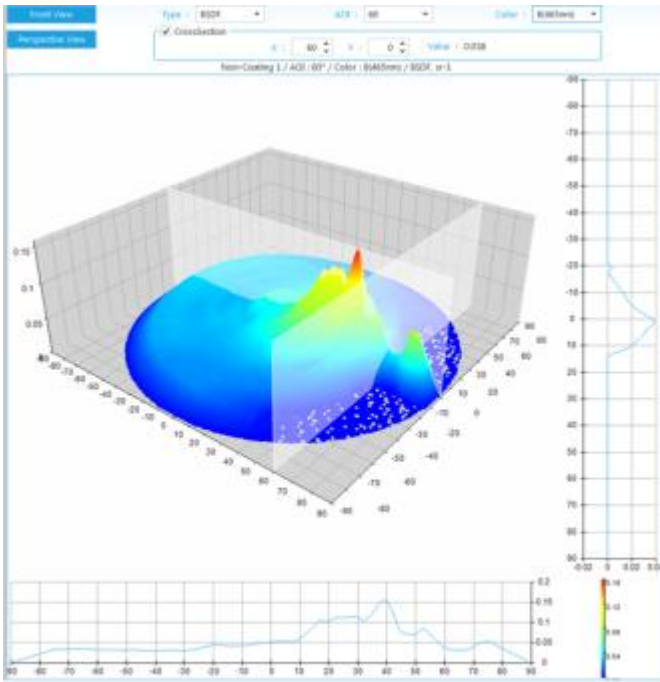


**SiC: Estimated TIS : 0.208**

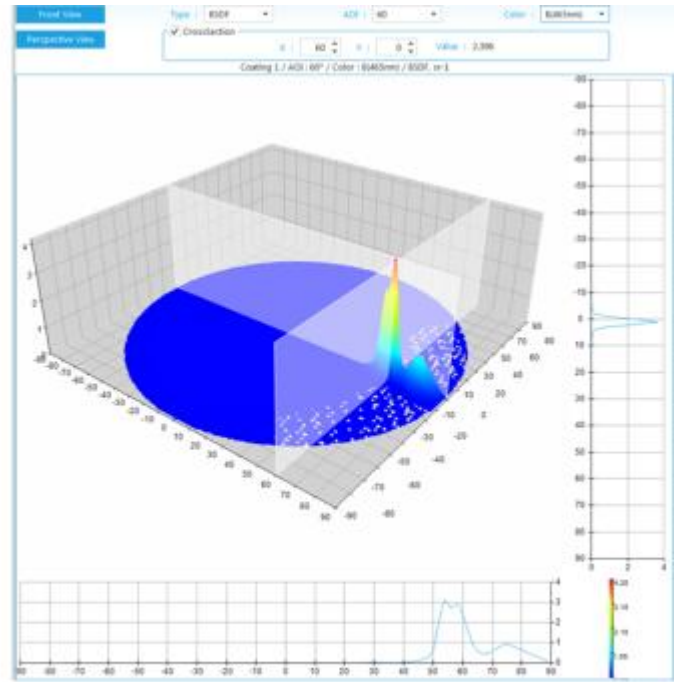


**CVD SiC: Estimated TIS : 0.272**

그림 3-1-17. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (40 deg)



**SiC: Estimated TIS : 0.118**



**CVD SiC: Estimated TIS : 0.052**

그림 3-1-18. CVD 코팅 전(좌)과 후(우)의 SiC 시편에 대한 BRDF 측정 결과 (60 deg)

## 제2절 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가

### □ 연구내용 2-1. 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가

#### 1) 정적하중시험 계획 수립 및 검증시험

정적하중시험은 반사경 구조물에 대한 이력현상 발생 여부를 통하여 성능평가를 진행한다. 광학계의 반사경 파트 구조물의 질량은 ~50 g이며, 발사과정에서 본 광학계에 걸리는 하중은 60 G이다. 따라서 50 g에 걸리는 60 G의 하중을 무게로 환산하면 3 kgf가 된다. 따라서 정적 하중 시험에서는 부경 구조물을 X축 방향으로 3 kgf(60 G)까지의 하중을 0.5 kgf(10 G) 단위로 증가 후 감소시키며 이에 따른 부경의 변위(Displacement)를 다이얼 게이지로 측정한다.

반사경 구조물에 걸리는 하중을 증가시킨 후 감소시켰을 때 반사경 구조물이 제자리로 돌아오는지를 확인하는 작업으로 이를 통하여 이력현상이 발생되는지 여부를 확인하여 구조물의 기계적 성능을 평가하는 것이다. 정적하중시험을 위해서는, 일정한 방향으로 정확한 하중을 가하기 위하여 도르래와 0.5 kgf의 추를 사용하여 실제 중력이 적용될 수 있는 하중환경을 구성한다. 실제 변위 측정은 반사경 구조부 반대편에서 다이얼 게이지를 사용하여 변위를 측정한다.

총 8번 반복하여 측정한 결과, 정적 하중에 대한 부경의 위치 변이 측정 결과를 그림 19와 표 10에 나타내었다. 부경 구조물에 가해지는 하중을 증가시키고 감소시킬 때 부경 구조물의 변위에는 차이가 있었지만  $0\mu\text{m}$ 에서 시작하여  $0.125\mu\text{m}$ 에  $1\sigma$   $0.354\mu\text{m}$ 으로 돌아오는 것을 확인할 수 있으며, 이력현상이 존재하나 이력발생량이 무시할 수 있는 수준임을 확인할 수 있다.

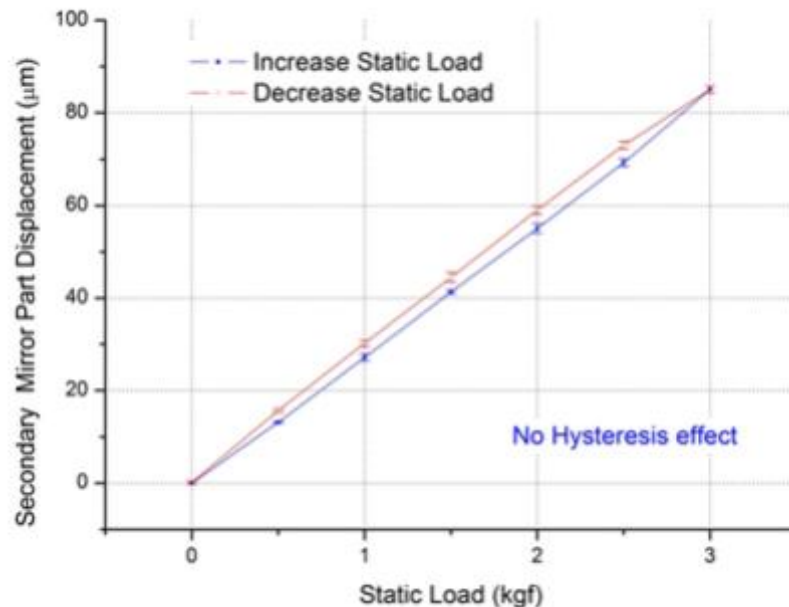


그림 3-2-1. 정적 하중에 대한 부경의 위치 변이 측정 결과



표 3-2-1. 정적 하중에 대한 반사경의 위치 변이 측정 결과

하중 (kgf)	하중의 증가						
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	0	13	28	41	53.5	70	86
2	0	13	28	42	54	70	86
3	0	13	28	42	54	70	86
4	0	13.5	26.5	41.5	56	70	84.5
5	0	13	26.5	41	56	68.5	84.5
6	0	13	26.5	41	55.5	68	84.5
7	0	13.5	27	41	56	69	85
8	0	13	26.5	41	55.5	68.5	84
평균값	0.000	13.125	27.125	41.313	55.063	69.250	85.063
표준편차	0.000	0.231	0.744	0.458	1.050	0.845	0.821
하중 (kgf)	하중의 감소						
	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0
1	86	74	60	46	30.5	16	0
2	86	74	60	45.5	31	16	0
3	86	74	60	45.5	31	16	0
4	84.5	72.5	58.5	44	30	15.5	0
5	84.5	72.5	58	43.5	29.5	15.5	0
6	84.5	72.5	58.5	43.5	29.5	15.5	0
7	85	73	59	44.5	30.5	16	1
8	84	72	58	43.5	29.5	15	0
평균값	85.063	73.063	59.000	44.500	30.188	15.688	0.125
표준편차	0.821	0.821	0.886	1.035	0.651	0.372	0.354

unit :  $\mu\text{m}$

## 2) 발사환경시험 방안 수립

발사과정에서 탑재체가 받는 진동 및 충격 등의 하중에 대한 안전성 검증을 위해 정현파 진동시험, 랜덤 진동시험, 충격시험 등 발사환경시험을 수행한다. 레퍼런스 광학계에 대해 실험실에서 이를 구현하기 위해서는 가진기(Shaker) 사용이 필요하다. 반사경 및 구조부 주요 지점에 3축 가속도계(3-axis Accelerometer)를 부착함으로써, 진동에 따른 반사경 및 구조부의 영향을 확인할 수 있다. 3가지 시험 모두 X, Y, Z 3축에 대해 진행하며, 각 시험 전후에 저수준의 정현파 진동시험(Low sine sweep test)을 실시하여 구조물에 가해진 하중에 대한 기계적 특성의 변화여부를 확인한다. 저수준의 정현파 진동시험은 5 Hz 부터 2000 Hz까지 0.3 G의 하중으로 수행한다.

- 정현파 진동시험

정현파 진동시험은 5 Hz부터 2000 Hz까지 주파수를 변화시키며 1 G에서부터 9.5 G까지의 하중으로 수행하며, 그 조건은 그림 20에 나타내었다. X, Y, Z 3축 모두 동일한 조건으로 시험을 진행하며, 시험들은 각각 11분(TBD) 동안 수행한다.

각 시험 전후에는 저수준 정현파 진동시험을 수행하며, 저수준 정현파 진동시험에서 진동의 특성 변화 여부를 분석하여 구조물의 안전성의 문제여부를 판단한다. 각 시험 전후의 저수준 정현파 진동시험 결과 그래프에서 뚜렷한 구조물 반응의 변화가 나타나지 않으면 이는 구조물이 안정하다고 판단할 수 있으며, 이를 통해 광학계의 정현파 진동시험 통과 판단여부를 결정하고, 발사 생존성을 검증할 수 있다.

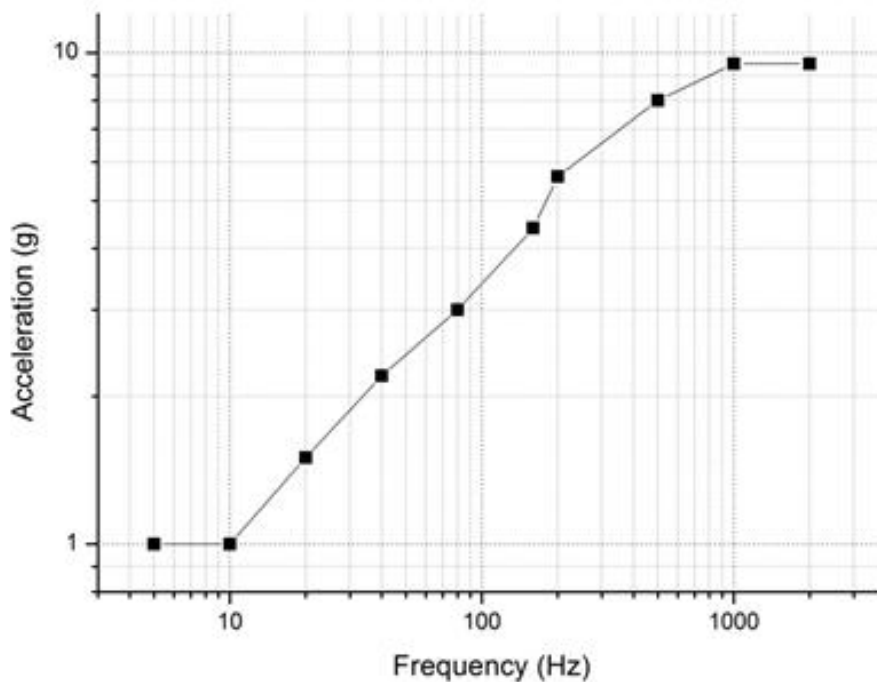


그림 3-2-2. 정현파 진동시험 조건

- 랜덤 진동시험

랜덤 진동시험은 주어진 주파수 영역의 하중을 동시에 주는 시험으로 발사과정에서 구조물이 받을 진동환경을 사실적으로 모사하는 시험이다. 랜덤 진동시험은 일반적으로 420초동안 20 Hz부터 2000 Hz까지의 영역에서 그림 21의 조건으로 수행한다.

랜덤 진동시험 또한 각 시험 전후에는 저수준 정현파 진동시험을 수행하며, 저수준 정현파 진동시험에서 진동의 특성 변화 여부를 분석하여 구조물의 안전성의 문제여부를 판단한다. 각 시험 전후의 저수준 정현파 진동시험 결과 그래프에서 뚜렷한 구조물 반응의 변화가 나타나지 않으면 이는 구조물이 안정하다고 판단할 수 있으며, 이를 통해 실제 발사환경을 모사한 랜덤 진동시험에 대한 구조물의 안전성 여부를 결정하고, 발사 생존성을 검증할 수 있다.

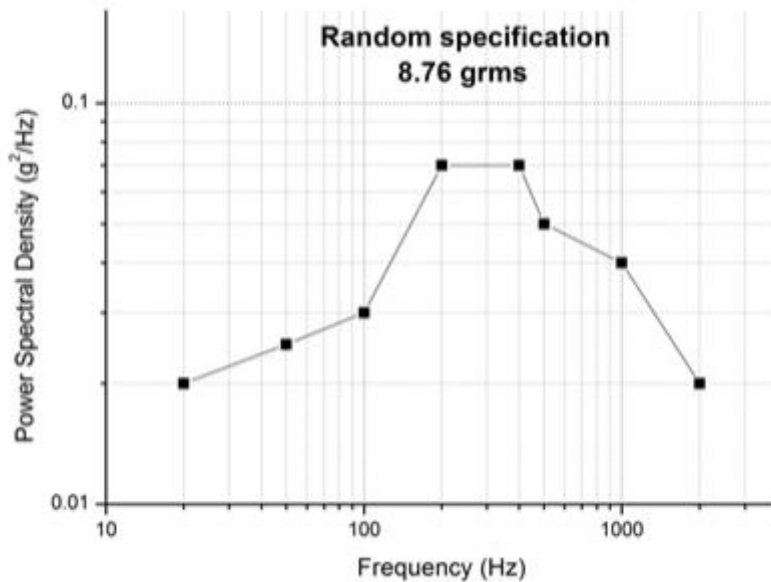


그림 3-2-3. 랜덤 진동시험 조건

### 3) 우주환경시험 전후 신뢰성검증용 변조전달함수(MTF) 측정방안 수립

우주환경시험 전후의 광학계의 성능변화 여부를 광학계의 변조전달함수 측정을 통하여 확인한다. 일반적으로 변조전달함수는 광학계 점확산함수(Point Spread Function, PSF)의 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 통해 계산한다.

우선 점확산함수를 측정하기 위하여는, 위상이동간섭계와 TF(Transmission Flat)를 사용하여 광학계의 성능측정용 기준 파장대인 632.8 nm(He-Ne)의 평면파를 생성하여야 한다. 해당 평면파를 광학계에 입사한 상태에서, 초점면에 검증용 카메라를 설치하여 점확산함수를 측정한다. 실제 우주급 해양관측시스템 성능 검증을 위해서는, 실제 위성에 탑재된 검출기와 동일한 모델의 검출기를 이용하는 것이 원칙이나, 시험 조건에 따라서,

MTF 측정에 핵심이 되는 픽셀 사이즈를 최대한 동일하게 구성하는 것이 변조전달 함수 측정결과의 신뢰성 확보에 중요하다.

그림 22는 레퍼런스 광학계로 측정된 점확산함수를 각각 X축과 Y축에 대한 점확산함수로 표현한 것이다. 이를 고속 푸리에 변환하면 광전달함수(Optical Transfer Function, OTF)가 되며, 광전달함수의 최대값으로 표준화를 하여 변조전달함수를 구한다.

#### 4) 우주환경시험 수행을 위한 우주급 해양관측시스템 조립

작년도 하반기부터 금년 상반기 1차 조립/정렬이 완료된 TMS 광학계의 시스템 레벨 성능평가를 수행한 결과, 반사경 표면 기준면의 절대위치가 설계 대비 1~2mm 차이가 발생함을 확인하였고, tilt 특성 뿐만 아니라, 반사경의 대구경화에 따른 후부 구조부 불균일성에 따른 형상오차가 발생함을 확인하였다. 뿐만 아니라, 여러 기관이 동시에 참여하여 제작한 광학계 시스템 특성상, 광학계 표면에 칩과 같은 다양한 이물질들로 오염되었음도 확인하였다. 본 과제는 출연연간 창의형융합연구과제(CAP과제)의 기관부담금 과제임에 따라, CAP과제의 총괄주관연구기관인 한국기초과학지원연구원(KBSI)과의 협의를 통해, 광학계 분해 및 반사경 경면 재가공(폴리싱) 및 2차 코팅 후, 해양과기원에서 2차 광학계 조립 및 성능시험을 수행하기로 결정하였다. COVID-19 등 당초 연구계획 수립 시 예상하지 못한 사태 발생으로 인해, 광학계 재가공에 생각보다 많은 시간이 소요된 결과, 과제 종료가 임박한 11월 초에 각 부품별 분해된 상태로 2차 가공이 완료된 광학계가 우리 해양과기원에 입고되었다.

우주급 해양관측시스템의 광학계를 구성하는 3종 반사경(M1, M2, M3)의 2차 코팅 후 형상 오차(figuring error) 측정 결과, M1의 RMS와 PV 에러가 각각 0.46um, 1.94um로 측정되었으며, 이는 1차 폴리싱/코팅 직후 측정한 결과인 0.403um 및 1.611um 대비 높은 값이나, 실제 광학성능 구현에 이슈가 되었던 조립/정렬 개선을 통한 광학성능 구현에는 문제가 없는 수준으로 확인되었다.

금년도 연구과제 수행 중, 개발된 광학계의 성능 이슈 발견 및 재가공 등의 절차는 천리안위성과 같은 일반적인 대형위성 개발과정에서 자주 발생하는 사안으로, 실용급 인공위성용 해양관측시스템 개발에 있어, 일종의 통과의례와 같은 과정이라고도 할 수 있다. 현재 2차 조립/정렬 및 성능시험이 원활하게 진행되고 있는 관계로, 과제 종료기간인 12월말까지 전체 연구과제 성과목표인 우주환경시험까지 수행할 예정이다.

아울러, 후속과제 형태로 진행될 해양 나노위성 개발이 본격화되는 2021년부터는, 본 연구과제 성과에 기반한 기술이전 및 부산시와 산업부, 해경청 등 다양한 정부/공

공기관에서 발주하는 해양 나노위성개발사업에 우리 해양과학기술원이 주관연구기관으로 참여하는 신규 국가연구개발과제가 본격적으로 추진될 예정이다.

[201104\_TMS\_M1\_After Coating.mdx(])  
 Prm:LAF\_M1[U] Pr = 1.900 (um) 11:56:04 Thu 05 Nov 2020  
 Measured aX;2020/11/04 16:35:24,01:02:59 [245] Y-Data; Not Use  
 Align. Decent. Lock:X = 0.0000(um) Lock:Y = 0.0000(um) Free:Z = -0.4273(um)  
 Align. Tilt Free:a = 1.0115(min) Free:b = -0.9909(min) Free:c = -48.2226(min)

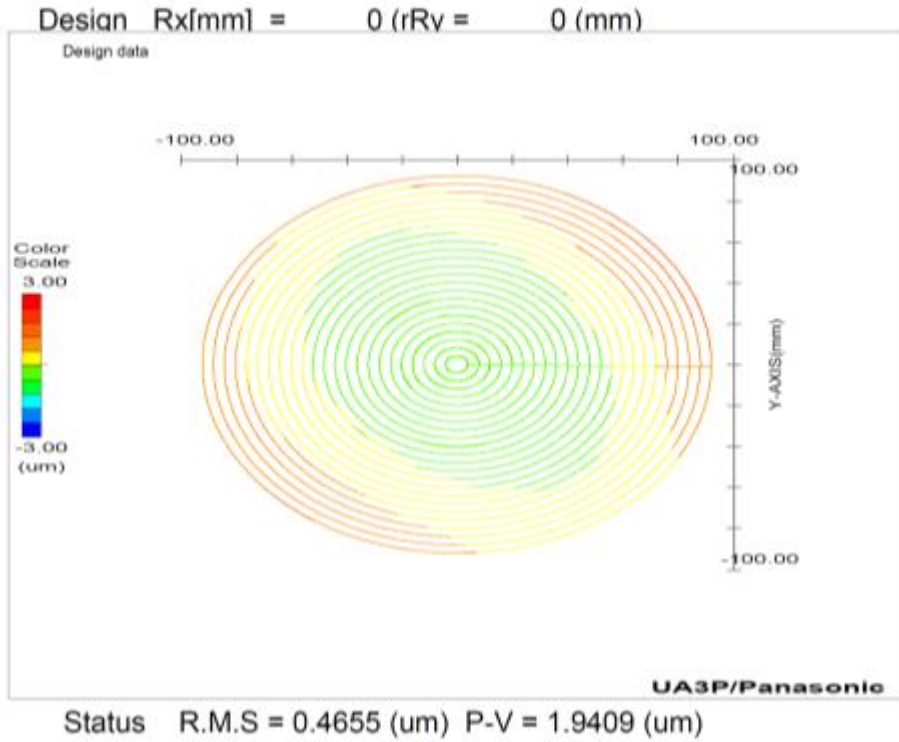


그림 3-2-4. 2차 폴리싱/코팅 후 반사경(M1) 형상 오차 측정 결과

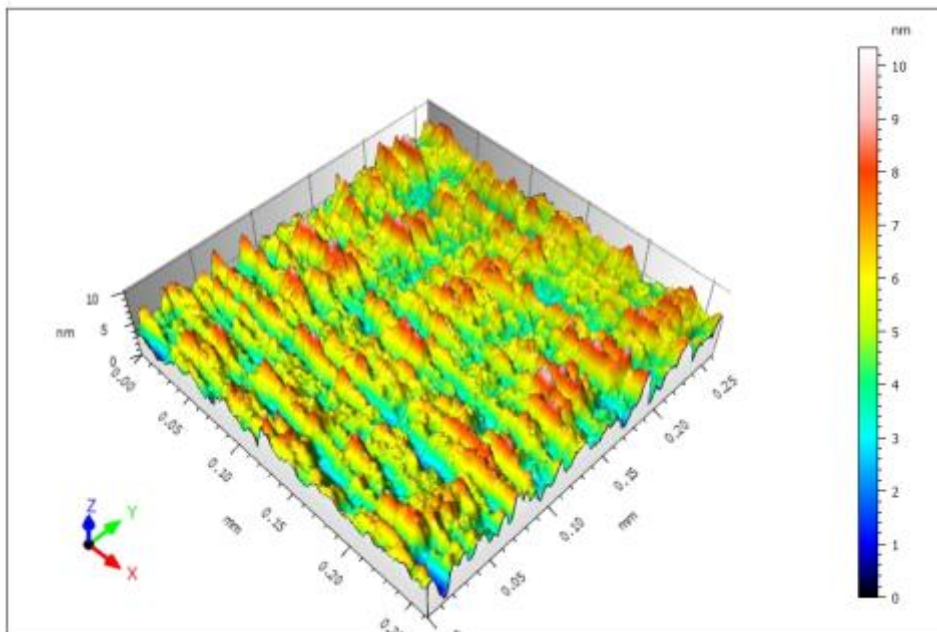


그림 3-2-5. 2차 폴리싱/코팅 후 반사경(M1) 표면 거칠기 측정 결과



그림 3-2-6. 초정밀 해양관측시스템 2차 폴리싱/코팅 후 재조립/제작 중인 우리 원  
청정실험실 전경

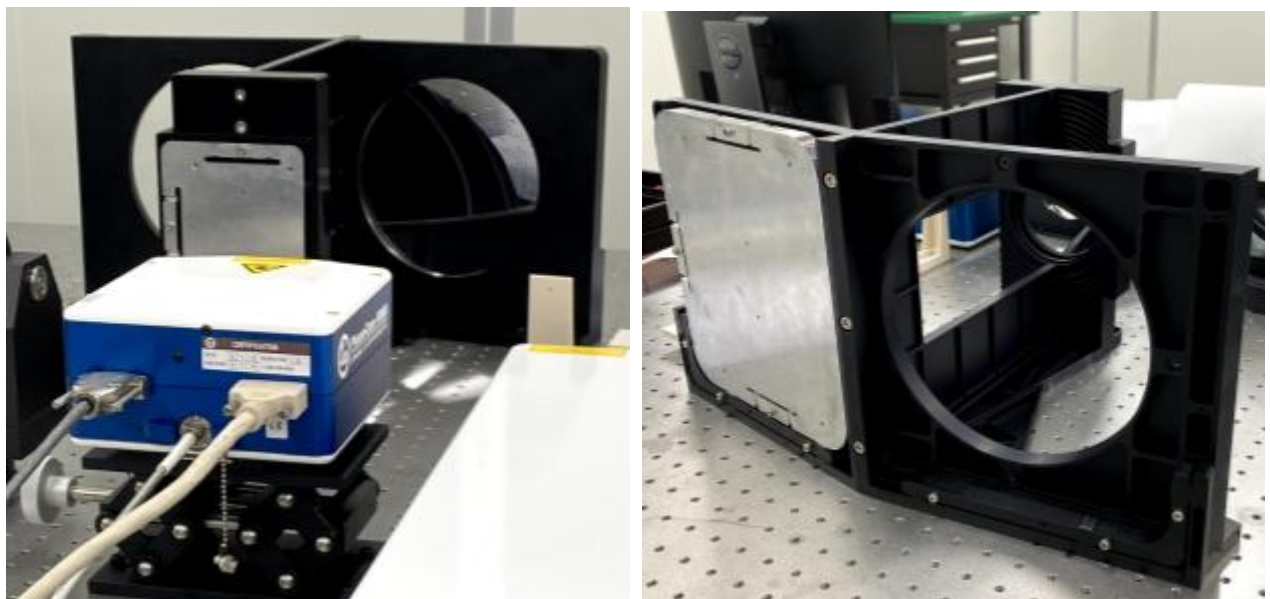


그림 3-2-7. 재조립/정렬작업이 진행중(11월초 기준)인 우주급 초정밀 해양관측시스템

## [참고] 1~4차년도 연구개발 수행 내용 및 결과

### ① 1차년도

#### □ 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계

- 본 과제에서 개발 중인 자유형상 광부품 가공장비의 성능검증을 위한 시제품 광학계 설계를 수행함. 이에 구경 200mm 비축-비구면 광학계 설계 및 구경 200mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 개념 설계를 완료하였음.

- 연구목표에 대하여 광학계 구경 100mm 이상의 구경 200mm 비축-비구면 광학계 설계를 완료하였으며, 공간해상도는 저궤도 고도 685km 기준 4m로 연구목표인 10m 이하를 만족함. 또한 광학계 파면오차는  $1/20\lambda$ 로  $1/5\lambda$ 를 충분히 충족시킴.

#### • 구경 200mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계

- Telescope type : Three

#### Mirror Anastigmat (TMA)

- Pupil size : 200 mm

- Effective focal length (EFL) : 1200 mm

- Ground Sampling Distance (GSD) @LEO (685 km) : 4 m @Nadir

- 광학계 설계 Layout 및 성능

- 검출면(이미지 위치)의 광축에 따른 앞뒤 이동에 따른 광학계의 파면오차 RMS (RMS Wavefront Error)값을 보여주는 그래프로 상단 검정색 선은 물리적 한계인 회절한계 (Diffraction limit) 값임.

- 설계된 광학계는 모든 시야각 내에서 검출면이 앞뒤로  $\pm 10 \mu\text{m}$  이동하여도 회절한계 내에서 광학계 파면오차  $1/20\lambda$ 이내의 우수한 성능을 보임.

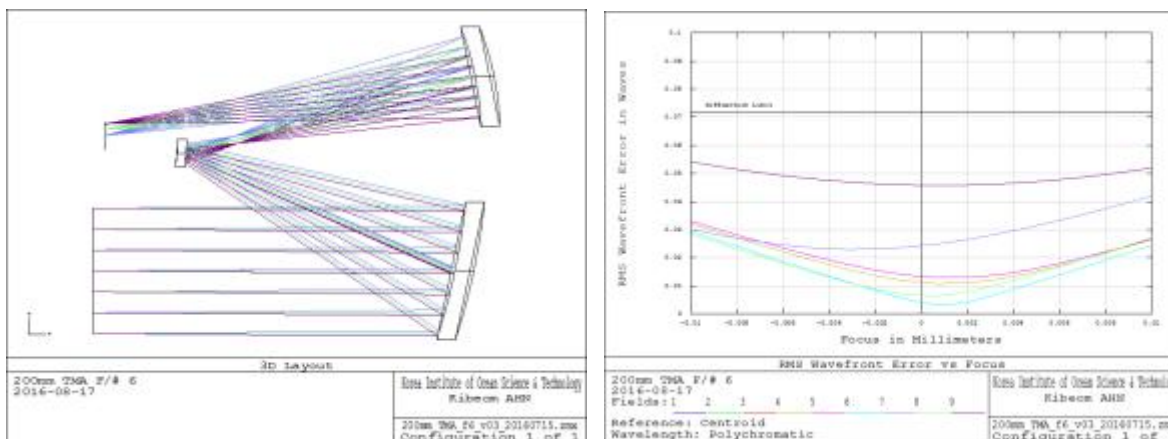


그림 2-1. 광학계 설계 layout(좌) 및 RMS Wavefront Error(우)

□ 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 개발

- 초정밀 광학계 잡광 분석을 위한 3D 모델링 기반 광선추적 분석코드 개발 수행.
- 많은 시간과 인력이 소요되는 기존 방식과는 다른 한번의 분석을 통하여 검출기 한 픽셀에 도달하는 모든 방향의 잡광 분석 시스템을 개발함.
- 국내 특허 출원 및 등록

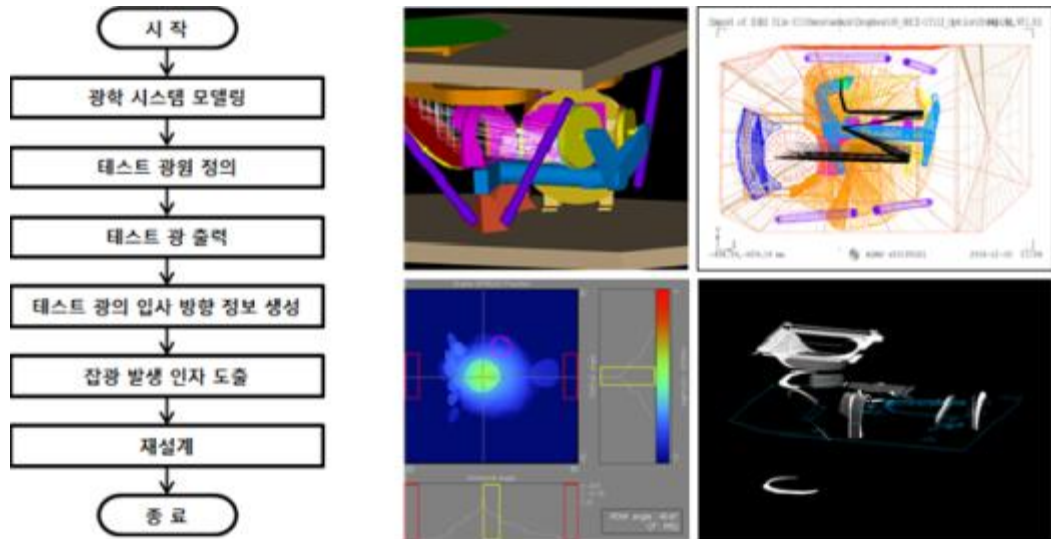


그림 2-2. (좌)초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 흐름도 및 (우)잡광 분석 결과 예시

□ SiC 미러 구조 설계

- 광학계 3D modeling 수행
- 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D modeling 수행
- 경량화 패턴 : 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 경량화 패턴은 천리안 해양관측위성의 heritage를 바탕으로, 천리안 해양관측위성 주반사경(M1)에 사용된 삼각형 패턴을 이용하여 설계함.
- 비교 분석을 위한 다소 복잡한 패턴의 경량화 설계를 수행함.

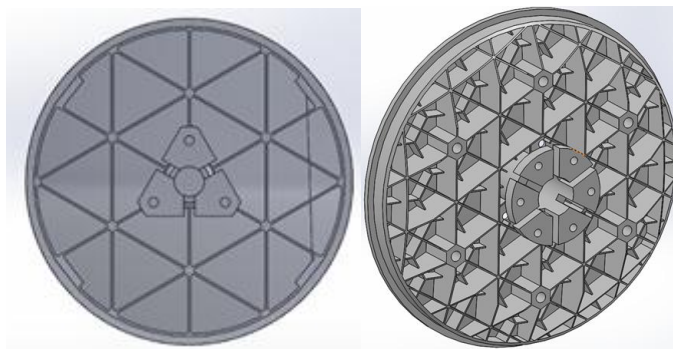

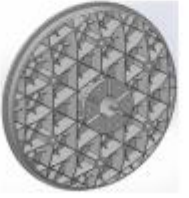


그림 2-3. 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D 모델링



- 해양관측위성 주반사경(M1) 경량화 패턴과 장단점 비교분석 수행.

		Pros	Cons
GOCI-1 M1 lightweight pattern		Simple (triangle only), Lighter, Low manufacturing cost, lower shrinkage rate depending on SiC manufacturing process	Lower bending mode, center supports for fabrication (large power will be introduced), Large patches → large quilting effect during
Current M1 lightweight pattern (in progress)		Higher bending mode, 6-point outer support for fab, Less quilting effect during fab., 6-point center mount	Complex (combination of triangle and hexa) High manufacturing cost, Need rocker arms to form 3-point support d ab., Higher shrinkage rate depending on SiC man uring process

□ 초정밀 광학계 평가 시스템 구축을 위한 기본설계

• 국제수준 신뢰성 평가(환경시험) 요구사항 도출

- 습도 시험 요구사항 (from MIL-C-48497A)
- 온도 시험 요구사항
- 열진공 시험 요구사항

• 신뢰성 평가 시험 계획 및 시험 인프라 구축 방안 수립

- 주요 환경시험 요구사항을 만족하는 국내 시험 인프라 환경 조사
- 신뢰성 평가를 위한 해양위성센터 내 현장관측기기 검보정 실험실 개선 방안 수립
- 항우연, 천문연, 세트렉아이 등 우주급 광학계 환경시험 시설을 보유한 국내 주요 기관과의 연구협력방안 검토
- 세계 최고 수준의 우주급 광학계 환경시험 시설을 보유한 미국 NASA 현장방문조사
- 천리안 해양관측위성 중심으로 진행 중인 KIOST-NASA 간 국제공동연구 확대 방안 협의 (위성 광학계 신뢰성평가 기술 공동연구 등)

② 2차년도

□ 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계

- 본 과제에서 개발 중인 자유형상 광부품 가공장비의 성능검증을 위한 시제품 광학계 설계를 수행함. 이에 구경 300mm 광축-비구면 광학계 및 구경 300mm 비축-비구면 광학계 설계를 수행하였으며, 구경 300mm 광축-비구면 Aluminum 미러 구조 및 구경 300mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 설계를 완료하였음.
- 연구목표에 대하여 광학계 구경 100mm 이상의 구경 300mm 비축-비구면 광학계 및 구경 300mm 광축-비구면 광학계 설계를 완료하였으며, 공간해상도는 저궤도 고도 685km 기준 각각

2.6m와 1.3m로 연구목표인 5m 이하를 만족함. 또한 광학계 파면오차는  $1/20\lambda$ 로  $1/8\lambda$ 를 충분히 충족시킴.

- 구경 300mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계

- Telescope type : Three Mirror Anastigmat (TMA)
- Pupil size : 300 mm
- Effective focal length (EFL) : 1800 mm
- Ground Sampling Distance (GSD) @LEO (685 km) : 2.6 m @Nadir
- Wavefront Error <  $1/20\lambda$
- 광학계 설계 Layout 및 성능
- 설계된 광학계는 모든 시야각 내에서 검출면이 앞뒤로  $\pm 10\ \mu\text{m}$  이동하여도 회절한계 내에서 광학계 파면오차  $1/20\lambda$  이내의 우수한 성능을 보임.

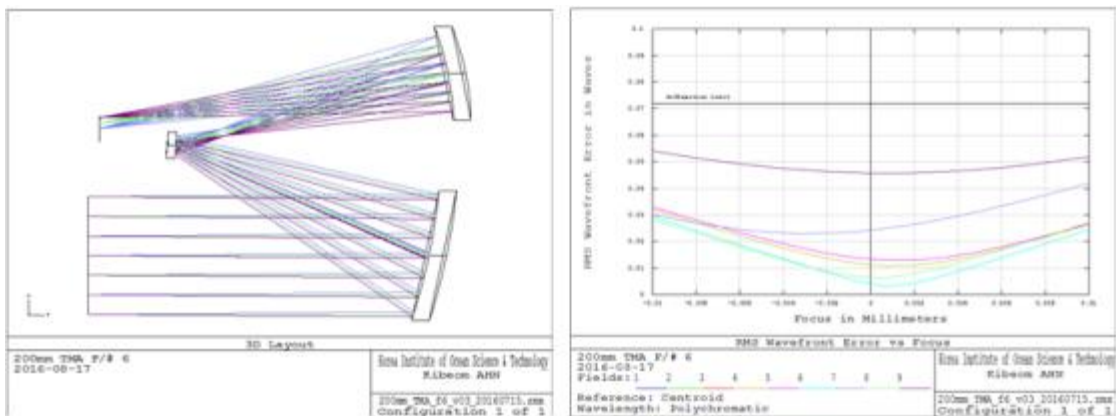


그림 2-4. 구경 300mm TMA 광학계 설계 layout(좌) 및 RMS Wavefront Error(우)

- 구경 300mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계 수행

- Telescope type : Ritchey-Chrétien
- Pupil size : 300 mm
- Effective focal length (EFL) : 3600 mm
- Ground Sampling Distance (GSD) @LEO (685 km) : 1.3 m @Nadir
- Wavefront Error <  $1/20\lambda$
- 광학계 설계 Layout 및 성능
- 검출면(이미지 위치)의 광축에 따른 앞뒤 이동에 따른 광학계의 파면오차 RMS (RMS Wavefront Error)값을 보여주는 그래프로 설계된 광학계는 모든 시야각 내에서 검출면이 앞뒤로  $\pm 10\ \mu\text{m}$  이동하여도 회절한계 내에서 광학계 파면오차  $1/20\lambda$  이내의 우수한 성능을 보임.

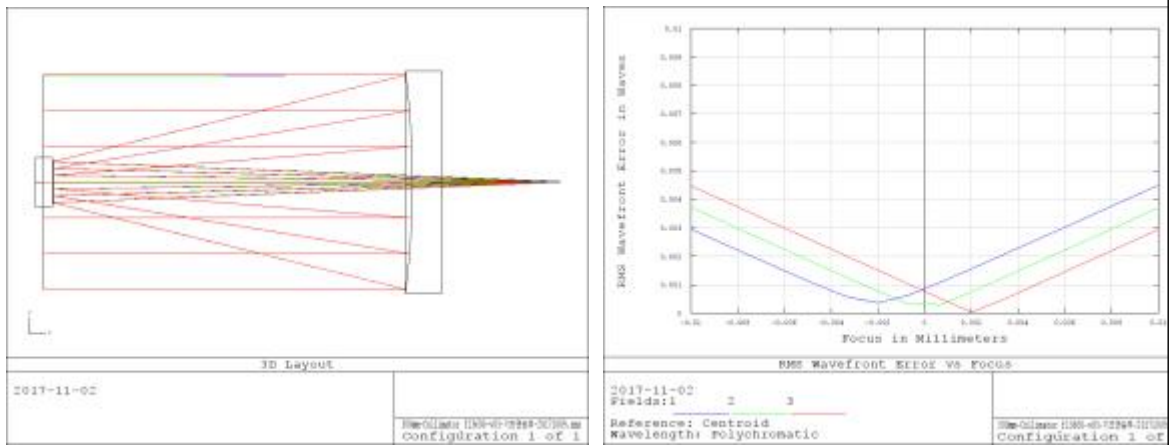


그림 2-5. 구경 300mm Ritchey-Chrétien 광학계 layout(좌) 및 RMS Wavefront Error(우)

### □ SiC 미러 구조 설계

- 구경 300 mm 비축-비구면 SiC 미러 및 구경 300 mm 광축-비구면 Al6061 미러 구조 3D modeling 수행



그림 2-6. 구경 300mm 비축-비구면 SiC 미러(좌) 및 구경 300mm 광축-비구면 Al6061 미러(우) 구조 설계

- 경량화 패턴 : 구경 300 mm 비축-비구면 SiC 미러 경량화 패턴은 천리안 해양관측위성의 heritage를 바탕으로, 천리안 해양관측위성 주반사경(M1)에 사용된 삼각형 패턴을 이용하여 설계함

지지구조는 반사경에 스트레스를 최소화하기 위하여 3점지지로 반사경 뒷면에서 잡는 구조로 설계하였음

### • 중력(하중) 영향에 의한 성능 분석

- 중력(하중)에 의한 반사경의 변형을 분석하고 변형에 따른 성능 영향을 분석함
- 하중조건 : 중력 방향으로 1G

표 2-13. Reaction forces

표 2-1. Selection set	표 2-2. Units	표 2-3. Sum X	표 2-4. Sum Y	표 2-5. Sum Z	표 2-6. Resultant
표 2-7. Entire Mode 1	표 2-8. ]	표 2-9. -0.019022	표 2-10. 7.65E-08	표 2-11. -1.46E-07	표 2-12. 0.019022

• 고유진동수 모드 분석

- SiC 반사경 설계에 따른 고유진동수 모드를 분석함

표 2-14. Mode List

Frequency Number	Rad/sec	Hertz	Seconds
1	5.24E+05	83427	1.20E-05
2	5.24E+05	83459	1.20E-05
3	6.94E+05	1.10E+05	9.05E-06
4	1.14E+06	1.81E+05	5.53E-06
5	1.21E+06	1.92E+05	5.21E-06

표 2-15. Mass Participation (Normalized)

Mode Number	Frequency(Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	83427	0.001767	0.001042	7.49E-06
2	83459	0.001047	0.001738	1.50E-06
3	1.10E+05	4.73E-08	3.20E-07	0.56842
4	1.81E+05	3.93E-07	2.61E-08	0.11711
5	1.92E+05	5.25E-06	0.00205	1.55E-06

### ③ 3차년도

#### □ 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계

- 구경 600mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계
  - Telescope type : Three Mirror Anastigmat (TMA)
  - M1 Mechanical Diameter : 600 mm
  - Effective focal length (EFL) : 6,000 mm
  - Ground Sampling Distance (GSD) @LEO (685 km) : 0.78 m @Nadir
  - Wavefront Error <  $1/20 \lambda$
  - 광학계 Layout 및 성능

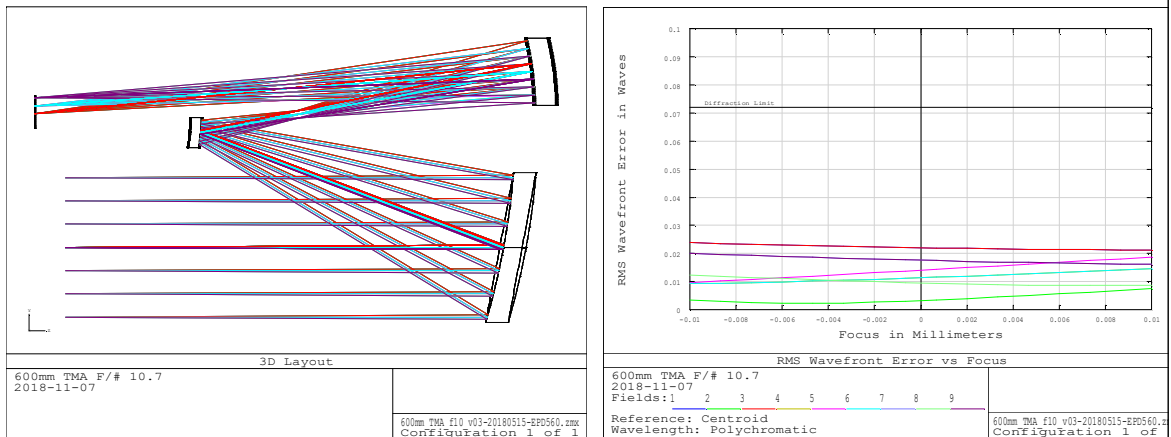


그림 2-7. 구경 600mm TMA 광학계 Layout(좌) 및 RMS Wavefront Error(우)

#### □ 초정밀 광학계 분석 및 광구조물 최적화

- 구경 200mm 비축-비구면 광학계 straylight 분석 및 광구조물 설계 최적화
  - ASAP(Straylight 분석툴) 모델 생성 및 광학 표면 특성 적용
  - Straylight(잡광) 분석 결과

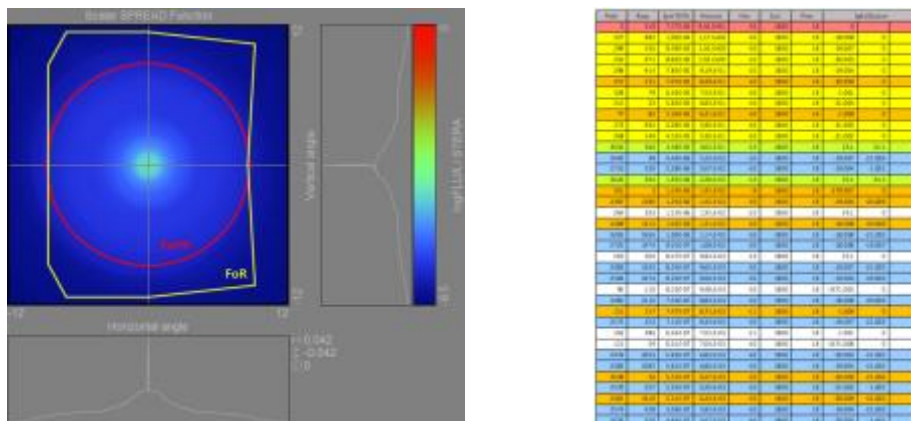


그림 2-8. Straylight(잡광) 분석 결과

- 광학계 straylight 분석에 의한 광구조물 설계 최적화
- Calibration Wheel 하단 베플 추가
- 광학계 외부에서 M1으로 바로 입사하는 잡광 차단

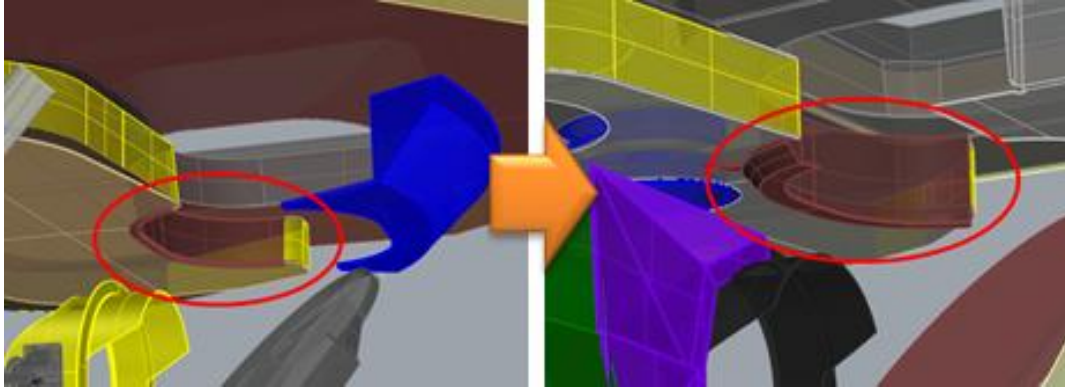


그림 2-9. Calibration Wheel 하단 베플 추가 전(좌)과 추가 후(우) 모습

- 외부와 광학계 공간의 분리를 위한 MLI 설계 추가
- Scan mirror 상단에 반사되어 Pupil과 기존 MLI 사이로 M3에 입사되는 잡광 차단

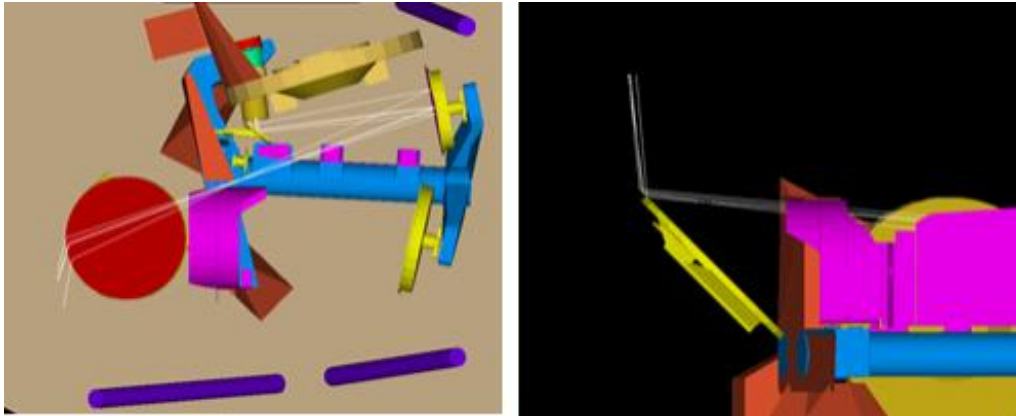


그림 2-10. 잡광분석 결과 Scan mirror 상단에 반사되어 M3으로 입사하는 잡광

- M1-M3 Baffle 설계 최적화
- M2에서 M3로 가는 잡광 차단

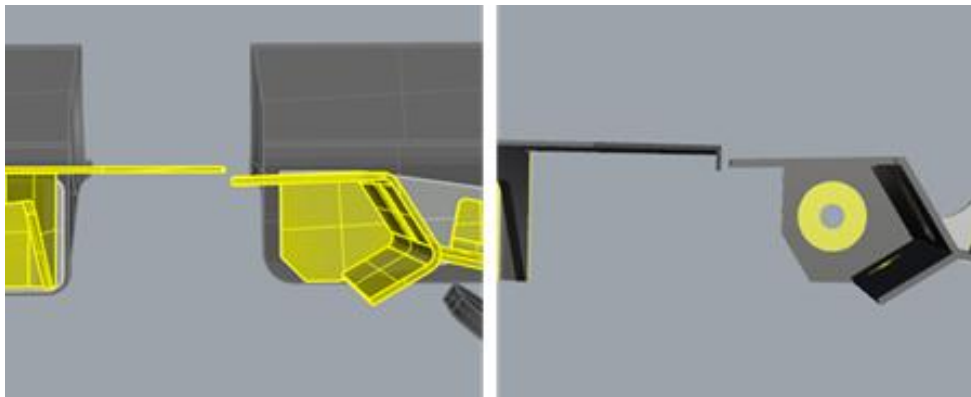


그림 2-11. M1-M3 Baffle 설계 변경 전(좌)과 설계 변경 후(우)

□ 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가를 위한 실험실 구축

• 고성능의 초정밀 광학계 조립/정렬을 위한 간섭계(Interferometer) 구축

- 무진동 간섭계 주요성능

Vibration insensitive dynamic Twyman-Green interferometer

Laser Source : Stabilized HeNe @ 632.8 nm

Pupil Focus Range :  $\pm 12.5$  mm

Pupil Magnification : Fixed, 4X digital zoom

Camera : 1K X 1K pixels, 10-bit standard

Acquisition Rate > 10 frames/sec display; 4 interferograms/frame

> 25 frame/sec max data acquisition with post processing

Minimum Exposure : 30  $\mu$ sec

Sample Reflectivity : 1~100%

RMS Repeatability < 0.001 wave

RMS Precision < 0.002 wave

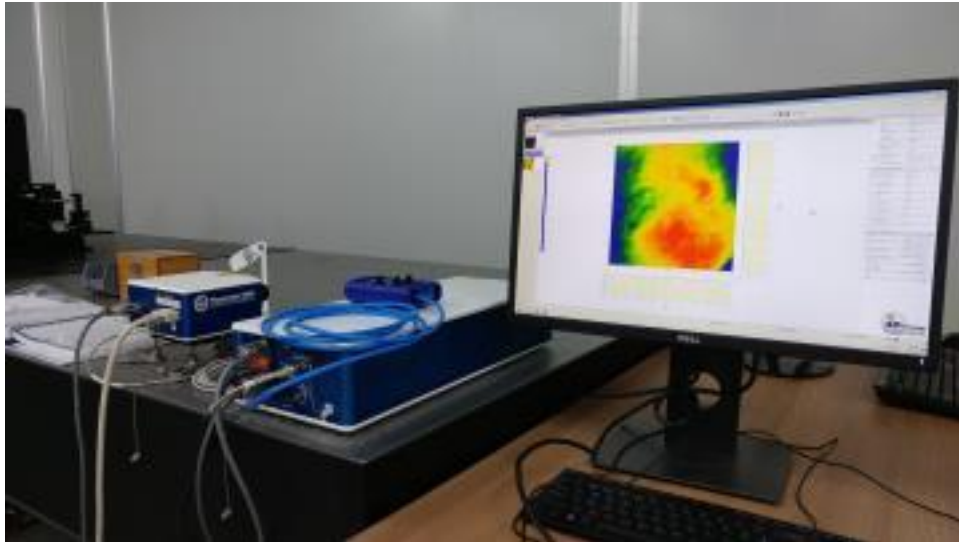


그림 2-12. 한국해양과학기술원 클린룸 내 설치한 무진동 간섭계

④ 4차년도

□ 우주급 초정밀 광학계 최적 설계 및 실제 인공위성 개발기회 확보 성공

- 해양과학기술원은 본 과제의 연구성과가 과제기간 종료 후 사장되는 것이 아닌, 적시에 시장에서 인정받아 기술이전 및 수출실적을 달성할 수 있도록 지원하는 것을 핵심 역할로 하고 있음.

- 4차년도에는 주관기관인 KBSI와 3세부 담당기관인 해양과학기술원이 협력하여, 본 과제에서 보유한 기술로 해양관측위성 개발을 추진하였음.

- 공공수요조사 및 협의 결과, 부산광역시와 해양경찰청에서 본 과제 연구성과를 기반으로 한 해양나노위성 개발에 매우 적극적인 의사를 보였음.

- 부산광역시는 해양나노위성을 市의 새로운 신성장동력으로 선정하여, 3세부기관인 해양과 기원이 제안한 초정밀 해양관측카메라 개발을 핵심으로 하는 **총 사업비 182억원 규모의 해양 나노위성 개발 사업**을 2019년 9월부터 시작함(해당사업기간 2019~2021)
- 부산광역시의 12U급 해양나노위성 개발을 통해, 본 과제에서 개발한 자유형상 광부품 가공/검사기술 개발성과를 실제로 입증할 수 있는 기회를 마련함으로써, 연구성과의 적시 산업화 및 기술이전이 가능하게 되는 기회를 사업 종료 이전에 확보할 수 있게 되었음.
- 해양경찰청의 경우에도, 해양과기원이 제안한 초정밀 해양관측카메라 개발을 정지궤도 통신위성에 이은 해양경찰청의 2단계 위성개발사업으로 선정하여, **21년 착수를 목표로 총 490억원 규모로 20기의 해양관측 초소형위성 개발**을 위한 신규 연구개발사업 적극 추진 중
- 해양과기원은 부산광역시와 해양경찰청 등 급증하는 국내 공공분야 초소형 해양나노위성 수요에 맞춰, 본 과제 연구성과로 개발이 가능한 **직경 170mm급 고해상도 초정밀 해양관측을 위한 인공위성 카메라용 광학계 설계를 완료**하였음

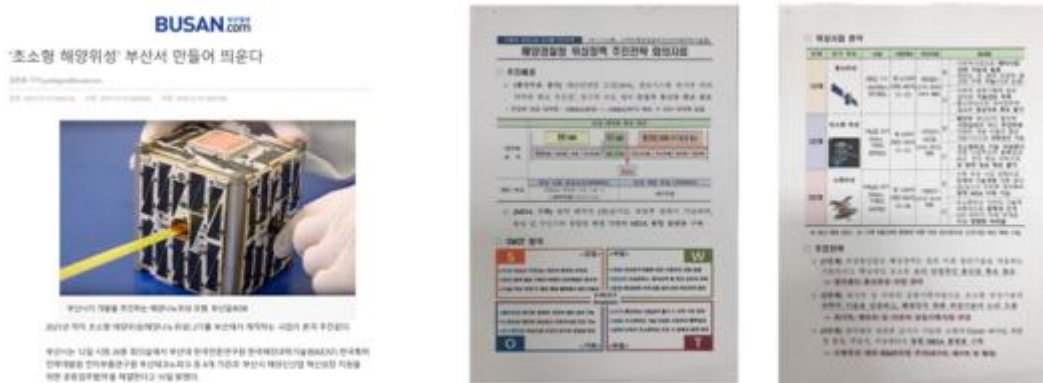


그림 2-13. 부산광역시 해양나노위성 개발 사업 소개 보도(좌) 및 해양경찰청의 위성사업 로드맵(우)

**□ 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가 시험 수행(AI 광학계 기반)**

- 본 과제에서 수행하는 SiC 반사경이 5차년도에 제작되는 즉시, 조립/정렬 및 성능평가가 가능할 수 있도록 관련기술 성숙도 향상 및 최신 CAA(Computer Aided Algorithm) 기반 광학계 정렬 알고리즘 개선을 위해, 알루미늄으로 제작된 광학계를 사용하여 광학계 성능평가 방법 검증 수행.
- 세계 최고 수준의 SiC 기반 자유형상광부품을 실제로 사용한 정지궤도복합위성 2B호 해양탐재체(KIOST-KARI -Airbus 공동개발, KIOST는 Airbus社와 공동으로 SiC 비축비구면광학계 개발)의 성능을 기준으로 목표 설정 (파면오차 성능기준:  $\lambda/10$ )

**• 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 성능평가.**

- Telescope : Linear Astigmatism Free Three Mirror System (LAF-TMS)
- Entrance pupil Diameter : 150 mm
- Effective focal length (EFL) : 500 mm



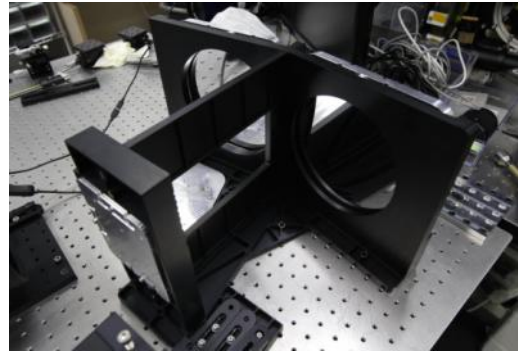
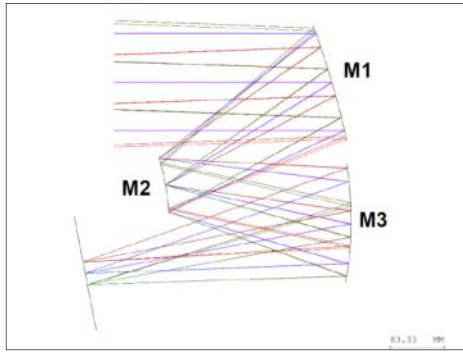


그림 2-14. LAF-TMS 광학계 Layout(좌) 및 LAF-TMS 광학시스템 형상(우)

- 간섭계를 사용한 광학계 성능평가의 신뢰성 확보를 위한 Reference 구조물을 추가 설계 하였으며, 이를 모델링하여 3D 프린터로 제작함.
- 간섭계를 통한 광학시스템 성능평가 수행

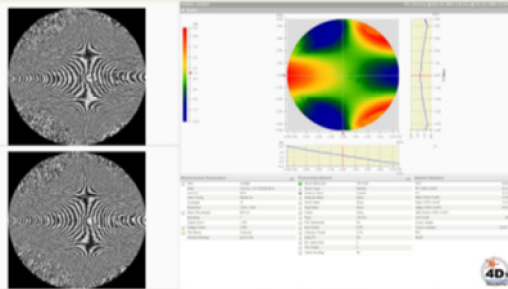
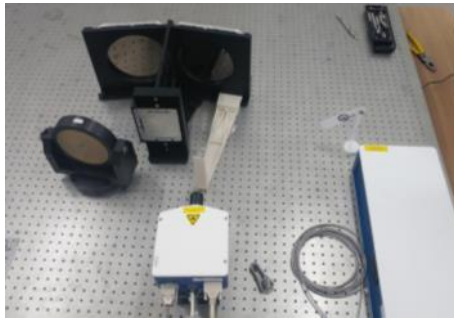


그림 2-15. 간섭계 및 광학 초점면 Reference 구조물을 통한 광학시스템 성능평가 모습(좌) 및 성능평가 결과(우)

- 간섭계를 이용한 광학시스템 성능평가 결과:  
현재 광학시스템은 PV(Peak to Valley) 11.1 waves, RMS 2.38 waves 값을 보임  
위 성능은 간섭계에서 틸트(tilt) 값을 보정해준 후 결과임

### □ 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가

- 본 과제에서 수행하는 SiC 반사경 제작 지연으로 알루미늄으로 제작된 광학계를 사용하여 우주환경시험 기반 신뢰성 평가 방법 검증 수행
- 우주환경시험 대상 광학시스템 정보

재질 : 알루미늄

사이즈 : 351 (L) X 502 (W) X 266 (H) mm

무게 : ~ 9.5 kg

- 열주기시험
- 열충격/온도급변 시험 수행
- 열주기 시험 성적서

- 열주기 시험을 성공적으로 수행함
- 열주기 시험 전후 광학계의 변화형상 없음을 확인함으로써 우주환경에서의 신뢰성을 확보함



그림 2-16. 열주기 시험 성적서

## 제4장 연구개발목표 달성도

### 제1절 연차별 목표 대비 달성도

#### 1. 연차별 목표 대비 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
5년차 (2020)	초정밀 광학계 조립/정렬/성능평가 및 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가	○ 초정밀 광학계 조립/정렬 및 성능평가 (100% 진행) - 본 과제 주관(KBSI) 및 참여기관(핵융합연, 서울대 등)에서 개발한 가공장비로 제작된 광학계의 조립/정렬 및 성능평가 수행	0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>4차년도에 수행한 성능평가 결과를 바탕으로, 본 과제 주관기관에서 재가공 및 성능개선을 수행한 LAF-TMS 기반의 우주급 해양관측시스템 조립/정렬 및 성능평가 수행중</li> </ul>	(100)
		○ 자유형상 광부품의 우주환경시험 기반 신뢰성 평가 (100% 진행) - 본 과제 주관(KBSI) 및 참여기관(핵융합연, 서울대 등)에서 개발한 가공장비로 제작된 광학계(우주급 해양관측시스템용)의 우주환경시험 수행	0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차 우주환경시험 분석결과를 바탕으로, 우주급 해양관측시스템 2차 가공 후 재조립한 시스템에 대한 우주환경시험 준비 중</li> <li>2차 우주환경시험을 위한 광학계 핵심부품 2차 가공(주관기관인 KBSI 수행) 및 납품이 지연(11/9) 되었으나, 과제기간 내 2차 우주환경시험 수행 완료 예정</li> </ul>	(100)
	계		1.0		100

표 4-1-1. 연차별 목표 대비 달성도

## 제2절 정량적 목표달성도

### 1. 정량적 목표 달성도

구분	논문				저서					
	SCI(E)	SCOPUS	연구재단 등재	연구재단 등재후보	국제			국내		
					저서	편저	Chapter	저서	편저	Chapter
달성목표	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
성과	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
달성율(%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

구분	연구노트		
	연구노트수(A) (서면노트는 1권(20P)/ 전산노트는 20건을 1권으로 인정)	참여연구원수(B) (참여율 10%이상의 내부참여연구원)	달성율 (A/B) * 0.7 이상이면 PASS
성과	-	-	-

구분	특허					실용신안		디자인	S/W	신기술 등록
	국제			국내		등록	기술평가 확정등록			
	출원	등록	추가등록	출원	등록					
달성목표	-	-	-	1	(1)	-	-	-	-	-
성과	-	-	-	2*	0	-	-	-	-	-
달성율(%)	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-

구분	기술료				
	기술실시 계약명	계약체결일	기술실시 대상기관명	기술실시 내용	당해연도 기술료
성과	-	-	-	-	-
달성율(%)	-	-	-	-	-

구분	대외활동		홍보활동	
	대외활동 내용	기간 (6개월 이상만 인정)	홍보활동 내용	횟수
성과	KISTEP 자문위원 (달탐사업 적정성 평가, 우주분야 R&D 장기투자방안)	6개월	오션테크 코리아 2020 발표 예정(11/26)	1
	해양경찰청 해경위성개발 기획연구 자문위원	7개월	오션테크 코리아 2020 단행본 원고 게재	1
합계	-	-	-	-

표 4-2-1. 정량적 목표달성도

## 제5장 연구개발결과의 활용계획

### 제1절. 연구개발결과의 활용방안

#### (1) 한계돌파형 新연구장비개발사업 추진

- 과기정통부 “한국주도형 선도 연구장비기술개발사업” 예타 기획 참여 타진 중  
〈 연구장비산업 혁신성장을 위한 R&D 중장기추진계획 수립(2020.8.20.) 〉
- 자유형상 가공공정 및 검사장비 개발 원천기술을 활용한 한계돌파형 新연구장비개발사업으로 “이온/전자빔 기반 3차원 초정밀 가공연구장비”, “광 기반 대영역 3차원 위치/형상 고정밀 측정 연구장비” 개발사업 기획

#### (2) “2019년 지역발전투자협약 시범사업” 으로 초소형 해양위성 기반 지역 재난재해 대응 및 산업 육성을 위한 부산광역시 지자체 최초 초소형위성 개발 진행 중

- 부산 및 동남권 지역특화 해양관측 초소형위성 개발
- 사업기간/사업비 : 2019. ~ 2021.(3년) / 182억원

#### (3) 조각거울 망원경 광학계 개발 사업 기획 추진

##### □ 한국형 대형우주망원경 및 대형 지상 망원경 개발사업 기획 추진

- 본 과제에서 확보된 자유형상 반사경의 초정밀가공 공정과 대면적 검사장비 원천기술 적용
- 조각 거울형 망원경 광학계의 주반사경은 1m급의 조각거울로 자유형상의 면으로 광학설계가 이루어지며, 본과제에서 확보된 자유형상 반사경의 초정밀가공 공정기술과 대면적 검사장비 원천기술을 적용하여 한국형 대형우주망원경 사업에 참여 기획 진행 중

#### (4) NASA 핵심우주기술 개발 국제공동연구 사업 참여(아리조나대학)

##### □ 50m급 초대형 우주망원경 개발사업의 원천기술 개발사업 참여

- 본 초대형 우주망원경 개발: 조각 렌즈 조합을 통한 8.5m 대형 우주망원경 및 50m급 Array 위성군 개발을 목표로 하고 있음.

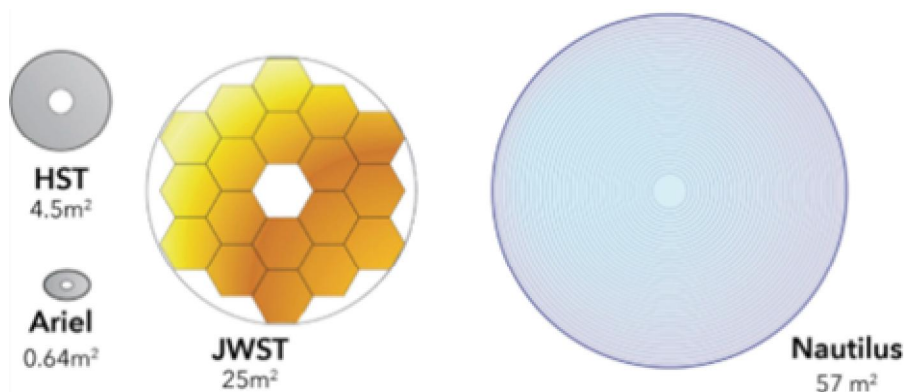


그림 5-1-1. 세계 각국의 초대형 우주망원경 개발 현황(주경 비교)

※ 출처: <http://nautilus-array.space/>, The Astronomical Journal, 158:83 (21pp), 2019 August)

- 인류가 생존 할 수 있는 우주행성을 찾기 위하여 기존 Hubble, JWST 등의 대형 우주망원경은 제작기간과 예산이 천문학적으로 요구됨.\*2

\*2 HST: '74-' 90년(16년), US\$4.7 billion, JWST: '97-' 20(23년), US\$10 billion

- 렌즈의 사이즈가 커짐에 따라 우주망원경의 무게가 상승하여 발사 비용의 증가를 초래하기 때문에 렌즈 무게를 줄일 새로운 디자인이 필요함.

발사체 크기의 한계에 의해 렌즈 대형화의 제한\*3이 발생함.

\*3 NASA 차세대 발사체 (SpaceX/BFR, NASA SLS B2) 내부지름 8.9m임.

- 광학계 무게 감소\*4 및 광학계 성능 향상을 위하여 MODE Lens (Multi-Order Diffraction Engineered Lens) 디자인 채용계획.

\*4 MODE렌즈는 동일성능을 갖는 굴절렌즈에 비해 10~15배 정도 무게가 감소됨.

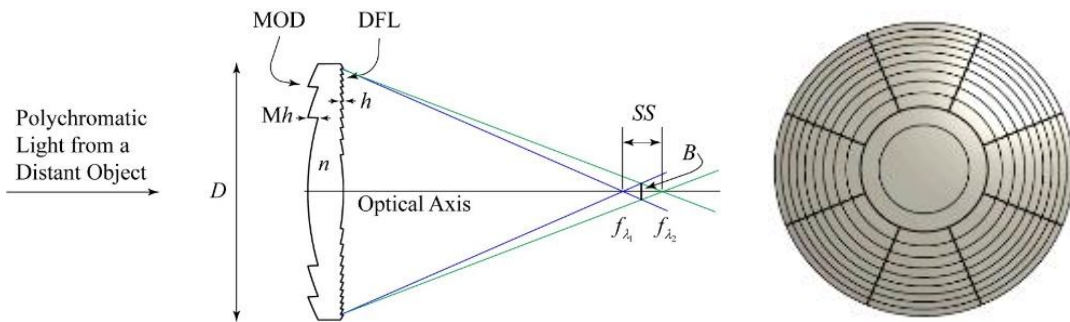


그림 5-1-2. MODE렌즈 원리 및 설계 예

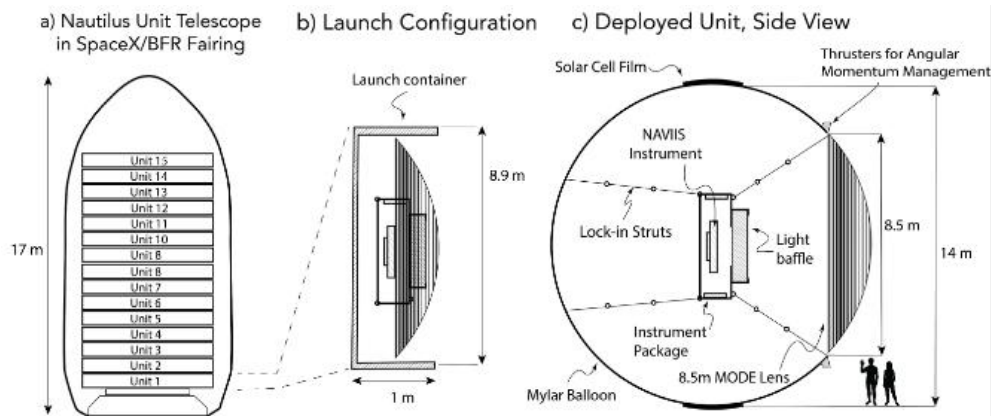


그림 5-1-3. 초대형 우주망원경 Nautilus 개발 개념도

### □ MODE 렌즈를 적용한 시제품 개발 공동 참여

- 조각 렌즈 조합을 통한 8.5m 대형 우주망원경 및 50m 급 Array 위성군(8.5m 35개 조합) 개발 사업을 추진 예정임.

- 현재 아리조나대학에서 광학계 설계 후 MODE렌즈 개발을 위한 조각렌즈용 금형코어에 대하여 KBSI에서 초정밀가공 기술을 적용하여 공동 개발 진행 중.

- NASA의 우주핵심기술 개발사업 추진을 위한 연구계획서 작성 중.

## 주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

자유형상 광부품  
기반 우주급 초정  
밀 광학계 개발

Development of ultra precision optical system  
based on the freeform optical devices and modules

**KIOST**  한국해양과학기술원