

다이아몬드 직선 절인에 의한 Al합금의 가공특성에 관한 연구
(A study on the machining characteristics of Al-alloy by
diamond tool with the straight cutting edge)

유종선*, 유기현†, 정진용‡, 서남섭**

* 전북대학교 기계공학과 대학원

** 전북대학교 기계공학과

1. 서 론

최근의 사무기기용 다면체반사경을 비롯하여 메모리디스크, 복사기용 드럼 등은 물론 레이저 용융, X-선용의 천체망원경 및 현미경 등의 광기술에 “초정밀 가공기술(Ultraprecision machining technique)”의 용도가 점차 확대되어 가고 있는데, 이는 진보된 과학과 공업기술에 대한 시스템에 있어서 광학, 전기 및 전자 그리고 기계 부품의 생산에 가장 중요한 핵심 기술의 하나이다.

가공 정밀도의 수준은 시대의 기술 정도에 따라 다르며, 오늘날에 있어서 “초정밀가공(Utraprecision machining)”이란 $0.01\mu\text{m}$ 과 $0.001\mu\text{m}$ (=1nm) 정도 내의 치수공차와 표면거칠기를 각각 의미하며, 나노테크놀로지(nanotechnology)로 일컬어진다¹⁾.

현재의 의미에 있어서 초정밀 절삭가공은 1960년대 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 J. B. Bryan에 의해 처음 시도되었으며, 그 이후로 미국과 유럽은 물론 일본의, LLNL, CUPE 등의 연구기관과 Union Carbide사, Pneumo Precision, Philips, 豊田工機 등의 업체에서 많은 연구와 개발로써 이 분야를 이끌어가고 있다. 이에 반하여, 우리나라의 초정밀 가공기술은 이들 나라에 비해 초보적인 수준이지만, 최근 그 응용기술, 가공시스템에 관한 연구·개발이 활발해지고 있다²⁾.

현재 경면가공을 위한 초정밀 공구로서 다이아몬드 공구가 사용되고 있고, 이로써 얻어지는 표면거칠기는 공구의 이송과 절인 윤곽에 의해 기하학적으로 결정되는 이론적 표면거칠기와 밀접하게 관련되어 있기 때문에 좋은 가공면을 얻기 위해 직선날의 공구가 요구되며, 그의 설치각이 적절하게 조정되어야만 한다. 이에 대하여, M. Masuda 등은 정밀 다이아몬드 공작기계에 존재하는 전동 가운데서 표면거칠기를 향상시키는데 선단반경이 곡률을 갖는 공구보다도 직선날인 공구가 더 효과적이라는 보고를 하였으며³⁾, 직선날의 다이아몬드 공구를 사용하여 공구설치각의 변화에 따라서 이론적인 표면거칠기와 실

제 가공된 표면거칠기 사이의 차이를 연구하였다⁵⁾. 또한, 마모된 다이아몬드 직선날 공구로써 가공 표면의 생성기구에 대한 연구⁶⁾ 뿐만 아니라, 효율적인 다이아몬드 선삭을 위해 직선날 공구의 설정장치를 연구·개발하였다⁷⁾.

본 연구에서는 초정밀 전용 공작기계가 아닌 범용CNC 선반에 초정밀 절삭공구인 직선 절인의 천연다이아몬드 공구와 공작물로써 알루미늄합금(Al alloy 2024)을 장착하고, 선삭하여 초정밀 절삭에 관한 정성적인 데이터를 얻고자, 절삭조건에 따른 표면거칠기와 절삭력 등의 변화를 조사하였다.

2. 초정밀 절삭가공의 조건

2-1 공작기계

절삭 현상이 공구와 공작물간의 상대적인 위치운동에 의하여 이루어져 형상 정도를 갖는 의미에서 공작기계 운동의 정밀도는 초정밀 가공을 하기 위한 매우 중요한 요소이다. 이러한 면유에서 초정밀 가공용 공작기계는 요구하는 가공형상을 높은 정밀도로 실현할 수 있는 요소의 구성과 절삭저항에 견딜 수 있는 강성, 온도에 대한 안정성, 전동의 안정성 및 장기간의 치수 안정성 등이 요구되며, 특히 주축의 회전 정밀도가 매우 높아야하고, 공구대의 정확한 위치제어 또한 반드시 갖추어야 할 사항이다.

이 밖에, 운동 요소들을 지지하는 기계 본체는 정적 및 동적인 강성과 열에 대한 강성이 커야 한다. 그리고 초정밀 공작기계에는 일정한 온도의 오일을 공급하기 위한 윤활유 펌프 유니트, 절삭유제의 공급장치, 기계의 운동을 제어하는 CNC 장치 및 칩으로부터 가공 표면을 보호하기 위한 흡진장치 등을 갖추어야만 한다.

2-2 공 구

초정밀 절삭가공에 있어서 가공 정밀도의 한계를 결정하는 요인의 하나인 공구는 매우 미세한 칩 생성과 매끄럽고 변질층이 작은 다듬질면을 만들 수 있는 능력 및 내구성 등을 요구한다. 천연다이아몬드가 초정밀 공구로서 가지는 장점으로는 가장 큰 경도, 예리한 절인, 열전도율이 커서 최고온도 저하 및 마찰계수가 작아 원활한 칩 유동을 도모할 수 있다는 점 등이다. 이 가운데서 초정밀 가공에 가장 필수적 요소인 절인반경은 정확하게 측정된 값은 없으나, 최근 그 측정값이 20~45μm의 범위라고 보고되었다⁸⁾.

경면을 생성시키기 위해서는 미세절삭이 이루어져야 하고, 이러한 미세절삭에서는 물림깊이와 이송이 아주 작기 때문에 공구의 날끝 반경크기에 따라 공작물이 절삭 작업이 이루어지거나 또는 공구의 여유면쪽으로 밀려들어가 벼니싱작용 등을 하기 때문에 초정밀 절삭에서는 공구날끝 반경의 크기가 아주 중요한 요소가 된다.

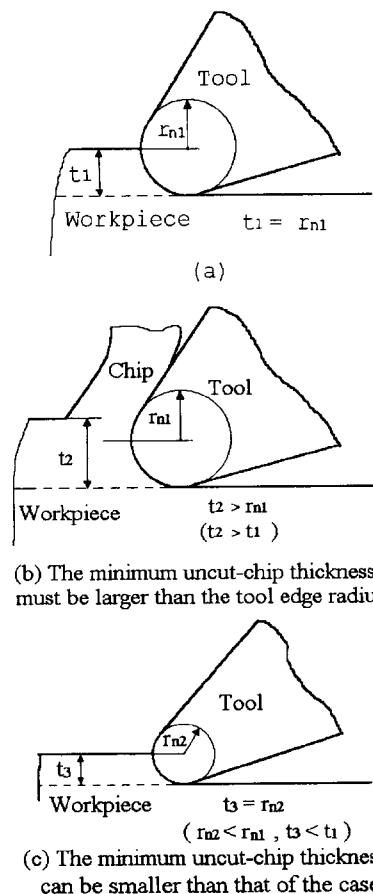


Fig. 1 The effect of the tool edge radius on the minimum uncut-chip thickness

Fig. 1에서와 같이 물림깊이에 따른 절삭날 반경의 크기에 따라 정상절삭의 여부가 결정된다. 그림에서 (a)의 경우는 절삭이 이루어지기 힘든 경우이며, 정상절삭이 이루어지기 위해서는 (b)와 같이 최소 물림깊이로 $t_1 (=r_{n1})$ 이상의 값을 취해야 한다. 또한, (c)의 경우는 (a)의 공구보다 날끝 반경을 작게 함으로써 최소 물림깊이를 작게 취할 수 있다. 따라서, 절인반경이 작을수록 보다 작은 미세절삭이 가능하며, 절삭날 반경의 크기에 따라 이송과 물림깊이를 작게하는데 제한을 받는다. 물림깊이와 이송을 작게 취함으로써 치수정밀도를 크게 하고 이송의 감소에 따라 기하학적 표면거칠기를 향상시키며, 절삭저항 감소에 따른 진동의 영향 및 절삭후 표면층의 잔류응력을 최소화 시킬 수 있는 잇점이 있다. 한편, 천연다이아몬드 공구는 벼개성이라는 단점과 결정면에 따라 강도의 차이가 현저하여 마모의 정도가 다르기 때문에 공구의 생산에 있어서 세심한 취급을 필요로 한다.

2-3 기타 조건

그 밖에, 가공재료, 절삭조건, 절삭유체 및 주위 환경에 대한 충분한 지식을 가져야 하며, 이와 더불어 셔브마이크로 이하의 값을 측정할 수 있는 정밀측정법이 뒤따라야 한다.

3. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental apparatus

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

이 실험에 사용된 공구동력계와 공구를 설치하기 위해 지그(jig)를 설계, 제작하였으며, Fig. 2는 전체적인 실험장치의 설정형태를 보여주고 있다.

3-2 공작물 재료 및 절삭공구

실험에 사용된 피삭재는 항공기 및 기타 기계부품에 많이 사용되는 알루미늄합금(Al alloy 2024)을 선택하였으며, 그 화학 조성이 Table 2에 나타나있다.

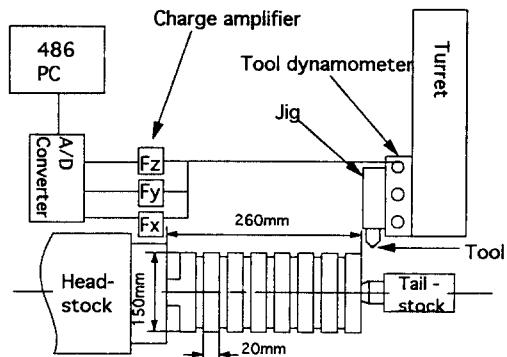


Fig. 2 Experimental device set up

Table 2 Chemical compositions of Al alloy (2024)

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

실험에 사용된 공구는 천연다이아몬드 공구이며, 기하학적 형상 및 크기는 경사각 0°, 여유각 5°인 직선날 공구로서 국내 다이아몬드 공구 제작사에 의뢰하여 제작하였다.

다음 사진은 직선날 공구의 경사면과 절인을 금속현미경으로 100배 확대하여 보여진 것으로서, 다이아몬드 공구의 직선절인 거칠기가 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

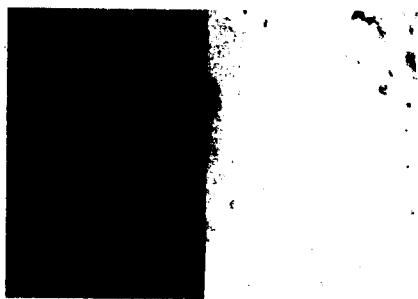


Photo 1 Shape of the cutting edge

3-3 실험방법

CNC선반에 공구동력계를 장착할 수 있도록 지그를 설계, 제작하여 터렛의 공구홀더에 부착하였다. 알루미늄 합금을 CNC선반의 주축대와 심압대에 고정시킨 후, 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭을 하였다. 공구가 가공 시작시에 충격을 받지 않도록 사포로 모서리를 테이퍼 가공하였고, 공작물 표면의 초기상태를 균일하게 하기 위하

여 물림깊이 6μm, 이송 5μm로 매번 전절삭(precutting)을 한 후 절삭조건에 따라 실험을 진행하였다.

법용 CNC선반은 마이크로미터(μm)까지 제어가 가능하지만 초정밀 전용가공기와는 많은 차이가 있으며, 특히 고속 회전에서 진동, 소음 등이 수반되었다. 실험에 사용된 절삭조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Cutting conditions

Velocity (m/min)	200, 400
Feed rate (μm/rev)	2, 5, 8, 10, 11, 17, 23, 29, 35, 40
Depth of cut (μm)	3, 10, 17, 24

절삭저항의 측정은 공구동력계에서 나온 신호를 증폭시킨 다음 A/D컨버터를 통하여 컴퓨터에서 볼수 있도록 하였으며, 절삭가공후 공구의 기하학적 형상 및 절삭조건에 따른 가공면의 거칠기를 촉침식 표면조도계를 이용하여 컷오프(cut-off) 0.8mm, 트래버싱(traversing) 길이 2.4mm의 조건에서 중심선 평균거칠기 Ra를 측정하였고, 이상의 방법으로 얻은 데이터를 각 절삭조건별로 그래프화 하여 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1 공구설치각(θ)에 따른 표면거칠기와 절삭력

천연 다이아몬드의 직선 절인 공구를 사용하여 Al합금의 가공 특성에 대한 공구설치각의 영향을 조사하여 다음과 결과를 얻고, 이에 대한 고찰을 하였다.

Fig. 3은 절삭속도 200m/min, 물림깊이 25μm에서 각각 이송이 10과 40μm/rev인 경우의 공구설치각에 따른 표면거칠기를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이송이 작은 10μm/rev 일 때 표면거칠기 값이 작게 나타나며, 공구설치각이 0°에 가까운 양의 각일 때 가장 작은 값을 갖게 된다. 그러나 이론 값에 미치지 못함은 공작물과 공구의 상대 진동이 크고, 공작물과 공구 인의 상태, 공작기계의 불안정성, 그리고 주위 환경 등의 영향과 공구설치각을 정확히 0°로 설정하는 것이 쉽지 않았기 때문이다.

Photo 2에서 (a)와 (b)는 이송이 10μm/rev이고, 각각 공구설치각이 0.009°와 -0.01°일 때의 SEM 사진이다. 공구설치각이 양(+)인 0.009°의 사진에서 많은 긁힘 자국과 깊은 틈들 그리고, 미세 분말들이 표면에 붙어 있음을 보여주고 있다. 반면에 -0.01°의 공구설치각의 사진에서는 긁힘 자국은 적으나 이송 사이의 경계에서 발생되는 벼(burr)가 밝게 나타나고 있다. 이것이 표면거칠기를 감소시키는 요소임을 알 수 있다. 또한, (c)는 공구설치각

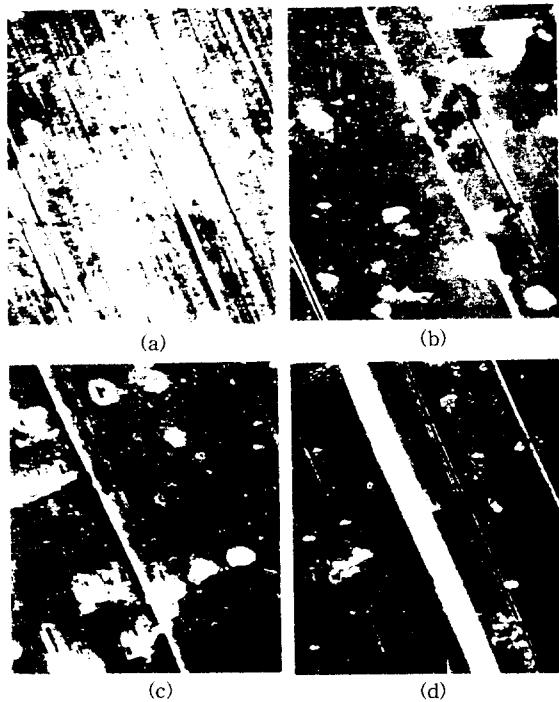


Photo 2 SEM photos of the machined surface ($\times 700$)

-0.08°와 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 의 이송이며, (d)는 같은 공구설치각에서 이송이 $40\mu\text{m}/\text{rev}$ 인 경우이다. 두 사진 모두 깨진 자국이 나타나고 있으나, $40\mu\text{m}/\text{rev}$ 이송에서 긁힘 자국 외에도 이송 사이에서의 버(burr)가 밝은 부분으로 크게 보이고 있다. 여기에서, 가공된 표면거칠기에 이송 사이의 경계에서 생성되는 버가 큰 영향을 주고 있으며, 공구설치각을 0° 에 가깝게 설정하는 것이 좋은 가공 표면을 얻게 하고 있음을 알 수 있다. 더불어 절인에 의한 긁힘 자국과 가공된 표면에 보이는 미세 분말을 없애기 위해 공구의 절인에 미세 침평(chipping) 등의 손모가 발생하지 않도록 하고, 흡진기와 적절한 절삭유제의 필요성을 갖게 하였다.

Fig. 4는 이송이 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 의 경우에 절삭력에 대한 공구설치각의 영향을 나타낸다. 그림으로부터 양의 공구설치각이 증가함에 따라서 주분력은 감소하는 듯 하지만 다시 증가하고 있으며, 배분력은 그 크기가 거의 일정하게 나타나고 있다. 또 공구설치각이 부(-)인 경우에 주분력은 설치각의 절대값이 커짐으로써 그 크기의 증가가 현저하며, 배분력은 작은 증가율을 보여준다.

부의 공구설치각에서는 주로 측면 절인에 절삭 작용에 관여하는 양의 공구설치각과는 달리, 측면 절인 뿐 아니라 끝 절인 역시 많은 부분이 절삭 작용에 참여하기 때문에 끝 절인에 작용하는 저항의 크기가 증가하게 되며,

공작물과 공구간의 접촉 길이가 증가함으로써 수직력이 증가하는 결과를 가져온다.

4-2 표면거칠기에 대한 이송과 물림깊이의 영향

Fig. 5는 절삭속도 $400\text{m}/\text{min}$ 로 가공했을 때 나타난 표면거칠기로서 공구설치각이 부인 경우이다.

그림으로부터 알 수 있듯이 이송의 증가와 더불어 표면거칠기 역시 증가하는데 이는 이론적인 경향과 같고, 이송이 적은 부분, 즉 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 이하의 범위에서 표면거칠기가 일정한 경향을 나타내지 못하고 있음을 보여준다. 여기에서 나타난 특성은 이송이 작을 경우 측면 절인에 의한 절삭작용보다는 선단부분의 절인과 공작물의 접촉 표면 증가로 인해 배분력이 증가함으로써 공구와 공작물 사이에 상대진동 발생의 가능성이 커지게 되며 불안정한 표면거칠기를 가져오게 한다.

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

본 실험에서, 정상절삭으로서 안정된 표면거칠기를 얻을 수 있는, 최적 이송은 대략 $15\mu\text{m}/\text{rev}$ 정도이었고, 표면거칠기에 대한 물림깊이의 영향은 크지 않았지만, 대체로 $10\mu\text{m}$ 의 물림깊이에서 양호한 표면거칠기를 나타내었다.

4-3 절삭력에 대한 이송과 물림깊이의 영향

Fig. 7과 8은 각각 설치각이 부와 양의 각일 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(F_t)이 배분력(F_n)보다 대체로 크게 나타나고 있다. 그러나, 이송이 작은 범위에서는 오히려 배분력이 주분력보다 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 정밀절삭에서 나타나는 특성을 보여준다.

다음 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. 위와 같은 원인은 이송이나 물림깊이가 특정 값 이하로 되면 정상절삭이 잘 이루어지지 않으며, 절삭방향의 주분력보다 공구와 가공물간의 상대진동에 의해 공구의 여유면상에 작용하는 배분력이 커지기 때문이다. 이것으로부터 알 수 있듯이 배분력의 크기가 여유면에 대한 수직 압력의 영향을 받고, 절인 반경에 의존하기

때문에 정밀절삭에서의 정상절삭을 위해서는 절인 반경이 아주 작은 공구 뿐만 아니라 이와 함께 공구와 가공물 사이에서 발생하는 진동을 가장 작게 하는 주축의 회전 정밀도와 강성이 큰 공작기계의 필요성을 보여주며, 본 실험에 사용된 공작기계의 한계를 보여준다.

5. 결 론

- (1) 공구설치각에 따른 표면거칠기는 설치각이 0° 에 가까워짐에 따라 작은 값을 나타내었고, 주분력은 설치각의 절대값이 커짐에 따라 현저한 증가를 보였으며, 배분력은 설치각이 부인 경우가 양일 때보다 크게 나타났으나 각각에서 큰 변화는 보이지 않았다.
- (2) 이송과 물림깊이가 증가함에 따라 표면거칠기의 증가가 뚜렷하였으며, 또 이송과 물림깊이가 특정값 이하로 되면 이 역시 불안정한 거칠기 값을 나타내었다. 본 실험에서 최적의 이송과 물림깊이는 각각 $15\mu\text{m}/\text{rev}$, $10\mu\text{m}$ 정도였다.
- (3) 절삭력에 있어서 이송 또는 물림깊이가 큰 경우에 주분력이 배분력보다 크게 나타나지만, 작은 범위에서는 오히려 배분력이 주분력보다 증가함을 보인다.

6. 참고문헌

1. N. Taniguchi, "Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing", Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 573~582, 1983.
2. 강철희 외, "초정밀가공 공작기계의 개발에 관한 연구(I), (II), (III)", 과기처 특정연구 보고서, 1990, 1991, 1992.
3. 김정두, "천연 다이아몬드 인선 형태에 의한 Al합금의 경면 절삭에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 14권, 6호, pp. 1515~1522, 1990.
4. S. Takasu, M. Masuda, T. Nishiguchi, "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.
5. T. Nishiguchi, Y. Maeda, M. Masuda, M. Sawa, "Mechanism of Micro Chip Formation in Diamond Turning of Al-Mg Alloy", Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 117~120, 1989.
6. M. Masuda, Y. Maeda, T. Nishiguchi, M. Sawa, "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.

7. M. Sawa, Y. Maeda, M. Masuda, R. Ito, "Development of an Advanced Tool-Setting Device for Diamond Turning", Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 87~90, 1993.
8. S. Asai, Y. Taguchi, K. Horio, T. Kasai, "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.
9. 서남섭, "금속切削理論", 東明社, 1994.

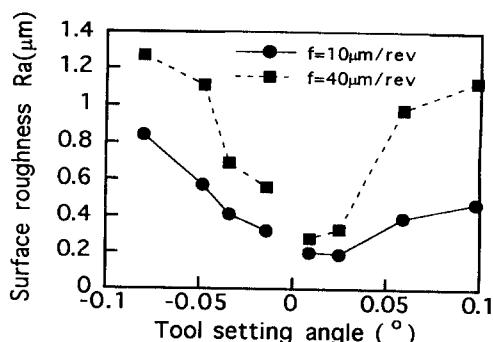


Fig. 3 Effect of tool setting angle on machined surface roughness
($V=200\text{m}/\text{min}$, $d=25\mu\text{m}$)

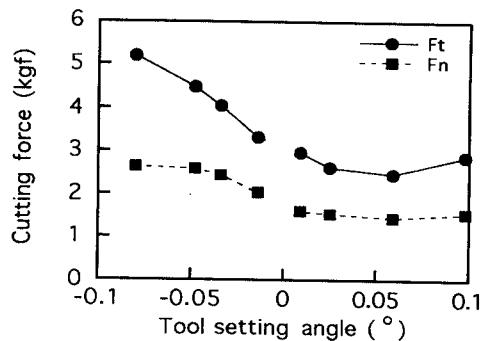


Fig. 4 Effect of tool setting angle on the cutting force
($V=200\text{m}/\text{min}$, $f=10\mu\text{m}/\text{rev}$, $d=25\mu\text{m}$)

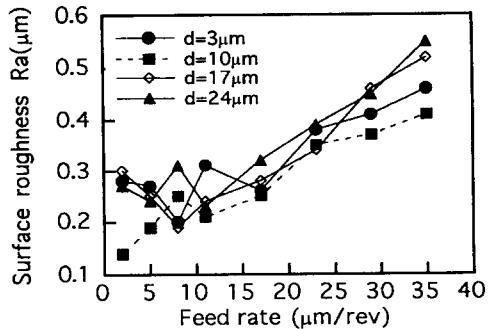


Fig. 5 Effect of feed rate on the surface roughness
($V=400\text{m/min}$, $\theta=-0.01^\circ$)

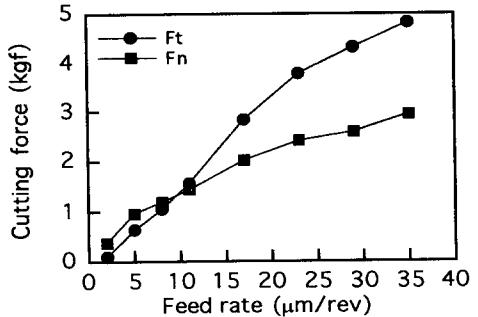


Fig. 8 Effect of feed rate on the cutting force
($V=200\text{m/min}$, $d=10\mu\text{m}$, $\theta=0.009^\circ$)

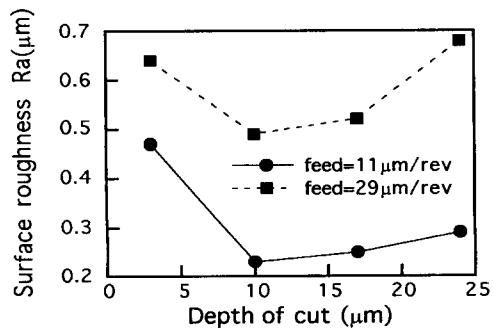


Fig. 6 Effect of the depth of cut on the surface roughness
($V=200\text{m/min}$, $\theta=-0.01^\circ$)

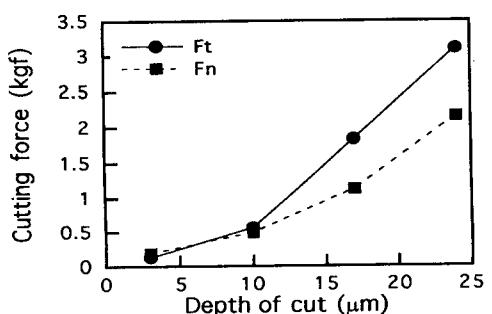


Fig. 9 Effect of the depth of cut on the cutting force
($V=200\text{m/min}$, $f=8\mu\text{m/rev}$, $\theta=-0.01^\circ$)

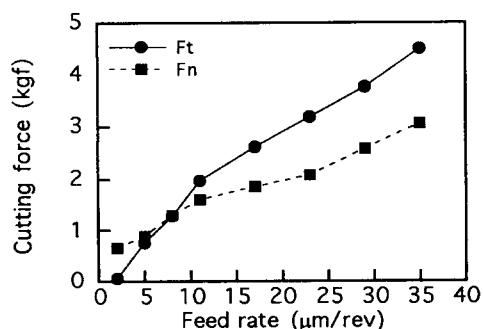


Fig. 7 Effect of feed rate on the cutting force
($V=200\text{m/min}$, $d=10\mu\text{m}$, $\theta=-0.01^\circ$)