

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME 94-E-10)에 의하여 연구되었음

Diamond 공구에 의한 aluminium 합금의 초정밀 절삭가공에 관한 연구

유 기 현, * 문 상 돈, * 유 종 선, * 김 태 영, ** 서 남 섭**

A Study on the Ultraprecision Cutting of Aluminium Alloy by the Diamond Tool

Ki-Hyun Yu, * Sang-Don Mun, * Jong-Sun Yu, * Tae-Young Kim, ** Nam-Seob Seo**

ABSTRACT

This paper presents the characteristics of surface roughness and cutting force in ultraprecision cutting of aluminium alloy using natural diamond tools whose edge radii are smaller than those of tools made of other materials. The feed rate and depth of engagement were set to be a micrometer order. After measuring the surface roughness of machined surface and cutting force for each cutting condition, the relations between the surface quality and its condition were investigated qualitatively.

If the feed rate was under a certain limit, the machined surface quality was deteriorated unexpectedly. This is supposed to have happened due to vibration leading its condition to abnormal one. In a certain situation the machined surface roughness by a natural diamond tool was inferior to that made by a carbide tool whose cutting edge radius is larger. This is supposed to be caused by not normal machining but burnishing effect.

Key Words : Ultraprecision Machining(Cutting)(초정밀 가공), Diamond Tool(다이아몬드 공구)

1. 서 론

초정밀 절삭가공은 1962년 미국의 Union carbide 사가 다이아몬드(diamond) 절삭가공기술을 계획하고

프랑스의 Du pont사와 협동으로 고정도 기계를 개발하여 1966년 M.T.D.R.에 발표한 것이 최초이다.^[1] 또한 유럽에서는 Philips사가 1959년 고정밀도 정압베어링을 이용한 초정밀 선반을 개발하여 1969년 발표하

* 전북대학교 대학원
** 전북대학교 공과대학

였으며,⁽⁴⁾ 우리나라와 가까이 있는 일본 역시 조정밀 절삭분야가 매우 발달한 나라중의 하나이다. 이에 반해 우리나라는 1990년 초부터 이 분야에 관심을 갖기 시작하여^{(3),(4)} 산업현장의 조정밀 절삭분야는 외국기계에 대한 의존도가 높은 실정이다. 이러한 조정밀절삭 가공 기술에 의해 생산되어지는 제품으로는 VCR드럼, 레이저 빔(laser beam) 프린터의 폴리곤 미러(polygon mirror), 자기디스크, 복사기 드럼, 광학용품 등을 들 수있다.

조정밀 절삭을 위해서는 절인반경을 작게할 수 있는 공구가 요구되며, 천연 다이아몬드 공구가 이러한 조건을 만족하는 절삭공구로서 가장 유용하다. 榊井昭一은 SEM과 화상해석을 이용하여 다이아몬드 절인반경이 수십 μm 정도라고 보고하였으며⁽⁵⁾, N.Ikawa는 인선의 표면에너지와 탄성변형에너지로부터 단결정다이아몬드 절인반경의 도달한계가 2 μm 라고 보고하고 있다.⁽⁶⁾

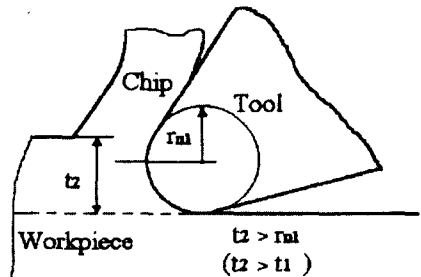
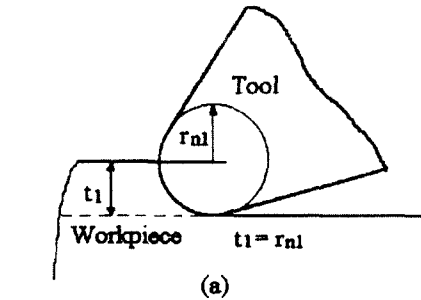
조정밀 가공 공작기계는 운동의 정도에 신뢰성이 있어야 한다. 스피들(spindle)의 회전, 공구대의 이송에 정밀도가 높아야 하고, 또한 기계의 부분적인 강성 뿐만 아니라 전체적인 강성이 커야 한다. N.Moronuki와 Y.Furukawa는 공작기계 이송의 정확성을 위해 마찰전동기구에 대하여 연구하였고,⁽⁷⁾ A.Shimokobe는 조정밀 가공을 위한 공작기계의 구동과 기구에 대한 중요성을 기술하였으며,⁽⁸⁾ 또한 Y.Kakino 등은 조정밀 가공을 위한 공작기계의 운동정도에 대하여 보고하였다.⁽⁹⁾

조정밀 가공에서는 절삭조건을 어떻게 결정하느냐에 따라 가공물의 표면거칠기는 큰 영향을 받게 되는 등, 절삭조건이 중요한 요소가 된다. T.Sugano 등은 알루미늄합금(Al-alloy)을 다이아몬드 공구로써 가공하여 절삭조건에 따른 가공물의 표면거칠기를 조사하였다.⁽¹⁰⁾

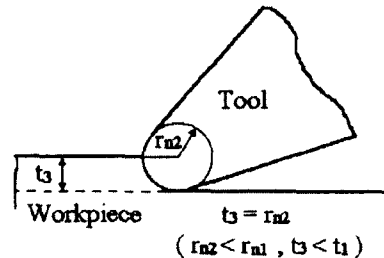
본 실험에서는 CNC선반을 사용하여 절삭속도, 물림깊이, 이송, 공구를 변화시키면서 공작물의 표면거칠기와 절삭력을 측정하였으며, 각각의 절삭조건에서 나타나는 이 측정값들을 기초로하여 절삭조건에 영향을 정성적으로 확립하고자 한다.

2. 이론적 배경

경면(mirror surface)을 생성시키기 위해서는 미세 절삭이 이루어져야 하고, 이러한 미세절삭을 하기 위해서는 물림깊이와 이송을 아주 작게 할 수 있는 정밀도



(b) The minimum uncut-chip thickness must be larger than the tool edge radius.



(c) The minimum uncut-chip thickness can be smaller than that of the case(a).

Fig. 1 The effect of the tool edge radius to the minimum uncut-chip thickness

가 높은 공작기계와 그에 따른 공구의 선택이 중요하다. 공구의 날끝반경 크기에 따라 절삭작업이 이루어지기도 하고, 경우에 따라서 공작물의 일부가 공구의 여유면쪽으로 밀려들어가 버니싱(burnishing)작용을 하기도 한다.

예로서 Fig. 1과 같이 물림깊이에 따른 절삭날 반경의 크기에 따라 정상절삭이 되는지의 여부가 결정된다. (a)의 경우는 절삭이 이루어지기 힘든 경우이며, 정상 절삭이 이루어지기 위해서는 (b)와 같이 최소 절삭깊이로 $t_1 (= r_{n1})$ 이상의 값을 취해야 한다. 또한 (c)의 경우

는 (a)의 공구보다 날끝 반경을 작게 함으로써 최소 절삭깊이를 작게 취할 수 있다.

따라서 절삭날 반경의 크기에 따라 이송과 물림깊이를 작게하는데 제한을 받는다. 절삭날 반경을 작게할수록 물림깊이와 이송을 작게 취할 수 있게 되고, 미세 절삭이 가능하게 되며, 결과적으로 치수정밀도를 높게 하고 이송의 감소에 의해 기하학적 표면거칠기를 향상시킬수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Table 1과 같으며, Fig. 2는 실험장치 설정을 보여주고 있다.

3-2 피삭재 및 절삭공구

실험에 사용된 피삭재로는 항공기 구조재 및 기타 기계부품에 많이 사용되는 알루미늄합금(Al 2024)을 택하였으며, 그 화학적 조성은 Table 2와 같다.

실험에 사용된 공구재료는 PCD(인조 다이아몬드)와 MCD(천연 다이아몬드)이며, 공구의 기하학적 형상 및 크기는 경사각 0°, 여유각 5°와 선단반경 0.8, 2, 3, 5(mm)로써 국내 다이아몬드 공구 제작사에 의뢰하여 제작하였으며, 또한 간단한 비교실험을 하기 위하여 선단반경 0.8mm인 초경공구를 사용하였다.

3-3 실험방법

CNC선반에 공구동력계를 장착할 수 있도록 지그(jig)를 설계, 제작하여 터렛의 공구홀더에 부착하였다. 알루미늄 합금(직경 150mm, 길이 260mm)을 주축대로 고정시키고 심압대로 지지한 후, 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭을 시작했다. 공구가 가공 시작시에 충격을 받지 않도록 사포로 모서리를 테이퍼 가공하였고, 공작물 표면의 초기상태를 균일하게 하기 위하여 물림깊이 6 μ m, 이송 5 μ m/rev로 매번 전절삭(precutting)을 한 다음 입력된 Table 3의 절삭조건에 따라 data를 얻

Table 1. Experimental equipments

CNC Lathe	PUMA 6S turret type
Tool dynamometer	KISTLER 9257A
Charge amplifier	KISTLER 5001
Surface roughness tester	Mitutoyo Surftest-201
A/D converter	FPGA ASIC controller
486PC	CPU 80486

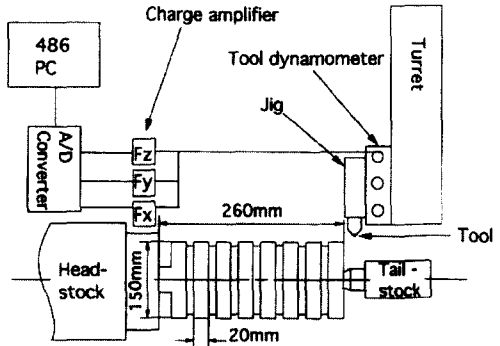


Fig. 2 Experimental device set up

Table 2. Chemical compositions of Al alloy (2024)

Cu	Si	Mg	Zn	Cr	Fe	Ti	Al	heat treatment
3.8 ~ 4.9	0.50 max	1.2 ~ 1.8	0.3 ~ 0.9	0.10 max	0.50 max	0.15 max	rest	T4

Table 3. Cutting conditions

Velocity(m/min)	200, 600
Feed(μ m/rev)	2, 5, 8, 11, 17, 23, 29, 35
Uncut-chip thickness (μ m)	3, 10, 17, 24

기위한 절삭을 진행하였다. CNC선반은 μ m까지 제어가 가능하지만 초정밀 전용가공기들과 달리 고속 회전시에 진동이 수반되었다.

절삭저항의 측정은 공구동력계에서 나온 신호를 증폭한 후 A/D컨버터를 통하여 컴퓨터에 입력하여 처리하였다. 절삭가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 거칠기를 측정식 표면조도계를 이용하여 컷오프(cut-off) 0.8mm, 트레이싱(traversing)길이 2.4mm의 조건에서 중심선 평균조도 Ra를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1 표면거칠기

Fig. 3은 절삭속도 600m/min에서 각 이송에 따른 MCD공구 선단반경 R의 변화가 절삭후의 공작물 표면 거칠기에 미치는 영향을 보여주는 그림으로써 이송이 8 ~ 11 μ m/rev에 도달하기 전까지는 선단반경의 변화에 따른 표면거칠기의 차이는 거의 나타나지 않고 이송이 8

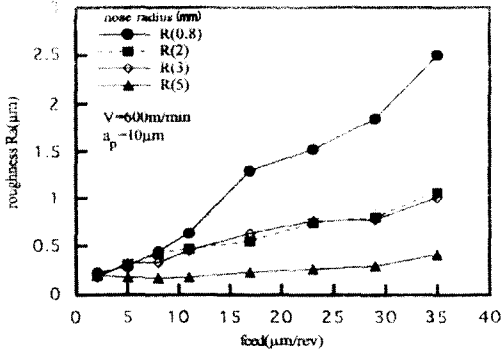


Fig. 3 The relation between surface roughness and feed

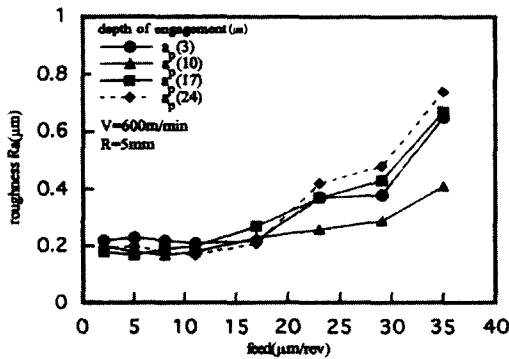


Fig. 4 The relation between surface roughness and feed

~11μm/rev를 넘어서면서부터 선단반경의 증가에 따라 공작물 표면거칠기의 차이가 현저하게 나타나고 있다.

공구 및 피삭재의 상태, 공작기계의 진동 등이 절삭 과정에 미치는 영향은 이송이 작은 범위에서 크게 작용되고, 이송이 11μm/rev를 초과하면서부터 이러한 영향보다 이송의 영향이 가공면의 표면거칠기에 더 크게 작용하고 있음을 보여준다. 이것이 정밀 가공에서의 본 공작기계의 한계라 할 수 있다.

가공면 표면거칠기에 미치는 영향은 같은 조건하에서 $Ra=0.0321 f^2/R$ 의 이론식에 의한 예상과 같이 큰 선단반경일수록 Ra가 작아지게 되며, 이송이 작아지면 절삭되는 칩 두께가 얇아져서 버니싱작용의 발생 가능성이 높아지고 표면거칠기가 향상된다. 그러나 버니싱작용이 발생될 경우 정상절삭은 이루어지지 않고 공작물과 절인의 접촉표면 증가에 따른 배분력의 증가로 인하여 공구와 공작물 사이에 진동의 발생 가능성이 높아

져 오히려 역효과를 가져올 수 있다. 따라서 선단반경이 커질수록 작은 이송과 물림깊이 하에서 진동이 증가하여 오히려 가공물 표면거칠기가 악화될 수 있다.

위에서 서술한 효과 때문에 작은 이송의 범위(2~11 μm/rev)에서는 선단반경에 따른 가공물의 표면거칠기 차이는 나타나지 않으며, 이송이 증가함에 따라 점점 그 차이는 명확하게 나타나고 있다. 이러한 특성은 같은 절삭조건일때 공작기계가마다 각각 다른 값을 보여줄 것이며 정밀도가 높은 공작기계일수록 보다 작은 이송의 범위에서도 안정된 절삭이 이루어 질 것이다.

Fig. 4는 MCD공구로서 절삭속도 600m/min, 선단반경 R=5mm인 상태에서 물림깊이를 변화시키면서 각 이송에 따른 가공면 표면거칠기를 나타낸 것으로서 이송이 작은 범위에서는 물림깊이에 따른 표면거칠기의 차이가 보이지 않지만 이송이 증가하면서 물림깊이가 증가할수록 표면거칠기도 악화됨을 보여주고 있다. 이때 물림깊이가 3μm일때 보다 10μm일때 예상과는 달리 표면거칠기가 작게 나타나고 있는데, 이는 작은 물림깊이 보다는 약간 물림깊이를 증가시켜 가공함으로써 안정적인 절삭이 이루어진 것으로 해석된다.

4-2 MCD공구 와 PCD공구의 비교

Fig. 5은 절삭속도 600m/min, 선단반경 R=0.8mm, 물림깊이 10μm의 조건에서 공구재질에 따른 인선반경의 차이가 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기위해 초경, PCD, MCD 공구로 각각 절삭한 후 가공면의 표면거칠기를 측정한 결과를 보여주고 있다.

이송을 2~11μm/rev로 비교적 작게 취한 경우에 초경공구에 의한 가공면의 표면거칠기가 가장 양호하게

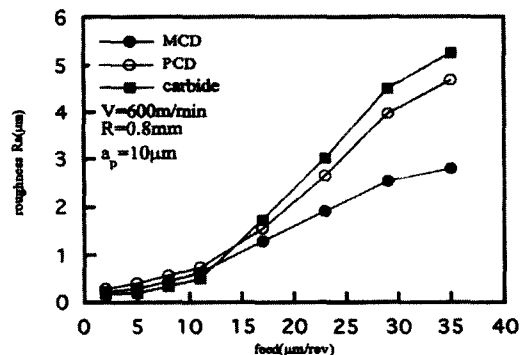


Fig. 5 The relation between surface roughness and feed

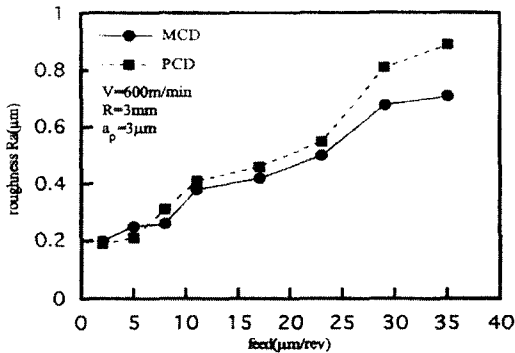


Fig. 6 The relation between surface roughness and feed

나타났으며, 다음으로 MCD공구, PCD공구 순으로 표면거칠기가 양호해짐을 보여주고 있고, 이송이 11 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 를 넘어서면서부터 초경공구에 의해 절삭된 공작물의 표면거칠기 상승폭이 커지고 있다. 이는 이송이 작은 범위에서는 다른 공구에 비하여 상대적으로 절인반경이 큰 초경공구의 버니상작용 때문에 발생하는 현상이라 생각되며 정상 절삭과정으로 판단하기는 어렵다.

Fig. 6은 절삭속도 600m/min, 물림깊이 3 μm , 선단반경 R=3mm인 경우 이송의 변화에 따른 MCD공구와 PCD 공구로 가공된 공작물의 표면거칠기를 비교한 그림이다.

이송이 작은 범위(2~8 $\mu\text{m}/\text{rev}$)에서는 PCD공구에 의한 가공면의 표면거칠기가 약간 양호하게 나타나다가 이송이 증가함에 따라 점차적으로 MCD공구에 의한 가공면의 표면거칠기가 더 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상 역시 PCD공구와 MCD공구와의 절인반경의 차이 때문에 발생하는 현상이라 생각되며, 물림깊이와 이송이 작은 범위에서는 절인반경이 큰 경우에 가공면 표면이 절인에 의해 불리는 버니상 작용에 의하여 가공면 표면거칠기가 일시적으로 양호하게 되어진다고 생각된다.

4-3 절삭저항

일반적인 초정밀 절삭과정중에 발생하는 절삭력은 아주 미소하며, 절삭력의 변화량에 비하여 진동의 영향이 크기 때문에 순간 순간의 정확한 크기를 측정하기는 매우 어렵기 때문에 본 실험에서는 각 조건에 따른 평균값을 측정하였다.

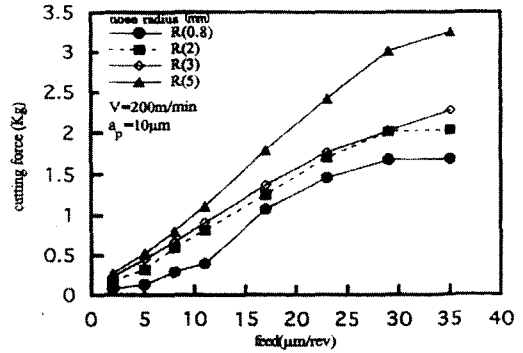


Fig. 7 The relation between cutting force and feed

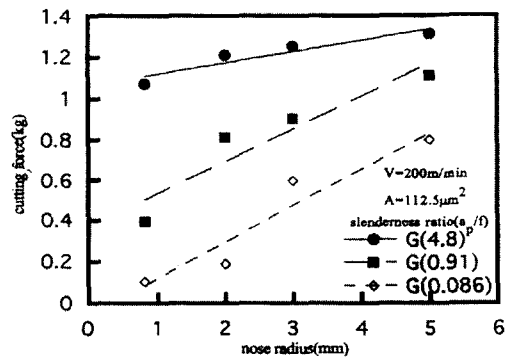


Fig. 8 The relation between cutting force and nose radius

Fig. 7은 절삭속도 200m/min, 물림깊이 10 μm 의 조건에서 MCD공구 선단반경에 따른 주분력의 변화를 보여주고 있다. 이송의 증가와 함께 주분력이 증가하고 있으며, 공구 선단반경이 커짐에 따라서도 주분력이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

같은 이송상태에서 공구의 선단반경 증가는 절삭칩 두께의 감소를 초래하게 되며 따라서 치수효과에 의하여 같은 단면적을 절삭 가공하는 경우 절삭력의 증가원인이 되는 것으로 추정된다.

Fig. 8은 절삭속도 200m/min, 절삭전 칩단면적(uncut chip sectional area) 112.5 μm^2 인 상태에서 세장비의 변화에 따른 공구 선단반경의 변화와 주분력과의 관계를 보여주고 있다. 세장비($G=a_p/f$)가 커짐에 따라 절삭력이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 초정밀 절삭에서도 물림깊이를 증가시키기 보다는 이송을 증가시키는 쪽이 치수효과와 관점에서 유리하다는 것을 알 수 있다. 세장비($G=a_p/f$)가 큰 경우보다 작은 경우가

선단반경에 따른 주분력의 증가율이 커지고 있다. 이것은 세장비가 큰 경우보다는 작은 경우가 물림깊이에 대하여 상대적으로 이송이 큰 경우이므로, 공구 선단반경에 따른 절삭칩 두께의 변화는 세장비가 클때보다 상대적으로 크게 나타나 주분력의 변화폭에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결 론

알루미늄합금을 다이아몬드 공구로 절삭할 때 이상의 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선단반경이 크고 이송이 작을수록 양호한 표면거칠기를 얻을수 있으나, 어느 특정값 이하의 이송과 물림깊이에서는 기계진동 등이 표면거칠기에 적지 않은 영향을 주고 있어 선단반경에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다.
2. 절인반경이 상대적으로 작은 MCD공구에 의한 표면거칠기가 PCD공구에 의한 것보다 작게 나타나나 이송과 물림깊이가 작은 어느 한계 범위에서는 버니싱 작용에 의해 PCD공구에 의한 표면거칠기 값이 일시적으로 양호하게 나타났다.
3. 세장비($G=a_p/f$)를 작게 취함으로써 비절삭저항을 작게할수 있으며, 세장비가 커질수록 공구 선단반경의 증가에 따른 절삭저항의 증가폭이 둔화되었다.

참고문헌

1. L.G.Whitten, T.G.Lewis, "Machining and Measurement to Submicron Tolerances", Proc. M.T.D.R., Pergamon Press, pp.491. 1966.

2. H.J.J.Kraakman, J.G.C.de Gast, "A Precision Lathe with Hydrostatic Bearings and Drive", Philips Tech. Rev., 30, 5, pp.117. 1969.
3. 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al 합금의 경면절삭에 관한 연구", 大韓機械學會論文集, 第14卷, 第6號, pp.1515-1522. 1990.
4. 이경호, 윤영식, 이상조, "다결정 다이아몬드 공구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si함량의 영향", 韓國精密工學會誌, 第12卷, 第6號, pp.20-26. 1995.
5. 棧井昭一, "走査電子顯微鏡によるダイヤモンド工具の刃先測定", 昭和61年度精密工學會春季大會學術講演會講演論文集, pp.365. 1986.
6. N.Ikawa et al., "Cutting Tool for Ultra-precision Machining", 3rd Int. Conf. Pro Eng., Kyoto, pp.357. 1977.
7. N.Moronuki, Y.Furukawa, "摩擦轉動による精密送り機構に関する研究", JSPE-54-11, 88-11-2113
8. A.Shimokobe, "超精密工作機械の驅動系構造と機構", 東京工業大學精密工學研究所, 超精密加工series-27.
9. Y.Kakino, Y.Ihara, Y.Nakatsu, A.Shinohara, "NC工作機械の運動程度に関する研究", JSPE-55-03, 89-03-587.
10. T.Sugano, K.Takeuchi, T.Goto, Y.Yoshida, "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror", Annals of the CIRP Vol.36, 1.1987.
11. 서남섭, "金屬切削理論", 東明社, 1994.