

자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개발

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

2016. 12.

한 국 해 양 과 학 기 술 원

## 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

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

2016. 12.

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원

총괄연구책임자 : 조성익

참여연구원 : 박영제

“ : 안기범

“ : 오은송

## 보고서 초록

과제고유 번호	PE99445	해당단계 연구기간	2016.01.01. ~ 2016.12.31.	단계 구분	1차년도
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 : 4 명 내부: 4 명 외부:    명	해당단계 연구비	정부:    천원 기업:    천원 계 :    천원
		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 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 장비를 상용화함.

### 2. 연구개발의 필요성

SiC 기반 초정밀 자유형상 광학계는 현재 해양수산부의 예산지원으로 해양과기원이 운영/개발하고 있는 천리안 해양관측위성 및 '19년 발사 목표로 개발 중인 천리안 2호 해양위성의 해양관측 탑재체 개발에 적용된 핵심 우주기술임. 현재까지 국내 기술자립화가 달성되지 못하여, 국내주도개발이 예정된 천리안 3호 해양위성 개발과 연계한 국내기술 확보 시급하고, 특히, 천리안 해양위성의 성공에 고무된 중국/일본 등 우주개발선진국들이 50m급 고해상도 지구관측위성 (천리안 해양위성은 500m급) 발사 성공(Gaofen-4, 중국 2015) 및 개발 진행(GISAT, 인도 2017) 상황을 고려할 때, 2020년대 중반 발사 예정인 천리안 3호 위성 고성능 해양탑재체 국내주도개발을 위한 첨단광학시스템 관련 핵심기술 개발이 시급함.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

### 1. 연구기간

2016년 1월 1일 ~ 2016년 12월 31일

### 2. 연구개발의 내용 및 범위

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2016년	자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 개념설계	○ 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 개념설계 - 사용자 요구사항 도출 - 우주급 초정밀 광학계 개념설계 수행
			○ SiC 미러 구조 개념설계 - 우주광학계로서 경량화 설계 수행 - 광부품 고정을 위한 광기계부 설계 수행

## IV. 연구개발결과

### 1. 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계

#### 가. 구경 200mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계

(1) Telescope type : Three Mirror Anastigmat (TMA)

(2) Pupil size : 200 mm

(3) Effective focal length (EFL) : 1200 mm

(5) 광학계 성능 - MTF (Modulation Transfer Function, 변조 전달함수)

(가) 물리적 한계인 회절한계(Diffraction limit) 값에 근접한 설계값을 보임

(나) 천리안 해양위성2호 광검출기 기준 (픽셀사이즈(pixel size) 6.8  $\mu\text{m}$ )으로 나이퀴스트 주파수 (Nyquist frequency) 73.53 lp/mm 에서 회절한계는 0.784, 설계값은 광축에서 0.782의 우수한 성능을 보임

(6) 광학계 성능 - 스팟 다이어그램 (Spot diagram)

(가) 설계된 광학계의 스팟(spot) 분포가 물리적 한계를 나타내는 에어리 원반(airy disk) 내에 위치함을 확인함

(나) 에어리 원반(airy disk) 사이즈는 2.768  $\mu\text{m}$ 로써, 설계된 광학계는 모든 시야각에서 스팟분포의 RMS 반경값이 1  $\mu\text{m}$ 이내 우수한 성능을 가짐

(7) 광학계 성능 - RMS Wavefront Error vs Focus

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

(8) 민감도 분석 (M2)

(가) M2의 움직임에 의해서 Astigmatism 수차 변화가 큼

(나) M3에 비하여 큰 민감도를 가지고 있음 (선형적인 변화를 보임)

(다) 비축(Off-axis) TMA형태이기 때문에 원점(0,0)지점에서 최적의 성능을 보이지 않음

(라) 외곽 필드와의 밸런싱을 고려하여 추가적인 최적화가 필요함

(9) 민감도 분석 (M3)

(가) M2에 비해서 둔감함

(나) TX, TY를 중점적으로 고려하여 추후 공차 할당이 필요함

## 2. 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 개발

### 가. 초정밀 광학계 잡광 분석을 위한 3D 모델링 기반 광선추적 분석코드 개발 수행

- (1) 기존 광학계의 잡광 분석 방법에는 임계 물체(critical object) 조사를 위한 역방향 광추적과 조사 물체(illuminated object) 획득을 위한 정방향 광추적이 있음
- (2) 하지만 기존 방식은 정확한 결과 도출을 위해서는 입사각도를 최대한 많이 설정하여 분석을 수행하여야 되므로, 많은 시간과 인력이 소요됨
- (3) 이에 대하여 1회 분석으로 검출기 1픽셀에 도달하는 잡광을 분석하는 시스템을 개발함
- (4) 국내 특허 출원 (출원번호 : 10-2016-0148093, 광학계의 잡광 분석 방법 및 이를 수행하는 광학계의 잡광 분석 장치)

## 3. SiC 미러 구조 설계

### 가. 광학계 3D modeling 수행

#### 나. 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D modeling 수행

- (1) 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
- (2) 지지구조 또한 천리안 해양관측위성 주반사경(M1)과 동일하게 거울 중심부에 설계함
- (3) 비교 분석을 위한 다소 복잡한 패턴의 경량화 설계를 수행함
- (4) 해양관측위성 주반사경(M1) 경량화 패턴과 장단점 비교분석 수행함

#### 다. SiC 미러 유한요소모델(FEM, Finite Element Model) 생성

- (1) 유한 요소 모델은 Solidworks 2016 SP5를 이용하여 구성함

#### 라. 중력(하중) 영향에 의한 성능 분석

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

#### 마. 고유진동수 모드 분석

- (1) SiC 반사경 설계에 따른 고유진동수 모드를 분석함
- (2) Free-Free 모드 및 중앙 지지부 고정시 모드 분석을 수행함

#### 4. 초정밀 광학계 평가 시스템 구축을 위한 기본설계

국제수준 신뢰성 평가(환경시험) 요구사항 도출

가. 습도 시험 요구사항 (from MIL-C-48497A)

- (1) 습도 조건 : 90% ~ 95%
- (2) 온도 조건 :  $45^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$
- (3) 시간 조건 : 24시간

나. 온도 시험 요구사항

- (1) 온도 범위 :  $-30^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$
- (2) 습도 조건 : 응결을 방지할 정도로 충분히 건조해야함
- (3) 최고 온도( $60^{\circ}\text{C}$ )와 최저 온도( $-30^{\circ}\text{C}$ )에서 각각 2시간의 안정화 시간을 갖고 20회의 주기시험 수행함
- (4) 온도 변화 조건 :  $>1^{\circ}\text{C}/\text{minute}$

다. 열진공 시험 요구사항

- (1) 진공 조건 : 10-5 mbar
- (2) 온도 범위 :  $-30^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$
- (3) 최고 온도( $60^{\circ}\text{C}$ )와 최저 온도( $-30^{\circ}\text{C}$ )에서 각각 2시간의 안정화 시간을 갖고 6회의 주기시험 수행함
- (4) 온도 변화 조건 :  $> 1^{\circ}\text{C}/\text{minute}$

라. 신뢰성 평가 시험 계획 및 시험 인프라 구축 방안 수립(1)

- (1) 주요 환경시험 요구사항을 만족하는 국내 시험 인프라 환경 조사함
- (2) 신뢰성 평가를 위한 해양위성센터 내 현장관측기기 검보정 실험실 개선 방안 수립함
- (3) 항우연, 천문연, 썬트렉아이 등 우주급 광학계 환경시험 시설을 보유한 국내 주요 기관과의 연구협력방안 검토함
- (4) 세계 최고 수준의 우주급 광학계 환경시험 시설을 보유한 미국 NASA 현장방문조사
- (5) 천리안 해양관측위성 중심으로 진행 중인 KIOST-NASA 간 국제공동연구 확대 방안 협의 (위성 광학계 신뢰성평가 기술 공동연구 등)

## V. 연구개발 활용계획

1. 초정밀 양산 시스템에 대한 활용 및 신뢰성 평가기술도 동시에 개발하여 시장요구 수준에 맞는 상용화 솔루션을 공급함. 본 과제를 통해 20편의 SCI급 논문과 28건의 국내/국외 특허를 출원할 계획이며, 개발된 공정 기술 및 장비는 중소기업 기술이전을 추진할 계획임
2. 본 사업을 통해 표면 가공 공정기술 및 측정 장비를 개발하고, 자유곡면 초정밀 광학계 가공/측정 기술에 대한 원천기술을 확보할 수 있어 정밀 광학 및 나노/반도체/디스플레이 등의 다양한 전략산업 및 태양광/메디컬/바이오 등의 첨단 산업에 기술적 파급효과가 클 것으로 기대됨
3. 자유곡면 광학계 및 나노스케일 광측정 기술은 산업적인 요구가 매우 높은 기술일 뿐만 아니라 국방/보안, 자동차 산업 및 반도체, 디스플레이등 사회 전반에 활용 가능성이 커, 기반 산업을 부흥시키고, 관련 제품에 대한 가격을 낮추어, 국민의 안전하고, 편안한 삶에 기여할 수 있음
4. 현재의 초정밀 광학계 및 측정/검사 장비는 대부분 미국, 일본, 유럽 등의 선진업체에 의존하였으나 본 과제를 통해 신개념의 측정 및 검사 장비가 개발된다면, 이에 따른 수입대체 및 국내 장비 시장의 질적 향상을 꾀할 수 있음. 특히 정밀 가공장비는 꾸준한 관리 및 업그레이드 작업이 중요하며, 이러한 점에서 국내 업체는 본 연구 결과물의 기술이전을 통해 경쟁력을 보유할 수 있음
5. 국방 및 산업계 전반의 파급효과가 큰 SiC 기반 초정밀 광학계 설계/시험기술 국산화에 따른 국내 산업체 기술이전 및 해당분야 창조경제 생태계 형성 기여할 것으로 기대됨
6. 천리안 2호 후속위성 및 차세대중형위성용 고정밀 광학탑재체 개발 기여함
7. 해수부 주관 국가해양영토 광역감시망 구축의 핵심 시스템 가운데 하나인 무인항공기 해양관측망의 주요 탑재체인 고정밀 광학센서 국산화 기여함
8. 수입에 의존하는 해양분야 광학관측기기 국산화 선도를 위한 핵심기술 개발함

# 목 차

<b>제 1 장 서론</b> .....	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
<b>제 2 장 국내외 기술개발 현황</b> .....	15
제1절 국내동향 .....	15
1. 대면적 자유형상 측정기술 .....	15
2. 하이브리드연삭/연마기 .....	16
3. 초정밀 이온빔 연마기술개발 .....	17
4. 대기압 플라즈마 SiC연마기술 .....	17
5. 집속 이온빔 .....	17
6. 초정밀 광학계(렌즈)가공기 .....	17
제2절 국외동향 .....	18
1. 주요국의 정밀광기술 경쟁 패러다임 변화 .....	18
2. 대면적 자유형상 측정기 .....	18
3. 3차원 측정기 및 레이저 간섭계 .....	20
4. 나노미터급 미세표면 및 형상 측정/검사기 .....	20
5. 하이브리드 연삭/연마기 .....	21
6. 초정밀 이온빔 연마 기술 개발 .....	21
7. 대기압 플라즈마 SiC연마 기술 선진국 연구 동향 .....	21
8. 집속이온빔 기술 .....	21
<b>제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과</b> .....	22
제1절 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계 .....	22
1. 구경 200mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계 .....	22
제2절 초정밀 광학계 잠광 분석 시스템 개발 .....	27
제3절 SiC미러 구조 설계 .....	29
1. 광학계 3D modeling수행 .....	29
2. 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D modeling 수행 .....	29
3. SiC 미러 유한요소모델(FEM, Finite Element Model) 생성 .....	30
4. 중력(하중) 영향에 의한 성능 분석 .....	31
5. 고유진동수 모드 분석 .....	32
제4절 초정밀 광학계 평가 시스템 구축을 위한 기본설계 .....	35

1.국제수준 신뢰성 평가(환경시험) 요구사항 도출 .....	35
2.신뢰성 평가 시험 계획 및 시험 인프라 구축 방안 수립(1) .....	36
<b>제 4 장 연구개발목표 달성도 .....</b>	<b>37</b>
제1절 연차별 목표 대비 달성도 .....	37
제2절 정량적 목표달성도 .....	38
1.정량적 목표 달성도 .....	38
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....</b>	<b>39</b>
제1절 연구개발결과의 활용방안 .....	39

## 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 .....	16
그림2-2-1. 국가별 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화 .....	18
그림2-2-2. Zygo의 형상측정기 제품 .....	19
그림2-2-3. Akrometrix의 형상측정기 제품 .....	19
그림2-2-4. Dkantec Dynamics의 형상측정기 제품(Q-400, DIC) .....	20
그림2-2-5. Dantec Dynamis의 형상측정기 제품(Q-300, ESPI) .....	20
그림2-2-6. Orbotech의 형상측정기 제품(Ultra Discovery VAOI) .....	20
그림3-1-1. 광학계 설계값 .....	22
그림3-1-2. 광학계 설계 layout .....	22
그림3-1-3. 광학계 성능-MTF .....	23
그림3-1-4. 광학계 성능-스팟 다이어그램 .....	24
그림3-1-5. 광학계 성능-RMS Wavefront Error vs Focus .....	25
그림3-1-6. 민감도 분석-M2 .....	26
그림3-1-7. 민감도 분석-M3 .....	26
그림3-2-1. 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 흐름도 .....	27
그림3-2-2. 초정밀 광학계 잡광 분석 결과 .....	28
그림3-3-1. SiC 미러 구조 설계 .....	29
그림3-3-2. 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D 모델링 .....	29
그림3-3-3. 해양관측위성 주반사경(M1) 경량화 패턴과 장단점 비교분석 수행 .....	30
그림3-3-4. SiC 미러 유한요소모델(FEM, Finite Element Model) .....	30
그림3-3-5. 유한요소모델(FEM)에 적용된 물성치 .....	31
그림3-3-6. Piston, tip-tilt 형상 제거 후 변형량 .....	31
그림3-3-7. Piston, tip-tilt, power 형상 제거 후 변형량 .....	32
그림3-3-8. Piston, tip-tilt 형상 제거 후 변형량 .....	32
그림3-3-9. Astigmatic modes : 7번째 모드 - 2890 Hz .....	33
그림3-3-10. Astigmatic modes : 8번째 모드 - 2927 Hz .....	33
그림3-3-11. Radial bending mode : 9번째 모드 - 4006 Hz .....	33
그림3-3-12. Tip-tilt modes(왼쪽)1번째 - 834 Hz,(오른쪽)2번째 - 841 Hz .....	33
그림3-3-13. Rotational mode about Z-axis : 3번째 모드 - 852 Hz .....	33
그림3-3-14. Radial bending mode : 4번째 모드 - 2248 .....	33
그림3-3-15. Astigmatic bending mode .....	34
그림3-4-1. 열진공 시험 온도 설정 조건 .....	35
그림3-4-2. 해양위성센터 내 현장관측기기 검보정 실험실 .....	36
그림3-4-3. 미국 NASA 우주환경시험 시설 .....	36

## 표 차례

표4-1-1. 연차별 목표 대비 달성도 .....	37
표4-2-1. 정량적 목표달성도 .....	38

# 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 장비를 상용화한다.

### 2. 당해연도 주요연구내용

가. 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 상세 설계

나. 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 상세 설계

- (1) 초정밀광학계 설계단계에서는 광학부품 가공률의 조건에 맞추어 설계가 이뤄져야 한다.
- (2) 본 과제에서는 광학부품의 가공률 즉, 상압플라즈마 가공 기술을 개발하는 단계로, 개발현황에 따라 상압플라즈마 가공 기술의 조건에 맞는 초정밀 광학계의 최적화 작업이 이뤄져야 한다.

다. SiC 미러 구조 상세설계 수행

라. 유한요소모델(FEM) 해석 수행

- (1) SiC 미러를 우주광학계나 유/무인항공기 등 현업에서 활용하기 위해서는 제작전에 구조물의 강성이나 내구성에 대한 유한요소모델 (Finite-Element Model, FEM) 해석이 수행되어야 한다.

## 제2장 국내외 기술개발 현황

### 제1절 국내 동향

#### 1. 대면적 자유형상 측정기술

- 가. 국내에서 표면형상측정기는 고영(주), SNU프리시전(주), 인텍플러스(주) 등 중소기업이 반도체 제조기술과 관련해서 기술개발을 주도하고 있음.
- 나. 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.

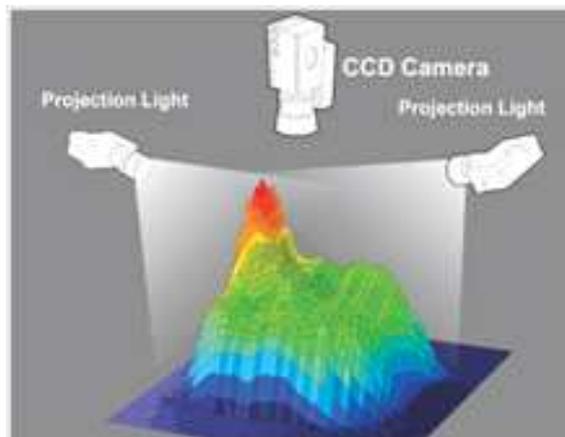


그림 2-1-1. 고영(주)이 Dual Protection 특허기술

- 다. SNUPrecision은 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.



그림 2-1-2. SNU프리시전(주)의 PSIS

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

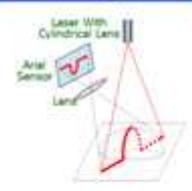
Laser Triangulation	Stereo Vision	Moire
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very Intuitive Principle</li> <li>• Simple Optics</li> <li>• Real 3D inspection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple Optics (2 Camera)</li> <li>• Fast Inspection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: 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>

그림2-1-3. 인텍플러스(주)의 Dual Projection 특허기술

마. 기술별로 개발현황을 보면, 95년 이후 국내등록 특허 기준으로 보았을 때 백색광 주사간섭계(14개), 그림자무아레법(13개), 광삼각법(11개), 위상이동간섭계(11개) 기술의 발전이 주도적이며, 특히 최근('05년 이후)의 경향으로 보면 백색광 주사 간섭계와 그림자무아레법에 대한 기술개발이 많이 이루어지고 있음을 알 수 있음.

## 2. 하이브리드 연삭/연마기

- 가. 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.
- 나. 현재, 전 세계 하이브리드 제조 기술 분야는 성장 단계에 있으며, 가공 하이브리드 기술은 특허출원 건수가 많고, 적층 하이브리드기술의 질적 수준과 시장 확보력이 상대적으로 매우 높다. 하이브리드 제조분야에 많은 R&D를 통해 우수 기술을 발굴한다면, 시장확보력을 높일 수 있으리라 판단됨.
- 다. 특히, 전통적인 가공(Bulk 또는 형상) 보다는 감성/기능성을 중시한 표면처리 기술에 대한 연구에 비중을 높인다면 선진국과의 기술경쟁에서 앞서나갈 수 있을 것으로 예상됨.
- 라. 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.
- 마. 내 모바일 기기의 경우 높은 강도, 내구성을 위하여 기존 성형 기술에 부식 방지 코팅, 정밀 가공을 추가하여 여러 공정을 이용해 제작하는 예가 많으며 하이브리드 공정을 개발하여 적용하는 예가 증가하고 있음.
- 바. 그러나 단편적인 개발에 관심은 있으나 하이브리드 가공 공정의 기초 연구와 공통되는 기술을 다양한 산업에 적용하는 시도는 아직 국내에서 시도되지 않고 있음.

### 3. 초정밀 이온빔 연마 기술 개발

- 가. 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>)
- 나. 상기 기술의 경우 대상의 표면 거칠기 측정을 통해 국부적으로 연마하는 기술이 아닌, 전체적으로 빔을 조사하는 방식임.
- 다. 2005년 이후로는 이온빔을 이용한 초정밀 연마 기술 개발 연구가 진행되지 않고 있음.

### 4. 대기압 플라즈마 SiC 연마 기술

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

### 5. 집속 이온빔

- 가. 2013년 재료연구소에서는 강판이나 폴리머 등 유연소재 표면의 불순물을 제거하는 고속형 선형 이온빔 소스를 개발하였음.
- 나. 개발된 선형 이온빔 소스는 초당 2m 이상의 광폭 이온빔을 쏘아 강판 등의 울퉁불퉁한 표면을 매끄럽고 고르게 처리할 수 있으며, 기존 기술에 비해 속도가 1.5배 이상 빠르고 대면적 기관처리를 위한 균일도의 오차범위도 4%이하로 매우 우수하다고 나타남.
- 다. 선형 이온빔 발생기의 설계 및 제작 기술과 선형 이온빔을 적용하는 표면의 에칭, 표면 개질 및 증착 플라즈마 공정 기술 등 설계-공정-양산-응용개발 등의 전주기 기술을 확보하는데 성공함.
- 라. 향후 식품용 포장재의 광학필름, IT기기, 강판 등 다양한 유연소재의 기능성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상되며, 플렉시블 디스플레이 보호막 소재 증착과 OLED용 미세 패턴 마스크 유기물세정 공정, 자동차용 내연기관 코팅 등에 널리 응용될 것으로 기대됨.

### 6. 초정밀 광학계(렌즈) 가공기

- 가. 국내는 초정밀 가공시스템 장비의 핵심부품들을 전량 수입에 의존하고 있는 실정으로 국내기술보다는 해외의존도가 높아, 기술적 난이도가 높아지는 각 단계마다 제품 공정기술의 확보가 선진국에 비해 늦어지는 현상이 발생하고 있음.
- 나. 국내에서는 그린광학이라는 업체의 입지 및 인지도가 독보적이며, 그린광학에서는 공군 조종사용 헤드업 디스플레이(HUD) 개발을 진행하고 있음.

## 제2절 국외 동향

### 1. 주요국의 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화

- 가. 유럽은 60년대까지 기술적 우위를 바탕으로 광학 카메라 세계 시장을 주도하였으나, 90년대 들어서면서 미국/일본 등의 경쟁에서 밀리면서 가격 경쟁력 및 기술 경쟁력을 상실함.
- 나. 미국의 경우, 70년대 비구면 광학소자를 개발하는 등, 세계 최고 수준의 기술력을 과시하였으나, 가격 경쟁력 약화로 시장 점유율은 낮은 상태였음. 현재는 군사용, 천문용 대형 정밀 광학계개발을 국가 주도로 실행되고 있음.
- 다. 일본의 경우, 80년대 유럽/미국과 기술 경쟁을 통해, 세계 수준의 기술력을 확보한다. 특히, 90년대 디지털화, 소형화 등을 통해 현재도 미국과 더불어, 최고 수준의 기술 경쟁력을 확보하고 있음.
- 라. 중국의 경우, 90년대에는 대량생산을 통한 저가격화로 저가 광학계 시장을 주도하였으나, 2010년 이후 품질 고급화를 통해, 기술력도 미국/일본의 턱 밑 수준까지 쫓아옴.
- 마. 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 상황이다. 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

그림2-2-1. 국가별 정밀 광기술 경쟁 패러다임 변화

### 2. 대면적 자유형상 측정기

- 가. 국외에서의 주요 기업으로는 미국의 Zygo, Akrometrix, 덴마크의 Dantec Dynamics, 이스라엘의 Orbotech 등이 있음.
- 나. Zygo는 계측사업부에서 3차원 형상측정장비를 위상이동간섭계 및 백색광 주사 간섭계 방법을 사용하여 연구개발함. 매우 높은 분해능을 갖지만은 기술의 특성상 대면적에는 적용하지 못해, 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 Stage:	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.

그림2-2-2. Zygo의 형상측정기 제품

다. Akrometrix는 미국 Georgia Tech.에서 스핀오프 된 회사로 그림자모아레에 기초한 형상 측정장비를 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.



그림2-2-3. Akrometrix의 형상측정기 제품

라. 덴마크의 Dantec Dynamics는 DIC와 ESPI 기술을 이용한 형상 및 변형을 측정기 개발 회사임. 적용분야는 반도체뿐만 아니라 항공, 자동차, 바이오, 전기, 유압 등 다양함.



그림2-2-4. Dantec Dynamics의  
형상측정기 제품(Q-400, DIC)



그림2-2-5. Dantec Dynamics의  
형상측정기 제품(Q-300, ESPI)

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



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

### 3. 3차원 측정기 및 레이저 간섭계

- 가. 비구면과 광학자유곡면 최종 테스트 과정의 중요성이 점차 높아지면서, 정확성에 대한 요구 또한 증가하고 있음.
- 나. 미국과 일본 등에서는 자유곡면을 나노미터 수준으로 정밀하게 측정하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 후발국인 중국도 자유곡면에 대한 연구에 많은 투자를 하고 있음.

### 4. 나노미터급 미세표면 및 형상 측정/검사기

- 가. 미세 표면 형상을 제조하는 반도체, MEMS, LCD, Build-up PCB 등의 산업 분야에서 저비용, 고품질, 고속 가공이 가능한 새로운 개념의 측정 기술을 요구하고 있음.
- 나. 나노스케일에서의 소자, 소재 등 물질의 역학적 특성을 측정하기 위한 기술인 복합나노 측정기술, 나노측정 모델링 기술의 고속 자동화 시스템 개발이 추진되고 있음.

## 5. 하이브리드 연삭/연마기

- 가. 국내외 산업체에서 높은 기능성, 모양, 질감을 가진 제품을 제작하기 위해 단일 공정이나 여러공정을 이용하는 것에서 더 나아가 하이브리드 공정을 이용하는 경우가 증가.
- 나. 국외에서는 이러한 흐름이 비교적 빨리 진행되었으며 Hybrid Manufacturing Technologies, DMG Mori, Siemens 등을 중심으로 디자인 자유도를 높이고 가공성을 증대시키기 위해서 주로 적층 공정을 CNC 머시닝과 결합하여 3차원 프린팅 개념의 하이브리드 공정이나 레이저를 보조 공정으로 이용한 하이브리드 공정이 널리 연구되고 있음.

## 6. 초정밀 이온빔 연마 기술 개발

- 가. 일본의 경우 5축 IBF(Ion Beam Figuring) 설비를 2006년에 개발 하였으며, FWHM 4mm, 1mm 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.
- 나. 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 있다. (100 mA, 2 kV 이온빔 소스의 경우 30 mm<sup>3</sup>/h 가공 가능)

## 7. 대기압 플라즈마 SiC 연마 기술 선진국 연구 동향

- 가. 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 있다. RAP의 경우 거울 가공 후 발생하는 응력을 완화하고, 원래의 자유표면상태를 회복하기 위해 SiC를 상압플라즈마를 이용하여 에칭함.
- 나. 상기 회사의 경우 RAP 방법을 적용하여, 200 mm의 거울을 0.33 nm rms 로 3주안에 제작 할 수 있는 능력을 갖추고 있음.
- 다. 일본의 경우 SiC 가공을 위한 새로운 기술로 물 플라즈마를 이용한 기술을 개발하고 있다. 가공이 매우 어려운 SiC를 물 플라즈마를 이용하여 산화를 시켜 가공성을 증대시켜 연마하는 기술임.

## 8. 집속이온빔 기술

- 가. 이온빔 응용 가공기술은 친환경, 고정정 공정기술로 평가 받는 新공정 복합가공기술로서, 청정효과뿐만 아니라 극도로 높은 표면조도의 달성이 가능한 효율적인 가공의 부가가치를 높이는 기술로 관련 산업에서 각광받고 있음.

### 제3장 연구개발 수행 내용 및 결과

#### 제1 절 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 설계

1. 구경 200mm 자유형상 광부품 기반 우주급 초정밀 광학계 설계

가. Telescope type : Three Mirror Anastigmat (TMA)

나. Pupil size : 200 mm

다. Effective focal length (EFL) : 1200 mm

라. 공간해상도 (고고도무인기, 고도 18 km) : 10 cm

마. 광학계 설계값

#	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Offset*	Conic	4 <sup>th</sup> order aspheric	6 <sup>th</sup> order aspheric
0	Object	Infinity	Infinity	-	Infinity	-	-	-	-
1	Stop	Infinity	600	-	100	-	-	-	-
2	M1	-1006.565	-449.862	MIRROR	323.804	-220	-0.805	8.39E-12	1.86E-19
3	M2	-305.843	469.752	MIRROR	43.869	-28.3	-11.812	1.90E-09	-8.79E-14
4	M3	-471.429	-601.398	MIRROR	155.077	89.7	-0.188	-1.17E-11	-9.67E-18
5	Image	Infinity	-	-	21.774	-	-	-	-

그림3-1-1. 광학계 설계값

바. 광학계 설계 Layout

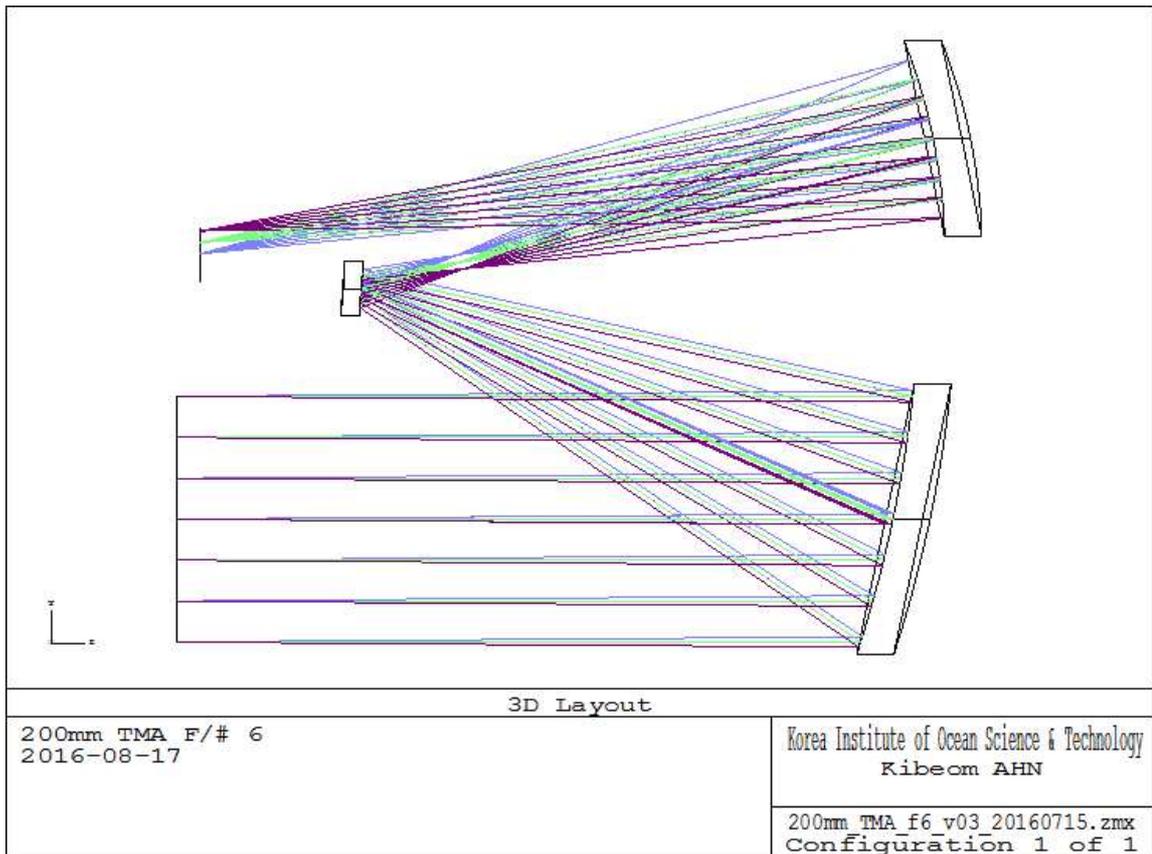


그림3-1-2. 광학계 설계 layout

사. 광학계 성능 - MTF (Modulation Transfer Function, 변조 전달함수)

- (1) 맨 상단의 검정색 선은 물리적 한계인 회절한계(Diffraction limit) 값으로 설계값과 차이가 거의 없음
- (2) 천리안 해양위성2호 광검출기 기준 (픽셀사이즈(pixel size) 6.8  $\mu\text{m}$ )으로 나이퀴스트 주파수 (Nyquist frequency) 73.53 lp/mm 에서 회절한계는 0.784, 설계값은 광축에서 0.782의 우수한 성능을 보임

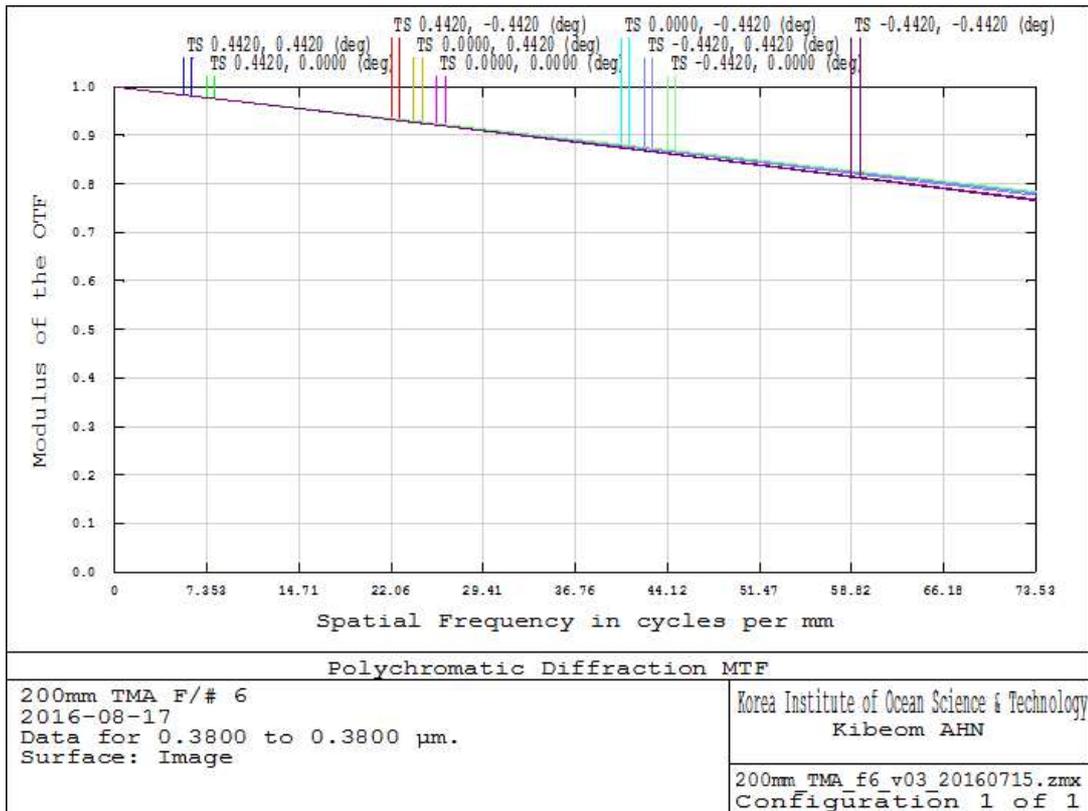


그림3-1-3. 광학계 성능-MTF

아. 광학계 성능 - 스팟 다이어그램 (Spot diagram)

- (1) 검정색 원은 물리적 한계를 나타내는 에어리 원반(airy disk)으로 설계된 광학계의 스팟(spot) 분포가 에어리 원반 내에 위치함을 확인
- (2) 에어리 원반(airy disk) 사이즈는 2.768  $\mu\text{m}$ 로써, 설계된 광학계는 모든 시야각에서 스팟분포의 RMS 반경값이 1  $\mu\text{m}$ 이내 우수한 성능을 가짐

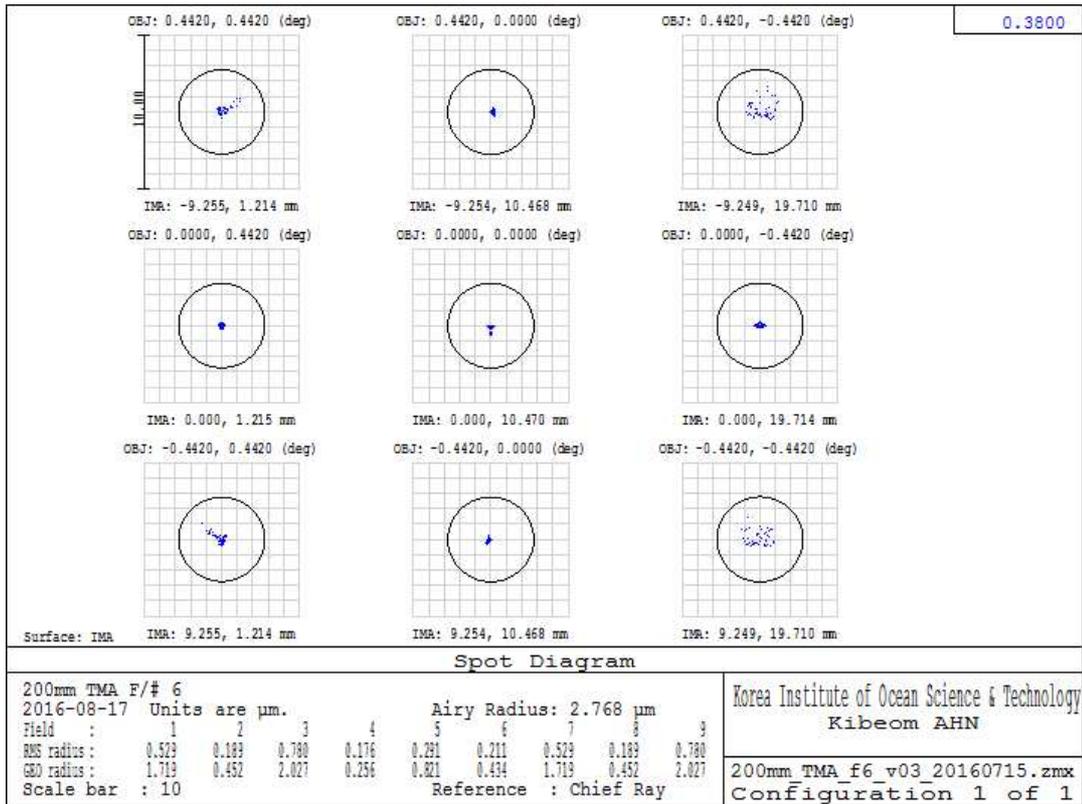


그림3-1-4. 광학계 성능-스팟 다이어그램

자. 광학계 성능 - RMS Wavefront Error vs Focus

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

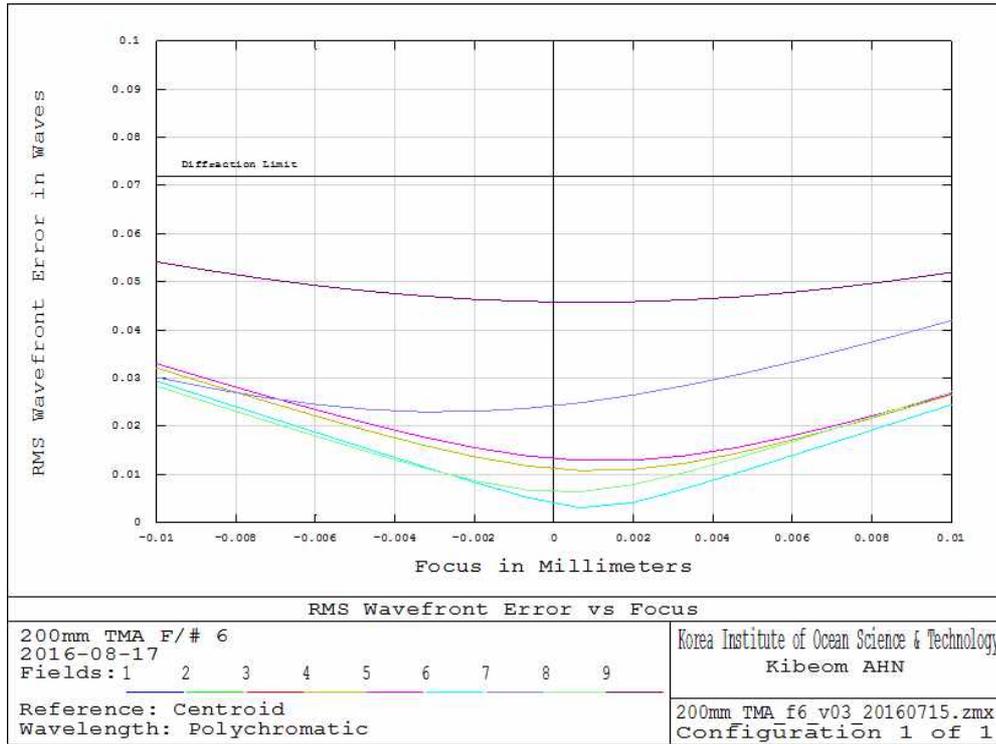


그림3-1-5. 광학계 성능-RMS Wavefront Error vs Focus

차. 광학계 성능(M2)

- (1) M2의 움직임에 의해서 Astigmatism 수차 변화가 큼.
- (2) M3에 비하여 큰 민감도를 가지고 있음. (선형적인 변화를 보임.)
- (3) 비축(Off-axis) TMA 형태이기 때문에 원점(0,0)지점에서 최적의 성능을 보이지 않음.
- (4) 외곽 필드와의 밸런싱을 고려하여 추가적인 최적화 필요함.

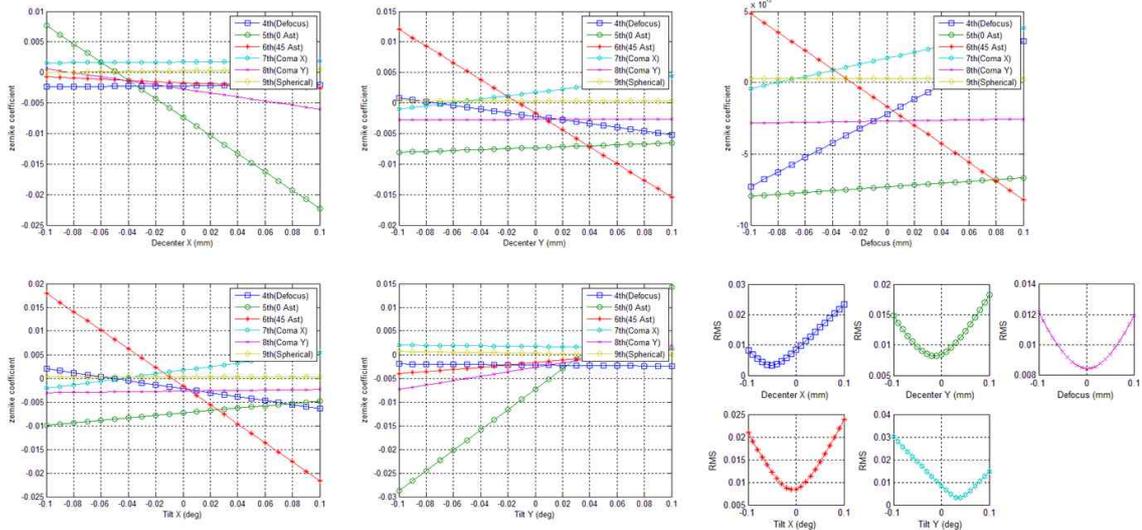


그림3-1-6. 민감도 분석-M2

카. 광학계 성능(M3)

- (1) M2에 비해서 둔감함.
- (2) TX, TY를 중점적으로 고려 하여 추후 공차 할당이 필요함.

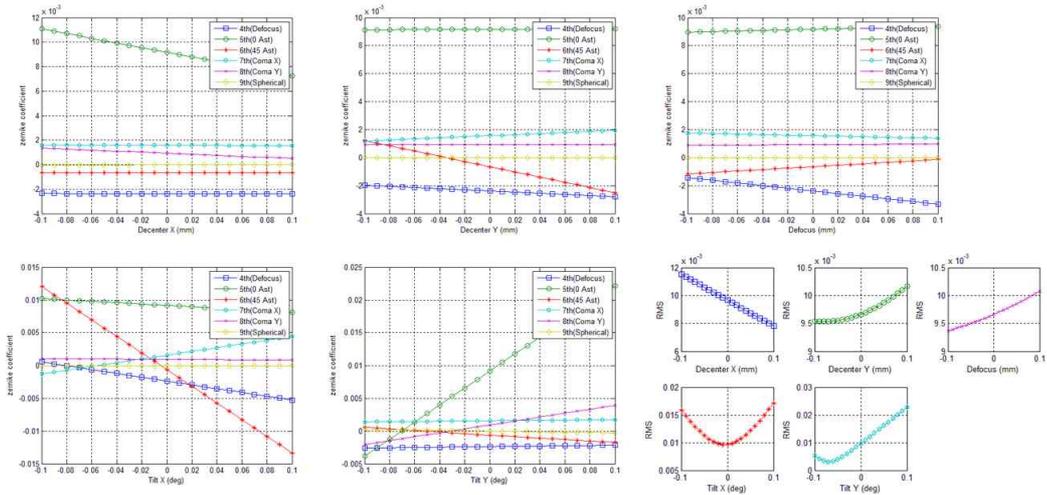


그림3-1-7. 민감도 분석-M3

## 제2절 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 개발

1. 초정밀 광학계 잡광 분석을 위한 3D 모델링 기반 광선추적 분석코드 개발 수행한다.
2. 기존 광학계의 잡광 분석 방법에는 임계 물체(critical object) 조사를 위한 역방향 광추적과 조사 물체(illuminated object) 획득을 위한 정방향 광추적이 있다. 하지만 기존 방식은 정확한 결과 도출을 위해서는 입사각도를 최대한 많이 설정하여 분석을 수행하여야 되므로, 많은 시간과 인력이 소요된다. 이에 대하여 한번의 분석을 통하여 검출기 한 픽셀에 도달하는 잡광 분석 시스템을 개발한다.
3. 그림 20은 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 흐름도를 나타낸다.
4. 국내 특허 출원 (출원번호 : 10-2016-0148093, 광학계의 잡광 분석 방법 및 이를 수행하는 광학계의 잡광 분석 장치)

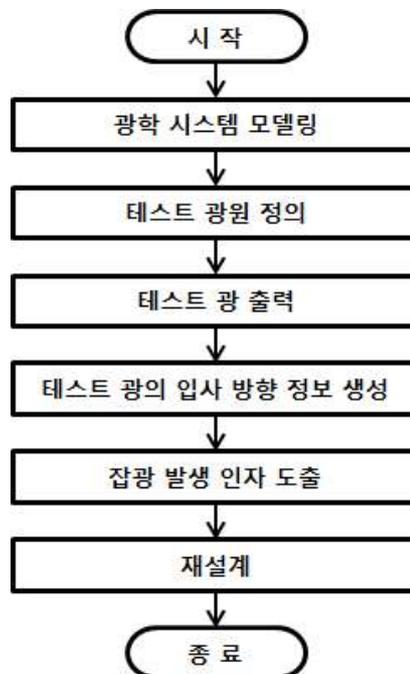


그림3-2-1. 초정밀 광학계 잡광 분석 시스템 흐름도

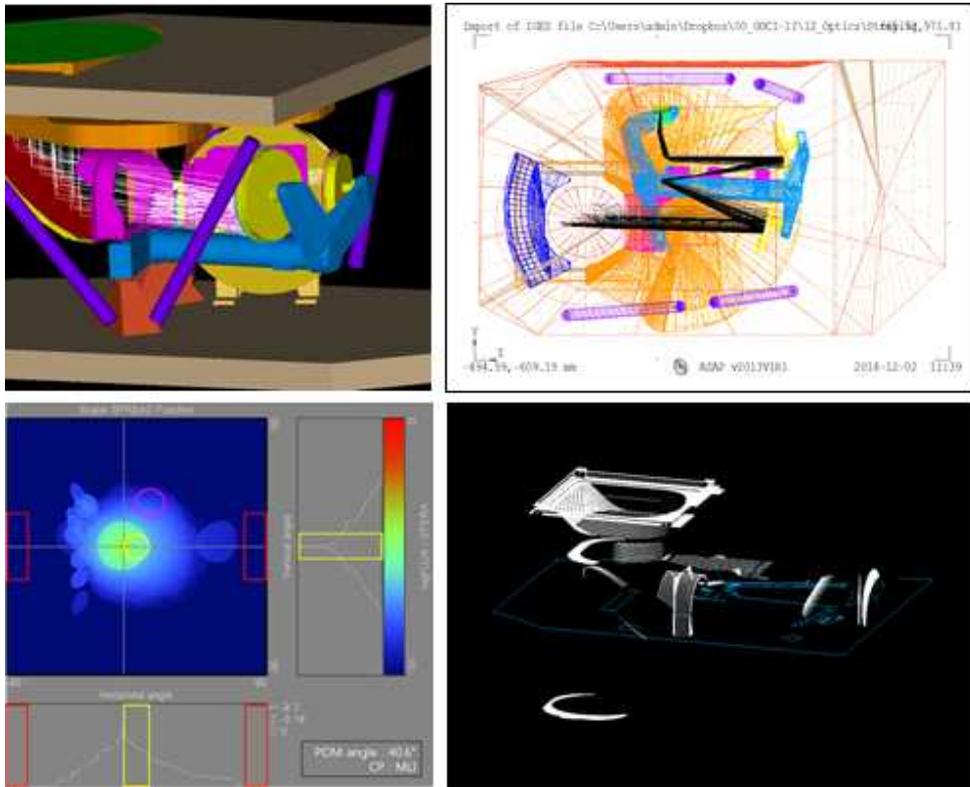


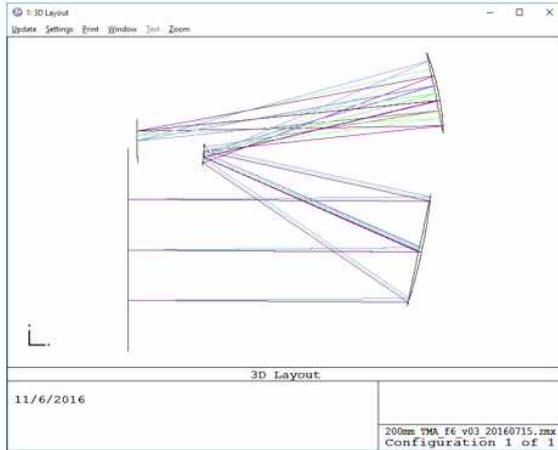
그림3-2-2. 초정밀 광학계 잡광 분석 결과

## 제3절 SiC 미러 구조 설계

### 1. 광학계 3D modeling 수행

가. 사용 프로그램 : Solidworks 2015 sp5.0

- Three mirrors in ZEMAX  
'200mm\_TMA\_f6\_v03\_20160715.ZMX'



- Three mirrors in SOLIDWORKS  
'200mm\_TMA\_f6\_v03\_20160715.sldasm'

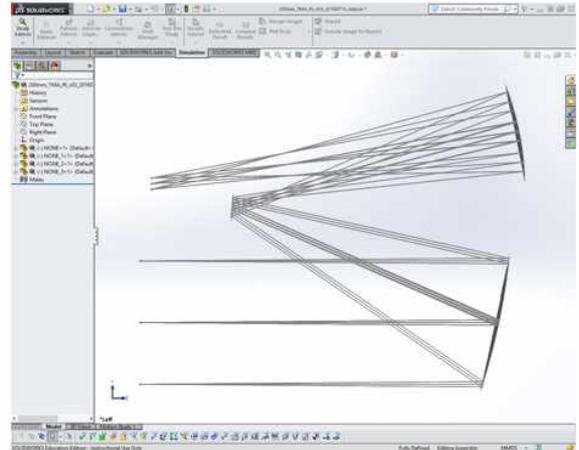


그림3-3-1. SiC 미러 구조 설계

### 2. 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D modeling 수행

가. 사용 프로그램 : Solidworks 2015 sp5.0

나. 경량화 패턴 : 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 경량화 패턴은 천리안 해양관측위성의 heritage를 바탕으로, 천리안 해양관측위성 주반사경(M1)에 사용된 삼각형 패턴을 이용하여 설계

다. 지지구조 또한 천리안 해양관측위성 주반사경(M1)과 동일하게 거울중심부에 설계

라. 비교 분석을 위한 다소 복잡한 패턴의 경량화 설계를 수행

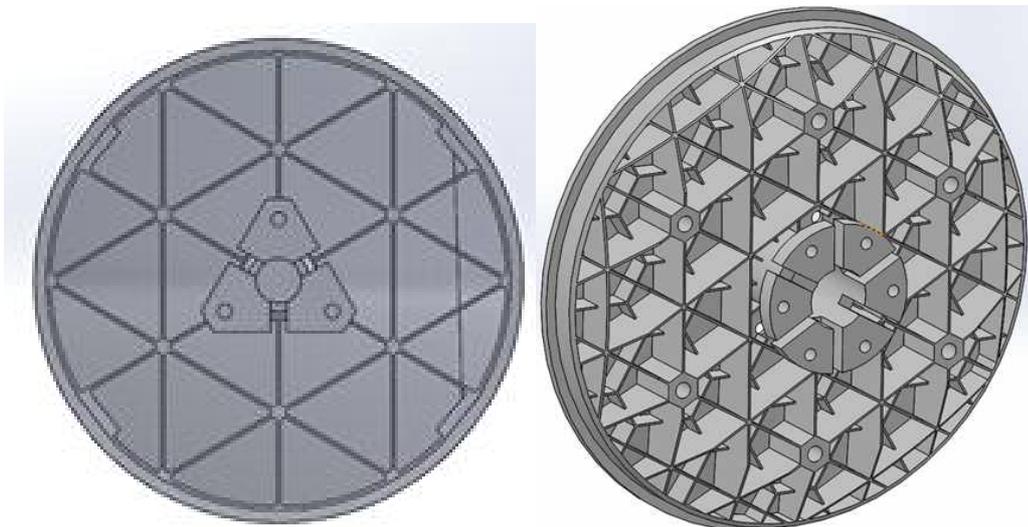


그림3-3-2. 구경 200 mm 비축-비구면 SiC 미러 구조 3D 모델링

마. 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 term will be introduced), Large patches → large quilting effect during fab.
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 hexagon), High manufacturing cost, Need rocker arms to form 3-point support during fab., Higher shrinkage rate depending on SiC manufacturing process

그림3-3-3. 해양관측위성 주반사경(M1) 경량화 패턴과 장단점 비교분석 수행

### 3. SiC 미러 유한요소모델(FEM, Finite Element Model) 생성

가. 유한 요소 모델은 Solidworks 2016 SP5를 이용하여 구성

나. Mesh type : 10-node tetrahedral mesh

다. 전체 node의 개수 : 약 210,000

라. Element의 개수 : 약 116,000

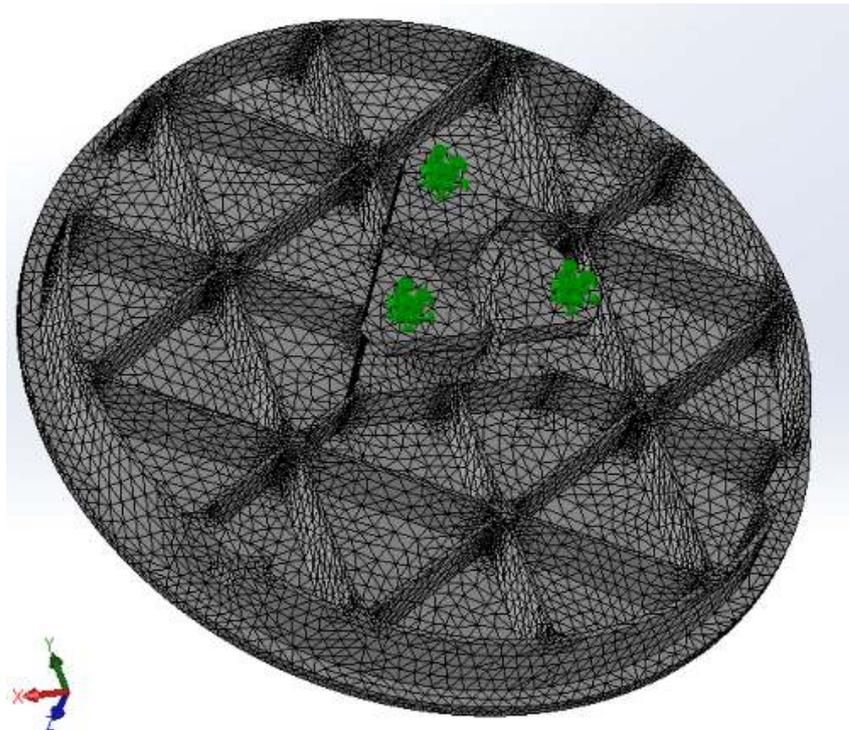


그림3-3-4. SiC 미러 유한요소모델(FEM, Finite Element Model)

	값	단위
Density	3,080	kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	450	GPa
Poisson's ratio	0.177	-
Compressive strength	3~8	GPa
Bending strength	530	MPa
Specific heat	662	J/kg·K
Thermal conductivity	175	W/m·K
CTE @ 300 K	3.26e-6	/K
Specific stiffness	143	kN/mg
Thermal stability	264	K/α

그림3-3-5. 유한요소모델(FEM)에 적용된 물성치

#### 4. 중력(하중) 영향에 의한 성능 분석

가. 중력(하중)에 의한 반사경의 변형을 분석하고 변형에 따른 성능 영향을 분석함.

나. 하중조건 : +Z축 방향으로 1G

다. 그림26은 Piston, tip-tilt 형상제거 후 변형량으로, 약 16.8 nm RMS의 변형이 발생

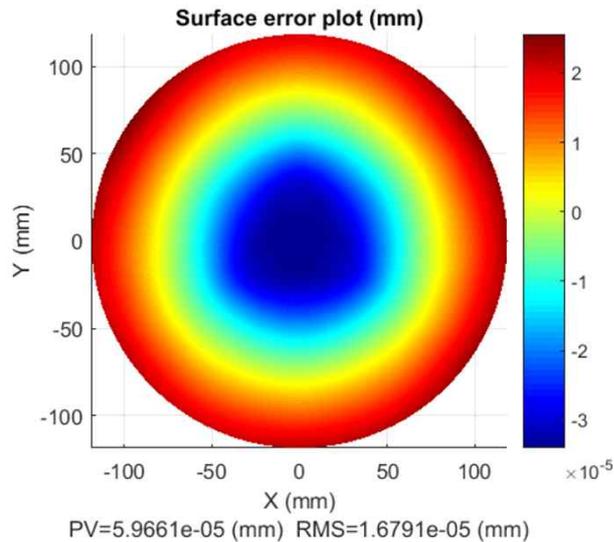


그림3-3-6. Piston, tip-tilt 형상 제거 후 변형량

라. 그림27는 Piston, tip-tilt, power 형상 제거 후 변형량으로, 약 3.6 nm RMS의 변형이 발생

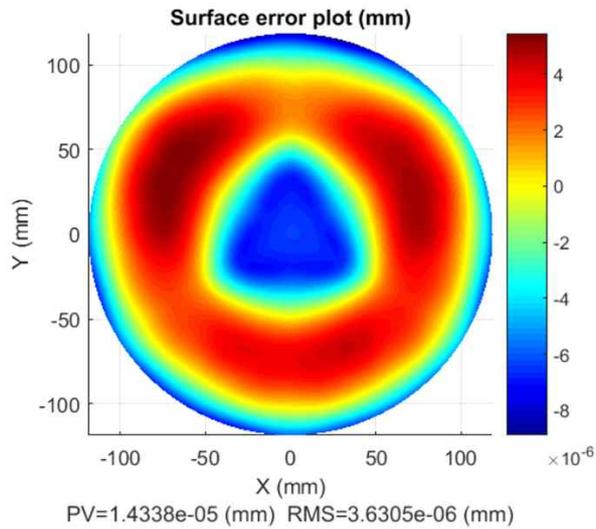


그림3-3-7. Piston, tip-tilt, power 형상 제거 후 변형량

마. 하중조건 : -Y 축 방향으로 1G

(1) 그림28는 Piston, tip-tilt 형상 제거 후 변형량으로, 약 0.7nm RMS의 변형이 발생

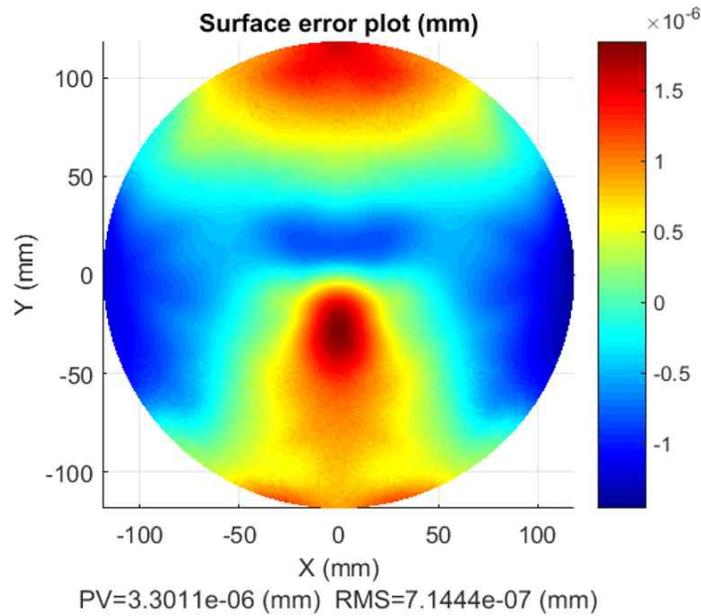


그림3-3-8. Piston, tip-tilt 형상 제거 후 변형량

## 5. 고유진동수 모드 분석

가. SiC 반사경 설계에 따른 고유진동수 모드를 분석함.

나. 모든 그림의 변위량은 다음과 같음.

$$\delta_{resultant} = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2}$$

다. Free-Free 모드

(1) 아래 그림은 1~6번째 모드(Rigid body motions)를 제외하고 보여줌.

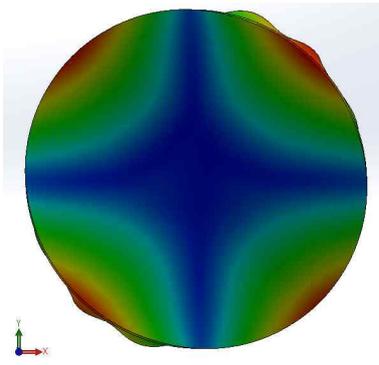


그림3-3-9. Astigmatic modes : 7번째 모드 - 2890 Hz

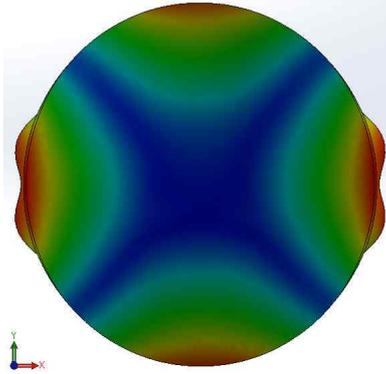


그림3-3-10. Astigmatic modes : 8번째 모드 - 2927 Hz

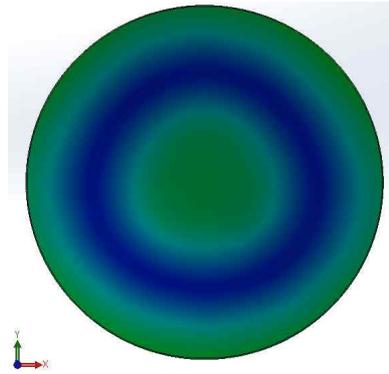


그림3-3-11. Radial bending mode : 9번째 모드 - 4006 Hz

라. 중앙 지지부 고정시 모드

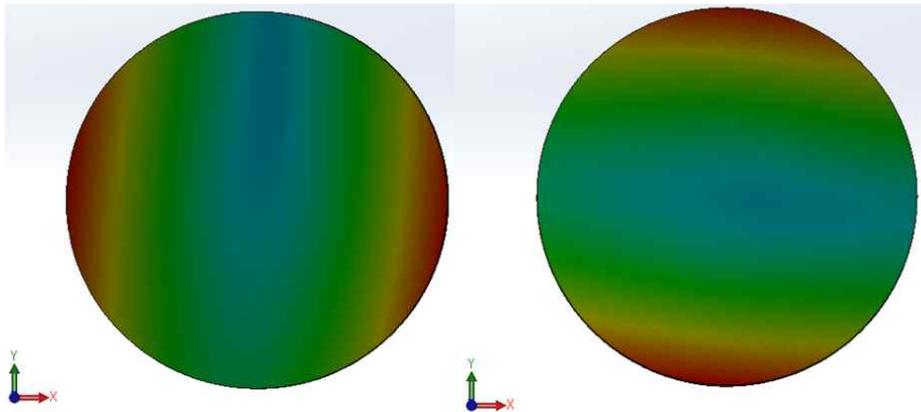


그림3-3-12. Tip-tilt modes (왼쪽) 1번째 모드 - 834 Hz, (오른쪽) 2번째 모드 - 841 Hz

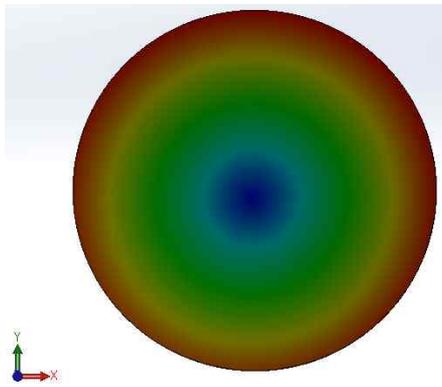


그림3-3-13. Rotational mode about Z-axis : 3번째 모드 - 852 Hz

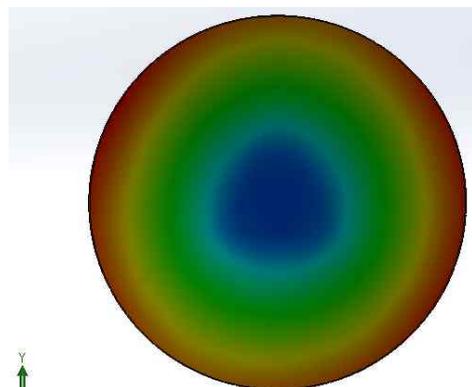


그림3-3-14. Radial bending mode : 4번째 모드 - 2248 Hz

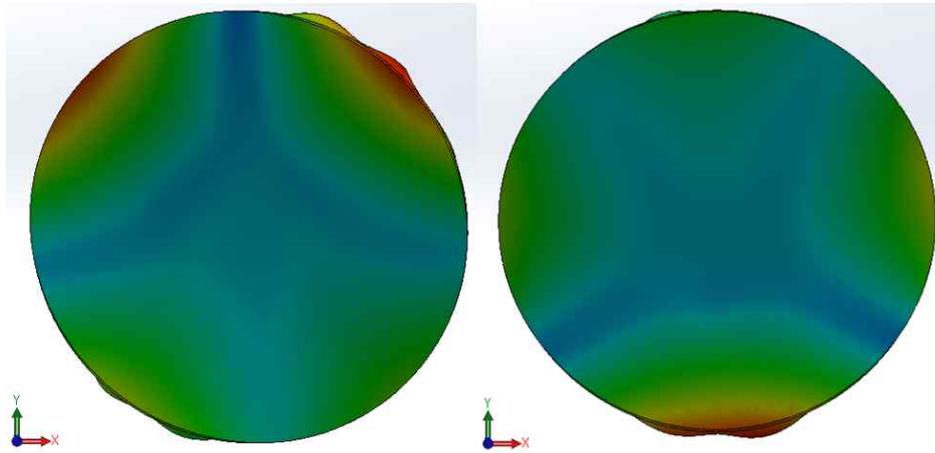


그림3-3-15. Astigmatic bending mode : (왼쪽) 5번째 모드 - 2813 Hz, (오른쪽) 6번째 모드 - 2825 Hz

## 제4절 초정밀 광학계 평가 시스템 구축을 위한 기본설계

### 1. 국제수준 신뢰성 평가(환경시험) 요구사항 도출함.

(ref. 천리안 해양위성2호 반사경 요구사항 기술문서, GC2.SP.00058.ASTR)

#### 가. 습도 시험 요구사항 (from MIL-C-48497A)

- (1) 습도 조건 : 90% ~ 95%
- (2) 온도 조건 :  $45^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$
- (3) 시간 조건 : 24시간

#### 나. 온도 시험 요구사항

- (1) 온도 범위 :  $-30^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$
- (2) 습도 조건 : 응결을 방지할 정도로 충분히 건조해야함.
- (3) 최고 온도( $60^{\circ}\text{C}$ )와 최저 온도( $-30^{\circ}\text{C}$ )에서 각각 2시간의 안정화 시간을 갖고 20회의 주기시험 수행
- (4) 온도 변화 조건 :  $> 1^{\circ}\text{C}/\text{minute}$

#### 다. 열진공 시험 요구사항

- (1) 진공 조건 : 10-5 mbar
- (2) 온도 범위 :  $-30^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$
- (3) 최고 온도( $60^{\circ}\text{C}$ )와 최저 온도( $-30^{\circ}\text{C}$ )에서 각각 2시간의 안정화 시간을 갖고 6회의 주기시험 수행
- (4) 온도 변화 조건 :  $> 1^{\circ}\text{C}/\text{minute}$

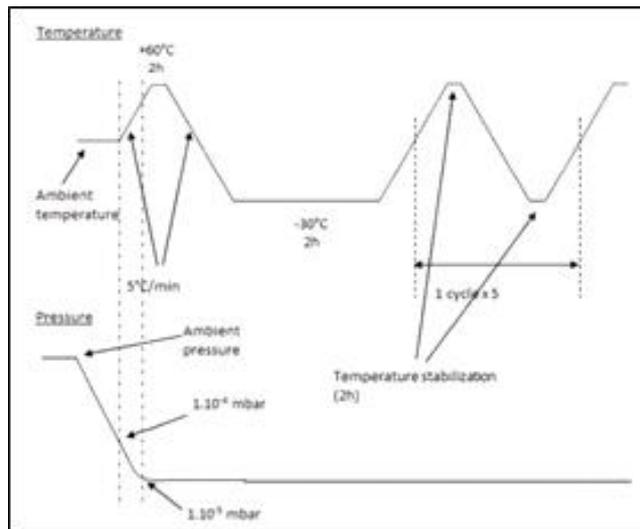


그림3-4-1. 열진공 시험 온도 설정 조건

## 2. 신뢰성 평가 시험 계획 및 시험 인프라 구축 방안 수립(1)

가. 주요 환경시험 요구사항을 만족하는 국내 시험 인프라 환경 조사

나. 신뢰성 평가를 위한 해양위성센터 내 현장관측기기 검보정 실험실 개선 방안 수립



그림3-4-2. 해양위성센터 내 현장관측기기 검보정 실험실

다. 항우연, 천문연, 세트렉아이 등 우주급 광학계 환경시험 시설을 보유한 국내 주요 기관과의 연구협력방안 검토

라. 세계 최고수준의 우주급 광학계 환경시험시설을 보유한 미국 NASA 현장방문조사

마. 천리안 해양관측위성 중심으로 진행 중인 KIOST-NASA 간 국제공동연구 확대 방안 협의 (위성 광학계 신뢰성평가 기술 공동연구 등)



그림3-4-3. 미국 NASA 우주환경시험 시설

## 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	
1년차 (2015)	1. 자유형상 광부 품 기반 우주급 초 정밀 광학계 개념 설계	1-1. 자유형상 광부품 기반 초정밀 광학 개념설계 - 사용자 요구사항 도출 - 우주급 초정밀 광학계 개 념설계 수행	0.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광학계 구경 200 mm, 공간해상도 10 cm (고고도무인기, 고도 18 km 기준)의 비축-비구면 광학계 설계 완료</li> <li>• 주관기관의 요청으로 광학계 구경 500 mm, 공간해상도 2.5 cm (고고도무인기, 고도 18 km 기준)의 광축-비구면 광학계 설계를 수행</li> </ul>	100
		1-2. SiC 미러 구조 개념설계 - 우주광학계로서 경량화 설계 수행 - 광부품 고정을 위한 광기 계부 설계 수행	0.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구경 200 mm 비축-비구면 반사경에 대한 개념설계 완료</li> </ul>	100
	계	1.0		100	

표 4-1-1. 연차별 목표 대비 달성도

## 제2절 정량적 목표달성도

### 1. 정량적 목표 달성도

구 분			2016년		2017년		2018년		장기 목표
분야	유형	지표명	목표	성과	목표	성과	목표	성과	
사회적 효과	정책효과	법률 개정 건수	-	-	-	-	-	-	-
		정책 반영 건수	-	-	-	-	-	-	-
	국제 인증	국제 인증 시험 항목	-	-	-	-	-	-	-
학술적 성과	논문	SCI(E) 건수	1	-	1	-	-	-	2
	특허	등록	-	-	1	-	1	-	2
		출원	1	2	-	-	-	-	1
	기술료	기술이전 성과	-	-	-	-	-	-	-

표4-2-1. 정량적 목표달성도

## 제5장 연구개발결과의 활용계획

### 제1 절. 연구개발결과의 활용방안

1. 초정밀 양산 시스템에 대한 활용 및 신뢰성 평가기술도 동시에 개발하여 시장요구 수준에 맞는 상용화 솔루션을 공급함. 본 과제를 통해 20편의 SCI급 논문과 28건의 국내/국외 특허를 출원할 계획이며, 개발된 공정 기술 및 장비는 중소기업 기술이전을 추진할 계획임
2. 본 사업을 통해 표면 가공 공정기술 및 측정 장비를 개발하고, 자유곡면 초정밀 광학계 가공/측정 기술에 대한 원천기술을 확보할 수 있어 정밀 광학 및 나노/반도체/디스플레이 등의 다양한 전략산업 및 태양광/메디컬/바이오 등의 첨단 산업에 기술적 파급효과가 클 것으로 기대됨
3. 자유곡면 광학계 및 나노스케일 광측정 기술은 산업적인 요구가 매우 높은 기술일 뿐만 아니라 국방/보안, 자동차 산업 및 반도체, 디스플레이등 사회 전반에 활용 가능성이 커, 기반 산업을 부흥시키고, 관련 제품에 대한 가격을 낮추어, 국민의 안전하고, 편안한 삶에 기여할 수 있음
4. 현재의 초정밀 광학계 및 측정/검사 장비는 대부분 미국, 일본, 유럽 등의 선진업체에 의존하였으나 본 과제를 통해 신개념의 측정 및 검사 장비가 개발된다면, 이에 따른 수입대체 및 국내 장비 시장의 질적 향상을 꾀할 수 있음. 특히 정밀 가공장비는 꾸준한 관리 및 업그레이드 작업이 중요하며, 이러한 점에서 국내 업체는 본 연구 결과물의 기술이전을 통해 경쟁력을 보유할 수 있음
5. 국방 및 산업계 전반의 파급효과가 큰 SiC 기반 초정밀 광학계 설계/시험기술 국산화에 따른 국내 산업체 기술이전 및 해당분야 창조경제 생태계 형성 기여할 것으로 기대됨
6. 천리안 2호 후속위성 및 차세대중형위성용 고정밀 광학탐재체 개발 기여함
7. 해수부 주관 국가해양영토 광역감시망 구축의 핵심 시스템 가운데 하나인 무인항공기 해양관측망의 주요 탑재체인 고정밀 광학센서 국산화 기여함
8. 수입에 의존하는 해양분야 광학관측기기 국산화 선도를 위한 핵심기술 개발함

## 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.