

◆ 특집 ◆ 광학부품 제조기술

우주관측용 광학계의 적외선 초자 초정밀 가공 기술개발

Development of the Ultra Precision Machining of IR Material for Space Observation Optical System

양순철^{1,✉}, 원종호²
Sun Choel Yang^{1,✉} and Jong Ho Won²

1 한국기초과학지원연구원 (Korea Basic Science Institute.)

2 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam Univ.)

✉ Corresponding author: md941057@kbsi.re.kr, Tel: 042-865-3462

Manuscript received: 2010.9.20 / Accepted: 2010.10.22

Using an IR (infrared) optical system of observation and research were performed long before. Nowadays satellites equipped with IR optical system observe the earth and universe. In this paper, we developed the IR optical system for main payload of the STSAT-3 (Science and Technology Satellite -3). We studied the ultra precision machining technique to fabricate FPL-53 lenses which is the IR optical material for space observation camera of the STSAT-3. DOE (Design of Experiment) was used to find best machining characteristic for FPL-53. Finally we fabricated FPL-53 aspheric lens with the form accuracy of P-V 0.36 μm .

Key Words: Multi Infrared Imaging System (적외선 영상 시스템), FPL-53 (적외선 광학초자), Ultra Precision Machining (초정밀 가공), Ultra High Accurate 3D Profilometer (초고정도 3차원 측정기)

기호설명

 V_d = abbe number n_d = refractive Index, helium d-line(587.56 nm) n_F = refractive Index, hydrogen F-line(486.13 nm) n_C = refractive Index, hydrogen C-line(656.27 nm)

1. 서론

적외선 광학계를 이용하여 관측 및 분석 연구가 이전부터 진행되어 왔으며 근래에는 인공위성에 적외선 광학계를 탑재하여 우주 및 지구 관측 등 연구의 범위를 확대 하고 있다.¹⁻³

본 논문에서는 과학기술 위성 3 호 주 탑재체

에 탑재 되는 우주관측카메라 광학계의 적외선 초자 초정밀가공특성에 대해서 연구를 하였다. 우주관측카메라는 파장 0.9 ~ 2.0 μm 영역에서 우주를 관측하면서 은하의 진화 및 초기 우주의 진화를 조사 하게 된다.^{4,5}

우주관측 위성 카메라용 비구면 렌즈 개발을 위하여 IR 광학소재인 FPL-53 의 초정밀 절삭특성을 파악하여 요구되는 형상정밀도에 준하는 비구면 렌즈를 개발 하고자 한다. 최적의 초정밀 가공특성을 찾아내기 위해 실험 계획법 (Design of Experiment DOE)을 이용하였으며, 표면 거칠기 측정데이터를 분산 분석하여 공구 윗면 경사각, 절삭속도, 이송속도 및 절삭 깊이에 대하여 어느 요인이 절삭조건에 유의한 영향을 미치는지를 파악

하고 그 영향의 양을 확인하였다.

과학기술위성 3 호는 순수 국산기술로 제작 하는 것에 초점을 두고 FPL-53 비구면 렌즈 초정밀 가공공정 기술을 개발하여 수입대체 효과를 얻고자 한다.

2. FPL-53 의 광학특성

FPL-53 은 일본 OHARA 사에서 개발한 초저분산 광학 소자이며 정식명칭은 S-FPL53 이다. Table1 의 광학특성 중에서 n_d 는 파장 587.56 nm 에서의 굴절률이다. 굴절률은 진공에서의 빛의 속도를 물질에서의 빛의 속도로 나눈 값이며, 파장과 온도에 따라 변한다. 본 소재의 굴절률은 1.43 이며, 일반적인 유리소재의 굴절률이 1.4 ~ 1.9 인 것을 보면 광학초자들 중에서 작은 굴절률을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 광학 소재의 또 다른 중요한 특성 중 하나인 아베수(V_d)는 다음의 식과 같이 굴절률에 의해 표현된다.

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1)$$

여기서 n_F 와 n_C 는 각각 파장 486.13 nm 와 656.27 nm 에서의 굴절률이다. 물질의 굴절률은 앞서 언급했듯이 파장, 즉 색에 따라 변화한다. 이러한 굴절률의 변화를 색 분산이라고 하며 아베수는 색 분산의 역수이다. 즉 아베수가 크다면 파장에 따른 굴절률의 변화가 작다는 것이 되고 이것은 색수차가 크게 발생하지 않는 것을 의미한다. FPL-53 의 경우 아베수가 95 로 매우 높은 초저분산 광학 초자임에도 불구하고 비슷한 아베수의 다른 광학 초자들과 비교하여 1.43 이라는 비교적 높은 굴절률을 가지고 있기 때문에 가공특성에 따라 좋은 광학초자로 사용될 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장비

Fig. 1 은 본 실험에서 사용한 5 축 자유곡면 가공기 Freeform 700A(5 axis Freeform generator)를 보여준다. 천연 다이아몬드 화이트를 이용한 선삭의 경우 최대 Ø700 mm 까지 가공이 가능하고 장비의 분해능은 0.8 nm 이다.

Table 1 Property of the FPL-53

Optical Properties		
Refractive Index	n_d	1.43875
Abbe Number	V_d	94.93

Fig. 2 는 표면 거칠기 측정 장비로써 비 접촉식 표면 형상측정기 NT 2000 을 사용하였으며 20 배의 배율로 표면 거칠기를 측정하였다. 측정기의 분해능은 0.1 nm 이며 자동 초점 이송방식이 가능한 장비이다.

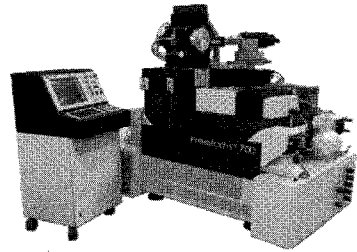


Fig. 1 Freeform 700A(5-axis Freeform generator)



Fig. 2 Surface roughness measurement system (NT 2000)

Fig. 3 은 일본 Panasonic 사에서 제작된 UA3P (Ultra high Accurate 3D profilometer)이다. UA3P 는 초고정도 3 차원 표면 형상 측정기로써 측정면에 원자간력이 작용하는 영역까지 근접하여 측정압력

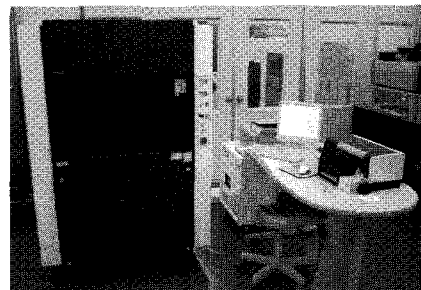


Fig. 3 Photograph of measuring instrument (UA3P)

0.5 gf 이하로 일정하게 유지하면서 최대 60°의 경사면을 측정할 수가 있다. 측정범위로는 X, Y, Z 축 200×200×45 mm 이며 분해능은 X, Y 축 측정범위 100 mm 이하에서 0.05 μm 이내이고 200 mm 이하에서는 0.1 μm 이다.⁶

3.2 실험방법

FPL-53 의 초정밀 절삭특성을 얻기 위하여 실험계획법을 이용하였으며 가공 조건에 따른 표면 거칠기의 데이터를 분석한 결과 최적의 절삭 조건을 찾을 수 있었다. 표면 거칠기에 영향을 주는 인자는 공구윗면 경사각, 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이로 예측할 수 있다.

실험방법으로 실험계획법의 3⁴ 요인배치법을 이용하여 실험데이틀을 작성하고 Table 2 에 표기한 절삭 속도, 이송량, 절삭깊이, 공구각과 같은 인자들을 3 수준으로 하여 조건 변화에 따른 표면 거칠기를 상용프로그램인 MINITAB 의 분산분석을 이용하여 초정밀 절삭가공에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 2 Experimental condition

Item	Cutting condition
Material	FPL-53
Cutting speed (m/min)	103, 122, 151
Feed rate (mm/min)	3, 5, 10
Depth of cut (μm)	1, 5, 10
Tool rake angle (°)	-10, -15, -25
Nose radius (mm)	0.5
Cutting fluid	MIST

실험을 위한 시편은 Fig. 4 와 같이 직경 40 mm, 두께 5 mm 의 시편을 제작하여 공구 윗면 경사각과 절삭속도, 이송속도 및 절삭 깊이에 대하여 표면 거칠기를 측정하였다. 절삭특성을 파악하기 위한 실험 시편은 평면으로 제작이 되었으며 조건에 따른 초정밀 절삭 가공 후 Fig. 4 에서와 같이 직경 30 mm 되는 부분을 선정하여 표면의 4 지점을 동일한 방법으로 반복 측정한 결과의 평균값으로 표면 거칠기 결과를 산출하였다. 동일한 부위를 측정하기 위하여 측정 위치를 표기하며 측정을 수행하였고, Fig. 5 는 Freeform 700A 를 이용해 가공을 하고 있는 모습을 보여준다.

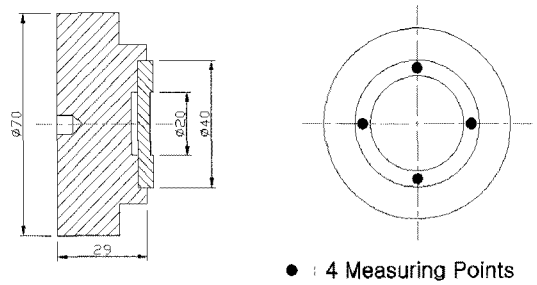


Fig. 4 Work-piece for test

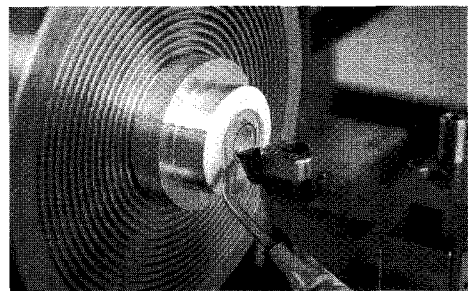
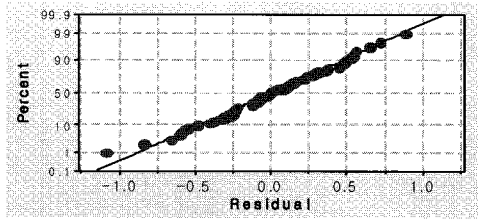


Fig. 5 Ultra precision machining of the FPL-53 sample

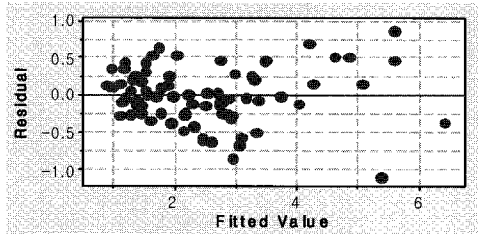
4. 실험결과 및 고찰

4.1 표면 거칠기 측정에 관한 잔차 Plot

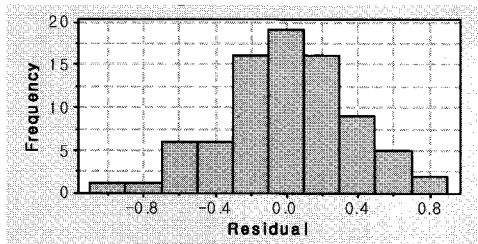
실험조건에 따른 초정밀 절삭 가공 후 표면 거칠기 결과의 특성치에 대한 잔차 분석을 하였다. Fig. 6(a)에서는 잔차 정규 확률도로 잔차의 정규성을 검토하는 것으로, 잔차가 정규 분포를 따르면 Plot 의 점들이 일반적으로 직선 형태를 이루게 된다. 하지만 Plot 의 점들이 직선 위치에서 벗어나게 되면 정규성 가정이 올바르지 않는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 6(a)에서는 정규성 그래프에서 점들이 직선에 근접하게 위치하므로 잔차의 분포상태가 정규분포를 따르고 있다고 할 수 있다. Fig. 6(b)는 잔차 대 적합치에서는 변동(variation)에 특별한 이상이 없음을 보여준다. Fig. 6(c)처럼 히스토그램 역시 잔차의 정규성을 검토하는 것으로 평균값을 기준으로 좌우 대칭의 종모양을 이루면 정규 분포를 따른다고 할 수 있다. Fig. 6(d)는 잔차 대 데이터 순서는 모든 잔차를 데이터 수집 순서로 표시한 것이다. 특히 시간과 관련된 효과에서 불규칙하지 않은 오차를 찾는 경우에 사용 할 수 있는 것이며 Fig. 6 (d)에서 특이점을 찾을 수 없는 것으로 보아 본 실험에서는 특이사항이 없음을 알 수 있다.



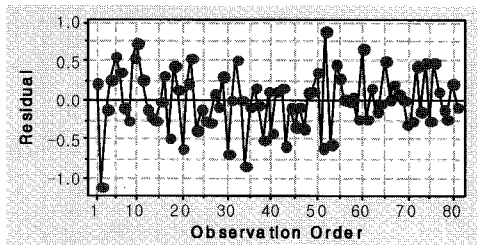
(a) Normal probability plot of the residuals



(b) Residuals versus the fitted values



(c) Histogram of the residuals



(d) Residuals versus the order of data

Fig. 6 Residual model diagnostics for surface roughness [nm]

4.2 주 효과에 의한 표면 거칠기 영향

FPL-53 시편을 가공조건에 따라 초정밀 가공한 후 표면 거칠기 측정값의 주 효과 (main effects)에 따른 크기를 비교하였다. Fig. 7 에서는 주 효과의 크기를 비교하기 위해 분산 분석(analysis of variance)을 수행한 그래프를 보여준다. 그래프에서 중심부의 수평선은 총 평균을 나타내며, 각 점들은 각 조건에서의 평균값을 뜻한다. 주 효과를 잇면 경사각, 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이의 4 가지 요인으로 나누어 분석한 결과 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자 중 절삭 깊이가 가장 큰 영향

을 미쳤다. 윗면 경사각과 절삭속도가 비슷한 영향을 미치고 있음을 그래프에서 나타내고 있다. 또한 윗면경사각 -25° 바이트를 사용했을 때 표면 거칠기 결과가 가장 양호 했으며 절삭 속도 변화에 따른 측정결과는 저속 103 m/min (1100rpm)에서 보다는 고속인 151 m/min (1600rpm)에서 더 양호한 측정결과를 얻을 수 있었다. 이송속도의 변화에 따른 측정 결과로는 예상대로 속도가 낮은 경우에서 더 양호한 표면 거칠기 결과를 보여준다.

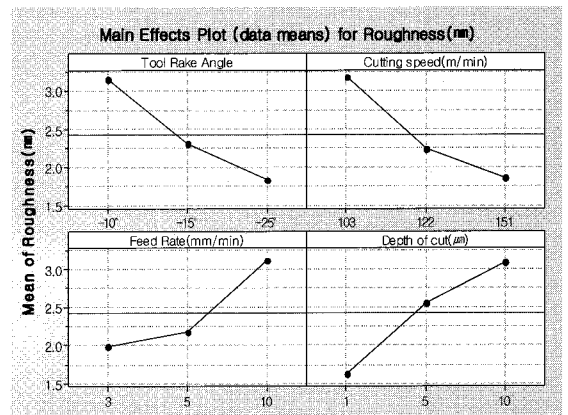


Fig. 7 Main effects plot for surface roughness

4.3 교호작용에 의한 표면 거칠기 영향

FPL-53 의 초정밀 가공특성을 4 가지 요인으로 교호작용 (interaction)에 의해 표면 거칠기에 미치는 영향을 결과를 Fig. 8 에서 보여준다. 각각의 가공조건에 따른 측정결과를 보면 공구 윗면 경사각 -25° , 절삭속도 151 m/min, 이송속도 3 mm/min, 절삭 깊이 1 μm 일 때 Fig. 9 에서와 같이 가장 양호한 표면 거칠기 Ra 0.64 nm 를 얻었다. Table 2 는 FPL-53 소재의 초정밀 가공 최적 조건을 나타낸다.

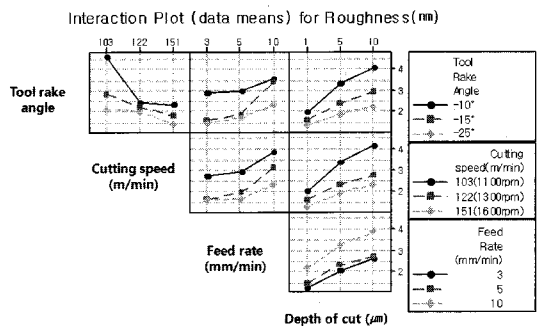


Fig. 8 Interaction plot for roughness

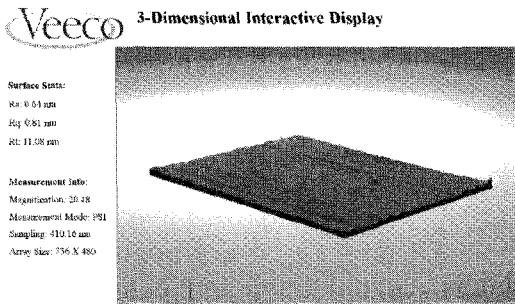


Fig. 9 Measurement of surface roughness by NT2000

Table 3 Optimism condition of ultra precision machining FPL-53

Material	FPL-53
Nose radius of tool (mm)	0.5
Cutting speed (m/min)	151
Feed rate (mm/min)	3
Tool rake angle (°)	-25
Depth of cut (μm)	1

4.4 FPL-53 비구면 렌즈 초정밀가공

실험에서 얻어진 FPL-53 초정밀 절삭특성을 이용하여 MIRIS 우주관측카메라 광학계에 사용되는 비구면 렌즈를 초정밀 가공하였다. FPL-53 소재가 글라스임에도 천연다이아몬드 화이트로 가공 가능한 정도가 작고 마모도가 높기 때문에 가능했다. 하지만 열팽창계수가 크기 때문에 취급 시 온도의 변화에 민감하다는 것에 주의를 기울여야 한다. 또한 파장 350 nm 에서부터 2400 nm 까지 95 %이상의 투과율을 가지고 있어서 광학계 조립 후 가시광선 파장을 이용하여 측정이 가능한 장점

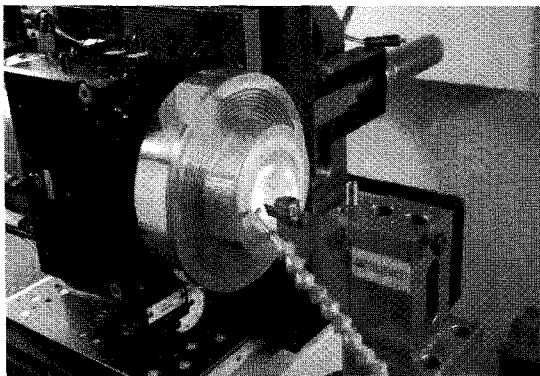


Fig. 10 Ultra precision machining FPL-53 aspheric lens

을 가지고 있다. Fig. 10 은 비구면 렌즈를 초정밀 가공하는 사진이다. 비구면 렌즈를 고정시키기 위하여 알루미늄 6061-T6 를 이용하여 렌즈가 안착되는 부분을 초정밀가공 하여 렌즈 표면에 스크래치가 생기지 않도록 하였다.

Fig. 11 은 비구면 렌즈 가공 후 표면 거칠기를 측정한 결과를 보여준다. FPL-53 소재의 초정밀가공은 결코 쉽지 않았다. 비구면 렌즈의 곡률이 54 mm 로 적어서 바이트의 사용각도를 많이 사용하게 되므로 정도가 좋은 waviness 50 nm 이하의 일본의 A.L.M.T 사 바이트를 제작 주문하여 사용하였다.

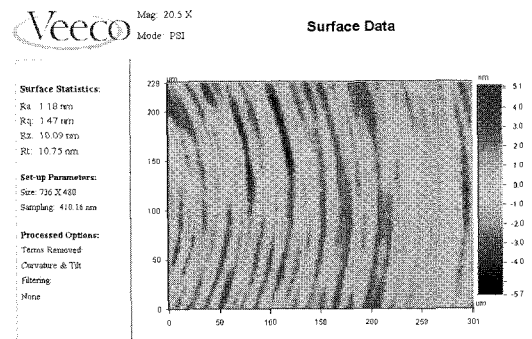


Fig. 11 Surface measurement data of aspheric lens by NT 2000

Fig. 12 는 초 고정도 3 차원 측정기 UA3P 를 이용하여 비구면 렌즈 측정하는 모습을 보여준다. 측정방식은 렌즈의 중심으로부터 3 차원 원주 측정방식으로 측정 후 분석하였다. Fig. 13 은 형상정밀도 측정 결과를 보여준다. 측정결과로 형상정밀도 P-V 0.363 μm 를 얻어 광학설계에서 요구되는 형상정밀도는 P-V 0.5 μm 이하를 만족하였다.

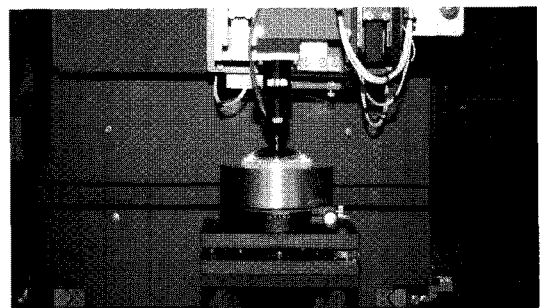


Fig. 12 Form accuracy measurement of aspheric lens

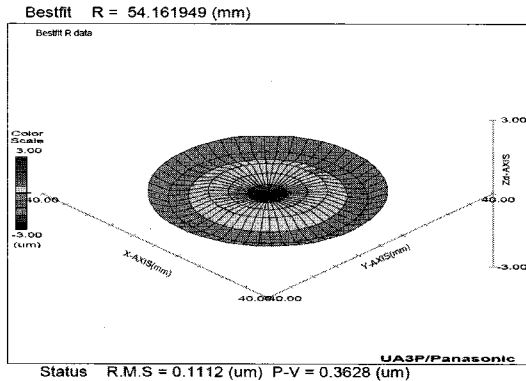


Fig. 13 Measurement data of aspheric lens by UA3P

5. 결론

본 논문에서는 과학기술위성 3 호 주 탑재체 우주관측카메라 광학계에 사용되는 초 저분산 광학초자 FPL-53 의 초정밀 절삭 특성을 파악하여 비구면 렌즈 가공에 적용하였다.

실험 계획법을 이용하여 FPL-53 초정밀 절삭특성 결과 노우즈 반경 R0.5 mm, 절삭속도 151 m/min, 이송속도 3 mm/min, 절삭 깊이 1 µm 인 조건에서 가장 양호한 표면 거칠기 Ra 0.64 nm 를 얻었다. 또한 공구의 윗면 경사각에 따른 표면 거칠기 측정 결과로는 경사각 -25 ° 공구를 사용했을 때 정도가 높은 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다.

실험 조건에 따른 표면 거칠기 측정결과에 영향을 미치는 인자 순서로는 첫 번째로 절삭 깊이며 뒤로 윗면경사각, 절삭속도, 이송속도 순서이다. 실험을 통한 결과를 토대로 FPL-53 비구면 렌즈 초정밀 가공한 결과 표면 형상정밀도 P-V 0.3628 µm 의 결과를 얻어 요구되는 정도를 만족시킬 수 있었다.

참고문헌

1. Yang, S. C., Kim, G. H., Kim, H. S., Shin, H. S. and Won, J. H., "A Study on the Characteristics on Ultra Precision Machining of IR Camera Mirror," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 44-50, 2006.
2. 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 Astronomy and Space," Journal of the Korean

- Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 25-32, 2007.
3. Yang, S. C., Kin, 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.
4. Yuk, I. S., Jin, H., Lee, S., Park, Y. S., Lee, D. H., Nam, U. W., Park, J. H., Han, W. Y. and Lee, J. W., "Preliminary Optical Design of MIRIS, Main Payload of STSAT-3," Publications of the Korean Astronomical Society, Vol. 22, No. 4, pp. 89-97, 2007.
5. Moon, B. K., Jeong, W. S., Cha, S. M., Ree, C. H., Park, S. J., Lee, D. H., Yuk, I. S., Park, Y. S., Park, J. H., Nam, U. W., Matsumoto, T., Yoshida, S., Yang, S. C., Lee, S. H., Rhee, S. W. and Han, W., "Development of the Mechanical Structure of the MIRIS SOC," Publications of the Korean Astronomical Society, Vol. 24, No. 1, pp. 53-64, 2009.
6. Tsutsumi, H., Yoshizumi, K. and Takeuchi, H., "Ultrahigh Accurate 3D Profilometer," Proc. SPIE, Vol. 5638, pp. 387-394, 2005.