

Al합금의 초정밀 절삭특성 연구

김우순*, 김동현⁺, 난바의치⁺⁺

(논문접수일 2003. 4. 24, 심사완료일 2003. 8. 4)

A Study on the Characteristics of Ultra-Precision Cutting for Al Alloy

Woo Soon Kim*, Dong Hyun Kim⁺, Yoshiharu Namba⁺⁺

Abstract

To obtain the surface roughness with range from 10nm to 1nm, we need the study of ultra-precision machine, cutting condition, and materials. In this paper, the optimal cutting conditions for getting mirror surface of aluminum alloy have been examined experimentally by using ultra-precision turning machine and single crystal diamond tool. In generally, the cutting conditions such as feed rate and depth of cut, have effect on the surface roughness in ultra-precision turning. The result of surface roughness was measured by the ZYGO New View 200. Therefore, The surface roughness and cutting conditions has been clarified. The smooth surface of aluminum alloy less than 1nm RMS, 1nm Rmax can be obtained by the ultra-precision cutting.

Key Words : Ultra-Precision Turning(초정밀 선삭), Mirror Surface(경면), Single Crystal Diamond Tool(단결정다이아몬드공구)

1. 서론

단결정 다이아몬드 공구와 고정도 절삭가공기계를 사용한 연질금속의 초정밀 절삭가공은 1962년에 Union Carbide사와 공동으로 절삭가공기계를 개발한 것이 최초라고 알려져 있다. 그 후, 미국이나 일본에서도 이와같은 절삭가공기계가 개발되어졌고, 치수정도가 높은 경면이 쉽게 얻어지는 장점 때문에 급속하게 실용화되었다^(1,2).

단결정 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭가공기술은 고도정보화 사회를 지탱하는 컴퓨터의 기억장치인 삭가공기술은 고도정보화 사회를 지탱하는 컴퓨터의 기억장치인 하드 디스크에 사용되는 알루미늄 기판의 가공이나 레이저 프린터에 사용되는 폴리진 미러, 레이저 가공용의 반사미러(평면, 구면, 비구면) 등에 널리 이용되고 있는 실정이다.

최근에 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭가공은 가공 정밀도를 높이기 위한 새로운 방법과 성능이 향상된 초

* 주저자, 원광대 기계시스템 디자인공학과 (knamba@wonkwang.ac.kr)

주소: 570-749 전북 익산시 신룡동 344-2번지

+ 원광대학교 기계시스템디자인공학부

++ 일본 중부대학 기계공학부

정밀 가공기계의 제조 기술의 발전에 따라 초정밀 산업에 필요한 광학부품이나 정밀기계부품, 전자부품 등 다양한 분야에 널리 적용되고 있다⁽³⁾.

단결정 다이아몬드 공구에 의한 초정밀 절삭 가공은, 연질금속을 다이아몬드의 대단히 예리하고 정확한 인선으로 가공하기 때문에 경면이 쉽게 얻어지고, 또한, 공구의 형상이 피삭재에 전사되는 정도가 좋으므로 치수정도, 형상연마가공보다도 쉽게 얻어질 수 있다.

그러나, 단결정 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭가공에 사용되는 피삭재는 철이나 몰리브덴 등의 금속은 적합하지 않고, 비교적 피삭성이 좋고 다이아몬드와 화학적 친화력이 작은 알루미늄합금 또는 무산소동 같은 연질금속이나 플라스틱 재료가 피삭재로 사용되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄합금을 피삭재로 하여 단결정 다이아몬드 공구와 초정밀 가공기계를 이용한 초정밀 절삭을 행한 후, 각 절삭조건에 따른 표면거칠기를 측정하여 알루미늄 합금의 초정밀 가공 특성을 파악하고 나노오더의 표면거칠기를 위한 최적의 가공조건을 제안·제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 초정밀 가공기계

Fig. 1은 본 연구에 사용된 초정밀가공기계를 보여주고 있다. 동시 3축 제어에 의해 초정밀 광학 부품등의 평면, 구면, 비구면 형상을 가공할 수 있다. X축과 Z축은 베드 위에 직교하도록 되어 있고, Z축 슬라이드 테이블에 공작물을 회전

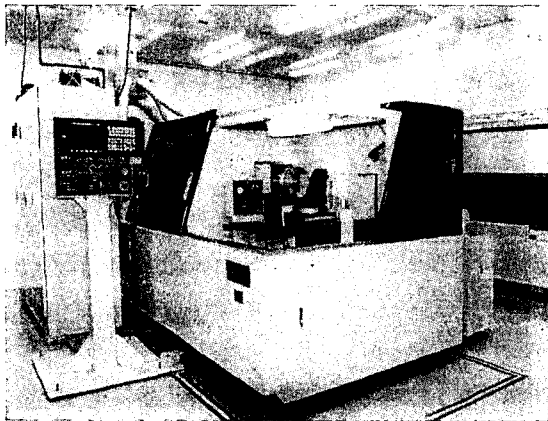


Fig. 1 Ultra-precision machine

구동시키는 주축이 설치되어 있다. B축 회전 테이블은 X축 테이블상에 설치되어 있고 B축 선회 중심상에 장착한 공구의 선단 각도를 제어 할 수 있다. X축, Z축 슬라이드 테이블과 B축 회전 테이블의 안내 베어링은 유정압 베어링을 채용하였고, 주축에는 정압공기 베어링을 채용하였다.

사용된 초정밀 가공기계의 위치 피이드 백에는 레이저 측정 시스템을 이용하였다. 레이저 측정의 광축과 가공점을 일치시켜 아베 오차를 저감하고, 레이저를 커버함으로써 주위의 온도 변화를 받지 않도록 하였다.

초정밀 가공기계는 일본 (주)도요타에서 제작한 기계로서 최대가공직경은 $\varnothing 140\text{mm}$, 주축회전속도 30-2,000 rpm, X축, Z축 슬라이드 테이블의 최소 이동거리 1.25nm, B축 회전 테이블 최소 이동단위 0.36초이며, 온도 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 습도 40%이하, 공기청정도 클래스 100인 항온항습의 크린룸내에 설치되었다.

2.1.2 단결정 다이아몬드 공구

본 연구에 사용된 단결정 다이아몬드 공구는 절인의 선단 반경이 1mm, 3mm, 5mm, 10mm의 (주)어라이드 매터리얼과 도요타 벤몹즈(주)에서 제작한 초정밀 다이아몬드 공구를 사용하였다.

Table 1과 Fig. 2는 단결정 다이아몬드 공구의 사양과 도면을 보여주고 있다.

Table 1 Specific of single crystal diamond tool

Nose Radius(mm)	Rake angle (°)	Flank angle(°)
1	0	5
3	0	5
5	0	5
10	0	5

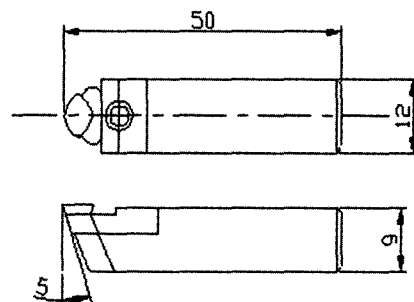


Fig. 2 Single crystal diamond tool

공구의 샤크부분은 절삭시의 저항에 의한 휨이나 진동을 방지하기 위하여 강성이 높은 초경합금을 사용하였다. 샤크의 단면형상은 12mm×9mm의 각주이고, 다이아몬드 공구의 선단까지의 전체길이는 50mm이다. 사용한 다이아몬드는 천연의 단결정 다이아몬드 결정이고, 공구의 절인의 선단 형상이 1~10mm까지의 노우즈 반경을 갖는 원호 형상의 것을 각각 사용하였다.

본 연구에서는 순도가 극히 높은 알루미늄에 마그네슘을 2.48% 첨가한 Ψ 54mm, 12mm두께의 알루미늄 합금을 사용하였다.

2.2 실험 방법

초정밀 가공기계를 이용하여 알루미늄합금의 절삭 특성을 연구하기 위하여 정면 절삭을 행하였다.

Fig. 3에서와 같이 진공척으로 구성된 주축에 알루미늄 합금을 고정하고, Z축 슬라이드 테이블고정, X축 슬라이드 테이블 이동에 의해 정면 절삭을 행하였다.

공구대를 탑재한 X축 슬라이드 테이블에 이송을 주면서 실험하였다. 절삭유제는 비수용성 절삭유중에 점도가 낮은 등유를 이용하였고 미스트 노즐을 분무시켜 가공하였다. 초정밀 절삭한 알루미늄합금의 표면 거칠기의 측정에는 3차원 표면구조해석현미경(ZYGO New View 200)을 이용하여 측정하였으며, Fig. 4에는 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 노우즈 반경 및 이송에 따른 표면 거칠기

초정밀 선삭가공한 절삭면의 표면 거칠기 R_{max} 는, 기하학적 이론식인 $R_{max}=f^2/8R$ 으로 표현되므로, 표면거칠기

는 공구의 노우즈 반경(R) 및 이송(f)에 의존한다.

이런 기하학적 이론식으로 부터, 인선 형상이 원호 형상인 초정밀 다이아몬드 공구를 이용하여 초정밀 다이아몬드 절삭하는 경우, 그 공구의 노우즈 반경이 크면 클수록 표면 거칠기가 작게 되고, 이송이 작을수록 표면 거칠기가 작게 된다고 말할 수 있다.

따라서, 이송이 작은 영역에서는 표면 거칠기가 이론적으로 작게 되기 때문에 공작물의 표면 거칠기에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다.

그래서, 본 연구에서는 이론식에 의해 계산을 행한 후, 초정밀 절삭 실험을 통하여 이론치와 실제 가공치의 일치 여부를 판단하고자 하였다.

단결정 다이아몬드 공구는 등근형으로 노우즈 반경을 1mm, 3mm, 5mm, 10mm로 변화시켜 가면서 직경 54mm, 두께 12mm의 알루미늄 합금을 초정밀 절삭하였으며 이송 조건은 일반적인 초정밀 절삭에서 정면을 얻기 위해 사용되는 조건으로 하였다.

알루미늄합금의 표면 거칠기를 측정할 때는, 인선 반경의 변화에 따라 표면 거칠기에 미치는 영향에 대하여 중점 조사하였다.

Fig. 5는 알루미늄 합금을 초정밀 절삭한 때의 표면 거칠기(R_{max})와 이송과의 관계를 나타내었다.

이송이 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$ 이하의 영역에서는 모든 노우즈 반경의 경우에 있어서 표면 거칠기값이 증가하는 양상을 보였다. 일반적으로 이송이 작으면 절삭력이 작아져서 더 좋은 표면 거칠기값을 얻을 것으로 예측되나, 진동과 같은 다른 요인이 더 큰 영향을 미친 결과로 판단된다. 이송이 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$ 이상인 경우는 이송이 증가함에 따라 표면 거칠기값도 증가하는데 이것은 절삭량의 증가와 인선에 연질인 알루미늄 합금

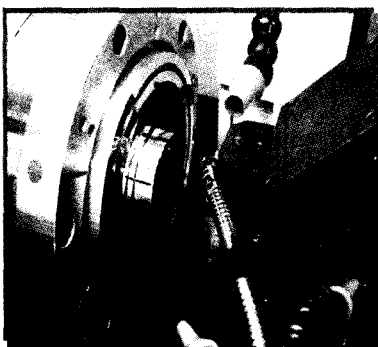


Fig. 3 Ultra-precision machining layout



Fig. 4 Measurement apparatus(New View 200)

이 융착함으로써 나타난 결과로 사료된다. 또한, 다이아몬드 공구 인선의 마멸이 성장하면서 절삭면에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 6은 노우즈 반경 5mm의 공구에서, 이송을 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 할 때의 표면형상을 노마르스키식 미분간섭 현미경으로 관찰한 것으로, 불규칙한 요철의 조흔이 나타났다. 이송에 따라 미소 공구 마크가 그대로 절삭면에 나타남을 확인하였으며 이송이 나노 오더의 표면 거칠기를 얻기 위한 중요한 절삭 변수임을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 이송을 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 절삭한 때의 초정밀 다이아몬드 공구의 노우즈 반경과 표면 거칠기 R_{max} 의 관계에 나타내었다. 따라서, 표면 거칠기는 공구의 노우즈 반경 및 이송에 의존함을 실험적으로 검증하였다.

3.2 절삭깊이에 따른 표면 거칠기

원호날 형상의 공구에 의한 절삭은, 인선의 형상이 그대로 공작물에 전사된다고 할 경우, 공구 절삭깊이가 변화하더라도 가공물에 전사되는 형상은 변화하지 않을 것으로 보는 견해도 있지만, 절삭깊이의 증가와 함께 공구와 공작물의 접촉면적이 증가하고, 그것에 따라 절삭 저항도 증가하게 되리라 판단된다. 이로써 절삭깊이가 변화하면 표면 거칠기가 변화한다는 것은 예측할 수 있다.

Fig. 8은 초정밀 절삭한 알루미늄합금의 표면 거칠기와 절삭깊이의 관계를 나타낸 결과이다.

표면 거칠기에 영향을 미치는 절삭깊이의 영향을 실험적으로 알아보기 위하여 앞에서 얻은 데이터로부터 가장 이상적인 실험값을 보였던 노우즈 반경 10mm의 공구를 이용하고, 절삭속도 2m/s, 이송 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$ 의 조건에서 절삭깊이를 $0.1\mu\text{m}$ 부터 $8\mu\text{m}$ 까지 변화시키면서 알루미늄합금을 절삭하였다.

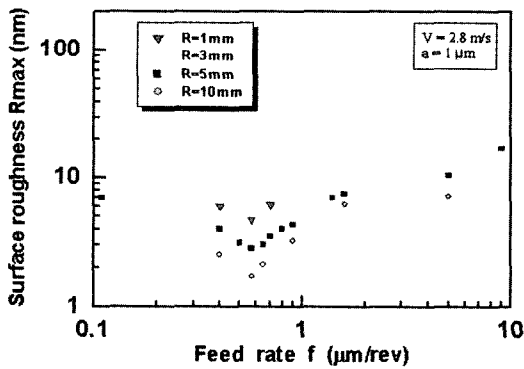


Fig. 5 Relationship between R_{max} and Feed rate

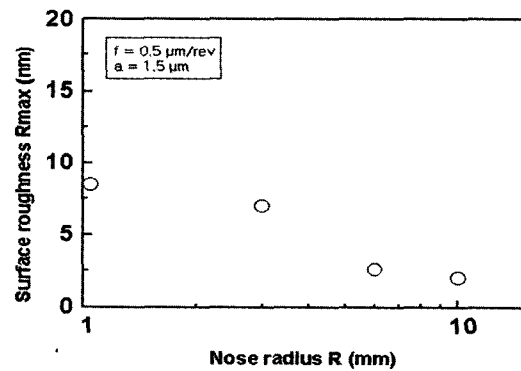


Fig. 7 Relationship between R_{max} and Nose radius

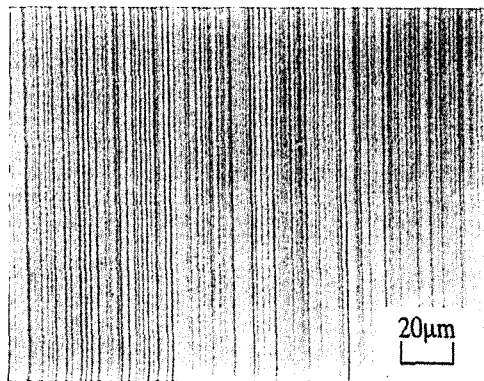


Fig. 6 Machined surface shape

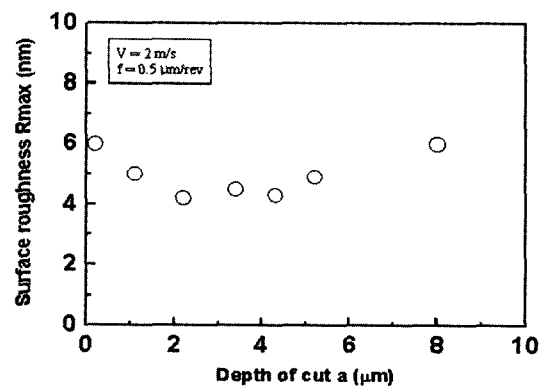


Fig. 8 Relationship between R_{max} and Depth of cut

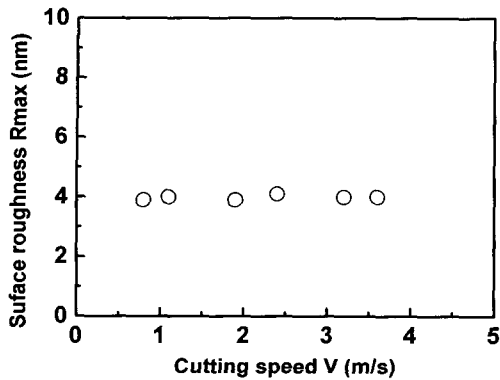


Fig. 9 Relationship between Rmax and cutting speed

표면 거칠기는 절삭깊이가 감소함에 따라 작아지는 경향을 보이다가 절삭깊이 $2\mu\text{m}$ 에서부터 증가하는 양상을 보였다. 절삭깊이에 따라 표면 거칠기가 크게 되는 것은 절삭 깊이가 크게 되면 될수록 공구와 공작물의 접촉면적이 증가하고, 더불어 절삭 저항도 크게 되어 초정밀 다이아몬드 공구의 여유면에 공구마모가 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

절입 $1\mu\text{m}$ 이하에서는, 표면거칠기값이 증가하는데 이런 결과는 공작물과 공구간의 상대진동이 발생하고, 그 진동이 공작물에 채터링으로 전사됨에 따라 표면 거칠기가 증가한 것으로 사료된다. 또한, 연질인 알루미늄 합금은 미세 절삭시 공작물이 음의 공구상면경사각으로 절삭되는 형태가 되어 러빙이나 버니싱 같은 소성 변형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 절삭속도에 따른 표면 거칠기

원호날 형상의 공구에 의한 절삭은, 인선의 형상이 그대로 공작물에 전사된다고 할 경우, 공구 절삭속도가 변화하더라도 가공물에 전사되는 형상은 변화하지 않을 것으로 보는 견해도 있다. 하지만, 절삭속도의 증감에 따라 절삭 저항이 증감하는 것은 예측할 수 있다.

Fig. 9는 표면 거칠기와 절삭속도의 관계를 나타내었다.

앞에서 얻은 데이터로부터 노즈 반경 10mm 의 공구를 이용하고, 이송 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭깊이를 $1\mu\text{m}$ 의 조건에서 절삭속도 $0.8\text{m}/\text{s}$ 로부터 $3.6\text{m}/\text{s}$ 까지 변화시키면서 알루미늄합금을 초정밀 절삭하였다.

절삭속도의 증감에 따라 절삭 저항이 증감할 것이라는 예측과는 달리 실험 범위에서는 표면 거칠기가 약간의 차이는 있었지만 절삭속도에 의존하지 않고, 거의 일정한 값을 보였다.

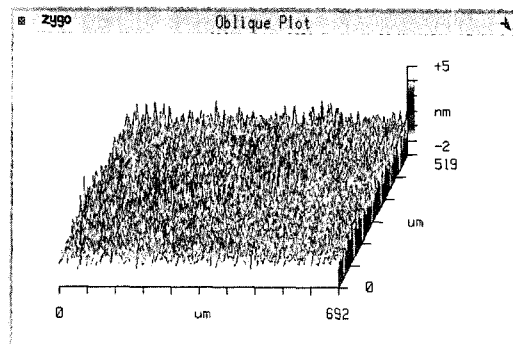


Fig. 10 A surface profile of machined surface

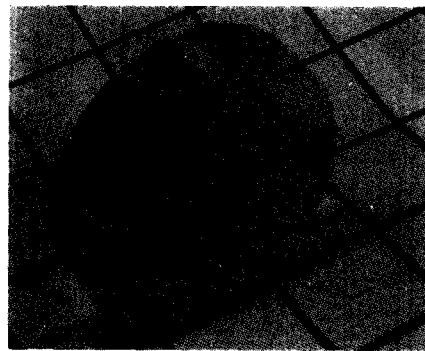


Fig. 11 Photograph of machined surface

Fig. 10은 ZYGO사의 New View 200으로 측정된 표면 거칠기값을 나타낸다. 노우즈반경 10mm 의 초정밀 다이아몬드 공구와 이송 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭깊이 $1\mu\text{m}$ 로 초정밀 절삭하여 표면 거칠기 0.344nm RMS , 2.09nm Rmax 값을 얻었다.

Fig. 11은 초정밀 선삭가공하여 얻은 알루미늄합금의 경면을 나타낸다.

4. 결론

직경 54mm , 두께 12mm 의 알루미늄합금을 초정밀 절삭한 결과, 이하의 결과를 얻었다.

- (1) 초정밀 절삭에 의한 절삭면의 표면 거칠기는 절삭속도에 의존하지 않고, 공구의 노우즈 반경, 이송, 절삭깊이에 의존하며, 표면 거칠기가 가장 작게 되는 최적절삭조건은 노우즈 반경은 10mm , 절삭깊이 $2\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ 이내이다.

- (2) 표면거칠기가 가장 작게 되는 최적 이송은 $f=0.5\mu\text{m}/\text{rev}$ 이었으며, $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 이하의 이송영역에서는 기하학적으로 구한 표면 거칠기와 일치하지 않았다.
- (3) 노우즈반경 10mm의 초정밀 다이아몬드 공구를 이용하여, 이송 $0.5\mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭깊이 $1\mu\text{m}$ 로 초정밀 절삭한 결과, 표면 거칠기 $0.344\text{nm RMS } 2.09\text{nm Rmax}$ 를 얻었다.

참 고 문 헌

- (1) Simata, I., 2007, "Ultra-precision Cutting and Accuracy Limit", *J. of JSPE*, Vol. 52, No. 12, pp. 2002~2007.
- (2) Hirai, "Ultra-precision Cutting and Polishing of Metal mold", *J. of JSPE*, Vol. 52, No. 12, pp.2028~2031.
- (3) KANIZEN. Inc, 1988, Electronickel Coating Method.