

## Al6061-T651의 초정밀 절삭특성에 관한 연구

김건희<sup>#</sup>, 양순철\*, 박요창\*\*

### A Study on the Characteristics on Ultra Precision Machining of Al6061-T651

Geon-Hee Kim<sup>#</sup>, Sun-Cheol Yang\*, Yo-Chang Park\*\*

#### ABSTRACT

This paper is described about the technique of ultra-precision machining for an aerospace aspheric mirror. The reflection mirror system generates parallel beams inside a thermal vacuum chamber. A 200mm diameter aspheric mirror was fabricated by SPDTM. Aluminum alloy as mirror substrates is known to be easily machined, but not polishable due to its ductility. Aspheric large reflector without a polishing process, the surface roughness of 10 nm Ra, and the form error of  $\lambda/2$  ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ) for reference curved surface 200mm has been required.

The purpose of this research is to find the optimum machining conditions for cutting reflector using Al6061-T651 and apply the SPDTM technique to the manufacturing of ultra precision optical components of Al-alloy aspheric reflector.

**Key Words** : SPDTM(단결정 다이아몬드 선반), Reflector(반사경), Aspheric Mirror(비구면 반사경)

#### 1. 서 론

다이아몬드 터닝 머신은 단결정 다이아몬드공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 알루미늄 합금을 다이아몬드공구를 이용하여 초정밀 경면 절삭하는 기술이 발표된 것은 1966년이 최초라고 알려져 있다. 그 이후의 가공기계·재료·공구나 주변 기술 등의 정밀화와 진보에 따라 초정밀 가공기술이 급속하게 보급되어 왔다. 국내에서의 연구는 90

년대에 이르러 초정밀가공기의 개발을 선두로 초정밀 절삭가공에 대한 관심이 증가하고 있다<sup>[1,2]</sup>. 종래의 한정된 가공법으로 밖에 얻을 수 없었던 동, 알루미늄 합금 등의 연질금속이나 플라스틱의 경면은, 초정밀 가공기술에 의해 쉽고 저렴하게 얻어지게 되었으며, 그 용도가 더욱 확대되어, 여러 분야에서 사용되게 되었다<sup>[3-5]</sup>.

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<sup>[6,7]</sup>. 하지만 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작

# 교신저자 : 한국기초과학지원연구원 초정밀가공팀  
E-mail : kgh@kbsi.re.kr

\* 한국기초과학지원연구원 초정밀가공팀

\*\* 충남대학교 대학원 기계공학과

및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 인공위성 연구 부품을 국산화의 일환으로 AI 6061-T651에 대하여 주축 회전수, 절삭 깊이, 이송속도에 대한 초정밀 최적가공조건을 찾아내었으며, Kistler 9257B를 이용하여 절삭력을 측정하였다. 이렇게 얻은 AI 가공특성을 이용하여 과학위성용 IR 광학계에 AI합금을 적용하기 위한 형상정밀도 향상에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 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 다이아몬드 바이트를 설치할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직 방향으로 구동한다.

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. 1은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.



Fig. 1 Photograph of the ultra precision machine (Nanoform600)

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

측정 장비로서 표면 거칠기 측정은 비접촉식 표면형상 측정기 WYKO사의 NT 2000을 사용하였으며 측정기의 측정범위는 최대  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 이며, 측정범위로는 0.1 nm~150  $\mu\text{m}$ 이며, 분해능은 0.1 nm이고 Auto Focusing 타입이다. 표면형상측정으로는 접촉식 측정기인 Form Talysurf Series2와 Laser interferometer WYKO6000을 이용하였다.

Fig. 2는 Laser interferometer로 직경 200 mm 곡률반경 R236을 측정하고 있는 사진이다.



Fig. 2 Measurement of a workpiece

### 2.2 실험방법

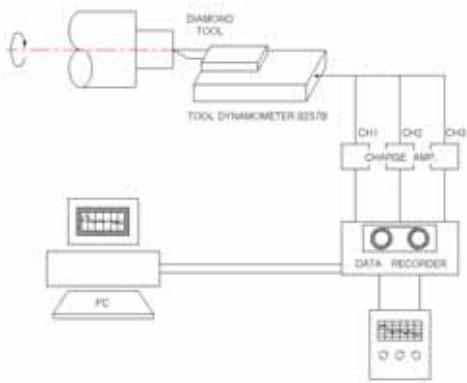
알루미늄 합금인 AL6061-T651의 초정밀 최적가공 조건을 찾기 위하여 절삭속도, 절삭 깊이와 이송속도에 대한 표면 거칠기를 측정하여 최적 초정밀 가공조건을 찾아내었으며 가공조건은 Table 1과 같다. 또한 절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험 장치의 개략도는 Fig. 3에서 보여주고 있다. 실험은 단결정 Diamond 공구로  $\varnothing 50\times 120$  크기의 AI 6061-T651을 단면절삭방법으로 실험을 실시하였다. DTM에 설치된 압전형 공구동력계를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호를 증폭한 후 A/D변환기를 통하여 PC로 전송하여 데이터 처리하였다. 그리고 AI6061-T651 실험결과로 얻어진 최적절삭 조건을 이용하여 대구경 비구면 반사경을 제작하였다.

대구경 반사경의 표면형상을 측정하기 위하여

Laser interferometer WYKO6000을 사용하였다.

**Table 1 Experimental Condition**

Item	Cutting condition
Work piece	Al 6061-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( $\mu\text{m}$ )	1, 2, 4, 6, 8, 10
Vacumm pressure(in.Hg)	-20
Cutting fluid	Air+EDM oil



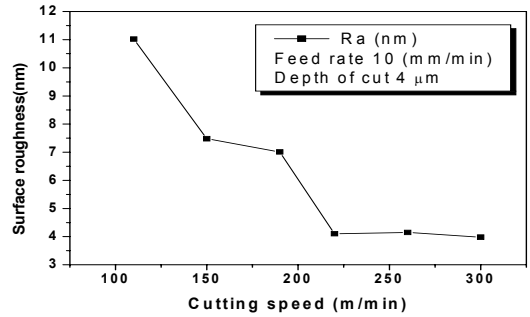
**Fig. 3 Experimental devices of the DTM**

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Al 6061-T651 절삭특성에 관한 평가

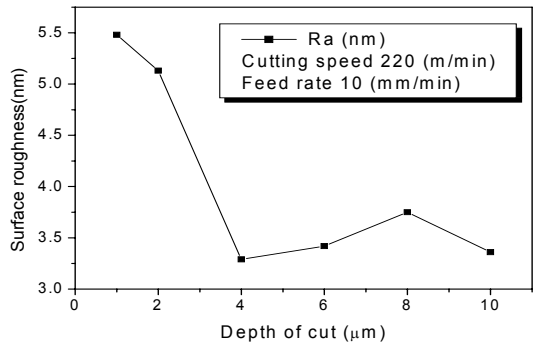
##### 3.1.1 표면 거칠기 특성

Fig. 4는 단결정 다이아몬드 바이트를 사용하여 Al6061-T651을 이송속도 10 mm/min, 절삭 깊이 4  $\mu\text{m}$ 로 고정하고, 절삭 조건에서 주축 회전수 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 110~300 m/min까지 절삭속도를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 110 m/min 에서 점점 회전수를 증가시킴에 따라 표면 거칠기가 향상되고 220 m/min 이상의 속도에서는 표면 거칠기의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 확인함으로써 220 m/min 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 유리하다는 것을 알 수 있다.



**Fig. 4 Surface roughness versus cutting speed**

Fig. 5는 Al6061-T651을 단결정 다이아몬드 바이트로 절삭속도 220 m/min, 이송속도를 10 mm/min으로 고정하고, 절삭 깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭 깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 5의 결과를 볼 때 4  $\mu\text{m}$ 까지 표면 거칠기가 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있고, 4  $\mu\text{m}$ 이상에서는 표면 거칠기가 거의 일정하나 조금씩 차이를 보이는 것을 알 수 있다.



**Fig. 5 Surface roughness versus depth of cut**

Fig. 6은 Al6061-T651의 최적표면을 얻기 위해 표면 거칠기가 가장 좋은 220 m/min의 절삭속도, 절삭 깊이가 4  $\mu\text{m}$ 로 고정하고 1~10 mm/min까지의 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기 실험결과를 나타낸다. 그 결과 본 초정밀 가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선형의 표면을 형성시키고, 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률 만큼 간격을 두고 반복적으

로 이루어진다. 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( $R_{max}=f^2/8R$ )<sup>[5]</sup>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.

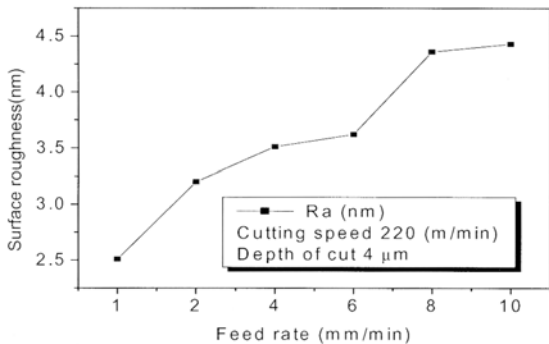


Fig. 6 Surface roughness versus feed rate

### 3.1.2 절삭력 특성

알루미늄 합금의 이송에 대한 절삭력을 Fig. 7에서와 같이 절삭속도 300 m/min, 절삭 깊이 10 μm로, 이송 속도 변화에 대한 동적상태의 절삭력을 나타낸 것이다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송이 클수록 절삭력이 크게 나타나며, 이는 이송이 클수록 절삭 면적이 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 알루미늄합금을 절삭속도 300 m/min, 이송속도를 10 mm/min의 절삭조건에서 절삭 깊이 변화에 따른 절삭력을 측정된 결과이다.

절삭 깊이 변화에 따른 절삭력의 경향을 보면, 절삭 깊이가 증가할수록 주절삭력은 감소하나 배분력은 점차로 증가하며 이송분력은 거의 변화를 나타내지 않는다. 이는 절삭량의 증가에 따른 절삭 면적이 증가하기 때문이다. 각 분력을 보면 주분력은 절삭 깊이 10 μm이하에서는 절삭력에 변화가 없으나 10 μm이상에서는 주절삭력이 감소하고 있다. 배분력은

15 μm까지는 선형적으로 증가하고 15 μm이상에서는 적은 비율로 증가한다. 절삭 깊이 5 μm에서 주분력 0.42 N, 배분력 0.3 N, 이송분력 0.25 N정도로 나타났다.

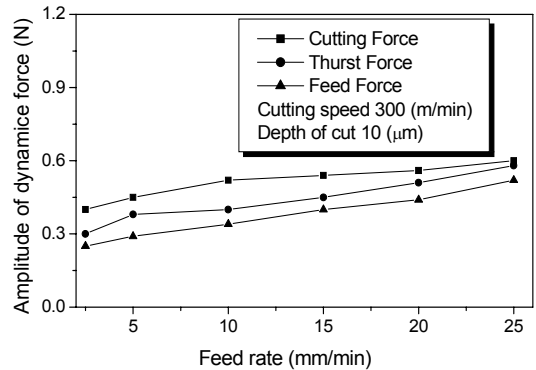


Fig. 7 Dynamic cutting force of Al6061 according to feed rate

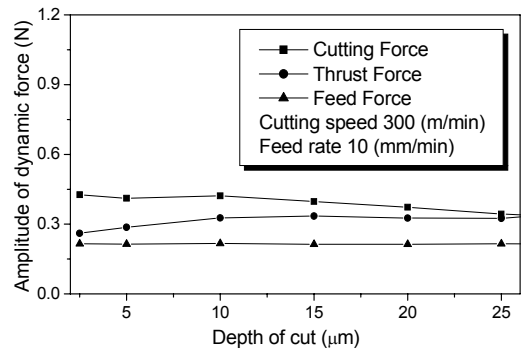


Fig. 8 Dynamic cutting force versus depth of cut

Fig. 9는 알루미늄 합금을 이송속도 10 mm/min, 절삭 깊이 10 μm의 조건에서 절삭속도 변화에 따른 동적상태의 절삭력을 측정된 결과이다. 절삭속도가 증가함에 따라 절삭력은 서서히 증가한다. 절삭속도 260 m/min 이하에서는 삼분력이 일정하지만 260 m/min 이상에서 절삭력이 급격히 증가한다. 그 원인은 주축의 고속회전에 의한 공진 등의 외부요인으로 인하여 급격히 증가하여 나타난다. 이 실험으로 초정밀가공기의 안정된 최대 절삭속도 한계가 360 m/min임을 알 수 있다.

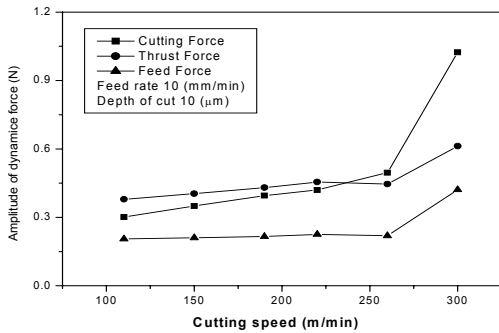


Fig. 9 Dynamic cutting force versus spindle speed

### 3.2 직경 200mm 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. 10은 SPDTM을 이용하여 가공하는 사진을 보여주며, Fig. 11은 NT2000을 이용하여 최적절삭조건으로 가공한 후 표면 거칠기를 측정된 결과 Ra 2.32 nm를 얻었다. Fig. 12는 Interferometer WYKO6000을 이용하여 직경 200 mm 구면을 측정된 결과 P-V 0.324 μm를 얻을 수 있었다. 향후 지그에서 발생하는 오차를 줄이기 위한 수치해석과 가공특성 실험을 통하여 비구면형상정밀도 향상에 관한 연구를 수행 하고자 한다.

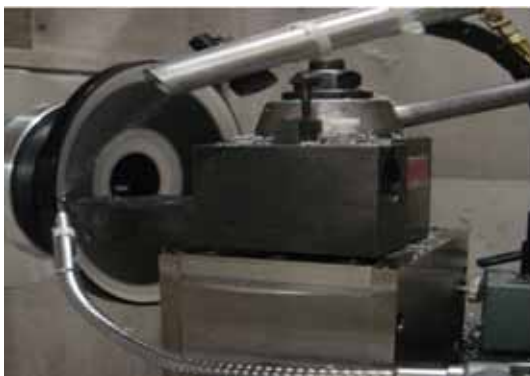


Fig. 10 Machining reflector mirror by SPDTM

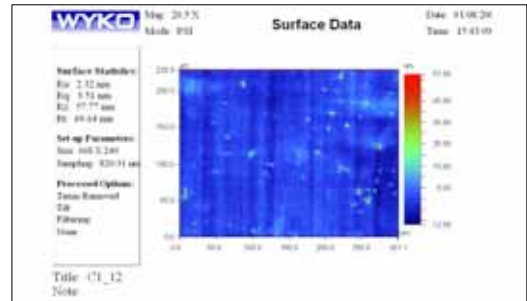


Fig. 11 Measurement of Al6061 surface after turning

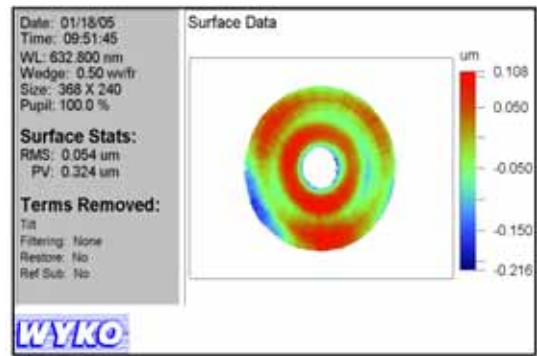


Fig. 12 Measurement of the surface for a large reflector

## 4. 결 론

1. Al6061-T651 표면 거칠기 측정을 통하여 얻어진 결과로서 최적절삭조건은 절삭속도 220 m/min, 절삭 깊이 4 μm, 이송속도 1 mm/min일 때 2.32 nm Ra의 표면 거칠기 결과를 얻을 수 있었다.
2. 절삭력 측정결과로서 절삭속도의 변화에 따른 영향은 거의 없으며 안정된 최대 절삭속도의 한계는 360 m/min임을 알 수 있었다.
3. 특수설계 제작한 지그를 사용하여 최적절삭조건으로 직경 200 mm 구면 반사경을 가공한 결과 P-V 0.324 μm를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

1. 김정두, “천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al합금

- 의 경면절삭에 관한 연구,” 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp.1515-1522, 1990.
2. 이경호, 윤영식, 이상조, “다결정 다이아몬드를 공구로 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si함량의 영향,” 한국정밀공학회지, 제12권, 제6호, pp. 20-26, 1995.
  3. 성기형, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, “초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구,” 대한공업교육학회지, Vol. 22, No. 2, pp.116-124, 1997.
  4. Kim, J. D. and Kim, D. S., “Surface characteristics of magnetic-disk cutting using a single-crystal diamond tool in an ultraprecision lathe,” Journal of Materials Processing Technology 59, pp.303-308, 1996.
  5. Seong, C. H., Kim, H. C. and Kim, K. S., “Characteristics of surface roughness in the high speed micro turning of aluminum alloy,” Korean Society of Precision Engineering, Vol.16, No.7, pp.94-100, 1999.
  6. 이윤우, “고해상도 위성카메라 평가 기술,” 측정표준, 제22권, 제2호, pp. 29-41, 1999.
  7. Kim, Y. S. and Baek, H. Y., “Electro-Optical Camera of Korea Multi-Purpose SATellite,” Optical Science and Technology, Vol. 6, No. 4, pp.17~22, 2002.