

직선날 다이아몬드 공구에 의한 Al합금의 정밀가공 특성 연구

유기현*, 정진용*, 권용기**, 서남섭***

A Study on the Precision Cutting Characteristics of Al-alloy by the Diamond Tool with the Straight Cutting Edge

Ki-Hyun Yu*, Chin-Yong Cheong*, Yong-Ki Kwon**, Nam-Seob Seo***

ABSTRACT

This research intends to gain the sight for the qualitative characteristics of precision cutting by using the CNC lathe with a mono-crystal diamond(MCD) tool having a straight cutting edge.

As an absolute value of tool setting angle becomes smaller, the surface roughness has improved. We knew that according to each of the machine tools and cutting edge radius, there exist a proper minimum feed and depth of engagement for improving the surface roughness. This results suggest that the proper values of feed and depth of engagement are about 11-15 μ m/rev, 10 μ m, respectively.

Key Words: Tool Setting Angle(공구설치각), Mono-Crystal Diamond(MCD, 단결정 다이아몬드), Straight Cutting Edge(직선 절인), Precision Cutting(정밀가공)

1. 서론

산업이 발전됨에 따라 컴퓨터의 메모리 디스크, 복사기 용 드럼 등 사무기기용 뿐만 아니라 다면체반사경을 비롯한 레이저 응용기기, X-선용의 천체망원경 및 현미경의 광기술에 정밀 가공기술의 용도가 점차 확대되어 가고 있다. 이와 같이 과학기술의 발달과 함께 좀더 미세한 영역 까지 절삭기술이 요구되어지며 광학, 전기 및 전자 그리고 기계 부품의 생산에 중요한 핵심 기술의 하나로 부각되고 있다. 정밀 절삭가공은 1960년대 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 J. B. Bryan에 의해

처음 시도되었으며, 그 이후로 미국, 유럽, 일본 등의 LLNL, CUPE, Union Carbide사, Pneumo Precision, Philips, 豊田工機 등의 업체에서 많은 연구와 개발로써 이 분야를 이끌어 가고 있다. 이에 반하여, 우리나라의 정밀 절삭가공 기술은 이들 나라에 비해 초보적인 수준이지만, 최근 그 응용기술이나 가공시스템에 관한 연구 개발이 활발해지고 있다⁽¹⁾.

현재 정밀 절삭가공을 위한 공구로서는 주로 다이아몬드 공구가 이용되고 있으며, 이로써 얻어지는 공작물의 표면거칠기는 이송과 공구절인 윤곽에 의해 기하학적으로 결정되는 이론적 표면거칠기와 밀접하게 관련되기 때

* 전북대학교 기계공학과 대학원
 ** 전주공업전문대학 기계과
 *** 전북대학교 기계공학과

문에 좋은 가공면을 얻기 위해 직선날 공구가 요구되며, 그 설치각이 적절히 조정되어야 한다. 이에 대하여, Masuda 등⁽²⁾은 정밀 공작기계에 존재하는 진동 가운데서 표면거칠기를 향상시키는데 선단반경이 곡선인 공구보다도 직선인 공구가 더 효과적이라는 보고를하였으며, 직선날의 다이아몬드 공구를 사용하여 공구설치각 변화에 따른 이론적 표면거칠기와 실제 가공된 표면거칠기 사이의 차이를 연구하였다⁽³⁾. 또한, 마모된 다이아몬드 직선날 공구로써 가공 표면의 생성기구에 대한 연구⁽⁴⁾ 뿐만 아니라, 다이아몬드 공구를 이용한 효율적인 선삭을 위해 직선날 공구의 장착장치를 연구 개발하였다⁽⁵⁾. 지금까지 정밀 절삭가공 기술에 관한 연구와 개발이 이루어져 왔지만, 앞으로도 더욱 더 많은 연구가 이루어져야 하겠다.

본 연구에서는 CNC선반과 직선 절인을 갖는 천연 다이아몬드 공구로써 알루미늄합금(Al alloy 2024)을 선삭하고, 이로부터 절삭조건에 따른 표면거칠기와 절삭력 변화 등의 가공특성을 조사하여 정밀 절삭에 관한 정성적인 데이터를 얻고자 한다.

2. 정밀 절삭가공의 조건

2-1 공작기계

절삭 현상은 공구와 피삭재간의 상대적인 운동에 의하여 이루어지므로 공작기계 운동의 정밀도는 정밀가공을 하기 위한 매우 중요한 요소로서 요구하는 가공형상을 높은 정밀도로 실현할 수 있는 요소의 구성과 절삭저항에 견딜 수 있는 강성, 온도에 대한 안정성, 진동의 안정성 및 장기간의 치수 안정성 등이 요구되며, 특히 주축의 회전 정밀도가 매우 높아야하고, 공구대의 정확한 위치제어 또한 반드시 갖추어야 할 사항이다.

그 밖에, 운동 요소들을 지지하는 기계 본체는 정적 및 동적인 강성과 열에 대한 강성이 커야 하고 정밀 공작기계는 일정한 온도의 윤활유를 공급하기 위한 펌프 유닛, 절삭유제의 공급장치, 기계의 운동을 제어하는 CNC 장치 및 칩으로부터 가공 표면을 보호하기 위한 흡진장치 등을 갖추어야 한다.

2-2 공구

정밀 절삭가공에 있어 가공 정밀도의 한계를 결정하는 요인의 하나인 공구는 미세한 칩 생성과 매끄럽고 변질층이 작은 다듬질면을 생성할 수 있는 능력 및 내구성 등을 요한다. 천연 다이아몬드가 정밀 절삭공구로서 가지는 장

점으로는 경도와 열전도율이 커서 최고온도 저하 및 마찰 계수가 작아 칩 유동을 원활하게 할 수 있다는 점 등이며, 특히 예리한 절인을 형성할 수 있다는 점이다. 정밀가공에 가장 필수적 요소인 절인반경은 정확하게 측정된 값은 없으나, 최근 그 측정값이 20~45mm의 범위라는 보고가 있다.⁽⁶⁾

정밀 절삭을 위해서는 미세절삭이 되어야 하고, 이러한 미세절삭에서는 물림깊이와 이송이 아주 작기 때문에 공구의 절인반경 크기에 따라 공작물이 절삭되어지거나 아니면 공구의 여유면쪽으로 밀려들어가 버니싱(burnishing)작용을 하기 때문에 정밀 절삭에서는 공구의 절인반경 크기가 아주 중요한 요소가 된다.

Fig. 1에서와 같이 절삭깊이(uncut-chip thickness,

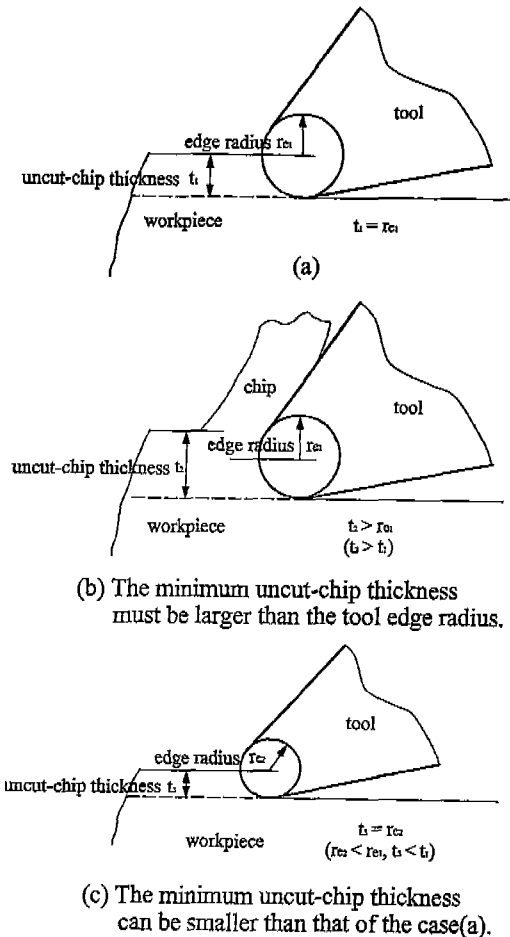


Fig. 1 The effect of the tool edge radius on the minimum uncut-chip thickness

t_1, t_2, t_3 와 절인반경(re_1, re_2)의 크기에 따라 정상절삭의 여부가 결정된다. 그림에서 (a)의 경우는 절삭이 이루어지기 힘든 경우이며, 정상절삭이 이루어지기 위해서는 (b)와 같이 최소 절삭깊이를 t_1 이상($t_2 \cdot re_1$)의 값으로 취해야 한다.¹⁸⁾ 또한, (c)의 경우는 (a)의 공구보다 절인반경을 작게 함으로써 최소 절삭깊이를 더 작게 취할 수 있음을 보여준다. 따라서, 절인반경이 작을수록 보다 작은 미세절삭이 가능하므로, 절인반경의 크기에 따라 절삭깊이를 결정하는 이송과 물림깊이의 최소값에 제한을 받는다. 물림깊이와 이송을 작게 취함으로써 치수정밀도를 높이고 이송의 감소에 따라 기하학적 표면거칠기를 향상시키며, 절삭저항 감소에 따른 진동의 영향 및 절삭 후 표면층의 잔류응력을 최소화 시킬 수 있는 이점이 있다. 한편, 천연 다이아몬드 공구는 백계성이라는 단점과 결정면에 따라 강도의 차이가 현저하여 마모의 정도가 다르기 때문에 공구 제작시에는 세심한 주의를 필요로 한다.

2-3 기타 조건

그 밖에, 가공재료, 절삭조건, 절삭유제 및 주위 환경에 대한 충분한 지식을 가져야 하며, 이와 더불어 서브마이크로미터(submicrometer)의 값을 측정할 수 있는 정밀 측정법이 뒤따라야 한다.

이상과 같은 이상적 조건을 구비한 상황에서만이 절대적 의미의 정밀절삭이 가능하나 본 연구에서는 상대적 의미의 정밀절삭에 대한 정성적 해석에 관점을 두어 다음과 같은 조건에서 실험을 수행 하였다.

3. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

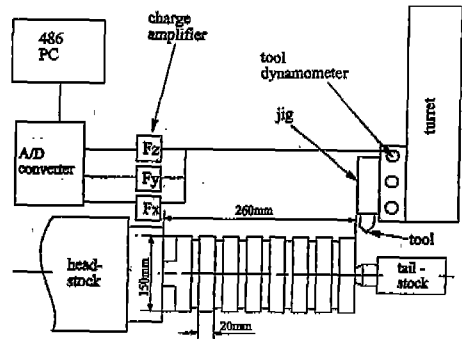
본 실험에 사용된 실험장치는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental apparatus

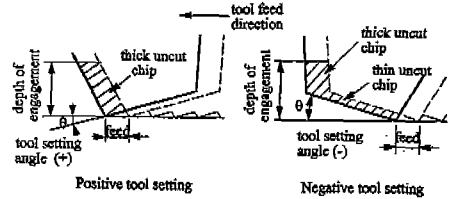
CNC Lathe	PUMA 6S turret type(DAEWOO)
Tool dynamometer	KISTLER 9257A
Charge amplifier	KISTLER 5001
A/D converter	FPGA ASIC controller
486 computer	CPU 80486
Surface roughness tester	Minutoyo Surf-test-201
SEM	HITACHI X-650
Metal microscope	OLYMPUS MF-TR

이 실험에 사용된 공구동력계와 공구를 설치하기 위해 지그(jig)를 설계, 제작하였으며, Fig. 2에서 (a)는 실험

에 사용된 각장비들의 세팅을 보여주며, (b)는 공구설치각에 따른 공구 설치형상을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 양의 설치각(Positive tool setting)에서는 끝절인보다는 측면절인에 의해 절삭이 이루어지며 공구절인에 따른 절삭깊이가 일정하고, 음의 설치각(Negative tool setting)인 경우는 끝절인과 측면절인에 의해 절삭이 이루어져 공구절인 위치에 따라 절삭깊이가 변하게 된다.



(a) Experimental device setup



(b) Tool shape

Fig. 2 (a)Experimental device setup and (b)tool shape

3-2 공작물 재료 및 절삭공구

실험에 사용된 피삭재는 항공기 및 기타 기계부품에 많이 사용되는 알루미늄합금(Al alloy 2024)을 선택하였으며, Table 2는 그의 화학적 조성성분을 보여준다.

Table 2 Chemical compositions of Al alloy (2024)

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

실험에 사용된 공구는 직선날의 천연 다이아몬드 공구로서, 기하학적 형상 및 크기는 경사각 0°, 여유각 5°, 절인길이 2.5mm, 선단각 70°(주절인각 35°, 부절인각 55°)인 직선날 공구이며, 국내 다이아몬드 공구 제작사에 의뢰하여 제작하였다.

Photo 1은 MCD(Mono-Crystal Diamond, 단결정 다이아몬드)공구와 PCD(Poly-Crystal Diamond, 다결정 다이아몬드)공구의 경사면과 절삭날을 금속현미경으로 100배 확대한 것으로서, MCD공구의 절인 및 경사면 거칠기가 양호하게 나타나고 있음을 비교하여 보여준다.

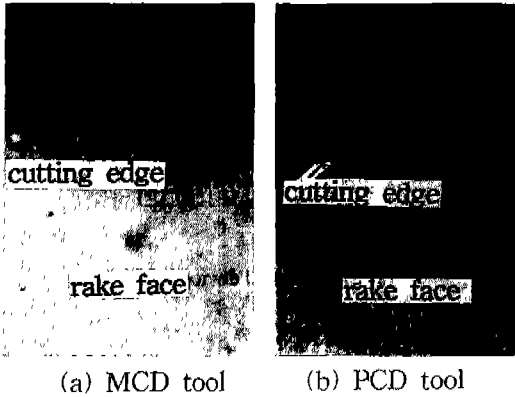


Photo. 1 Shape of the cutting edge

3-3 실험방법

지그를 이용하여 공구동력계를 CNC선반의 터렛에 고정시키고, 피삭재를 CNC선반의 주축대와 심압대에 고정시킨 후, 다이아몬드 공구(MCD 공구)를 이용하여 절삭을 하였다. 가공 시작시에 공구가 충격을 받지 않도록 사포로 모서리를 테이퍼 가공(chamfer가공)하였고, 공작물 표면의 초기상태를 균일하고 일정하게 하기 위한 방법으로 물림깊이 6 μ m, 이송 5 μ m/rev로 매번 전절삭(pre-cutting)을 한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였다.

사용된 CNC선반의 가능한 최소이송과 물림깊이는 각각 Z축 1 μ m/rev, X축 0.5 μ m이며, 최대 회전수는 4000rpm이지만 진동의 영향에 의한 데이터의 신뢰성 때문에 Table 3 과 같은 절삭조건을 설정하였다.

절삭저항의 측정은 공구동력계에서 나온 신호를 증폭시킨 다음 A/D컨버터를 통하여 컴퓨터에서 볼 수 있도록 하였으며, 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 거칠기를

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed (m/min)	200, 400
Feed rate (μ m/rev)	2, 5, 8, 10, 11, 17, 23, 29, 35, 40
Depth of engagement (μ m)	3, 10, 17, 24, 25

측침식 표면조도계를 이용하여 컷오프(cut-off) 0.8mm, 트래버싱(traversing) 길이 2.4mm의 조건에서 중심선 평균거칠기 Ra를 측정하였고, 이상의 방법으로 얻은 데이터를 각 절삭조건별로 그래프화하여 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1 공구설치각(θ)에 따른 표면거칠기와 절삭력

Fig. 3은 절삭속도 200m/min, 물림깊이 25 μ m, 이송이 각각 10과 40 μ m/rev인 경우, 공구설치각에 따른 표면거칠기를 보이고 있다. 그림에서와 같이 이송이 상대적으로 작은 10 μ m/rev 일 때 예상과 같이 표면거칠기 값이 작게 나타나며, 공구설치각이 양의 방향으로 0에 가까워질수록 양호한 값을 갖게 된다. 그러나 설치각이 1°이하에서 표면거칠기는 0.04 μ m이하의 아주 작은 값을 나타내는 이른치에 비해 실제값은 상당히 큰값을 나타내는데 이러한 원인은 공작기계의 진동이나 공작물과 공구의 채터링 현상, 주위 환경 등의 영향때문인 것으로 판단된다.

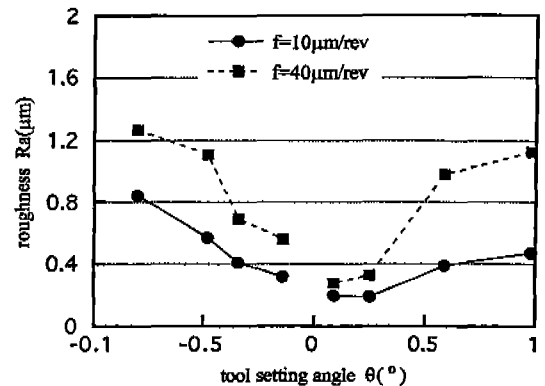


Fig. 3 The effect of feed and tool setting angle on the roughness (V=200m/min, d=25 μ m)

Photo 2의 (a)와 (b)는 절삭속도 200m/min, 이송 10 μ m/rev인 상태에서 공구설치각이 각각 0.09°와 -0.1°일 때 가공후 가공면의 SEM 사진이다. 공구설치각이 양

(+)인 0.09° 의 경우에 굽힘과 찢긴 자국이 많고 미세 분말들이 표면에 붙어 있음을 볼 수 있다. 반면에 (b)에서와 같이 공구설치각이 -0.1° 일때에는 굽힘 자국은 적으나 이송 사이의 경계에서 발생하는 버(burr)가 밝게 나타나고 있으며 이러한 것들이 표면거칠기를 감소시키는 원인이 됨을 알 수 있다. 또한, (c)와 (d)는 공구설치각 -0.8° 인 상태에서 이송을 각각 $10\mu\text{m}/\text{rev}$, $40\mu\text{m}/\text{rev}$ 으로 변화시킨 상태의 가공면 사진이다. 두가지 경우 모두 찢긴 자국이 나타나고 있으나, 이송이 $40\mu\text{m}/\text{rev}$ 에서 굽힘 자국 외에도 이송과 이송사이의 버(burr)가 더 크게 보이고 있어 표면거칠기에 버(burr)가 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 양호한 표면거칠기를 생성시키기 위해서는 공구설치각을 음(-)의 방향으로 설정함과 동시에 이송경계 사이에서 발생하는 버(burr)를 제거할 수 있는 연구가 필요하다. 더불어 절인에 의한 굽힘 자국과 가공된 표면에 부착된 미세 칩핑(chipping) 등의 손모가 발생하지 않도록 주의하고, 흡진기와 적절한 절삭유제의 필요성을 재확인 하게 되었다.

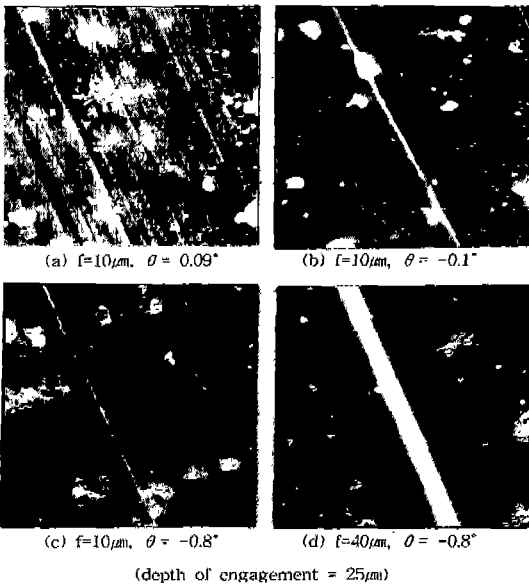


Photo. 2 SEM photographs of the machined surface($\times 700$)

Fig. 4는 절삭속도 $200\text{m}/\text{min}$, 이송 $10\mu\text{m}/\text{rev}$, 물림깊이 $25\mu\text{m}$ 의 경우, 절삭력에 대한 공구설치각의 영향을 보여준다. 공구설치각이 양(+)의 방향에서 음(-)의 방향

으로 변화되면서 절삭력이 증가되고 있다.

이러한 원인은 음의 공구설치각에서는 주로 측면 절인이 절삭 작용에 관여하는 양의 공구설치각과는 달리, 측면 절인 뿐만 아니라 끝 절인의 많은 부분이 절삭 작용에 참여하고 있어 끝 절인에 따른 버니싱현상과 공작물과의 접촉길이 증가에 따라 배분력이 상승된다고 판단된다.

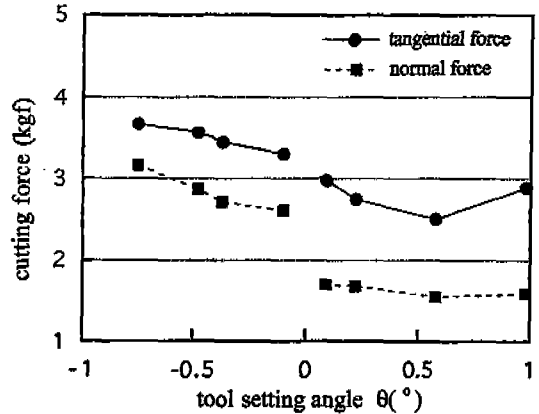


Fig. 4 The effect of tool setting angle on the cutting force ($V=200\text{m}/\text{min}$, $f=10\mu\text{m}/\text{rev}$, $d=25\mu\text{m}$)

4-2 표면거칠기에 대한 이송과 물림깊이의 영향

Fig. 5는 절삭속도를 $400\text{m}/\text{min}$, 공구설치각이 0.09° 인 경우 이송과 물림깊이 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 보여준다.

그림으로부터 알 수 있듯이 이송의 증가와 더불어 표면 거칠기 역시 증가하는데 이는 이론적인 경향과 같고, 이

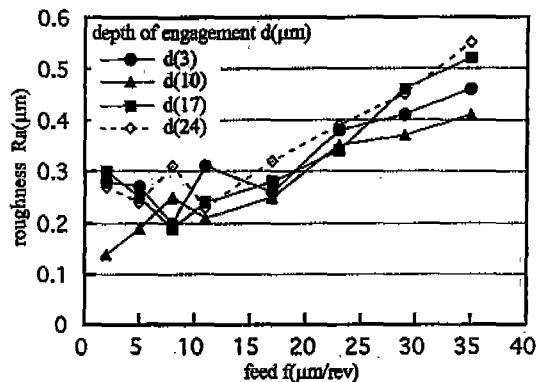


Fig. 5 The effect of depth of engagement and feed on the roughness ($V=400\text{m}/\text{min}$, $\theta=0.09^\circ$)

송이 적은 부분, 즉 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 이하의 범위에서 표면거칠기가 일정한 경향을 나타내지 못하고 있음을 보여준다. 여기에서는 이송이 작을 경우에 버니싱작용이 발생하고, 공구와 공작물 사이의 상대진동이 공구가 정상절삭을 수행하는 절삭깊이에 영향을 미침으로써 불안정한 절삭이 이루어지기 때문이다.

표면거칠기에 대한 물림깊이의 영향은 Fig. 6에 나타나듯이, 물림깊이가 증가할수록 표면거칠기 역시 증가하고 있음을 보여준다. 그러나 작은 물림깊이인 $10\mu\text{m}$ 이하에서 물림깊이가 작을수록 표면거칠기 값이 증가하게 되는데 이것 역시, 물림깊이가 작아짐으로써 정상절삭이 잘 이루어지지 않아 가공된 면의 거칠기가 불량하게 됨을 알 수 있다.

따라서 정상절삭으로서 안정된 표면거칠기를 얻을 수 있는 최적이송은 $11\sim 15\mu\text{m}/\text{rev}$ 정도이었고, 이송만큼 크지 않았지만 표면거칠기에 대한 물림깊이의 영향은 대체로 $10\mu\text{m}$ 부근의 물림깊이에서 양호한 표면거칠기를 나타내었다.

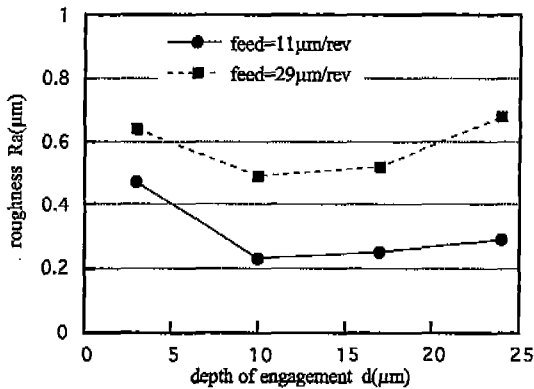


Fig. 6 The effect of feed and depth of engagement on the roughness ($V=200\text{m}/\text{min}$, $\theta=-0.1^\circ$)

4-3 절삭력에 대한 이송과 물림깊이의 영향

Fig. 7과 8은 각각 설치각이 -0.1° 와 0.09° 일 때 절삭속도 $200\text{m}/\text{min}$, 물림깊이 $10\mu\text{m}$ 인 경우 이송에 따른 절삭력을 나타낸다.

각각의 그림에서 볼 수 있듯이 이송이 커질수록 칩 단면적이 증가하며 이에 따라 절삭력이 증가하고 있으며, 또 주분력(tangential force)이 배분력(normal force)보다 대체로 크게 나타나고 있다. 그러나, 이송이 작은 범

위에서는 오히려 배분력이 주분력보다 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 버니싱작용과 함께 비정상절삭이 이루어졌기 때문이다.

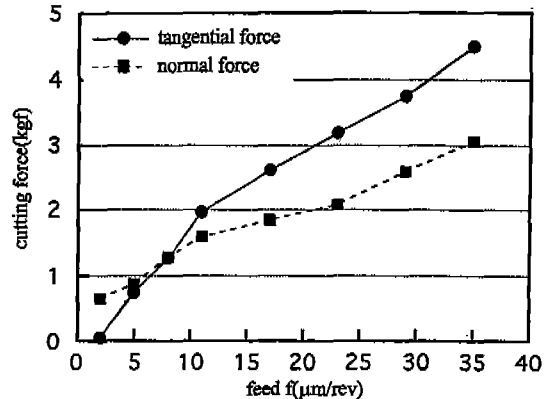


Fig. 7 The effect of feed on the cutting force ($V=200\text{m}/\text{min}$, $d=10\mu\text{m}$, $\theta=-0.1^\circ$)

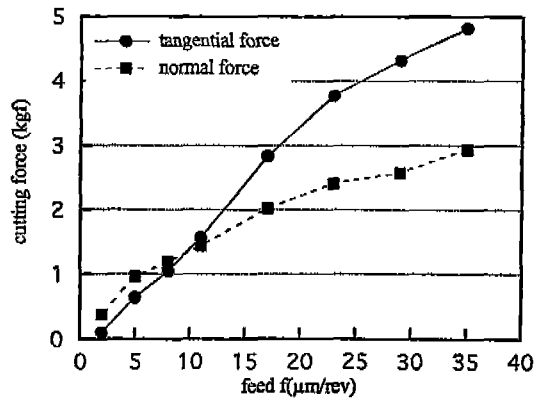


Fig. 8 The effect of feed on the cutting force ($V=200\text{m}/\text{min}$, $d=10\mu\text{m}$, $\theta=0.09^\circ$)

Fig. 9는 절삭력에 대한 물림깊이의 영향을 나타내고 있다. 물림깊이에 따라서 절삭력의 변화가 뚜렷함을 보이고 있으며, 역시 주분력이 배분력보다 전체적으로 크게 나타나지만 이송의 경우와 마찬가지로 물림깊이가 어느 특정 값 이하가 되면 배분력이 주분력보다 크게 됨을 보여준다.

이송이나 물림깊이가 특정 값 이하로 되면 uncut-chip 두께가 어느 한계 이하로 되어 정상절삭이 아닌 버니싱현상이 발생되고, 이로 인한 마찰력의 증가와 공구-공작물 간의 진동이 더 크기 때문에 정밀 절삭에서의 정상절삭을 위해서는 절인반경이 가능한 작아야 하며, 절인반경과 공

작기계 진동의 지배를 받지 않는 최소이송과 최소물림깊이를 설정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

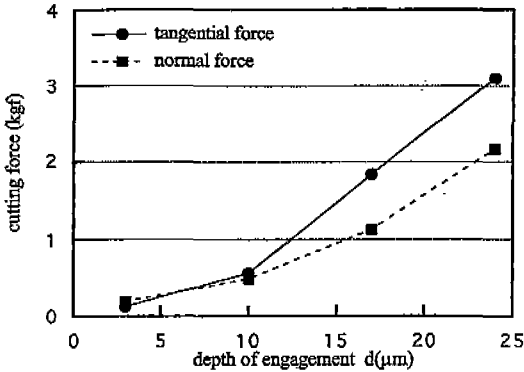


Fig. 9 The effect of depth of engagement on the cutting force (V=200m/min, f=8μm/rev, θ=-0.1°)

5. 결 론

직선날 다이아몬드 공구를 이용하여 알루미늄 합금을 절삭가공 실험한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공구설치각에 따른 표면거칠기는 설치각이 0 에 가까워짐에 따라 작은 값을 나타내었고, 설치각이 음(-)인 경우 양의 설치각인 경우보다 절삭력이 크게되며 주분력의 증가보다는 배분력의 증가가 크게 나타났다.
2. 이송과 물림깊이가 특정값 이하로 되면 불안정한 표면거칠기 값을 나타내었으며 본 실험에서 최적의 이송은 11~15μm/rev, 물림깊이는 10μm 정도였다.
3. 미세절삭에서는 이송과 물림깊이가 표면거칠기 및 절삭저항(배분력)에 영향을 주므로, 정상절삭을 이루는 최소절삭깊이를 설정함으로써 표면거칠기의 향상과 절삭저항의 감소를 가져올 수 있고, 표면거칠기 및 절삭저항의 변화 상태로 정상 절삭조건을 한계를 추정할 수 있다.

1. 강철희 외, "초정밀가공 공작기계의 개발에 관한 연구 (I), (II)", 과기처 특정연구 보고서, 1990, 1991.
2. Takasu, S., Masuda, M., Nishiguchi, T., "Influence of Steady Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining", Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1; pp. 463~467, 1985.
3. Nishiguchi, T., Maeda, Y., Masuda, M., Sawa, M., "Mechanism of Micro Chip Formation in Diamond Turning of Al-Mg Alloy", Annals of the CIRP, Vol.37, No. 1. pp. 117~120, 1980.
4. Masuda, M., Maeda, Y., Nishiguchi, T., Sawa, M., "A Study on Diamond Turning of Al-Mg Alloy - Generation Mechanism of Surface Machined with Worn Tool", Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 111~114, 1989.
5. Sawa, M., Maeda, Y., Masuda, M., Ito, R., "Development of an Advanced Tool-Setting Device for Diamond Turning", Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 87~90, 1993.
6. Asai, S., Taguchi, Y., Horio, K., Kasai, T., "Measuring the Very Small Cutting-Edge Radius for a Diamond Tool Using a New Kind of SEM Having Two Detectors", Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 85~88, 1990.
7. 서남섭, "金屬切削理論", 東明社, pp. 217~243, 1994.
8. 서남섭, "新版 精密工作法", 大光書林, pp.503~528, 1996.