

알루미늄 합금의 고속 미소 선삭에 있어서 표면거칠기 특성

성철현*, 김형철**, 김기수***

Characteristics of Surface Roughness in the High Speed Micro Turning of Aluminum Alloy

Chul Hyun Seong*, Hyeung Chul Kim**, and Ki Soo Kim***

ABSTRACT

This study adopted the ultra precision machining system which was composed of an air bearing spindle, a granite bed, air pad and a linear feeding mechanism. It also applied the cutting experiment on the aluminum alloy. To evaluate the safety of high speed machining, we examined the surface roughness according to the changes of cutting speed and obtained the speed limit. This paper also studied the effect of cutting condition such as feed rates and depths of cut on the surface roughness within the speed limit. This provided practical information regarding ultra precision machining.

Key Words : ultra-precision machining(초정밀 가공), PCD(다결정 다이아몬드), surface roughness(표면거칠기), micro turning(미소 선삭), air bearing spindle(공기 베어링 스피들)

1. 서론

첨단 산업의 눈부신 발전과 함께 초정밀 가공 기술에 대한 중요성이 점점 커지고 있으며, 다이아몬드 공구에 의한 절삭으로 대표되는 초정밀 절삭 가공 기술은 래핑, 폴리싱, 슈퍼피니싱 등의 연마 가공에 비하여 생산성과 가공 정밀도를 향상시킬 수 있는 가공 방법으로 관심이 높아지고 있다. 다이아몬드 공구에 의한 초정밀 가공 제품의 예로는 복사기 드럼, 컴퓨터 하드디스크, 비구면 렌즈 및 VTR의 자기헤드 등이 있다.

최근 연질 금속과 플라스틱 등의 초정밀 절삭 가공의 수요가 급증하고 있으며, 이에 대한 기초 기술, 응용 기술 및 가공 시스템 개발에 관한 연구가 활발하다¹⁻³⁾. 알루미늄 합금과 같은 연질 금속 재료의 초정밀 가공을 위해서는 빌트 업 에지의 발생을 줄일 수 있도록 고속절삭을 하여야 하며, 이를 위해서는 스피들을 고속으로 회전 시켜야 한다. 그러나 전통적인 스피들은 고속 회전에서 심한 진동과 열이 발생하기 때문에 스피들의 회전 정밀도가 저하된다. 따라서 진동, 발열이 없이 고속회전 정밀도를 얻을 수 있는 공기 베어링 스피들의 채용이

* 충남기계공고 특수기계과
** 충남대학교 산업기술연구소
*** 충남대학교 기술교육과

필요하다.

또한, 초정밀 가공을 위한 공작기계는 정밀 이송 기구, 높은 강성의 구조, 우수한 진동감쇠 성능을 가진 베드 및 외부로부터의 진동을 차단할 수 있는 방진 시스템 등이 필수적이다. M. Weck⁴⁾ 등은 광학 간섭계(optical interferometer)를 이용하여 미소 가공 표면의 간섭도를 분석한 결과, 절삭 과정에서 발생하는 진동으로 인하여 좋지 않은 표면거칠기가 유발된다는 것을 입증하였다.

초정밀 가공용 공구 재료로는 다이아몬드를 사용하는 것이 일반적이다. 다이아몬드 공구는 경도와 열전도율이 매우 높기 때문에 고속절삭이 가능하고 매우 우수한 가공 정밀도와 미려한 표면거칠기를 얻을 수 있다⁵⁾. T. Sugano⁶⁾ 등은 알루미늄 합금을 다이아몬드 공구로 선삭 하여 절삭 조건이 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하였다. J. D. Kim⁷⁾은 알루미늄 합금에 대해 노즈 반경이 없는 공구와 노즈 반경이 있는 천연 다이아몬드 공구를 제작하여 절삭조건에 따른 표면거칠기, 칩 생성 기구 및 경면 생성을 검토하였다. 前田幸男⁸⁾ 등은 다이아몬드 공구로 연질 금속을 절삭하여 표면거칠기와 이송률, 공구 인선 형상과의 관계를 고찰하였다. T. Nishiguchi⁹⁾는 알루미늄-마그네슘 합금의 다이아몬드 선삭에 있어서 미소 칩 형성 기구를 고찰하였다.

본 연구에서는 공기 베어링 스피들, 확장압 베드, 공기 방진 패드 및 직선 이송장치로 구성된 초정밀 가공시스템을 구성하였으며, 알루미늄 합금에 대한 절삭실험을 수행하였다. 가공 시스템의 고속 가공 안정성을 평가하기 위하여 스피들 회전수 변화에 따른 표면거칠기를 조사하여 고속 초정밀 가공의 한계 속도를 구하였다. 또한 한계 속도범위에서 이송률, 절삭깊이 등의 절삭조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰하여 초정밀 절삭가공의 실질적인 정보를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 알루미늄 합금에 대한 미소 절삭 실험을 수행하기 위하여 초정밀 선삭용 공작기계 시스템을 구축하였다²⁾. Fig. 1은 본 연구에 이용된 초정밀 선삭용 공작기계 시스템을 나타낸 것이다. 주축은 설계 제작한 공기 베어링 스피들을 사용하

였으며, 공구의 정밀 운동 안내와 위치 결정을 위하여 LM 가이드, 볼 스크류, AC 서보 모터로 구성된 직선 운동 안내 기구를 사용하였다. 그리고 이들을 장착하기 위한 베드는 진동 감쇠 계수가 큰 확장압을 사용하였고, 외부로부터 전달되는 진동을 차단하기 위해 공기 방진 패드를 사용하였다.

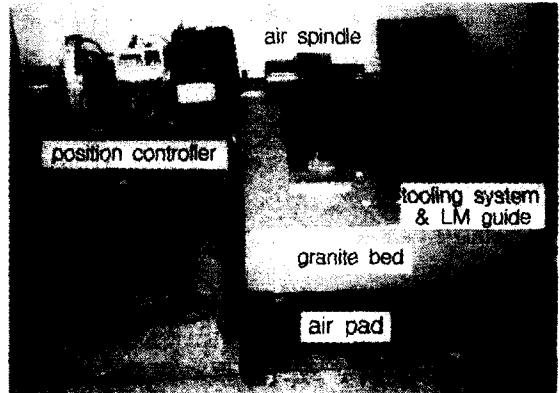


Fig. 1 Photograph of the prototype ultra-precision lathe

Fig. 2는 공기 베어링 스피들 시스템 구성도를 나타내고 있다. 공기 베어링 스피들에 공급되는 압축 공기의 압력은 6kgf/cm^2 로 하였으며, 불순물과 수분이 혼입 되지 않도록 공기 여과기와 공기 건조기를 거쳐 공기 베어링 스피들에 공급되도록 하였다. 스피들에 압축 공기가 공급되면 스피들의 회전축이 공기압에 의하여 부상하며, 이때 스피들에 전원을 공급하면 스피들이 회전 운동한다.

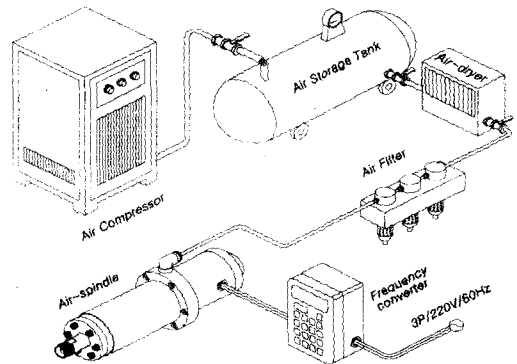


Fig. 2 Configuration of the air spindle system

Table 1은 본 실험에서 초정밀 선삭용 공작 기계 시스템의 절삭실험을 수행하는데 사용된 실험장비 및 측정장비들의 목록이다. 회전수 제어는 주파수 변환 방식으로써 주파수 변환기는 (주)삼성항공의 MOSCON-G3 인버터를 사용하였다. 이 인버터는 주파수 변화 범위 0~400Hz, 출력 0.4~75kW이고, 가감속 시간, 주파수 지령, 회전 속도 피드백 기능 등을 갖추고 있다. 공기 압축기는 경원세기의 스크롤형으로 동력 3.7kW, 토출량 400ℓ/min, 최대 압력 8kgf/cm²이고, 위치 결정 기구는 (주)삼익공공의 소형 1축 위치 결정 콘트롤러(PS-101A)이며, 테이블의 구동을 위한 구동 모터는 디지털 AC 서보모터를 사용하였다. 가공면에 대한 표면거칠기 측정은 0.0005 μ m의 분해능을 갖는 일본 Mitutoyo사의 Surftest(SV-500) 측정식 표면거칠기 측정기를 이용하였다. 또한 절삭공구의 상태는 최대 1,000배의 확대 배율을 갖고, 모니터를 통하여 고배율, 고해상도의 이미지를 얻을 수 있는 한라정밀의 Micro Hi-vision(HR-303) 공구현미경을 이용하여 확인하였다. 그리고 표면거칠기 데이터와 공구상태 이미지는 컴퓨터에서 그래픽 처리하였다.

Table 1 Specification of the experimental equipment

Name	Specification
Frequency converter	CIRM-22P3G3
Oilless scroll air compressor	AL-L5PAI
Position controller	Type PS-101A
Linear motion guide	HSR15A
Surface roughness tester	Mitutoyo Co., Surftest(SV-500)
Metal microscope	Han ra Micro Hi-vision(HR-303)
IBM PC	Pentium MMX 233MHz

절삭실험에 사용된 시편의 재료로 자동차와 항공기의 경량화 목적으로 이용되는 Al7075를 사용하였으며, 시편의 직경은 ϕ 32mm 이다. 시편은 공기 베어링 스피들에 부착된 콜릿 척에 장착하였다. 그리고 본 절삭실험에 사용된 인서트 팁은 높은 경도와 뛰어난 열전도율을 가지며, 알루미늄 같은 비

철 금속의 절삭에 주로 이용되는 PCD(Poly-crystalline diamond) 공구로 공구 인선 반경이 0.4mm인 (주)대한중석의 CNMA120404를 사용하였고, 공구출터는 PCLNR2525M12를 사용하였다.

2.2 실험방법 및 절삭조건

실험방법은 시편을 콜릿 척에 고정하였을 때 발생하는 편심을 제거하기 위하여 매 시편마다 전 가공(precutting)을 실시한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였고, 공구마멸에 대한 영향을 고려하여 매 실험마다 새로운 공구로 교환하였으며, 절삭유를 사용하지 않은 건식 절삭을 실시하였다. 그리고 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 측정식 표면거칠기 측정기를 이용하여 기준길이 0.25mm, 컷-오프(cut-off) 0.8mm의 조건에서 시편의 중앙부의 이송방향에 대한 최대 표면거칠기(R_{max})와 중심선 평균 표면거칠기(R_a)를 측정하였다.

Table 2는 본 실험에서 선정된 절삭조건들을 나타낸 것이다. 먼저, 절삭속도 50~900m/min(497~8952rpm) 범위에서 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 확인하여 가공 한계 절삭속도 범위를 구하였다. 이후 한계 절삭속도 범위 내에서 일정한 절삭속도를 일정하게 고정하고, 이송률을 2~10 μ m/rev 범위에서 2 μ m/rev 씩 5단계로 증가시켰고, 각각의 이송률에서 절삭깊이를 10~50 μ m 범위까지 10 μ m 씩 단계적으로 변화시켜 실험하였다. 절삭속도의 변화는 스피들의 회전수를 주파수 변환기로 조절하였으며, 이송률 변화는 직선 이송 안내 장치의 1축 위치 결정 제어기에 의해 제어하였다. 그리고 절삭깊이는 최소 측정 단위 1 μ m의 다이얼 게이지를 공구대에 부착하여 설정하였다.

Table 2 Cutting conditions

Item	Cutting conditions
Cutting speed(m/min)	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900
Feed rate(μ m/rev)	2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(μ m)	10, 20, 30, 40, 50
Air pad input pressure	2 kgf/cm ²
Cutting fluid	Dry cut

3. 실험결과 및 고찰

초정밀 가공을 위한 선삭 가공용 공작 기계 시스템으로 알루미늄 합금에 대하여 PCD 공구를 사용하여 절삭실험을 행하였다. 먼저 일정한 이송률과 절삭깊이에서 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 관찰하여 빌트 업 에지의 발생 범위와 시스템의 고속 가공 안정성을 평가하였으며, 이후 가공안정 범위의 절삭속도에서 이송률, 절삭깊이 등의 절삭조건이 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰하였다.

3.1 절삭속도 변화에 대한 표면거칠기 특성과 가공 한계속도 범위

Fig. 3은 사용하지 않은 새로운 공구와 이송률을 $10\mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭깊이를 $10\mu\text{m}$ 로 고정하고 절삭속도 $100\text{m}/\text{min}$ 과 $900\text{m}/\text{min}$ 으로 절삭실험을 실시한 후, 공구의 인선부분을 공구현미경을 이용하여 확대 관찰한 것이다. 공구인선 부분의 확대 사진을 통해서 판단하여 볼 때, $100\text{m}/\text{min}$ 으로 가공 후 공구선단을 나타낸 Fig. 3(b)의 경우, 절삭실험 조건 중 비교적 낮은 절삭속도로 가공이 진행되고, 칩 유출속도 또한 작아져서 칩과 공구의 마찰영역인 공구 경사면 선단 부근에 흰 부분으로 칩의 용착이 넓게 분포하고 있다. 그러나, 절삭속도 $900\text{m}/\text{min}$ 로 약 50초간 절삭가공 후 공구 선단을 나타낸 Fig. 3(c)의 경우, 절삭속도가 증가되면서 칩 유출속도가 빨라지게 되고, Fig. 3(b)의 경우와 같은 칩의 일부가 공구의 경사면에 부착되는 현상은 보이지 않으나 여유면에 공구마멸이 관찰되었다. 따라서, 저속가공에서의 칩의 일부가 공구의 선단에 부착되거나, 고속가공에서 여유면에서의 공구마멸 현상은 미소절삭에 있어서 가공면에 나쁜 영향을 미치기 때문에 적절한 가공조건 설정이 필요하다.

Fig. 4는 이송률 $10\mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭 깊이를 $10\mu\text{m}$ 로 고정하고, 절삭속도를 $50\sim 900\text{m}/\text{min}$ 으로 변화시켜 절삭실험을 실시한 결과로서 절삭속도 변화에 대한 표면거칠기를 나타낸 것이다. 절삭속도 $300\text{m}/\text{min}$ 까지는 절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 급격히 감소하고 있으며, 특히 절삭속도가 낮은 영역에서 그 경향이 더욱 심하게 나타나고 있다. 이러한 이유는 Fig. 3(b)과 같이 알루미늄 합금의 저속가공에서 발생하는 칩의 부착 현상과 절삭속도가 낮아질 수록 칩과 공구 경사면 사이의 접촉길이

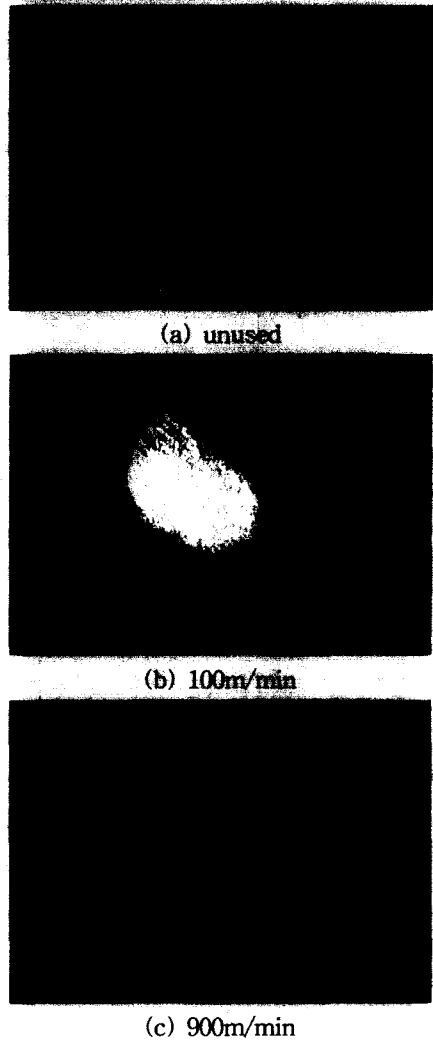


Fig. 3 Photographs of the cutting tool ($s=10\mu\text{m}/\text{rev}$, $t=10\mu\text{m}$)

가 길어지고, 이에 따라 생성되는 칩의 두께도 두꺼워지면서 가공면의 표면거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 약 $300\text{m}/\text{min}$ 이상의 절삭속도의 범위가 PCD 공구에 의한 Al7075 합금의 가공에서 경사면의 알루미늄 합금의 부착현상이 표면거칠기 값의 증가에 미치는 영향이 줄어드는 한계속도로 판단된다. 그리고 절삭속도 $300\sim 500\text{m}/\text{min}$ 범위에서의 표면거칠기는 R_{max} 가 $0.21\sim 0.23\mu\text{m}$ 정도, R_a 가 $0.028\sim 0.029\mu\text{m}$ 정도로 절삭속도의 증가에 따른 표면거칠기 감소 폭이 매우 작게 나타나고 있으며,

이 절삭속도 범위에서는 가공면의 표면거칠기는 절삭속도의 증가에 따른 영향을 그다지 크게 받지 않는다고 할 수 있다. 이 영역이 설정된 절삭실험 조건 중 가공안정 영역이라 볼 수 있다. 그러나 절삭속도가 600m/min 이상의 고속 절삭 영역에서 갑자기 표면거칠기의 증가가 발생하고 있는데 이는 공작기계 자체의 고속 가공 한계를 나타내는 불안정 영역으로, 스피들의 고속 회전에 의한 시스템 및 공구계의 진동을 원인으로 생각할 수 있으며, 또한 Fig. 3(c)과 같은 절삭공구의 마멸의 영향 때문으로 표면거칠기가 크게 증가한다고 생각된다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 고속회전에서도 회전정밀도를 유지할 수 있는 고속 스피들과 내마모성을 갖춘 공구재료의 개발이 필요하다.

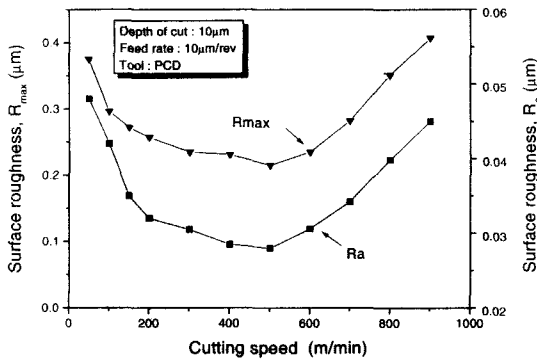


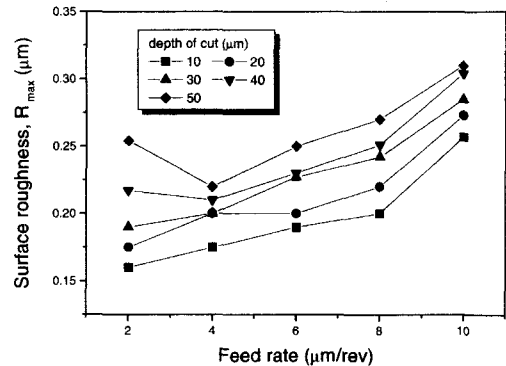
Fig. 4 The effect of cutting speed on the surface roughness

3.2 이송률 변화에 따른 표면거칠기 변화 특성

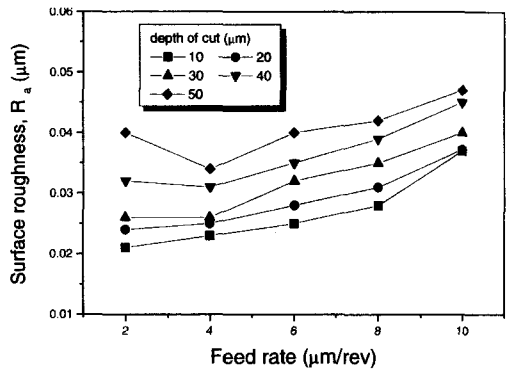
초정밀 절삭에 있어서 가공조건의 변화가 가공면에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이송률과 절삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기 변화 특성을 조사하였다. Fig. 5는 절삭속도를 빌트 업 에지의 발생 한계속도 이상의 범위에서 가장 좋은 표면거칠기 결과를 나타내었던 500m/min으로 고정하고, 이송률과 절삭깊이를 변화에 따른 표면거칠기를 측정 한 결과이다.

선삭가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나사상의 표면을 형성시키고, 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률만큼 간격을 두고 반복적으로

전사되어 이루어진다. Fig. 5의 결과를 볼 때, 전반적으로 동일한 절삭깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 가장 양호한 가공면은 이송률 2μm/rev, 절삭깊이 10μm에서 R_{max} 0.16μm, R_a 0.02μm의 표면거칠기 값을 나타내었다. 이후 이송률의 증가에 따라 8μm/rev까지는 비교적 극히 미소한 값의 변화를 보이거나 8μm/rev 이상에서는 표면거칠기 값이 다소 증가하고 있다. 이러한 표면거칠기 결과는 이송방향의 표면거칠기는 인선반경과 공작물의 1회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면거칠기($R_{max}=s^2/8R$)¹⁰와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 실험결과와 이론적 표면거칠기 값과의 차이가 약 10배에 달하는데 이와 같은 이유는 실험에 사용된 알루미늄 합금이 연성재료에 속하고, 고속



(a) maximum roughness



(b) arithmetic average roughness

Fig. 5 The effect of feed rate on the surface roughness (v = 500m/min)

절삭을 실시하여도 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그리고 이송률이 작아질수록 실험 결과와 이론적 표면거칠기의 차이가 커지는데 이러한 이유는 공구인선의 형상과 밀접한 관련이 있는 것으로 이송률의 감소에 따라 이송률에 의하여 결정되는 축 방향 절입깊이가 작기 때문에 공구의 예리한 인선으로 재료를 전단변형에 의해 제거시키기 보다는 가공면에 버니싱 효과를 더욱 크게 발생시키기 때문으로 생각된다.

이러한 현상은 표면거칠기 프로파일을 통하여 확인 할 수 있다. Fig. 6(a)와 (b)는 절삭속도 500m/min, 절삭깊이 50 μ m로 일정하고 이송률만 각각 2 μ m/rev과 6 μ m/rev의 조건으로 가공된 가공면의 표면거칠기 곡선을 나타낸 것이다. 이송률 6 μ m/rev인 (b)의 경우, 가공 표면의 형상은 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률만큼의 간격을 두고 규칙적이고, 반복적으로 전사되어 나타나고 있으므로 정상절삭 상태라고 생각할 수 있다. 그러나 이송률 2 μ m/rev인 (a)의 경우, 작은 이송률에 비하여 너무나 큰 절삭깊이 때문에 공구의 경사면을 따라 칩이 배출되지 못하고, 절삭날의 여유면 쪽으로 밀려들어가는 버니싱(burnishing) 효과가 절삭상태에 혼재하기 때문에 표면거칠기 곡선이 불규칙적으로 나타나고 있다.

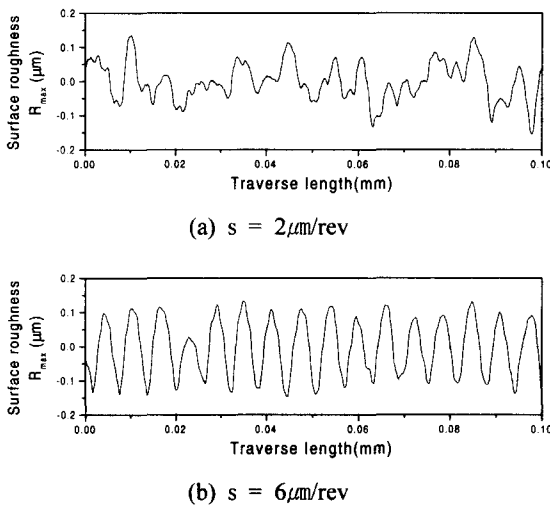


Fig. 6 Surface roughness profiles ($v=500\text{m/min}$, $t=50\mu\text{m}$)

3.3 미소 이송률에서 절삭깊이의 영향

절삭가공에 있어서 이론적 표면거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 5의 결과를 볼 때 동일한 이송률에서 절삭깊이의 증가에 따라 비례적으로 표면거칠기가 증가하고 있다. 특히 가장 이송률이 작은 2 $\mu\text{m/rev}$ 의 경우, 절삭깊이의 증가에 대하여 표면거칠기가 다른 이송률에 비하여 급격히 증가하고 있다. 이러한 결과로부터 미소절삭 시 표면거칠기는 절삭깊이의 증가와 관련이 있다고 할 수 있다.

Fig. 7은 절삭실험에서 설정된 이송률(s)을 각각의 절삭깊이(t)로 나눈 이송률에 대한 절삭깊이의 비율(s/t)에 대하여 최대 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 이송률이 작은 쪽으로 갈수록 절삭깊이의 증가에 따라 표면거칠기가 급격히 커지고 있으며, 상대적으로 이송률이 큰 쪽에서는 절삭깊이의 증가에 비교적 표면거칠기의 변화가 작게 나타나고 있다. 그리고 이송률에 대한 절삭깊이의 비율이 0.2 이상의 조건으로 절삭할 수록 표면거칠기의 변화는 거의 일정하게 나타나고 있다. 결론적으로 미소절삭 시 이송률이 작아 질수록 절삭깊이에 영향을 크게 받으며, 이송률에 대한 절삭깊이의 비율이 0.2 이상인 조건으로 가공하는 것이 유리하다.

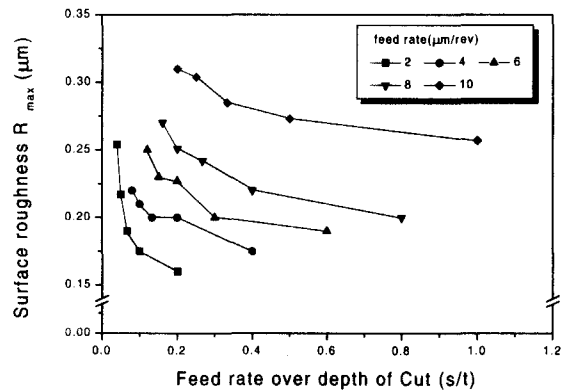


Fig. 7 Relationship feed rate over depth of cut and surface roughness

이상의 PCD공구에 의한 알루미늄 합금(AI7075)의 초정밀 절삭실험 결과로부터 미소절삭에서는 이송률과 절삭깊이가 매우 작기 때문에 절삭조건이 선

정에 매우 신중하여야 하며, 절삭공구의 인선이 예리하다는 가정 아래 가공조건 설정 시 먼저 표면거칠기에 큰 영향을 미치는 이송률을 되도록 최소 이송률의 조건으로 설정하고, 동일 이송률에서 절삭깊이를 작게 하는 것이 초정밀 절삭을 실현하는데 효과적이다.

4. 결론

경량화 재료로 널리 이용되고 있는 알루미늄 합금(Al7075)에 대한 초정밀 선삭 가공을 실현하기 위하여 공기 베어링 스피들, 화강암 베드, 공기 방진 패드 및 직선 이송장치로 구성된 초정밀 선삭 가공시스템을 구성하였으며, 절삭실험을 수행 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절삭속도 500m/min, 이송률 2 μ m/rev, 절삭깊이 10 μ m의 절삭조건에서 R_{max} 0.16 μ m, R_a 0.02 μ m의 표면거칠기를 얻었으며, 본 연구에서 구성된 초정밀 선삭 가공시스템의 고속 가공 안정성을 확인하였다.
- 2) PCD공구에 의한 알루미늄 합금(Al7075)의 미소절삭에서 공구의 경사면에 알루미늄의 부착이 소멸되는 한계속도는 약 300m/min 이상의 절삭속도로 판단된다.
- 3) 표면거칠기는 이론적인 표면거칠기의 경향과 유사하게 이송률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내지만 약 10배 정도의 차이를 보이고, 이송률의 감소에 따라 축 방향 절입깊이가 작아지게 되어 가공면에 버니싱 현상이 나타나게 된다.
- 4) 미소절삭 시 이송률이 작은 영역에서는 절삭깊이의 증가에 따라 표면거칠기 값이 증가되기 때문에 이송률에 대한 절삭깊이의 비율을 0.2 이상의 조건으로 가공하는 것이 유리하다.

참고문헌

1. 이재경, 이응숙, 채태진, 심충건, 조동우, 고태조, "초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발," 과학기술처 최종 보고서, 1992.
2. 성철현, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, "초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구," 대한공업교육학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 116-124. 1997.

3. 한복수, 김기수, "초정밀 동작기계용 공기 정압 스피들 시스템의 강성해석 및 성능평가," 대한공업교육학회지, 제21권, 제2호, pp. 90-101, 1996.
4. M. Weck, R. Hartel, K. Modemanm, "Performance Assessment in Ultra precision Micro machining," Annals of CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 499-502, 1988.
5. "세라믹 및 CBN/PCD 절삭 공구의 성능과 사용 조건," 기계 기술, 6월호, pp. 129-149, 1997.
6. T. Sugano, Y. Ihara, Y. Nakatsu, A. Shinohara, "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror," Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 17-20, 1987.
7. 김정두, "천연 다이아몬드 인선 형태에 의한 Al 합금의 경면 절삭에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1515-1522, 1990.
8. 前田幸男, 梶田正美, 西口隆, 7尺眞司, 伊藤立, 다이iamond工具によるAl合金の鏡面切削に関する研究(第1報)-バイト設定角の切削面粗さの影響, 精密工學會誌, 第54卷, 第10號, pp. 1993-1998, 1988.
9. 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, 1988.
10. 서남섭저, "금속절삭이론," 동명사, pp. 197, 1985.