

◆특집◆ 항공우주용 광학계의 초정밀가공기술 동향 및 적용

천문우주용 적외선 광학계 초정밀가공기술

김건희 *, 양순철 **, 김효식**, 이인제**, 국명호**, 이대희***

Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Astronomy and Space

Geon Hee Kim *, Sun Choel Yang **, Hyo Sik Kim**, In Je Lee**, Myung Ho Kook**
and Dae -Hee Lee***

Key Words : SPDTM(Single Point Diamond Turning Machine), Ultra Precision Machining (초정밀가공), Astronomic and Space (천문우주), IR Optics(적외선 광학계)

1. 서론

현대 산업사회 첨단제품의 발전을 주도하고 있는 반도체 및 정보통신을 포함한 제반 첨단산업은 하드웨어 면에서 초정밀(ultra-precision)이라는 기술적 특성을 공공기반으로 하고 있다. 이는 반도체의 고집적화, 광자기 메모리의 고용량화, 광섬유 활용 다채널 고속 통신망, 그리고 고 분해능 레이저 프린터 등의 대표적인 예를 통해 쉽게 짐작할 수 있다.

그러므로 초정밀을 향한 정밀 핵심기술의 보유는 한 국가의 제반 첨단산업의 국제적 경쟁력 확보를 위한 필수적인 공통 기반기술로서 자리 매김을 하고 있다.

항공우주에 사용되는 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고

해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다.²⁻⁴ 하지만 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다.¹⁻⁴

국가전략기술지도(NSTRM) 상의 중요 목표 중의 하나인 대형 적외선 우주 망원경을 성공시키기 위한 다양한 기술적 노력들이 전개되고 있으며, 그 일환으로 한국천문연구원과 한국기초과학지원 연구원은 정책 협동 과제로 한국기체연구원, 적외선영상센서관련 업체와 함께 우주용 적외선 냉각 시스템을 개발하고 있다.⁵⁻⁶

본 연구에서는 한국기초과학지원연구원의 초정밀가공 시스템 구축 현황과 적외선 천문관측을 위하여 개발한 시상망원경용 근적외선 카메라 시스템 개발을 위한 알루미늄 합금의 주 반사경에 대한 초정밀가공 및 평가에 관하여 기술하고, 우주환경과 동일한 77K 의 극저온 환경에 적용하기 위한 우주망원경 냉각시스템 개발에 적용된 적외선 광학소자인 Ge 의 초정밀가공 기술과, 현재 국제 공동과제로 진행중인 우주용 적외선 카메라 개발 및 로켓관측 과제에 관하여 소개하고자 한다.

* 한국기초과학지원연구원
Tel. 042-865-3460, Fax. 042-865-3469
Email kgh@kbsi.re.kr

** 한국기초과학지원연구원

*** 한국천문연구원

생산 시스템 특히, 초정밀 가공, 폴리싱 가공 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

2. 초정밀가공 시스템 구축

X, Y, Z, C, B 축 제어를 통한 나노단위 기계가공으로 국내 최대 유일의 자유곡면 초정밀가공 장비인 Freeform 700A 을 비롯한 Nanoform 600, 4 축 동시제어 자유 형상 폴리싱 머신과 Laser Interferometer, Form Talysurf, NT2000 등의 나노단위 형상측정시스템을 갖추고 있다.

2006 년 8 월 설치된 Freeform 700A 는 세 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스프인들과 유정압 B 축 회전테이블로 구성되어 있다. 두 축 안내면은 각각 X 축과 Z 축으로 T 형태의 직교를 이루어 구동되며, X 축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축스핀들이 고정되어 회전한다. 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z 축 구동 안내면 위에는 공구대가 고정되어 바이트나 연삭 휠을 설치할 수 있으며, 스프인들 구동 방향과 수직방향으로 구동된다. C 축 회전에 대한 위치제어와 X 축 위에 Y 축 안내면이 추가되어, 동시 4 축 제어가 가능한 구조의 초정밀 자유곡면 가공기이다. 추가적으로 FTS(Fast Tool Servo)를 설치하여, C 축과 동시제어를 통하여 광 커넥터 등에 사용되는 Lens Array 와 같은 초미세 Grid 가공이 가능하다. 초정밀 가공실은 온도 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 습도 $30 \pm 5\%$, Clean Room class 10,000 인 항온항습의 Clean Room 이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반구조로써 장비 하부는 3Point Air Bag 으로 지지된다.

초정밀가공기술은 다양한 사업 분야에 적용하고 있으나, 전문 특성화를 위한 특화 기술로써 적외선 광학계의 초정밀가공, 조립, 평가기술개발을

위하여 Fig. 1 과 같은 초정밀가공 및 측정시스템을 구축하였으며, 초정밀가공 장비와 측정장비의 세부 사양을 Table 1,2 에 기술하였다.

Table 1 Specification of Ultra-Precision Machine & Polishing Machine

Freeform 700A
<p>▶ An advanced five axis machining system for 4 or 5 axis raster milling and grinding applications.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Slide Travel: X-350mm(14")Y-150mm(6")Z-300mm(12") • Maximum Feedrate: 1500mm/min. (59"/min.) • Spindle Speed: ≤ 5000 RPM <ul style="list-style-type: none"> - Raster/Groove Milling - Tool Normal Diamond Turning, Grinding - Cross Axis, Parallel and 45° Grinding - Fast Tool Servo
Nanoform 600
<p>▶ An advanced two axis machining system</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Turning <ul style="list-style-type: none"> - Maximum : 600 mm - Surface roughness : $R_{\max} 0.01 \mu\text{m}$(Al, alloy) 2) Grinding <ul style="list-style-type: none"> - Maximum : 300 mm - Surface roughness : max $0.05 \mu\text{m}$(SF-12 Glass)
KRP-2200F
<p>▶ The optimum polishing pressure can be selected. Possible to polish aspherical surfaces uniformly.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Accuracy : $R_a 1 \text{ nm}$, PV: 50 nm - X×Y×Z(400×200×150)

Table 2 Specification of Measurement equipment
Surface Measurement system NT2000

<p>▶ Surface measurement technique : optical phase shifting and vertical scanning interferometer</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resolution : 0.1 nm - Vertical resolution : 0.1 nm - Vertical measurement range : 0.1 nm ~ 150 μm - Stitching measurement range : 100 mm × 100 mm - Focusing type : auto



Fig. 1 Data Acquisition and Analysis System

Laser Interferometer WYKO 6000
▶ Measurement equipment of plane and aspheric by optical interferometer - Wave length : 632.8 nm - Accuracy : $\lambda/100$ PV at 632.8 nm - Resolution : $\lambda/1,024$ - Transmission sphere : $f/0.75, f/3.2, f/7.0$
Form Talysurf series 2
▶ Aspherical surfaces measuring instrument. - Range : 120 mm - Data resolution : 0.25 μm - Precision : 0.5 $\mu\text{m} / 120$ mm, 0.2 $\mu\text{m} / 20$ mm - Standard stylus : 2 μm radius

3. 천문우주용 적외선 카메라 개발 사례

3.1 지상망원경용 근적외선 카메라

적외선 영역의 천체를 관측하기 위하여 지상용 광학 망원경에 부착되는 근적외선 카메라 카시닉스(KASINICS : KASI Near-Infrared Camera System)를 한국천문연구원과 공동으로 개발하였다. 개발된 카시닉스는 2006년 소백산 천문대에 설치하여 시험 관측을 수행하였다. 본 연구에서는 카시닉스의 주경에 대한 초정밀 가공 특성에 관하여 기술하고자 한다.

3.1.1 근적외선 카메라의 개요

한국천문연구원 (KASI : Korea Astronomy and Space Science Institute)에서는 지상용 광학망원경에 부착할 계획으로 근적외선 카메라 카시닉스(KASINICS : KASI Near-Infrared Camera System)를 개발 중이다. 광학망원경에 적외선 카메라를 부착하는 경우에는 망원경 자체에서 나오는 열복사가 카메라의 성능을 저하시키는데 이를 차단하려면 광량의 손실이 없는 범위에서 카메라 내부의 광학계에 cold Lyot stop 을 설치해야 한다. 카시닉스는 이를 구현하기 위하여 오프너 광학 시스템을 채택하였다.

오프너 시스템에서는 망원경의 제 1 초점면에 맺힌 영상이 오프너 주경에 반사된 뒤 cold Lyot stop 기능을 하는 고리 모양의 오프너 부경에 반사된다. 이 과정을 거치면서 망원경에서 나오는 불필요한 열복사가 걸러진다. 이후 다시 오프너

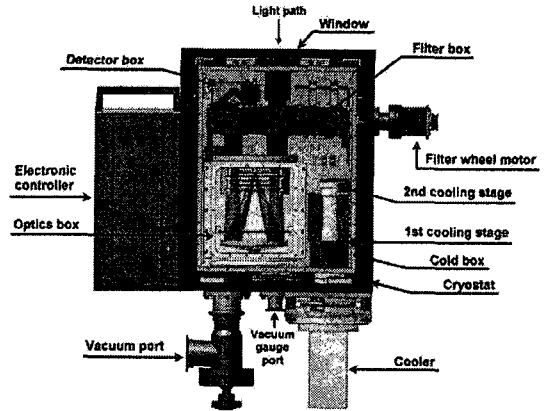


Fig. 2 Development figure of KASINICS

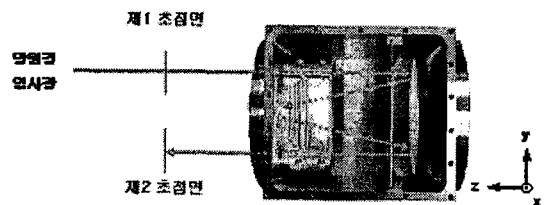


Fig. 3 A shape of KASINICS offner optical-system

주경에 반사된 빛은 최종적으로 카시닉스 제 2 초점면에 영상을 맺는 구조를 갖는다. Fig. 2 는 카시닉스의 개념도를 나타낸다.

Fig. 3 은 도면 중앙에 위치한 광학계에 광경로가 그려져 있다. 윈도우를 통해 들어온 빛은 필터 박스에 끼워진 배플 (baffle) 내부의 망원경 초점면을 지나 오프너의 주경과 부경에 차례로 반사된 뒤 광소자로 들어간다. 오프너 광학 시스템은 같은 축 위에 배치한 두 개의 구면경으로 구성된다. 따라서 구면수차가 없고, 비축구조임에도 공차가 크기 때문에 광축 정렬이 용이한 구조로 설계되어 있다.

3.1.2 근적외선 카메라 광학계 제작

천문 관측용 적외선 카메라 광학 반사경의 재료로는 알루미늄을 초정밀 절삭실험을 수행하였으며, 알루미늄을 적용한 이유는 열팽창률이 커서 온도 변화에 따른 변형이 크고, 열확산이 빠르기 때문에 냉각 효율이 좋으며, 광학계 조립 기구부

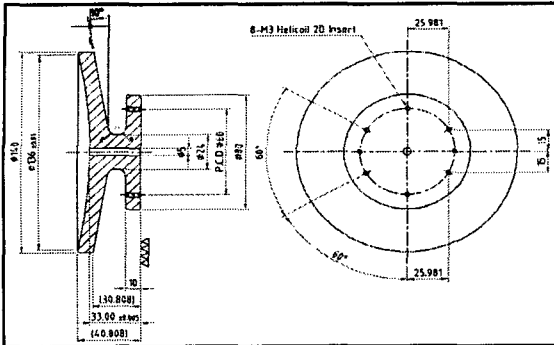


Fig. 4 Manufacturing drawing of IR camera primary mirror

와 동일한 재질이기에 때문에 마운트 설계가 쉬운 특징이 있으므로 알루미늄을 선정하여 제작하였다.

요구되는 광학계의 정밀도는 주 반사경은 PV $\lambda/4$, RMS $\lambda/10$ 이며, 유효구경부분은 $\phi 50 \sim \phi 130$ 에서 적용되며, 부경의 PV 값은 주경과 같으며, RMS는 $\lambda/12$ 값을 만족하여야 한다.

Fig. 4 는 적외선 카메라 주경의 제작 도면을 보여주고 있으며, 주경 초정밀 가공시 발생하는 변형을 줄이기 위하여 초정밀급 지그들을 제작하여 형상 공차 및 표면 거칠기를 향상시키고자 노력하였다.

알루미늄합금의 초정밀가공은 기존 연구자료를 근거로 최적조건을 설정하여 주 부 반사경의 초정밀가공을 완성하였다.⁷

초정밀 가공전 형상에서 빛의 방출을 막고 열복사율을 위한 무광택 Anodizing 처리를 하였으며, Helicoil 은 Anodizing 후에 삽입하였다. Fig. 5 에서는 초정밀 지그에 부착되어 초정밀 가공되고 있는 주경의 모습을 보여주고 있다.

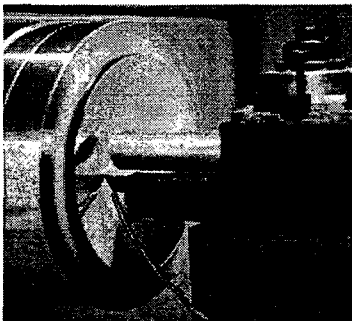


Fig. 5 Ulter-precision machining of primary mirror

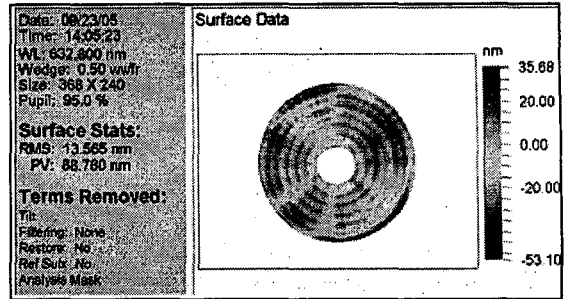


Fig. 6 Measurement result of form accuracy by Laser Interferometer WYKO6000

Fig. 6 은 Laser Interferometer 측정장치를 이용하여 형상 정밀도를 측정한 결과를 나타내고 있다. 광학계의 초정밀가공 결과에 대한 형상 정밀도 측정은 헬륨네온의 632.8 nm 가 기본파장인 WYKO사의 레이저 간섭계를 활용하였다. 형상정밀도 측정 결과 주경은 PV88 nm, RMS 13.5 nm 의 값으로 요구정밀도 보다 좋은 형상정밀도로 제작 완료하였다.

3.2 우주망원경 냉각시스템용 적외선 렌즈

국가우주 개발 중장기 계획에 우주 또는 지상을 관측하는 적외선 우주 망원경의 개발의 선행 연구로 지상 테스트용 적외선 망원경 냉각시스템을 설계하고 제작하였다. 지상 테스트용 냉각시스템 개발을 통해 위성탑재용 냉각시스템의 개발에 필요한 기법 확립과 진공 시험 및 장기운전 테스트 등의 시험이 가능하다. 이와 함께 초정밀 최적 가공조건을 찾아 우주망원경의 적외선 열화상 카메라에 적용되는 비구면 렌즈의 형상정밀도 향상을 도모한다. 이와 같은 냉각시스템 및 요소기술 개발을 국내에서 개발하면 그 동안 외국에서 완성 시스템으로 구입하던 위성 탑재용 적외선 망원경을 국산화 할 수 있으며 국내에서 생산된 적외선 센서를 산업 및 군사용으로 활용할 수 있는 기반이 마련된다.

우주적외선 냉각시스템 시험모델(PSICS)의 광학계로 사용되는 게르마늄 렌즈를 비구면으로 초정밀가공 하였다. 실험을 통하여 얻어진 최적절삭 조건을 이용하여 외경 40 mm, 두께 8 mm, 곡률반경 131.75 인 평볼록형상의 비구면 렌즈를 제작하였다.

Vacuum chuck 의 진공압력에 의한 제품의 변형

을 방지하기 위하여 특수한 지그를 설계 제작이 필요하였으며, 이에 일반적인 평판형상의 지그를 사용한 결과보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 7 은 우주 적외선 냉각용 광학계의 개념도를 나타내며, Fig. 8 은 비구면 형상측정기인 UA3P 를 이용하여 가공한 후 비구면 형상을 측정한 결과 P-V 0.2554 μm 를 얻었다.

Fig. 9 는 Interferometer WYKO6000 을 이용하여 직경 40 mm 평면을 측정한 결과 P-V 0.127 μm 를 얻을 수 있었다. 요구되는 형상정밀도는 P-V 0.5 μm 이하로써 요구사양에 적합하게 제작되었으며, 향후 렌즈 적외선 광학계에 사용하기 위한 투과율 향상을 위한 표면코팅을 하고, 제품의 형상 변형량 등을 측정하여 우주적외선 카메라용 렌즈가공 기술을 확보하였다. Fig. 10 은 적외선용 망원경에

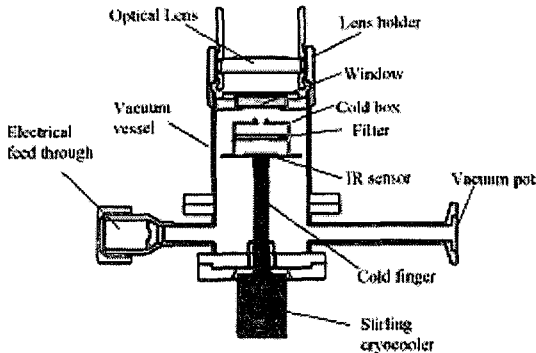


Fig. 7 Design of Space telescope cold-system

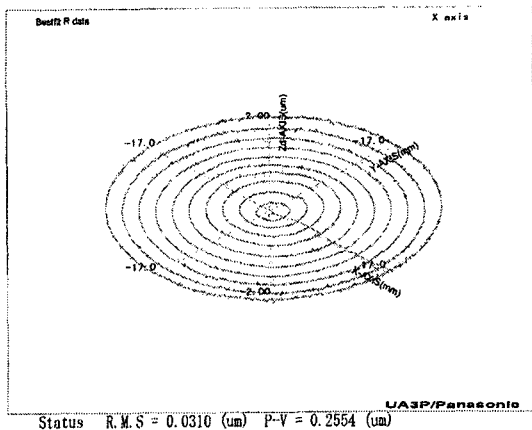


Fig. 8 Measurement of Ge surface profile

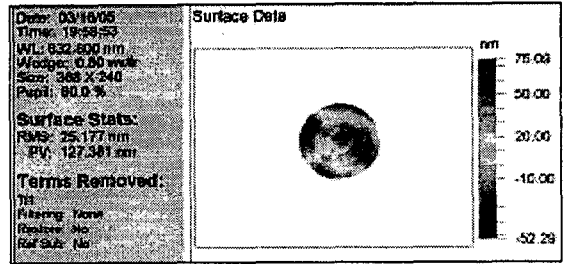
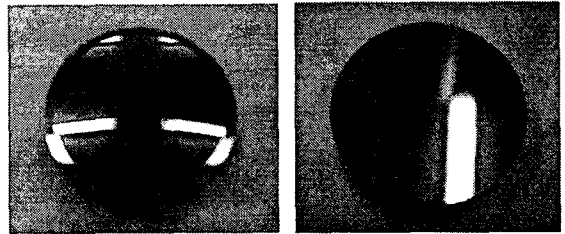


Fig. 9 Measurement of the Ge lens surface by WYKO6000



(a) Aspheric surface (b) Plane surface
Fig. 10 Result of Machining Ge lens by SPDTM



Fig. 11 Image by Space telescope cold-system

사용되는 Ge 렌즈의 전 후면사진으로 (a)는 비구면 형상을 (b)는 평면형상의 초정밀가공 결과를 나타낸다. Fig. 11 은 개발한 적외선 카메라시스템을 사용하여 촬영한 이미지를 나타낸다.

3.3 우주용 적외선 카메라 개발 및 로켓관측

2006 년 8 월에 “우주용 적외선카메라 개발 및 로켓관측” 과제가 기초기술연구회의 협동과제로 선정됨으로써 한국천문연구원(KASI), 한국기초과학지원연구원(KBSI), 그리고 경희대학교로 구성된 적외선 연구 그룹은 적외선 우주배경복사 관측

국제 공동 연구(Cosmic Infrared Background Experiment, CIBER)에 본격적으로 참여하게 되었다. CIBER 프로젝트는 미국의 제트추진연구소 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 및 일본의 우주과학연구소 (Institute of Space and Astronomy Science, ISAS) 등이 주축이 되어 진행되는 국제 공동 연구로써 미국 NASA 의 과학로켓에 탑재시켜 근적외선 (1-2 μ m) 영역에서의 우주배경복사를 관측하여 우주 초기의 별 및 은하에 대한 연구를 수행하려는 목적을 가지고 있다.

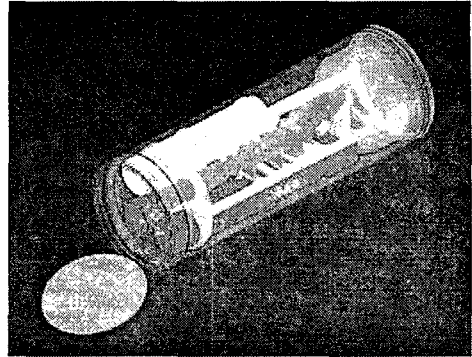
CIBER 는 시야가 넓은 근적외선 카메라 두 대를 이용하여 0.8 및 1.6 μ m 대역을 동시에 관측함으로써 근적외선 우주배경복사의 공간 섭동을 검출하려고 한다. 위의 두 파장 대역을 선택한 이유는 두 파장 대역에서 초기 별들에 의한 우주배경복사량이 제일 크고, 황도광 또는 우리 은하 내의 광원에 의한 잡음들과 잘 분리할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 국내에서 제작되고 있는 고분산 분광기의 성능 및 과학 임무에 대해 설명하고 로켓 실험의 개요에 대하여 소개 한다. 그리고 CIBER 에서 한국 그룹이 참여하는 구체적인 사항에 대해 기술하고 이것이 갖는 기술적, 과학적 의미에 대해 기술하고자 한다.

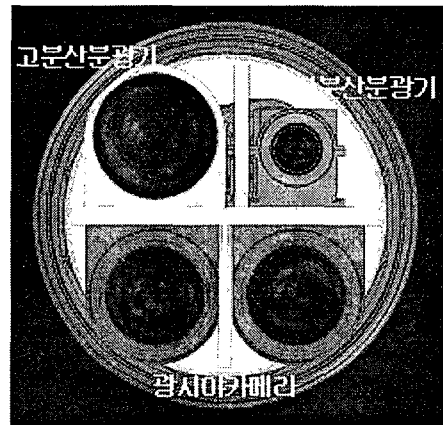
3.3.1 로켓 탑재용 적외선 광학계

CIBER 는 Fig. 1 에서와 같이 로켓의 경통 안에 위치한다. 두 대의 광시야 카메라와 저분산 분광기, 그리고 고분산 분광기로 구성되는 CIBER 는 액체 질소를 이용한 cryostat 안에 장착되어 절대 온도 77 K 의 온도를 유지한 상태에서 작동되며, 카메라와 분광기에 공통적으로 운용되는 전자부 시스템은 데이터 획득 및 로켓과의 인터페이스를 담당한다. 두 대의 광시야 카메라는 근적외선 우주배경복사 공간 섭동을 측정하며, 저분산 분광기는 근적외선 우주배경복사의 스펙트럼을 관측할 예정이다.

고분산 분광기는 7.5 cm 의 구경을 가지는 굴절망원경으로 협대역 필터를 이용하여 0.8542 μ m 부근의 좁은 영역의 파장을 관측하는데, 패브리-페로 분광기를 삽입하여 파장 분해능이 약 1000 정도가 되도록 분광 관측한다. 검출 센서로 256 x 256 HgCdTe 적외선 센서를 사용하며, 시야각이



(a) 3D perspective drawing



(b) A sectional drawing

Fig. 12 3D modeling of CIBER

8.5 x 8.5 도로 크기 때문에 픽셀의 각분해능은 2 분이 된다. 고분산 분광기는 태양계 내의 황도광을 정밀 측정하는 목적을 가지고 있다. 황도광은 태양계 내의 먼지에 의해 태양빛이 반사하여 나타나는 것으로 근적외선 우주배경복사의 가장 큰 잡음에 해당된다. 따라서 황도광을 정밀 측정하면 우주배경복사의 가장 큰 잡음을 제거할 수 있게 된다. Fig. 13 은 고분산 분광기의 광학계 설계 결과를 나타낸 것이다. 본 광학계는 4 개의 구면 렌즈와 2 개의 비구면 렌즈로 구성되며, 비구면 렌즈의 최적곡률반경에 대한 Sag 편차는 1.5 mm 로 매우 급격한 형상이며, 본 렌즈는 초정밀가공기의 정밀 위치 제어를 통한 연삭공정에서 요구되는 형상정밀도를 완성하여야 한다. 그러므로 이를 위하여 사용되는 광학소자(Sillica)에 대한 최적 초정밀가공 공정을 개발하고, 요구되는 형상정밀도로

Table 3 Optical Specifications

Aperture	7.5 cm
Dimension	256 x 256 pixels
FOV	8.5 x 8.5 degrees
Pixel size	2 x 2 arcmin
Wavelength	0.8542 μ m

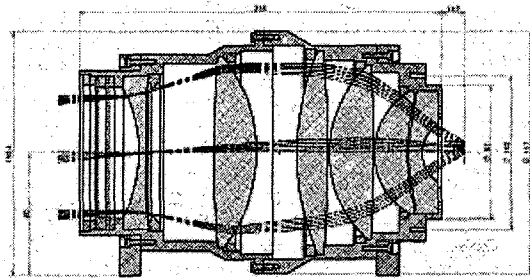


Fig. 13 Mounting structure of CIBER optics

제작 후 로켓에 탑재하여 영상을 획득함으로써 향후 적외선 우주 관측용 광학계의 국산화를 통한 국가적 위상을 정립할 것이다.

3.3.2 로켓 관측

CIBER 를 탑재한 로켓은 발사 후 약 600 초에 걸쳐 고도 350 km 까지 도달하게 된다. CIBER 는 고도 200 km 이상에서 약 300-390 초 동안 다섯 개의 지역을 관측하며, 관측 데이터는 실시간으로 지상으로 전송된다. 목표한 지역을 관측 가능한 시간을 택해 2008 년 경에 NASA 의 발사장에서 로켓을 발사할 예정이다. Fig. 14 는 로켓의 궤도 및 관측에 대한 개념도를 나타낸다.

현재 CIBER 는 각 기기의 설계가 완료되어 제작을 진행 중에 있으며, 한국에서는 지상 전자 장비의 개발과 고분산 분광기의 제작을 수행 중에 있다. 2007년에 조립, 시험 및 calibration 을 수행하고, 2008년에 NASA 에서 발사될 CIBER 프로젝트는 국제 선도적인 관측 데이터를 획득할 수 있으며, 첨단 우주 적외선 광학계 초정밀가공 기술을 직접 개발할 수 있는 좋은 기회이다. 그러므로 이번 과제를 완벽하게 수행하는 것은 차후에 국내 자체 기술에 의한 적외선 우주망원경 개발의 초석이 될 것으로 전망된다.

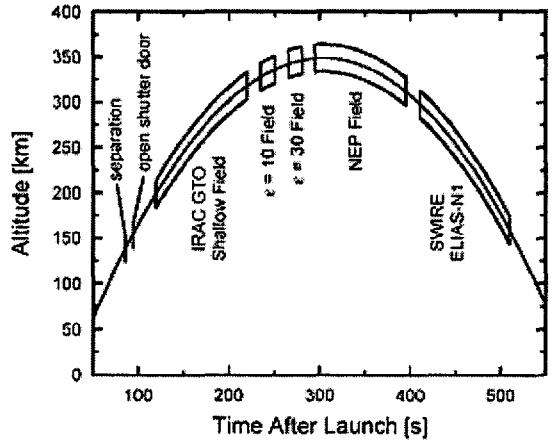


Fig. 14 Trajectory and Planned Observations

4. 결론

이 글에서는 초정밀가공시스템 구축을 위하여 초정밀가공에 필요한 주요 장비 및 측정장비에 관하여 기술하였으며, 천문우주용 적외선 광학계의 개발사례에 대하여 기술하였다.

1. 적외선 천문관측을 위하여 개발한 지상망원경용 근적외선 카메라 시스템 개발을 위한 알루미늄 합금의 주 반사경에 대한 초정밀가공 결과 형상정밀도 측정 결과 주경은 PV88 nm, RMS 13.5 nm 의 값으로 요구정밀도 보다 좋은 형상정밀도로 제작 완료하였다.

2. 우주적외선 냉각시스템 시험모델(PSICS)의 광학계로 사용되는 게르마늄 렌즈를 비구면으로 초정밀가공 결과 P-V 0.2554 μ m의 형상정밀도를 얻었으며, 이를 적용하여 적외선 광학계를 개발하고 열영상 이미지를 획득하여 시스템을 완성하였다.

3. 적외선 우주배경복사 관측 국제 공동 연구로 수행중인 “우주용 적외선카메라 개발 및 로켓 관측”에 관한 소개와 한국의 역할에 대하여 기술하였다.

향후 천문우주용 적외선 광학계의 국산화 및 세계화를 위해서는 초정밀가공 및 연삭, 폴리싱 공정기술 뿐만 아니라 광학계의 조립 평가 기술개발이 요구된다.

참고문헌

1. Donaldson, R. R. and Patterson, S. R., "Design and Construction of a Large, Vertical Axis Diamond Turning Machine," Proc. SPIE, Vol. 433, pp. 62-67, 1983.
2. Ko, J. B., Kim, G. H. and Won, J. H., "A Study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diamond turning machine," Trans. of KSMTE., Vol.10, No.5, pp.124-129, 2001.
3. Ko, J. B., Kim G. H., Hong, K. H., Song, H. D. and Won, J. H., "Nanometer Scale Ultra Precision Machining of Oxygen-free Copper," KOSTET REVIEW, Vol.6, No.2, pp.77-82, 2001.
4. Kim, G. H., Hong, K. H., Kim, S. S. and Won, J. H., "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.19, No.1, pp.18-24, 2002.
5. Kim, D. R., Yang, H. S., Kim, G. H., Kim, H. S., Yang, S. C., Sin, H. S., Lee, I. J., Lee, S. Y. and Yang, J. S., "Design and Manufacture of Cryogenic System for Space Telescope," Association Research Report, pp.12-14, 2005.
6. Kim, G. H., Kim, H. S., Yang, H. S., Lee, K. H., Bok, M. G., Lee, I. J., Yang, J. S., Kim, M. S., Lee, S. Y. and Sin, H. S., "Development of Manufacturing Technique of Astronomical IR Camera System," KBSI Consignment Research Report, pp.1-25, 2006.
7. Kim, G. H., Yang, S. C., Kim, H. S., Kim, I. J., Bok, M. G. and Kwon, G. I., "The Development of VGA Level Omni-Directional Surveillance Camera," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.23, No.6, pp.22-28, 2006.