한국공작기계학회논문집 Vol.10 No.5 2001. 10.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

초정밀가공기를 이용한 비철금속의 절삭특성에 관한 연구

고준빈*, 김건희**, 원종호***

A study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diam ond turning machine

J. B. Ko*, G. H. Kim**, J. H. Won***

Abstract

The experimental study was the cutting characteristics of non-ferrous metals. The experimental apparatus was used the turning machine and diamond tool.

This aimed at finding the optimal cutting conditions by measuring surface form and roughness. Used non-ferrous metals were aluminum, brass and oxygen-free copper. As well, according to changing cutting conditions such as feed rate by measuring cutting force and surface roughness and according to cutting conditions the non-ferrous metals studied about cutting properties.

Key Words : diamond turning machine(초정밀가공기), non-ferrous metal(비철금속), Oxygen-free copper(무산소동)

1. 서 론

최근에 정밀기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련 기기를 비롯한 영상, 정보 및 항공 우주 산업 등의 급속한 발달로 인하여 그 구성 부품들의 고정도 가공에 대한 필요성이 증대되고 있다.[1] 초정밀 절삭가공은 1962년 미국의 Union carbide사가 다이아몬드(diamond) 절삭가공기술을 계획하고 프랑스의 Du pont사와 협동으로 고정도 기계를 개발하여 1966년 M.T.D.R.에 발표한 것이 최초이다.[2]CIRP에서 1983년에 Taniguchi[3] 가 제창한 후 1984년에 Loewendl[4] 1987년에는 McKeon[5]이 각각 의견을 발표한 바 있으며 초정밀 공학의 중요성을 제기하였다. 우리나라는 1990년 초부터 이 분야에 관심을 갖기 시작하여[6,7] 산업현장에서 초정밀절삭 가공기술에 의해 생산되어지는 제품으로는 VCR드럼, 레이저빔 (laser beam), 프린터의 폴리곤 미러(polygon mirror), 자기디스크, 복사기 드럼, 광학용품 등으로 이들 부품의 재료로서는 전자 산업과 정보산업의 발달로 인하여 고정밀도가 필요하게된 알루미늄, 구리, 무전해 니켈 등의 비철금속 및 플라스틱, 실리콘, 게르마늄 등의 비금속 등 대부분 연질재료가 사용되고 있으

* 한발대학교 기계설계공학과(kjb1002@hanbat.ac.kr)
** 기초과학지원 연구소
*** 충남대학교 기계공학과

며, 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정도를 내기가 어렵다. 이와 같은 단점들을 해소하기 위해 최근에는 고정도, 고강성을 지닌 초정밀 가공기와 내마멸성이 큰 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀절삭 가공기술이 급속히 발전하고 있다.[8] 앞으로 사용범위가 점차 확대되고 더욱 엄격해지는 가공정도를 만족시키기 위하여 다이아몬드 공구를 이용한 비철금속의 초정밀절삭 과정의 해석을 위한 체계적인 연구가 요망된다.

따라서, 본 연구에서는 비철금속인 알루미늄합금, 황동, 무산소동을 초정밀가공기로 절삭하여, 절삭조건에 따른 절삭특성을 분석하여 비철금속의 적정가공조건을 찾아내고, 가공데이터베이스를 구축하고자 한다.

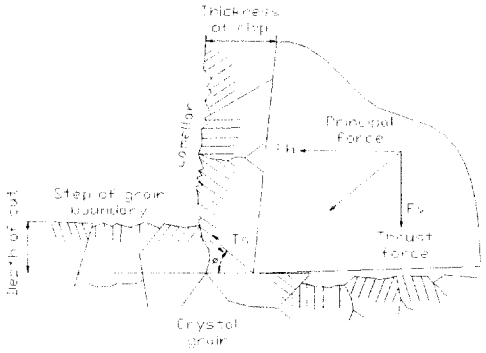
2. 초정밀절삭의 이론적 배경

초정밀 절삭에서는 연질의 금속 피삭재를 표면 거칠기 0.01㎛Ra, 형상정밀도 0.1㎛이하의 다듬질이 요구된다. 이 기술의 기본은 극히 높은 정밀도와 강성을 가진 공작기계의 운동을 다이아몬드 공구를 사용하여 피삭성이 좋은 공작물상에 충실히 전사하는 것이다. 이 경우의 절삭조건은 절입깊이 5-50㎛, 이송 속도 1-40㎛/rev, 절삭속도 2-5m/s의 범위이다. 따라서 칩의 생성 및 마찰 등의 가공현상이 발생하는 규모는 일반절삭에 비하여 1/10-1/100에 달하여 수㎛ 혹은 그 이하의 극히 작은 범위이고 이러한 현상 자체가 정밀도를 좌우하는 최대 요인의 하나이므로 그 특이성을 충분히 이해하는 것은 중요하다.

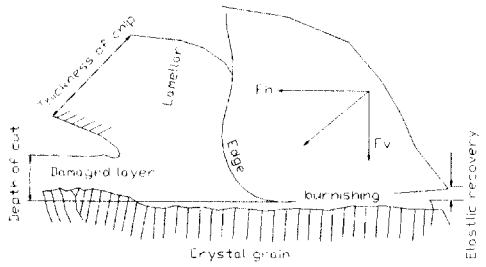
수 ㎜이상의 칩 두께가 보통인 일반 절삭에서는 절삭공구 날 끝의 예리함 정도로 취급하던 것도 수 ㎛이하의 칩을 발생시키는 미소절삭에서는 그러한 모델이 성립되지 않는다. 여기서는 일반절삭의 경우와 비교하여 초정밀 절삭에서 나타나는 절삭 현상의 특징을 고찰한다. Fig. 1의 (a)는 절삭깊이가 공구 반경보다 훨씬 큰 경우로서 일반적인 경우와 마찬가지로 칩 생성과정 및 표면의 성질은 각 결정 입자의 방위와 구조에 영향을 받는다. (b)는 날 끝 반경 R이 절삭깊이와 같은 정도의 미세절삭 의 경우로서 공작물은 커다란 음의 경사각으로 절삭되며 러빙(Rubbing)이나 버니싱(Burnishing)같은 소성 변형이 절삭작용보다 우세하다.

구체적으로 미크론 이하의 칩이 발생하여 절삭력 및 절삭온도의 변화가 달라진다. 그리고 기본적으로 공작물의 다듬질 면은 버니닝 과정에 의해 이루어진다. 바꾸어 말하면, 절삭면의 윤곽은 절삭 방향 에 수직한 면내에서 공구 윤곽의 복사이다. 따라서, 각종 교란이 없다면 매끄러운 공구일수록 다듬질면 을 형성하는 능력이 많은 것이다. 그러나 실제 공구 의 전사 과정에서의 절단특성은 공구 경사면과 공작물간의 각종 계면현상에 의해 다소 달라진다. 이는 피삭재의 탄 소성 거동에 의한 공간적, 시간적 변동 및 응착마모의 물질이동과 이에 따른 피삭재 내의 경질입자의 거동에 의한 것 등을 생각할 수 있다.[9]

일반 선삭가공시 발생하는 절삭력은 주분력(F_c),배분력(F_t), 이송분력(F_f)의 3분력으로 나눌 수 있으며, 주분력이 가장 크며 배분력의 약 3배정도로 나타난다.[10]이상적인 절삭에 있어서는 표면 거칠기는 이송량의 제곱에 비례한다. 즉, 일정 노우즈 반경의 공구를 사용하는 경우에서 이송량-표면 거칠기 선도는 포물선 분포를 이루며 이송량이 작아질수록 표면 거칠기는 향상된다. 그러나 실제의 가공에 있어서 표면 거칠기의 향상에는 한계가 존재한다. 이송량이 작아지면 공작물의 제거되는 부분이 작아지므로 공구의 위치가 정확하지 않으면 불안정한 절삭이 일어나기 쉬워지며 이를 막기 위하여 공작기계의 위치제어성능이 우수해야하며 공구의 고 강성이 요구된다.[11]



(a) Cutting model for large depth of cut



(b) Cutting model for small depth of cut

Fig. 1 Cutting model of orthogonal micro diamond cutting

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

선삭가공시 절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험 장치의 개략도는 Fig. 2에서 보여주고 있다. 초정밀 가공기(DTM)에 공구동력계를 장착할 수 있도록 지그(Jig)를 설계 제작하여 부착하였다. 실험은 단결정 다이아몬드 공구로 φ40×20 크기의 알루미늄과 황동, 무산소동을 단면절삭방법으로 절삭실험을 실시하였다. DTM에 설치된 압전형 공구동력계(Kistler 9257B)를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호는 증폭한 후 A/D변환기를 통하여 PC로 전송하여 데이터 처리하였다. 실험에 사용된 장비의 사양은 Table 1에 표시하였으며, Photo. 1은 절삭력 측정장치 사진이다.

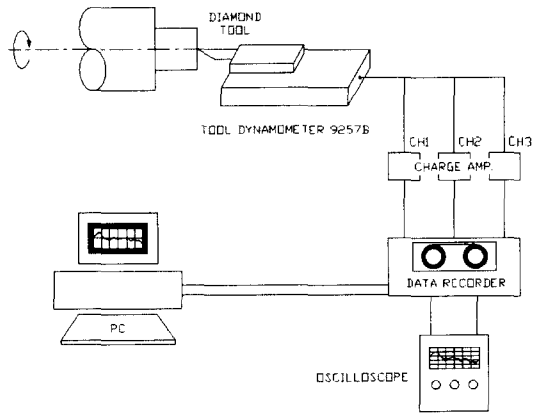


Fig. 2 Experimental setup of the DTM

Photo. 1 Tool Dynamometer

Table 1 Experimental apparatus

Apparatus	Maker	Model	Specification
Tool Dynanometer	Kistler	9257B	Natural frequency : 4㎑ Tangential force(Fz):0～10kN Radial force(Fy) : -5～5kN Feed force(Fx) : -5～5kN
Amplifier	Kistler	5007	Frequency range : 0～180㎑ Output current : ≤±5mA Output voltage : ±100V Output impedance : 100Ω Accuracy : ≤±1%
A/D Board	Kiethly	DAS-16F	16 Channels : 16SE Resolution : 12 bits Accuracy 0.01% of reading ±0.5%
Diamond Turning M/C	Taylor Hobson	Nanoform 600	Resolution : 1.25㎚ X-Axis Straightness: ≤0.15㎛ Z-Axis Straightness: ≤0.15㎛ Work Spindle Runout: ≤0.05㎛
Surface Test	WYKO	NT2000	Optical shifting : 0.1～150㎛ Objectives : 50X Resolution : 1 Å

3.2 피삭재 및 절삭공구

본 실험은 단결정 다이아몬드 공구로 가공이 가능한 φ40×20 크기의 알루미늄과 황동, 무산소동을 사용하였다. 그 화학조성은 Table 2와 같다.

실험에 사용된 공구재료는 천연다이아몬드이며, 공구의

Table 2 Compositions of Workpiece used in experiment

Com. / Met.	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
Al7075	0.10	0.08	0.03	4.41	0.43	0.02	0.01	0.08	rest
Brass	0.01	59.16	0.25	0.01	0.02	0.01	0.01	39.38	0.11
Cu	0.01	rest	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.40

기하학적 형상 및 크기는 경사각 0°,여유각 10°와 선단반경 2㎜로써 국내 다이아몬드 공구 제작사에 의뢰하여 제작하였다.

3.3 실험 방법

초정밀 가공기 자체의 특성파악을 위하여 가공을 하지 않는 상태에서 주축회전수에 따른 공구동력계의 신호를 측정한 결과 1500 rpm부근에서 안정적인 경향을 보여서

이송에 대한 절삭력 측정을 1500rpm에서 실시하였다. 회전수에 따른 비철금속의 표면거칠기를 측정하고, 이송속도 변화에 대한 알루미늄, 황동, 무산소동의 절삭력을 분석하였으며, 절삭가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 WYKO사의 비접촉식 표면조도 측정기인 NT2000으로 측정하였다.

4.실험결과 및 고찰

4.1 알루미늄합금의 이송속도에 관한 절삭력 실험

알루미늄합금의 이송에 대한 절삭력을 Fig. 3에 표시하였다. 회전수 1500rpm, 절삭깊이 10㎛로, 이송 속도 변화에 대한 동적상태의 절삭력을 나타낸 것이 다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송 클수록 절삭력이 크게 나타나며, 이는 이송이 클수록 절삭 면적이 증가하기 때문이다. 각 분력의 비를 보면 주분력은 이송속도가 10㎜/min 이하에서는 비례적으 로 증가하나 10㎜/min이상에서는 거의 변화가 없으며, 배분력과 이송분력은 선형적으로 증가하고 있다. 이송속도 5㎜/min에서 주분력 0.45N, 배분력 0.4N, 이송분력 0.3N정도로 나타나고 있다.

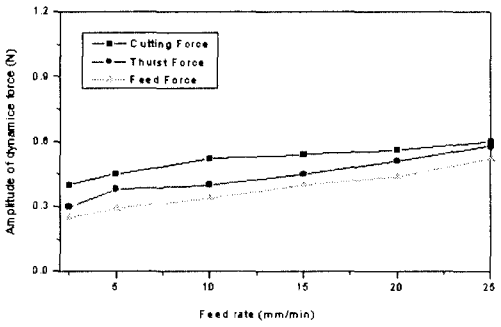


Fig. 3 Dynamic cutting force of Al-alloy according to feed rate(Spindle speed : 1500rpm, Depth of cut : 10㎛)

4.2 황동의 이송속도에 관한 절삭력 실험

황동의 이송에 따른 절삭력을 Fig. 4에 표시하였다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송이 클수록 절삭력이 크게 나타나며, 알루미늄의 절삭에서는 주분력이 더 크게 나타났지만 황동에서는 배분력이 현저히 높게 나타난다. 이는 황동의 조직이 연하고 취성이 커서 미세 절삭시 공작물이 커다란 음의 공구상면경사각(Negative Rake Angle)으로 절삭 되 며 러빙이나 버니싱 같은 소성 변형이 절삭작용보다 크기 때문이다. 이송속도 5㎜/min에서 주분력 0.29N, 배분력 0.5N,이송분력 0.4N정도로 나타나고 있다.

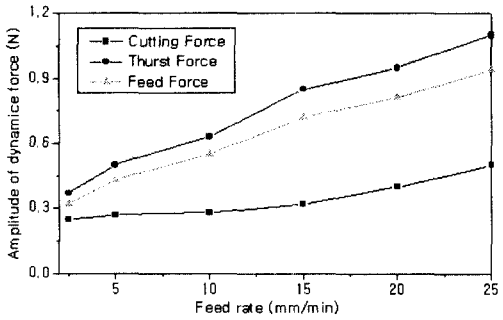


Fig. 4 Dynamic cutting force of brass according to feed rate(Spindle speed : 1500rpm, Depth of cut : 10㎛)

4.3 무산소동의 이송속도에 관한 절삭력 실험

무산소동의 이송에 따른 절삭력을 Fig. 5에 표시하였다. 절삭력의 경향을 보면, 이송이 클수록 절삭력이 크게 나타난다. 황동에서와 같이 배분력이 가장 높고, 주분력이 낮게 측정되며, 황동과 유사한 증가형태로 나타난다. 배분력과 주분력은 비선형적 으로 절삭력이 증가하나, 이송분력은 비철금속 모두에서 선형적으로 증가한다. 이송속도 5㎜/min 에서 주분력 0.29N, 배분력 0.37N,이송분력 0.32N 정도로 나타나고 있다.

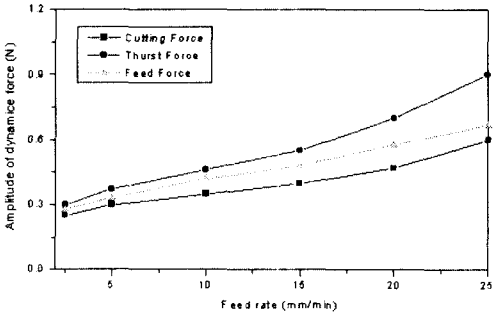


Fig. 5 Dynamic cutting force of oxygen-free copper according to feed rate(Spindle speed : 1500rpm, Depth of cut : 10㎛)

4.4 비철금속의 이송속도 변화에 대한 표면거칠기

비철금속인[12] 알루미늄, 황동, 무산소동의 이송에 따른 표면거칠기를 Fig. 6에 표시하였다. 이송이 커짐에 따라 표면거칠기가 불량해지며, 재질에 따라 살펴보면 무산소동이 가장 좋고, 알루미늄, 황동의 순으로 나타난다. 이는 재질에 따른 조직과 불순물 의 함유량 때문으로 사료된다. 회전수 1500rpm, 이송 2.5㎜/min, 절입10㎛에서 알루미늄은 9㎚Ra, 황동은 15㎚Ra, 무산소동은 7㎚Ra의 표면거칠기를 얻었다.

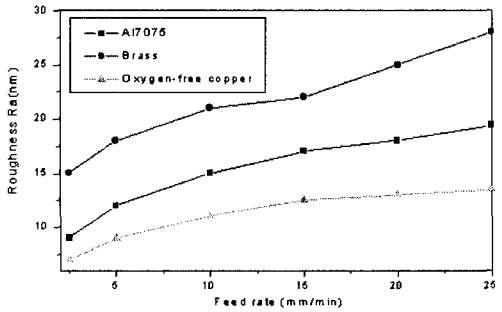


Fig. 6 Roughness(Ra: ㎚) corresponding of non- ferrous metal to feed rate(Spindle speed: 1500rpm, Depth of cut : 10㎛)

4.5 회전수 변화에 대한 비철금속의 표면거칠기

회전수에 따른 비철금속의 표면거칠기를 Fig 7에 표시하였다. 알루미늄 회전수에 따른 변화가 거의 나타나지 않으며, 황동과 무산 소동은 거칠기값의 차이만 있고 유사한 경향이 나타난다. 이는 소재에 내제된 구리의 함유량에 따른 조직의 차이로 사료된다. 황동과 무산소동은 낮은 회전영역에저 표면이 거칠지만 회전수가 증가할수록 면이 향상되며, 2100 rpm에서 가장 좋은 면을 나타내고 그 이상에서는 표면조도가 다시 불량해 진다. 알루미늄은 약 1500 rpm, 황동과 무산소동은 2100rpm 상태에서 표면거칠기가 낮게 나타난다.

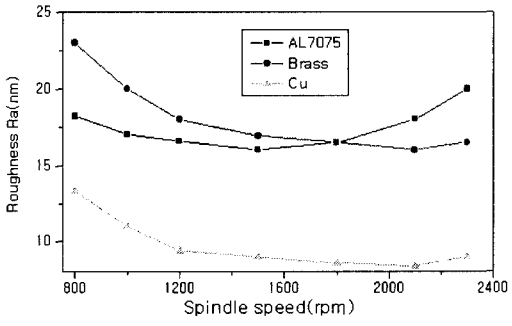


Fig. 7 Relationship between surface roughness(Ra) and spindle speed(Feed : 5㎜/min, depth of cut: 10㎛)

알루미늄은 1500rpm, 황동과 무산소동은 2100rpm의 속도영역이 적정절삭 속도임을 알 수 있다.

5. 결 론

초정밀가공에서 비철금속인 알루미늄, 황동, 무산소동의 절삭력 실험으로 가공에 미치는 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비철금속인 알루미늄, 황동, 무산소동을 초정밀 가공기에서 평면절삭을 수행하였으며, 절삭력을 측정하고 분석한 결과, 알루미늄의 경우에는 주분력이 크게 나타나며, 황동과 무산소동의 경우에는 배분력이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

(2) 표면거칠기는 회전수1500rpm, 이송 2.5㎜/min, 절 입 10㎛일 때 알루미늄은 9㎚Ra, 황동은 15㎚Ra, 무산소동은 7㎚Ra의 결과를 얻었다.

(3) 초정밀가공시 적정 회전수는 알루미늄 1500rpm, 황동 2300rpm, 무산소동 2100rpm의 부근에서 표면거칠기가 양호한 경향을 보였다.

참 고 문 헌

(1) 이후상, 외, "초정밀 절삭가공기술", 기계와 재료,2권 3호, pp.82~94, 1990

(2) L.G.Whitten, T.G.Lewis, "Machining and Measurement to Submicron Tolerance". Proc. M.T.D.R., Programon Press. pp.491, 1966

(3) N. Taniguchi. "Current Status in. and Future Trends of. Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing" Annals of the CIRP. 32/2/1983 pp. 573/582

(4) E.G.Loewn. "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining" Annals of the CIRP. 32/2/1984 pp.413/415

(5) P.A.Mckeown. "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future" Annals of the CIRP. 36/2/1987 pp.495/501
(6) 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al 합금의 경면절삭에 관한 연구".大韓機械學會論 文集, 제14卷, 제6號. pp.1515~1522. 1990
(7) 이경호, 윤영식, 이상조. "다결정 다이아몬드 공 구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si함량의 영향". 韓國精密工學會誌, 제12卷, 제6號. pp.20~26. 1995
(8) 김동원, "기계공작법", 청문각, 1986
(9) E.G.Loewn, "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining" Annals of the CIRP, Vol. 32, No.2, PP.413~415, 1984
(10) M.C.Shaw, "Metal Cutting Principles", Oxford Science Pub. 1991
(11) E.M.Trent, "Matel Cutting", Butterworth the Heinemann, 1991
(12) 전재억, 정진서, 하만경, "비철금속의 선삭에서 측면경사각과 이송량이 표면거칠기에 미치는 영향", 한국공작기계학회 논문집, 제10권, 제4호, pp.1~6, 2001