

◆특집◆ 초정밀가공기술

로켓탑재용 적외선 광학계 초정밀가공기술

김건희 *, 양순철 **, 김효식**, 국명호**, 이대희***

Ultra Precision Machining of Infrared Optic for CIBER

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

Key Words : Infrared optic(적외선 광학계), Aspheric lens(비구면 렌즈), Single point diamond turning machine(단결정 다이아몬드 선삭 가공), Cosmic Infrared Background Experiment(적외선 우주배경복사 관측 국제 공동 연구)

1. 서론

항공우주에 사용되는 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다.¹⁻³ 하지만 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 필요하다.

우주기술이 핵심기술의 하나로서 주도하는 21 세기에 들어와서, 우리나라도 우주개발에 적극적으로 참여하고 있다. 1992년에 발사된 우리별 1호를 시작으로 과학 위성들이 개발되었으며, 1995년부터 통신 방송위성인 무궁화 위성들이 발사되어 상업적으로 이용되고 있다.⁴⁻⁶

국가전략기술지도(NSTRM) 상의 중요 목표 중의 하나인 대형 적외선 우주 망원경을 성공시키기 위한 다양한 기술적 노력들이 전개되고 있으며, 그 일환으로 2006년 8월부터 "우주용 적외선카메라 개발 및 로켓관측"에 관한 연구를 수행 중에 있다.

본 연구는 한국천문연구원(KASI), 한국기초과학지원연구원(KBSI), 그리고 경희대학교로 구성된 적외선 연구 그룹이 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 NASA의 과학로켓에 적외선 카메라 및 분광기를 탑재하여 근적외선 (1-2 μm) 영역에서의 우주배경복사를 관측함으로써 우주 초기의 별 및 은하에 대한 연구를 수행하려는 목적을 가지고 있다.

본 논문에서는 CIBER를 구성하는 고분산 분광기의 성능 및 과학 임무와 로켓 실험의 개요에 대해 소개하고, CIBER 광학계로 사용된 비구면 렌즈의 초정밀연삭 및 폴리싱 기술과 극저온 광학계의 조립 평가결과에 관하여 소개하고자 한다.

* 한국기초과학지원연구원

Tel. 042-865-3460, Fax. 042-865-3469

Email : kgh@kbsi.re.kr

적외선 광학계의 초정밀 가공 및 폴리싱 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 한국기초과학지원연구원

*** 한국천문연구원 위성탑재체그룹

2. CIBER 관측기기

2.1 로켓관측

CIBER는 Fig. 1과 같이 로켓의 경통 안에 위치한다. 두 대의 광시야 카메라와 저분산 분광기, 그리고 고분산 분광기로 구성되는 CIBER는 액체 질소를 이용한 cryostat 안에 장착되어 절대 온도 77 K의 온도를 유지한 상태에서 작동된다. 카메라와 분광기에 공통적으로 운용되는 전자부 시스템은 데이터 획득 및 로켓과의 인터페이스를 담당한다. 두 대의 광시야 카메라는 근적외선 우주배경복사 공간섭동을 측정하며, 고분산 분광기는 근적외선 우주배경복사의 잡음에 해당하는 태양계 내의 황도광을 정밀 측정하는 것이 목표이다.⁷

CIBER를 탑재한 로켓은 발사 후 약 600초에 걸쳐 고도 350 km까지 도달하게 된다. CIBER는 고도 200 km 이상에서 약 300-390초 동안 다섯 개의 지역을 관측하며, 관측 데이터는 실시간으로 지상으로 전송된다. 목표한 지역을 관측 가능한 시간을 택해 2008년 경에 NASA의 발사장에서 로켓을 발사할 예정이다.

2.2 고분산 분광기

고분산 분광기는 7.5 cm의 구경을 가지는 굴절 망원경으로 현대역 필터를 이용하여 0.8542 μm 부근의 좁은 영역의 파장을 관측하는데, 패브리-페로 분광기를 삽입하여 파장 분해능이 약 1000 정도가 되도록 분광 관측한다. 256 x 256 HgCdTe 적외선 센서를 사용하며, 시야각이 8.5 x 8.5도로 크기 때문에 픽셀의 각분해능은 2분이 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 우주배경복사

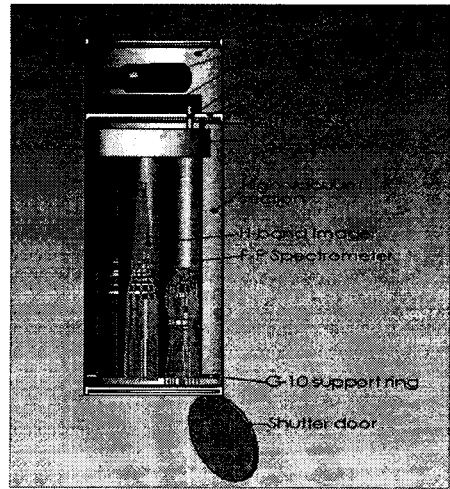


Fig. 1 3D perspective drawing of CIBER

의 가장 큰 잡음을 제거할 수 있게 된다. Fig. 2는 고분산 분광기의 광학계 설계 결과를 나타낸다.

고분산 분광기의 비구면 렌즈를 본 연구에서 제작하였으며, 렌즈의 재질은 Silica로 77 K의 극저온에서도 적외선 특성이 잘 나오는 물질을 사용하였다. 렌즈를 지탱하는 광기계부는 Aluminium A6061 T6를 사용하였으며, 분석 결과 상온과 극저온에서의 온도 차이에 의한 광학계 성능이 요구 조건을 만족시킴을 확인하였다. 제작된 렌즈는 AR (anti-reflection) 코팅을 수행하였다. AR 코팅의 요구 조건은 상온과 77 K의 온도에서 모두 렌즈 한 면의 반사율이 0.5 % 미만인 되도록 하는 것이며, 국내의 코팅 회사에서 시편을 코팅한 후 저온실험 장치를 이용하여 저온 피로시험을 실시하였다.

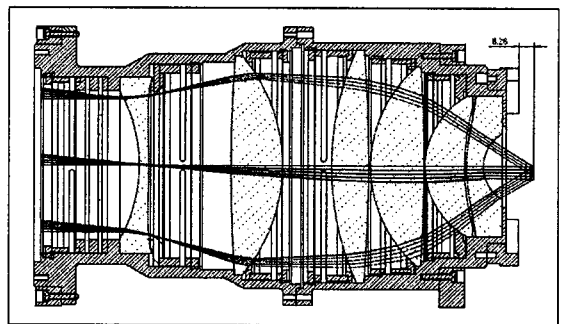


Fig. 2 Drawing of lens barrel into high-dispersive spectroscopy of CIBER

Table 1 Spec of CIBER optics

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 μm

3. 실험장비 및 방법

3.1 실험장비

3.1.1 초정밀 연삭시스템

본 연구에 사용된 초정밀가공기는 RTH사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신(DTM)이다.

다이아몬드 터닝머신은 두 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스피들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X축과 Z축으로 'T' 형태의 직교를 이루며 구동한다. X축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축 스피들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z축 구동안내면 위에는 공구대가 고정되어 연삭휠을 설치 할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직방향으로 구동한다. 안내면의 위치결정정도는

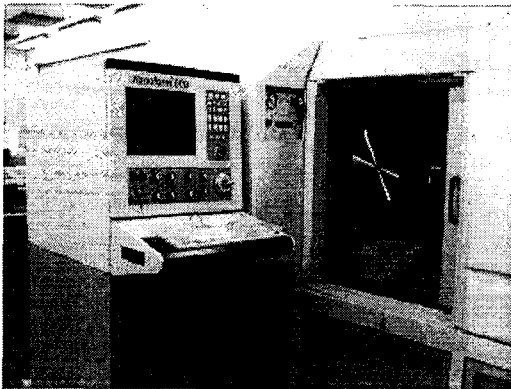


Fig. 3 The system of ultra precision lathe (Nanoform600)

0.25 μ m/300mm, 분해능은 1.25nm의 성능을 가지고 있으며, 선삭의 경우 최대 \varnothing 600mm(125kg), 연삭의 경우 \varnothing 300mm까지 가공이 가능하다. Fig. 3은 초정밀 가공 장비를 나타낸다.

3.1.2 초정밀 폴리싱 장비

초정밀 비구면 연삭공정으로 가공된 제품의 표면거칠기와 형상정밀도 향상을 위하여 본 연구에서는 일본 Kuroda사의 KRP 2200F를 사용하였다. 폴리싱 장비는 X, Y, A, C축의 4축을 동시제어가 가능하며, 최대직경 300mm까지 폴리싱이 가능하며, Fig. 4는 폴리싱 장치의 사진을 나타낸다.

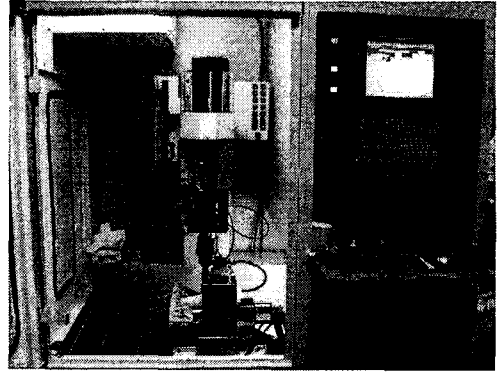


Fig. 4 The system of ultra precision polishing machine(KRP2200F)

3.1.3 광학계 측정 장치

WYKO 6000은 Veeco사 제품으로 광 간섭을 이용한 비접촉식 측정 장치로서 광학가공부품의 형상정밀도를 측정할 수 있는 장치이다. 광원의 파장은 632.8 nm이며, 분해능은 $\lambda/1,024$ 이다. 측정 대상물의 위치를 선형으로 움직이며, 기준면을 반사한 빛과 공작물에 반사되어 측정 장치에 들어간 빛과의 간섭현상을 이용하여 형상정밀도(PV) 및 Ra를 측정하는 것으로 본 연구에서는 Fused Silica 소재의 구면 형상정밀도를 측정하였다.

비구면 형상측정은 Talyer Hobson사의 비구면 측정기인 Form Talysurf series2를 사용하였다. Form Talysurf는 접촉식 측정 장치이며, 팁이 측정하고자 하는 대상물의 표면을 직접 접촉한 상태에서 선형으로 이동하면서 측정된 data를 컴퓨터로 전송하여 분석하는 장치이다. 측정범위는 최대 120 mm이며, 팁은 1.5 ~ 2.5 μ m 크기가 사용되고 있고, 본 연구에서는 2 μ m반경의 팁을 사용하였다. 폴리싱 공정에서는 연삭에서 발생하는 거친 큰 표면을 매끄럽게 하면서 동시에 형상정밀도를 향상하는 공정으로 반듯이 보정가공이 필요한 공정으로써 비구면 형상의 정확한 측정과 분석기술이 필요하다.

3.1.4 재료 및 공구

초정밀 연삭에 사용된 재료는 우주광학 소재로 사용되는 Fused Silica이며, Table 2는 광학소재의 물성치를 나타낸다. 연삭에 사용된 공구는 외경 \varnothing 70mm, 두께는 5mm, #300, #1500, #3500 레진본드 결합체의 다이아몬드 휠을 사용하였다.

Table 2 Physical properties of fused silica

Property	Value	Units
Density	2.2	gm/cc
Compressive Strength	1130	MPa
Poisson's Ratio	0.18	
Coefficient of Thermal Expansion	0.47	×10-6/°C
Thermal Conductivity	1.38	W/m°k
Max. Working Temp.	970	°C

3.2 렌즈 사양

CIBER 광학 시스템은 850 nm 영역의 근적외선 광학계로써 4매의 구면과 2매의 비구면 렌즈로 구성되어 있다. 본 연구에서는 직경 80 mm, 두께 20 mm인 오목형상의 구면과 볼록 형상의 비구면을 갖는 Fused silica 렌즈의 제작을 위하여 Table 3과 같은 광학설계 데이터를 이용하여 초정밀가공 및 폴리싱 공정을 수행하였다.

본 연구에서 설계된 비구면 형상은 비구면 계수가 포함되고 다음의 다항식으로 표현되어진다.

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots \tag{1}$$

where $r^2 = x^2 + y^2$
 c = 정점의 곡률
 k = conic constant

A, B, C, D, ... : 비구면(변형) 계수

여기서, r 는 비구면 축으로부터 수평 거리(x 축상의 거리), Z 는 비구면 축으로부터 수직 거리, R 은 곡률 반경, K 는 원뿔 상수, $A1, \dots, A12$ 등은 기본 원뿔 형태에 대해 대칭 다항 편차를 나타낸다.

Table 3 CIBER Aspheric Lens Design Data

구분	ASP	SHP	비고	
Radius	93.04	22.54	OD : Ø80mm Center t : 9.1mm	
Aspheric data	K	-0.822237		-
	A	-1.403010e-06		-
	B	6.96913e-15	-	

3.3 비구면 렌즈 초정밀 연삭

3.3.1 비구면 초정밀 연삭

연삭 가공 중 최초 황삭 가공을 할 때에는 벌크(bulk)상태의 소재를 바로 비구면으로 가공하지 않는다. 즉, 비구면에 가장 근접하는 구면의 곡률반경을 구하여 구면 가공을 수행하게 된다. 본 연구에서도 최적 구면을 만들기 위하여 Table 3의 비구면계수를 사용하여 직경 80 mm인 광학 소재에 대한 최적 구면의 곡률반경을 Tool path 프로그램을 사용하여 계산하였으며, 최적곡률 반경은 R162.05로 비구면과 최대 편차는 약 0.8 mm로써 초정밀연삭을 수행할 가공량이 매우 큰 제품이다. 따라서 초정밀 연삭을 위한 방법으로 일차적으로 입도가 큰 #300의 연삭 휠을 사용하여 20 µm정도의 형상으로 황삭 가공 후 점차적으로 입도가 낮은 연삭 휠을 사용하여 약 Rt 2 µm 이내의 형상정밀도로 연삭공정을 완료하였다.

Fig. 5는 Nanoform 600을 이용하여 연삭 하고 있는 모습을 보여주며, Fig. 6은 연삭 후 비구면 Fused Silica의 표면 형상을 측정된 결과를 나타낸다. 연삭 후 비구면 형상의 측정결과 Rt 1.9122 µm, Ra 0.1 µm의 결과를 얻을 수 있었다.

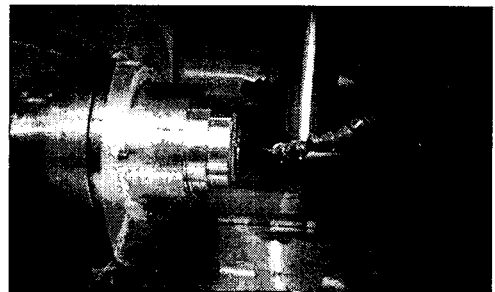


Fig. 5 Grinding of work piece by nanoform600

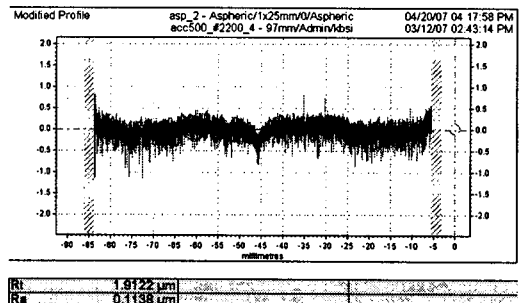


Fig. 6 Measure of Aspheric lens by Form Talysurf

3.3.2 초정밀 폴리싱

초정밀 연삭장치를 이용한 비구면 연삭 결과가 광학계의 요구정밀도에 미치지 못하므로 후 공정으로 표면 거칠기 향상과 형상정밀도 증대를 위하여 폴리싱 공정을 통하여 제품을 완성한다.

KRP 2200F 폴리싱 머신을 이용한 폴리싱 공정에서 표면 조도 향상을 위하여 노멀 헤드로 폴리싱 면적을 크게하여 가공함으로써 가공시간을 단축하고, 비구면 형상정밀도 $Rt\ 1\mu\text{m}$ 이하가 되면 마이크로 헤드를 이용하여 보정프로그램을 적용한 초정밀 폴리싱으로 요구정밀도 이내로 표면형상을 완성한다.

Fig. 7은 비구면 렌즈를 마이크로 헤드를 사용하고 있는 사진이며, Fig. 8은 Form Talysurf Series2를 이용하여 측정한 최종 형상측정결과를 나타낸다. 비구면 측정결과 $Rt\ 0.304\ \mu\text{m}$ 로서 요구 성능에 만족하였으며, 오목형상의 구면 또한 Fig. 9와 같이 구면 형상 측정결과 $Pv\ 0.201\text{wv}$ ($1\text{wv} = 632.8\text{nm}$)로서 본 과제에서 요구되어지는 형상정밀도에 만족하게 제작 완료하였다.

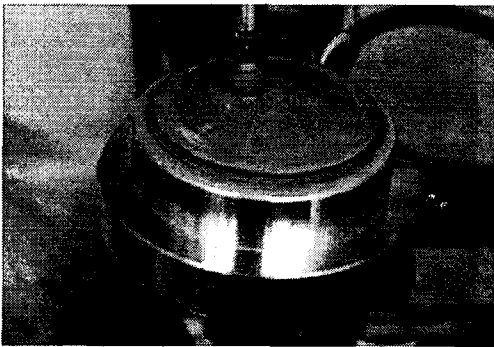


Fig. 7 Polishing machining for aspheric surface

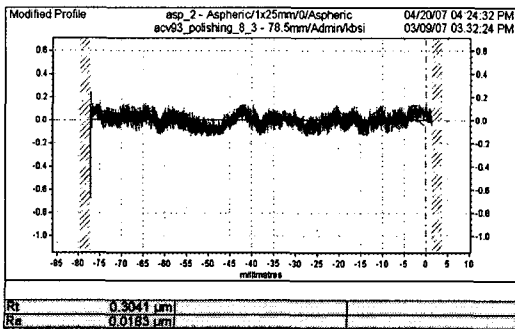


Fig. 8 Measurement of Aspheric lens by Form Talysurf

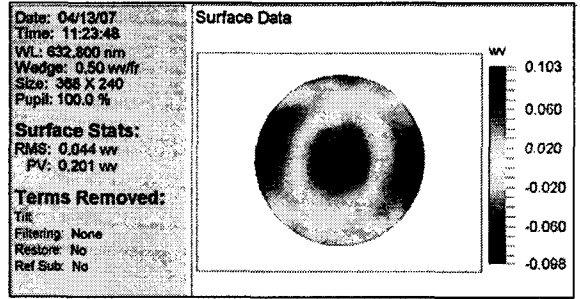


Fig. 9 Measurement of spherical lens by WYKO 6000

3.3.3 AR코팅 피로시험

CIBER가 발사되어 우주 배경 복사의 스펙트럼 관찰시 광학계가 극저온의 환경을 견뎌야 하기 때문에 Fig. 10과 같이 냉각시스템을 통하여 70K의 온도에서 5시간 동안 렌즈의 저온실험을 하였다. 저온 실험 후 렌즈의 코팅의 반사율을 측정하고 Fig. 11와 같이 850 nm 파장 영역에서 0.5% 이하의 낮은 반사율을 갖는 광학계를 제작하였으며, 본 제품을 일본의 상온 및 저온 측정이 가능한 반사율 및 투과율 측정결과 상온과 저온 상태에서 일치하는 그래프의 결과를 얻을 수 있었다.

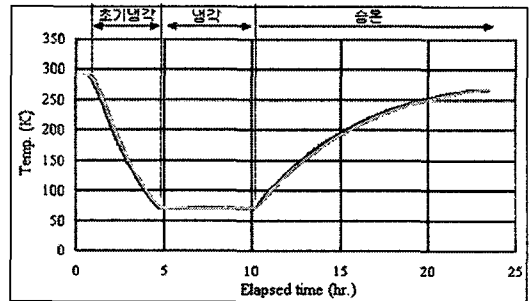


Fig. 10 Condition of cooling cycle test

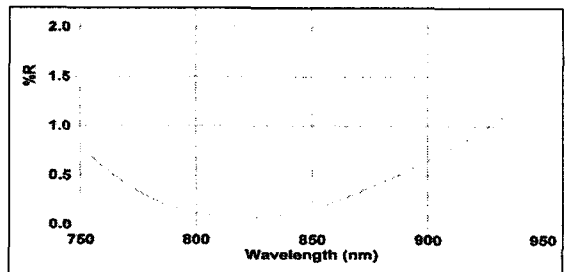


Fig. 11 Result of AR coating (spectral reflectivity at 77K, and physical strength)

4. 결론

본 논문에서는 2008년도 NASA에서 발사 예정인 CIBER 광학계 초정밀공정 개발에 관한 연구로서 광학계 중 비구면 렌즈의 Sag가 큰 렌즈의 형상정밀도 향상에 관한 개발을 바탕으로 우주 광학계에 요구되어지는 형상정밀도에 준하는 구면 Pv 0.127 μm , 비구면 Pv 0.304 μm 를 얻을 수 있었으며, 우주 공간의 환경과 동일한 냉각시스템을 통한 저온 실험 후 반사율 측정 결과 850 nm영역에서 0.5% 이하로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

초정밀가공 완료된 Fused silica 비구면 렌즈를 로켓용 광학계 전체의 조립과 평가를 담당한 일본의 우주과학연구소(Institute of Space and Astronomy Science, ISAS)에 납품하여 비구면 광학계의 표면형상 및 정밀도를 평가받아 2008년 발사예정인 로켓의 광학계로 조립 완료 하였다.

향후 국제 공동과제로 시작된 본 과제를 바탕으로 국내 독자적인 광학계 설계 및 제작, 평가를 통하여 국산화를 실현시키며, 국가적 위상을 정립하는 좋은 계기가 되리라 판단된다.

후기

본 연구는 “우주용 적외선카메라 개발 및 로켓 관측” 사업에서 수행중인 연구결과이다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Kim, Y. S. and Back, H. Y., “Electro-Optical Camera of Korea Multi-Purpose SATellite,” Optical Science and Technology, Vol. 6, No. 4, pp.17-22, 2002.
5. Yang, S. C., Kim, G. H., Kim, H. S., Lee, S. Y., Kim, M. S. and Won, J. H., “Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Aerospace,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No.2, pp.19-24, 2007.
6. Kim, G. H., Kim, H. S., Yang, S. C., 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., Lee, I. J., Kook, M. H. and Lee, D. H., “Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Aerospace and Space,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp.25-32, 2007.