한국공작기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 pp.591~596

Al 6061의 초정밀 절삭특성
Ultra Precision cutting Characteristics for Al 6061

박상진(충남대 대학원), 원종호(충남대 공대), 도철진, 김건희, 유병주(기초과학)

ABSTRACT

The needs of ultra precision machined parts is increase every days. But the experimental data of nonferrous metal is insufficient. The cutting behavior in micro cutting area is different from that of traditional cutting because of the size effect. Al6061 is widely used as optical parts such as LASER reflector's mirror or multimedia instrument. Al6061 opper is machined by ultra precision machine with natural diamond tool. From the experiment and discussion on the cutting force and worked surface roughness as the variable spindle speed, feed rate and depth of cut. As a result, the cutting force increases as the increasing depth of cut, but the worked surface roughness does not increase so much. The surface roughness is good when spindle speed is above 1200rpm, and feed rate is small. The influence of depth of cut is very small.

Key Words : ulter-precision machining(초정밀 가공), NCD(단결정 천연 다이아몬드), surface roughness(표면거칠기)

1. 서 론

알루미늄 합금을 다이아 몬드 공구를 이용하여 초정밀 경면절삭하는 기술이 발표된 것은, 1966년이 최초라고 말해지고 있다. 그 이후의 가공기계·재료·공구나 그 주변기술등의 정밀화와 진보에 따라 초정밀 가공기술이 급속하게 보급되어 왔다. 국내에서의 연구는 90년대에 이르러 초정밀가공기의 개발을 선두로 초정밀 절삭가공에 대한 관심이 증가하고 있다.[1~2]

종래의 한정된 가공법으로 밖에 얻을 수 없었던 동, 알루미늄 합금등의 연질금속이나 플라스틱의 경면은, 초정밀 가공기술에 의해 쉽고 저렴하게 얻어지게 되었으며, 더욱 그 용도가 확대되어, 여러 분야에서 사용되게 되었다.[3~5]

현재에는 캠코더(camcorder)의 비구면렌즈, CDP detect 렌즈, 프로젝션(projection) TV렌즈, 엑징 P/J TV 프레즈넬(fresnel)렌즈 등의 전자부품의 금형 가공 및 생산에 직접 이용되고 있다. 알루미늄 합금은 경량으로 비강도가 크며, 또한 비 자성재료이기 때문에 전자, 광학관련 기기의 부품에 널리 적용되고 있다. 게다가 알루미늄 합금의 특징은 그 절삭면이 아름답게 빛나는 성질을 지닌 경면이 되는 것이라 생각된다.

다이아몬드 공구에 대한 절삭으로 대표되는 초정밀 절삭가공 기술은 연마 가공에 비하여 생산성과 가공 정밀도를 향상시킬 수 있는 가공 방법으로 그 중요성을 더해가고 있다. 따라서 이러한 산

업기술 요구에 부응할 수 있는 각종 가공기술의 확립은 그 무엇보다도 시급히 해결해야 할 과제로 나타나고 있다.

따라서, 본 연구에서는 근간에 관심의 대상이 되고 있는 비철금속의 절삭가공에 주안점을 두어, 단결정 천연 다이아몬드 공구를 이용한 비철금속의 하나인 Al6061의 다이아몬드 공구인선에 의한 전사형태와 절삭조건 변화에 따른 절삭력과 표면거칠기 등의 변화를 고찰하여 최적 절삭조건을 찾아내고, 초정밀 절삭 특성을 고찰하였다. 또한 기초과학 지원연구소의 한빛 플라즈마 전자가열을 위한 Gyroklyston의 Microwave 소재인 BeO 세라믹의 유전율 및 굴절율을 측정하기 위한 장치인 Fabry-perot open resonator용 미러를 제작하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 무산소동에 대한 미소절삭실험을 수행하기 위하여 초정밀 비구면 가공기인 Nanoform 600을 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 초정밀가공기이다.[6]

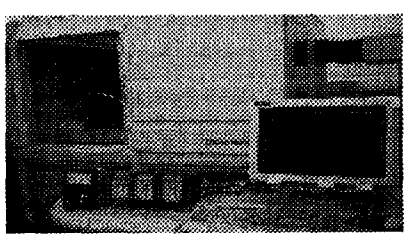

Fig. 1. Photograph of the ultra precision machine(Nanoform600)

초정밀 절삭가공시의 절삭력을 측정하기 위해 Fig. 2와 같은 절삭력 측정 장치를 구성하였다. 절삭력 측정을 위한 공구 동력계로는 KISTLER사의 9257B, 충전 앰프(charge amplifier)는 KISTLER사의 5011을, 데이터의 기록을 위한 DATA RECORDER로 받아들인 절삭력의 신호를 컴퓨터의 응용소프트웨어를 사용하여 주분력, 배분력, 이송분력을 각각의 절삭력 데이터로 저장하여 데이터를 분석하였다. 단면절삭에 의한 절삭력 측정으로 Fig. 2와 같이 Y축 방향에 작용하는 힘인 주절삭력을 Ft(tangential force)로 표기하였으며, Z축 방향에 작용하는 절삭력인 배분력을 Fp(Passive force)로 나타내고, X축 방향에 작용하는 힘인 이송분력을 Ft(Feed force)로 표기하였다[7]. 로우 패스 필터(low pass filter)는 10Hz를 사용하였고, 충전 앰프의 시간상수(time constant)는 1초로 하여 측정하였다.

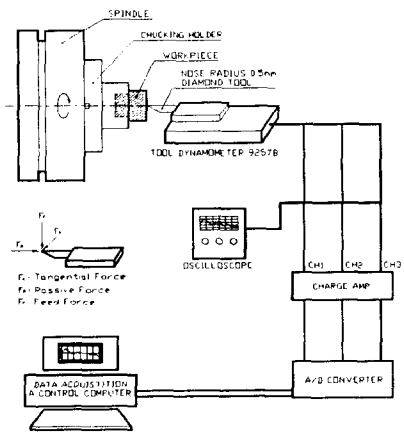

Fig. 2. Diagram of set up for measuring force

초정밀 가공 절삭력 측정 실험에서 절삭력 측정 데이터를 정적상태의 절삭력과 동적인 상태의 절삭력을 분석하였으며, 가공물의 표면 거칠기는 WYKO사의 레이저 간섭에 의한 비접촉식 표면조도 측정기인 NT2000으로 측정하였다.

실삭 실험에 사용된 재료로는 전자, 광학관련 기기 등에 이용되는 Al6061로 초정밀절삭실험을 수행하였고, Al6061의 성분은 Table 1과 같다. 또한 다이아몬드 공구는 코너 노즈 반경 R=1㎜, 경사각 0도로 여유각 10도로 예리하게 완성된 R바이트를 이용하였다. 또한, 가공액으로서 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 방법을 취하였다.

	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
Al6061	0.867	97.8626	0.501	0.021	0.0692	0.0142	0.0782	0.249	0.0214

Table 1. composion of material

2.2 실험방법 및 절삭조건

실험방법은 일차 초정밀 가공한 Al6061을 주축의 진공척에 진공압력 20Psi로 고정하여 회전시키고, 공구대에 단결정 다이아몬드 공구를 장착한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였고, 절삭유는 방전유와 압축공기를 혼합하여 분사하였다. 가공 시 공구동력계로 절삭력을 측정하였으며, 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 광학식 비접촉 표면조도 측정기인 NT2000으로 중심선평균거칠기(Ra)를 측정하였다.

Table 2는 본 실험에 선정된 절삭조건들을 나타낸 것이다. 먼저 이송속도 10mm/min, 절삭깊이 10㎛로 고정하고 주축회전수600~1600rpm 범위에서 주축회전수의 변화에 따른 절삭력을 측정하였으며 표면거칠기의 변화를 확인하여 최적 가공속도를 구하였다. 그 후 최적절삭속도 범위에서 절삭속도를 일정하게 고정하고 이송속도는 10mm/min으로 하여 절삭깊이를 1~10㎛으로 변화시켰고, 절삭깊이를 1~10mm/min까지 변화시키며 실험하였다.

Item	Cutting condition
Cutting speed(rpm)	600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(㎛)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Vacuum pressure	20 kgf/㎠
Cutting fluid	Air + EDM oil

Table 2. Cutting condition

3. 고찰

3.1 알루미늄의 절삭력

3.1.1 알루미늄의 주축속도 변화에 따른 절삭력

Fig. 3은 Al6061을 이송속도 10mm/min, 절삭깊이 10㎛의 조건에서 주축 회전수 변화에 따른 동적상태의 절삭력을 측정한 결과이다. 주축회전수가 증가함에 따라 절삭력은 서서히 증가한다. 주분력이 배분력과 이송분력에 비해 조금 크지만 삼분력의 양은 아주 작게 나타나고 있다.

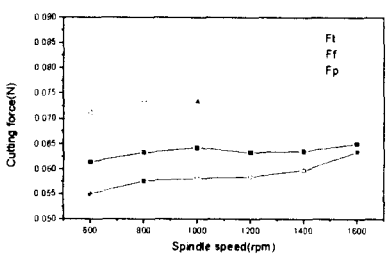

Fig. 3. Dynamic cutting force versus spindle speed (Depth of cut: 10㎛, Feed: 10mm/min)

3.1.2 알루미늄 절삭깊이 변화에 따른 절삭력

Fig. 4는 Al6061을 주축회전수 1600rpm, 이송속도를 10mm/min의 절삭조건에서 절삭깊이 변화에 따른 절삭력을 측정한 결과이다. 절삭깊이 변화에 따른 절삭력의 경향을 보면, 절삭깊이가 증가할수록 절삭력은 점차로 증가한다. 이는 절삭량의 증가에 따른 절삭 면적이 증가하기 때문이다. 절삭깊이 4㎛에서는 주분력 0.077, 이송분력 0.068N, 배분력 0.063N정도로 나타난다.

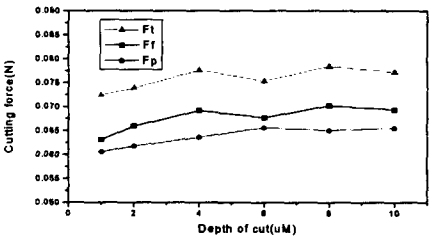

Fig. 4. Dynamic cutting force versus depth of cut (Spindle speed: 1500rpm, Feed: 10mm/min)

3. 1.3 알루미늄 이송속도에 따른 절삭력

Fig. 5는 Al6061을 주축회전수 1600rpm, 절삭깊이 4㎛의 절삭조건에서 이송속도 변화에 따른 동적상태의 절삭력을 측정한 결과이다. 이송속도에 따른 절삭력을 보면, 이송속도가 빠를수록 절삭력이 크게 나타나는데 이는 이송이 클수록 절삭 면적이 증가하기 때문이다. 각 분력을 보면 주분력은 이송속도가 증가해도 절삭력이 거의 변화가 없으나 이송분력과 배분력은 증가한다.

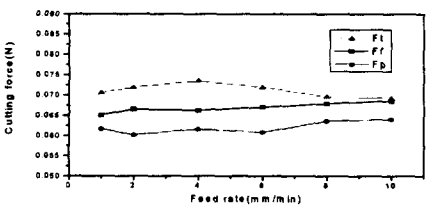

Fig. 5. Dynamic cutting force versus feed (Spindle speed: 1500rpm, Depth of cut: 10㎛)

이송속도 4mm/min에서 주분력 0.074N, 이송분력 0.067N, 배분력 0.062N정도로 나타나고 있다

3. 2 거칠기 특성

3. 2. 1 절삭속도에 따른 표면거칠기

Fig. 6은 단결정 다이아몬드 바이트를 사용해 Al6061을 이송속도 10mm/min, 절삭깊이 10um로 고정하고, 절삭 조건에서 주축 회전수 변화에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 600~1600rpm까지 회전수를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 600rpm에서 점점 회전수를 증가시킴에 따라 표면 거칠기가 향상되고 1200rpm이상의 속도에서는 표면 거칠기의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 따라서 Al6061의 미소절삭에서는 주축회전수 1200rpm 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 준다.

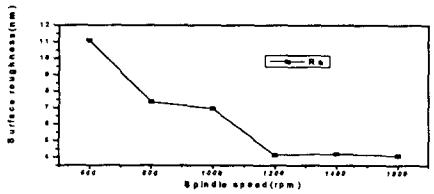

Fig. 6. Surface roughness versus spindle speed(Feed: 10mm/min, Depth of cut: 10um)

3. 2. 2 절삭깊이에 따른 표면거칠기

Fig. 7는 Al6061을 단결정 다이아몬드 바이트로 주축회전수 1600rpm, 이송속도를 10mm/min으로 고정하고 절삭 깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 절삭가공에 있어서 이론적 표면거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 7의 결과를 볼 때

4um까지 표면거칠기가 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있고 4um이상에서는 표면거칠기가 거의 일정하나 조금씩 차이를 보이는 것은 재료 내부의 불순물과 외부환경조건에 기인한 것으로 판단된다. 4um이하의 절삭깊이에서 거칠기가 나쁘게 나타나는 이유는 공구의 절삭날끝 인선반경 정도의 작은 절삭 깊이로 가공을 하는 경우는 Negative rake angle에 의해 절삭이 이루어진다. 이 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙(rubbing)이나 비니싱 같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며 소성변형을 일으킨 표면에서는 큰 잔류 응력 층이 생성되어 표면의 질에 악영향을 끼친다. 그리고 공작물의 고정 방법으로 진공척을 사용하므로 진공척이 견딜 수 있는 절삭력 이상이 걸리지 않도록 절삭 깊이의 한계를 두어야 한다.

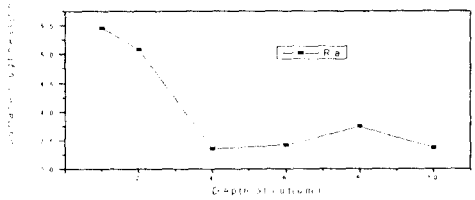

Fig. 7. Surface roughness versus Dept of cut (Spindle speed: 1600rpm, Feedrate:10mm/min)

3. 2. 3 이송속도에 따른 표면거칠기

Al6061 최적 면을 얻기 위해 Fig. 8은 표면 거칠기가 가장 좋은 1600rpm의 주축회전수, 절삭깊이는 4um고정하고 1~10mm/min까지의 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기를 나타낸다. 그 결과 본 초정밀가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나사상의 표면을 형성시키고, 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률만큼 간격을 두고 반복적으로 이루어진다. 이송속도는 동일한 절삭깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 표면거칠기 결과는 이송방향의 표면거칠기는 인선반경과 공작물의 1 회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면거칠기($Rmax=f^2/8R$)[5]와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 실험결과와 이론적 표면거칠기 값과는 차이가 있는데, 이와 같은 이유는 실험에 사용된 Al6061이 연성이고, 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다.

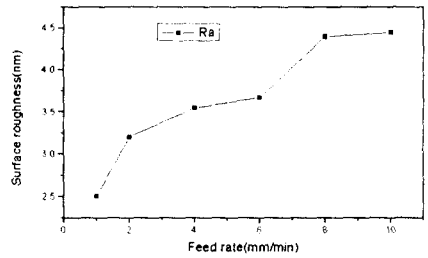

Fig. 8. Surface roughness versus feed (Spindle speed: 1600rpm, Depth of cut: 4um)

4. Fabry-perot open resonator용 미러제작

기초과학지원연구소의 한빛 플라즈마 전자 가열을 위한 Gyroklyston의 Microwave 소재인 BeO 세라믹의 유전율 및 굴절율을 측정하기 위한 장치인 Fabry-perot open resonator용 미러를 제작하였다.

Fabry-perot open resonator용 미러가공물의 표면 거칠기는 WYKO사의 레이저 간섭에 의한 비접촉식 표면조도 측정기인 NT2000으로 측정하였다. 측정결과 표면 거칠기는 5nm이하로 측정되었

다.

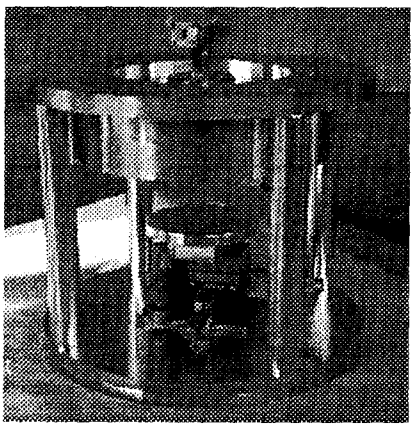

Fig. 10 Photo of Fabry-perot open resonator mirror

4. 결론

Al 6061을 다이아몬드 공구로 초정밀가공 시 절삭조건인 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력과 표면거칠기에 관한 고찰과 초정밀 Fabry-perot open resonator용 미러가공으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단결정 다이아몬드 공구의 Al6061절삭에서 주축속도 1600rpm에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻었다.
2. 단결정 다이아몬드 공구는 4mm/min이하의 이송속도에서 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
3. Al6061의 초정밀 가공 시 절삭깊이4㎛에서 최고의 표면거칠기를 얻을 수 있었다..
4. Al6061의 초정밀 가공 시 주축속도는 1600rpm이상으로 하는 것이 좋으며 이송속도는 작게 할수록 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있으며, 절삭깊이의 영향은 거의 없으나 4㎛로 하는 것이 유리하다.
5. 제작한 Fabry-perot open resonator용 미러의 평균 표면거칠기는 5㎚이하를 얻었다.

참고문헌

1) 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al합금의 경면절삭에 관한 연구." 大韓機械學會論文集, 제14卷, 제6號. PP.1515-1522. 1990

2) 이경호, 윤영식, 이상조. "다결정 다이아몬 공구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si함량의 영향." 韓國精密工學會誌, 제12卷, 제6號. pp. 20-26, 1995

3. 이재경, 이응숙, 제태진, 심충건, 종동우, 고태조, "초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발", 과학기술처 최종 보고서, 1992

4. 성기형, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, (초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구", 대한공업교육학회지, Vol. 22, No 2, pp. 116-124. 1997

5. 한복수, 김기수, "초정밀 공작기계용 공기 정압 스핀들 시스템의 강성해석 및 성능평가", 대한공업교육학회지, 제21권, 2호, pp. 90-101,1996

6. Donaldson, D. D. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine." ann. CIRP, Vol. 35, pp. 373~376, 1986

7) Sawai Sukvittayawong, Ichiro Inasaki, "Detection of bult-up in turning proces s." ann. CIRP, Vol.34, pp.829~840, 1994