

◆특집◆ 항공우주용 광학계의 초정밀가공기술 동향 및 적용

항공우주용 적외선 광학계 초정밀가공기술

양순철 *, 김건희 **, 김효식**, 이상용**, 김명상**, 원종호***

Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Aerospace

Sun Choel Yang *, Geon Hee Kim **, Hyo Sik Kim**, Sang Yong Lee**, Myoung Sang Kim** and Jong Ho Won***

Key Words : SPDTM(Single Point Diamond Turning Machine), Surface Roughness (표면거칠기), IR(적외선), Aspheric mirror (비구면 미러), Reflector (반사경), FE code (유한요소 해석코드)

1. 서론

단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 금속 반사경의 초정밀 가공은 1960 년대 미국에서 공기 베어링을 사용한 초정밀 선반의 개발과 더불어 시작되었다. 그 이후의 가공기계 · 재료 · 공구나 주변 기술 등의 정밀화와 진보에 따라 초정밀 가공기술이 급속하게 보급되어 왔다. 비구면 반사경은 주로 숙련된 작업자의 수작업에 의존하여 제작되었으나, 1980 년대에는 컴퓨터를 이용한 기계제어 기술의 발달로 다이아몬드 선삭이 가능한 연질 금속을 초정밀 선반에서 가공하는 기술이 개발되었다.

또한, 고기능의 우주항공용 관측시스템에 대한

요구와 더불어 반사경의 대구경화가 이루어져 최근에는 이러한 대구경 반사경의 가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{1,3}

항공우주에 사용되는 적외선 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 관측뿐만 아니라 군사용 카메라 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다. 하지만 독자적인 IR 영역 영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 적외선 카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다.⁴

본 연구에서는 적외선 카메라 연구 부품의 국산화 일환으로 AI 6061-T651 에 대한 형상정밀도가 $\lambda/2$ ($\lambda=632.8nm$) 이하를 요구하는 반사경의 가공에 있어서 형상변형을 유발할 수 있는 인자들을 가정하고 그에 대한 영향을 유한요소해석 코드를 이용하여 밝혀내고, 초정밀가공 최적조건 절삭실험을 통한 항공용 적외선 비구면 광학계의 초정밀 가공에 관한 연구사례를 소개하고자 한다.

* 한국기초과학지원연구원
Tel. 042-865-3462, Fax. 042-865-3469
Email md941057@kbsi.re.kr

** 한국기초과학지원연구원

*** 충남대학교 기계공학과

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

2. 비구면 반사경의 유한요소 해석

2.1 유한요소해석 모델

AI 6061-T651 에 대한 형상정밀도가 $\lambda/2$ 이하를 요구하는 반사경의 가공에 있어서 형상변형을 유발할 수 있는 인자들을 가정하고 그에 대한 영향을 유한요소해석 코드를 이용하여 밝히고자 한다. 각 인자에 대한 고찰은 각각 독립적으로 수행되었으며 초정밀 가공기는 이상적인 조건으로 운전되는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 고려한 인자들은 스피ndl의 회전수, 반사경이 가공기에 장착되었을 때의 고유진동수, 가공물의 온도상승이고 초정밀 최적가공조건을 찾아내었으며 이렇게 얻은 AI 가공특성을 이용하여 IR 광학계에 AI 합금을 적용하기 위해 본 연구를 수행하였다 Fig. 1 는 반사경에 대한 대칭인 유한요소 해석모델을 보인다. 사용된 요소는 8 절점의 3 차원 solid 요소이다. 볼트 체결부를 제외하면 축대칭 모델을 활용할 수 있으나 반사면의 반대면에 체결판을 형성하여 3 개의 볼트로 구속조건을 부여하므로 3 차원 대칭 모델을 사용하였다.

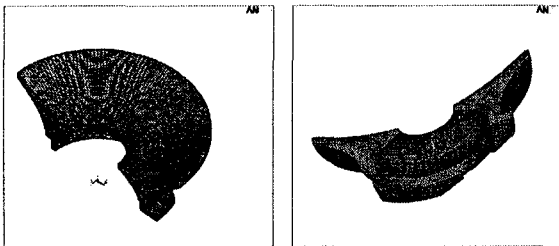


Fig. 1 Symmetric FE model for the reflector

2.2 스피ndl의 회전속도에 따른 영향

가공물은 스피ndl의 회전속도에 따라 변형정도가 달라진다. Fig. 2(a)는 스피ndl의 회전속도가 1200rpm 일 경우에 대한 축방향 변위를 보인다. 반경방향으로 반사면의 안쪽면은 양의 방향 변위를 보이나 바깥쪽면은 음의 방향 변위를 보인다. 이와 같은 축방향 변위 형태는 회전속도에 따라 모두 동일하나 그 값이 다르다. Fig. 2(b)는 스피ndl의 회전속도가 1000rpm 에서 2000rpm 까지 대하여 반경에 따른 축방향 변위를 보인 것이다. 회전속도에 따라 축방향 변위의 최대값이 비례하는

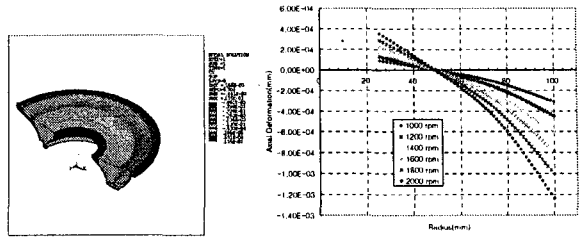


Fig. 2 Axial deformation of the reflecting surface for various revolution velocities

것을 확인할 수 있으며 반경 49mm 를 기준으로 이 보다 작은 반경영역에서는 양의 변위를 이보다 큰 반경영역에서는 음의 변위를 보인다. 회전속도가 2000rpm 의 경우 축방향 최대변위는 $1.24 \mu\text{m}$ 로 약 2λ 의 값을 보인다.

2.3 반사경의 고유진동수

일반적으로 회전구조물은 여러 가지 요인에 의하여 조화하중을 받게 된다. 따라서 구조물의 고유진동해석을 수행하였다. Fig. 3 는 반사경의 볼트부를 완전고정하였을 경우에 대한 고유진동해석 결과의 일부를 보인다. 반사경의 기본 고유진동수는 1741Hz 로 운전회전속도에 비해 매우 높은 값을 보이므로 공진의 가능성은 전혀 없는 것으로 판단된다. 반사경의 변형형상과 유사한 모드는 5561Hz 에서 보인다.

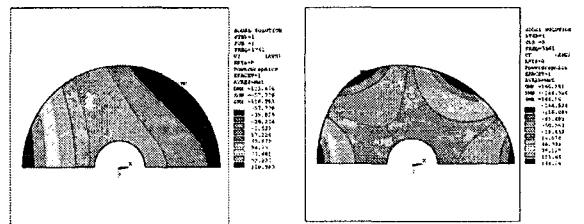


Fig. 3 Fundamental and 3 sine wave mode shape in the axial direction

2.4 온도변화에 따른 영향

초정밀 가공은 항온항습실에서 이루어지므로 정상상태에서는 온도차가 발생하지 않으나 절삭가공시에는 국부적으로나 전체적으로 작은 온도변화가 발생된다.

2.4.1 국부적 온도변화

가공물에는 절삭시 온도증가를 방지하기 위하여 절삭유나 공기를 공급되지만 국부적으로 온도상승을 초래할 수 있다. Fig. 4는 반사경의 반사면이 절삭되는 것을 모사하기 위하여 일부 절점에 임의의 온도인 5℃를 가하여 열해석을 수행한 결과와 이 결과를 이용한 축방향 변위를 보인다. 반사경의 안쪽면에 국부적 온도상승은 절삭되는 부분의 축방향 양의 변형을 보이거나 바깥쪽으로 절삭부가 이동하게 되면 절삭부가 음의 방향 변형을 보이는 것을 볼 수 있다.

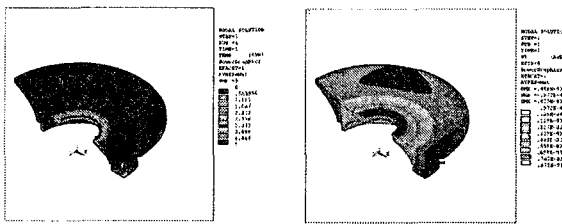


Fig. 4 (a) Inner surface

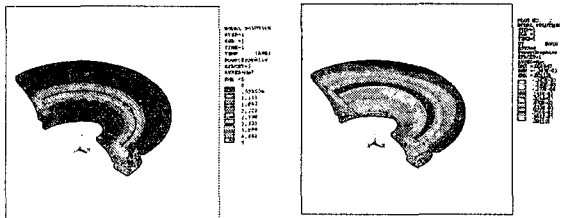


Fig. 4 (b) Middle surface

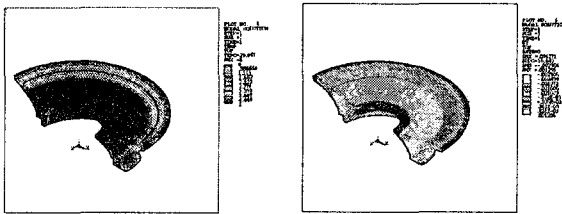


Fig. 4 (c) Outer surface

Fig. 4 Temperature distribution and axial deformation contours for local temperature increment cases

2.4.2 균등한 온도변화

절삭기산이 오래 지속되어 반사경 전체가 균등한 온도인 5℃의 온도상승을 가질 경우의 축방향 변형을 Fig. 5에 나타내었다. 해석에서 구한

PV 값은 약 8.509 μm이므로 온도와 PV 값이 선형적이라 가정하면 1℃의 온도변화에 대하여 약 1.702 μm의 PV 값을 예측할 수 있다. 이 값은 주어진 요구조건에 비해 매우 큰 값으로 가공물의 작은 온도상승이라도 반사경의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

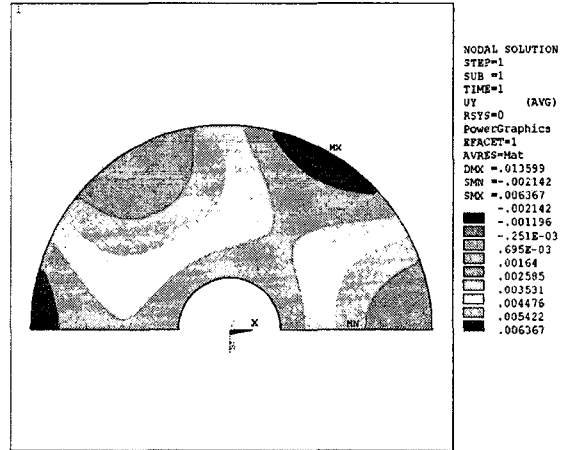


Fig. 5 Axial deformation by the uniform temperature increment

3. 항공용 적외선 광학계의 초정밀가공

본 연구에서는 적외선 카메라 연구 부품의 국산화 일환으로 AI 6061-T651에 대하여 주축 회전수, 절삭깊이, 이송속도에 대한 초정밀 최적가공조건을 찾아내었다. 이렇게 얻은 AI 가공특성을 이용하여 IR 광학계에 AI 합금을 적용하기 위한 형상정밀도 향상에 관한 연구를 수행하였다.

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 RTH사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신(SPDTM)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 다이아몬드 바이트를 설치할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직방향으로 구동한다.⁵⁻⁷

안내면의 위치결정정도는 0.25 $\mu\text{m}/300\text{ mm}$, 분해능은 1.25 nm의 성능을 가지고 있으며, 선삭의 경우 최대 $\varnothing 600\text{ mm}$ (125 kg), 연삭의 경우 $\varnothing 300\text{ mm}$ 까지 가공이 가능하다. Fig. 6은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.

초정밀 가공실은 온도 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $30\pm 5\%$, Clean Room class 10,000인 항온항습의 크린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반구조로써 장비 하부는 3Point Air Bag으로 지지된다.

표면 거칠기 측정 장비로는 비 접촉식 표면형상 측정기 WYKO사의 NT 2000을 사용하였다. 측정기의 측정범위는 최대 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 이며, 측정범위로는 0.1 nm~150 μm 이며, 분해능은 0.1 nm이고 자동 포커싱 타입이다. 표면 형상측정으로는 접촉식 측정기인 Form Talysurf Series2와 Laser Interferometer WYKO6000을 이용하였다.

Fig. 7은 Laser Interferometer로 형상 정밀도를 측정하는 모습이다.

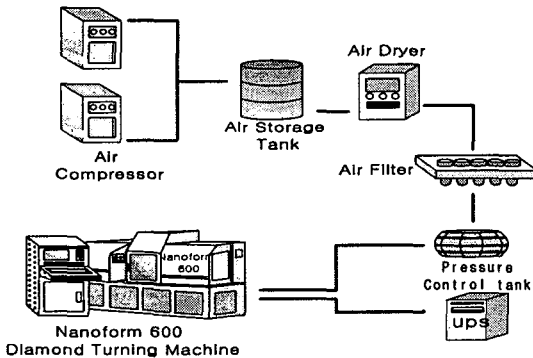


Fig. 6 The system of ultra precision lathe

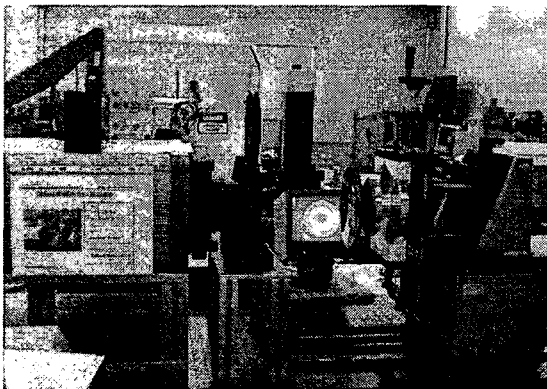


Fig. 7 Measurement of work piece

Table 1 Experimental Condition

Item	Cutting condition
Work piece	Al6061-T651
Nose radius(mm)	0.5
Cutting speed (m/min)	110, 150, 190, 220, 260, 300
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(μm)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Vacuum pressure(in.Hg)	-20
Cutting fluid	Air+EDM oil

3.2 실험방법

알루미늄 합금인 AL6061-T651의 초정밀 최적 가공 조건을 찾기 위하여 절삭속도, 절삭 깊이와 이송속도에 대한 표면 거칠기를 측정하여 최적 초정밀 가공조건을 찾아내었으며 가공조건은 Table 1과 같다. 또한 절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험 장치의 개략도는 Fig. 6에서 보여주고 있다. 실험은 단결정 Diamond 공구로 $\varnothing 50\times 120$ 크기의 Al 6061-T651을 단면절삭방법으로 실험을 실시하였다. DTM에 설치된 압전형 공구동력계를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호를 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 PC로 전송하여 데이터 처리하였다. 그리고 Al6061-T651 실험결과로 얻어진 최적절삭 조건을 이용하여 대구경 비구면 반사경을 제작하였으며 대구경 반사경의 표면형상을 측정하기 위하여 Laser interferometer WYKO6000을 사용하였다. Table 1에서 실험조건을 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Al 6061-T651 절삭특성에 관한 평가

4.1.1 표면 거칠기 특성

Fig. 8은 단결정 다이아몬드 바이트를 사용하여 Al6061-T651을 이송속도 10 mm/min, 절삭 깊이 4 μm 로 고정하고, 절삭 조건에서 주축 회전수 변화에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 110~300 m/min까지 절삭속도를 단계적으로 변화시켰으며, 그 결과 110 m/min에서 점점 회전수를 증가시키에 따라 표면 거칠기가 향상되고 220 m/min 이상의 속도에서는 표면 거칠기의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 확인함으로써 220 m/min 이상으

로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 유리하다는 것을 알 수 있다.

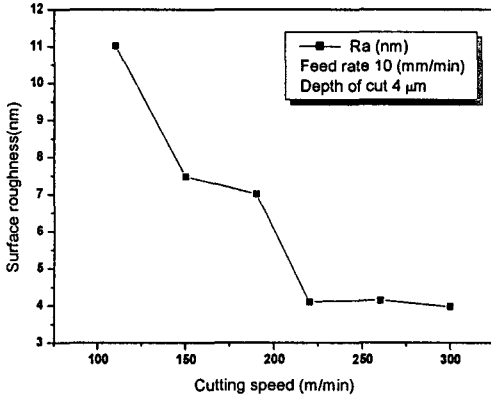


Fig. 8 Surface roughness versus cutting speed

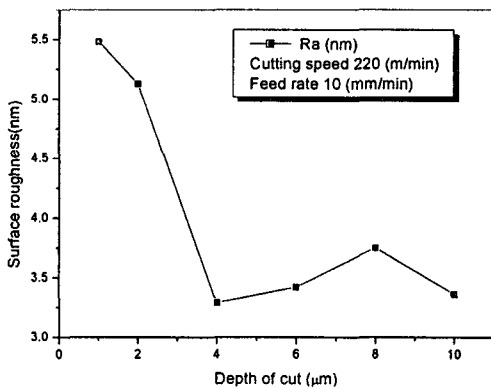


Fig. 9 Surface roughness versus depth of cut

Fig. 9는 Al6061-T651을 단결정 다이아몬드 바이트로 절삭속도 220 m/min, 이송속도를 10 mm/min으로 고정하고, 절삭 깊이에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭 깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 9의 결과를 볼 때 4 μm까지 표면 거칠기가 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있고, 4 μm 이상에서는 표면 거칠기가 거의 일정하나 조금씩 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 Al6061-T651의 최적표면을 얻기 위해 표면 거칠기가 가장 좋은 220 m/min의 절삭속도, 절삭 깊이가 4 μm로 고정하고 1~10 mm/min까지의 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기 실험결과

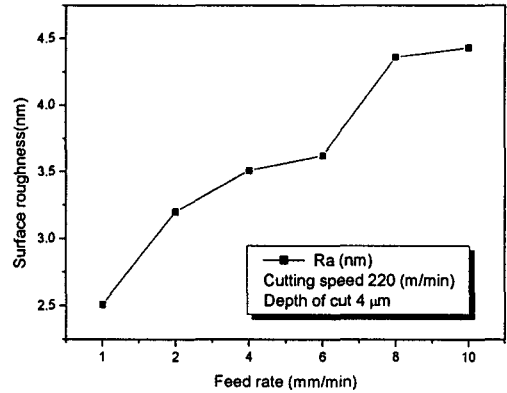


Fig. 10 Surface roughness versus feed rate

를 나타낸다. 그 결과 본 초정밀 가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선형의 표면을 형성시킨다. 이송속도는 동일한 절삭 깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면 거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 표면 거칠기 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기($R_{max} = f^2 / 8R$)와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 실험결과와 이론적 표면 거칠기 값과는 차이가 있는데, 이와 같은 이유는 실험에 사용된 알루미늄 합금이 연성이고, 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.2 직경 200 mm 대구경 구면 반사경 제작

실험을 통하여 얻어진 Al6061-T651의 최적 가공조건을 통하여 곡률 236 mm, 직경 200 mm의 대구경 구면 반사경을 제작하였다. Vacuum chuck의 진공압력에 의한 제품의 변형을 방지하기 위하여 특수한 지그를 설계 제작이 필요하였으며, 이에 일반적인 평판형상의 지그를 사용한 결과보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 11은 SPDTM을 이용하여 가공하는 사진을 보여주며, NT2000을 이용하여 최적절삭조건으로 가공한 후 표면 거칠기를 측정된 결과 Ra 2.32 nm를 얻었다. Fig. 12와 Fig. 13은 interferometer WYKO6000과 UA3P 측정기를 이용하여 직경 200 mm 구면과 비구면을 측정 한 결과 구면 P-V 0.351 μm, 비구면 P-V 0.374 μm를

얻을 수 있었다. 향후 지그에서 발생하는 오차를 줄이기 위한 수치해석과 가공특성 실험을 통하여 비구면의 형상정밀도 향상에 관한 연구를 수행하고자 한다.

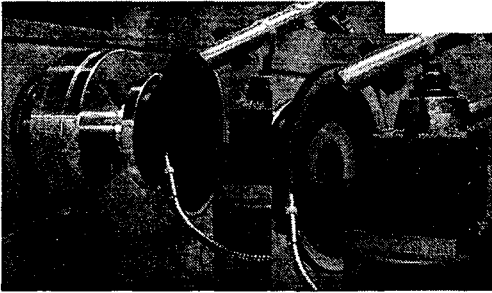


Fig. 11 Machining reflector mirror by SPDTM

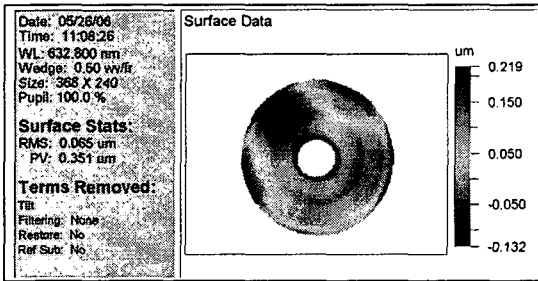


Fig. 12 Measurement of surface for spheric reflector

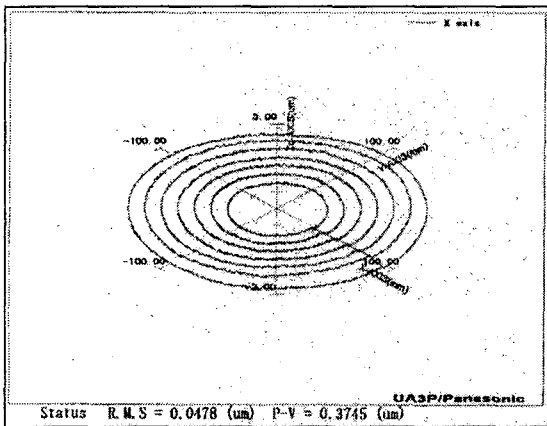


Fig. 13 Measurement of surface for aspheric reflector

5. 결론

적외선 카메라 연구 부품인 Al6061-T651 비구면 반사경의 가공변형에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대하여 해석적 방법으로 검토하였으며, 실험을 통해

초정밀 최적가공조건을 찾아내어 항공기용 비구면 반사경을 제작하였다.

1. 반사경의 가공변형에 가장 큰 영향을 주는 인자는 온도상승에 따른 변형에서 유발되는 것으로 평가된다. 이것은 적용된 소재가 열팽창계수가 상대적으로 높은 알루미늄 합금이기 때문이다.

2. 본 연구에서 Al6061-T651 표면 거칠기 측정을 통하여 얻어진 결과로서 최적절삭조건은 절삭속도 220 m/min, 절삭 깊이 4 μm , 이송속도 1 mm/min 일 때 Ra 2.32 nm 의 표면 거칠기 결과를 얻을 수 있었다.

3. 특수설계 제작한 지그를 사용하여 최적절삭 조건으로 직경 200 mm 구면 반사경을 가공한 결과 P-V 0.351 μm , 비구면 형상은 P-V 0.374 μm 를 얻을 수 있었다.

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. Lubarsky, S. V., Sobolev, V. G. and Shevtsov, S. E., "Optical Surface Fabrication on Ultra Precision Machines," SPIE, Vol. 1266, pp. 226-236, 1990.
3. Geyl, R. "Design and Fabrication of a Three-Mirror, Flat-Field Anastigmat for High-Resolution Earth Observation," SPIE, Vol. 2210, pp. 739-745, 1994.
4. Lee, Y. U., "Evaluation Technique of High-Resolution Satellite Camera," Measurement Standard, Vol.10, No.2, pp. 29-41, 1999.
5. Ko, J. B., Kim, G. H. and Won, J. H., "A Study on the cutting characteristic of non-ferrous metals using diamond turning machine," Trans. of KSMTE., Vol.10, No.5, pp.124-129, 2001.
6. 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.
7. Kim, G. H., Hong, K. H., Kim, S. S. and Won, J. H., "Nano-turning Technology Using Ultra-precision Machining System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.19, No.1, pp.18-24, 2002.