

# PCD공구를 이용 미소가공시 표면거칠기 특성

한복수\*, 이소영\*

## Characteristics of Surface Roughness in Micro Turning using PCD Tools

Han Bock Soo\*, Lee So Young\*

### Abstract

This paper deals with the micro turning property of setting angle using diamond tool. The bed of the system has used the granite which has the thermal and vibrational characteristics superior to the cast iron bed for the common machine tool. To minimize the inner and outer vibration of the turning system, an air pad system was manufactured and tested. The aero-static spindle system which has the excellent rotation accuracy was designed and manufactured. As a result of the micro-cutting test on aluminum alloy, tool setting angel have effected on surface roughness. From the results, the micro-cutting conditions hope to provide the useful actual data using in industrial fields.

**Key Words :** Ultra-precision machining(초정밀 가공), PCD(Poly-crystalline diamond), micro turning(미소 선삭), air bearing spindle(공기베어링 스피들), air-spring(공기 스프링), phase-shifting interferometer(광위상 간섭계), light scattering(광산란)

### 1. 서 론

현대산업은 마이크로 일렉트로닉스(Microelectronics)를 중심으로 산업발달이 급진전 하고 이에 속하는 신소재의 개발과 중요 기능품의 요구 정밀도는 현저히 향상되고 있으며 이에 상응하는 첨단 가공 시스템의 개발과 고기능의 제품을 초정밀, 초미세, 고정도로 가공할 수 있는 초정밀

가공기술의 개발이 고 부가 가치성, 첨단 기반 기술로서 당 연한 전제 조건이 되어지고 있다. 초정밀 가공에 관한 연구 는 1940년대에 다이아 몬드를 이용한 가공을 시점으로 1960년 대에 들어서면서 정밀 절삭 가공 및 가공기를 개발 하기 시작하여 세계 선진국에서 기술개발이 활발히 이루 어지고 있지만 국내의 경우 재래식 연삭, 연마 공정을 통하 여 부분적으로 이루어 지고 있을뿐 가공기에 의한 생산성

\* 한밭대학교 기계공학과(한복수: bshan@hanbat.ac.kr)

항상 인식의 증대에도 불구하고 해외 업체들의 기술 이전 기피로 개발이 이루어 지지않고 핵심 부품의 수입 의존으로 인한 생산 기반기술의 공동화 현상이 가속화 되어가고 있는 실정이다. 초정밀 가공을 위하여 공작기계 전체의 정밀도가 향상된 초정밀 공작기계의 설계 제작 뿐만 아니라 공작기계 구조용 재료의 개발, 공작기계의 성능평가기술, 절삭공구의 개발, 최적 절삭조건 선정등 가공기술의 확립과 측정 및 환경 기술등 다방면의 지속적인 연구는 시급하고 중요한 과제이다.<sup>(1,2)</sup> 이와 같은 제품을 생산하기 위한 초정밀 가공 기술의 기본은 매우 높은 정밀도와 강성을 갖은 공작 기계의 회전 및 직진 운동을 절삭성이 뛰어난 다이아몬드 공구를 사용하여 절삭성이 좋은 공작물을 가공하는 것이다.<sup>(3,4)</sup> 초정밀 절삭 가공을 위하여 일반적으로 다이아몬드 공구를 이용하는데 이는 연질금속 혹은 비금속에 한하고 있으며 이를 극복하기 위하여 절삭에서 경취한 재료(Brittle material)를 경면가공 하기 위한 연구가 이루어지고 있는데 임계절삭 깊이(Critical depth of cut)이하에서는 경한 금속일지언정 취성과는 무관한 소성 유동 형태로 절삭이 일어난다고 보고 하고 있다.<sup>(5,6,7)</sup> S. Takasu<sup>(8)</sup> 등은 초정밀 가공으로 절삭 공구 이송 방향에 대한 표면 거칠기 해석적 및 실험적으로 평가하였고, T. Moriwaki<sup>(9)</sup> 등은 칩형성, 표면 거칠기 및 절삭 저항의 관점으로부터 미소 가공 과정을 언급하기 위해 초정밀 공작 기계에 대하여 단결정 다이아몬드 공구로 구리에 대해 절삭 실험을 하였고 前田幸男<sup>(10)</sup> 등은 직선 MCD공구를 이용하여 Al합금의 경면가공에 관하여 연구하였다. 초정밀가공은 여러인자가 가공에 영향을 미치므로 각 시스템의 구성 요소에 대한 진동 실험을 통하여 초정밀 가공 시스템의 동적 특성을 파악후 실험을 하였다. 본 연구에서는 PCD공구를 이용하여 알루미늄합금에 대해 미소 절삭시 각 절삭 조건과 공구 설치각을 변화 시키면서 절삭 가공을 행하여 표면 거칠기에 미치는 절삭 조건과의 관계를 고찰하고 여기서 얻어진 결과를 토대로 최적의 가공 조건을 찾아 1차 가공으로 초정밀 절삭을 실현하여 최적의 조건을 제시하는데 연구의 목적을 두고 있다. 여기서 나타나는 결과를 기초로 하여 표면 거칠기에 미치는 여러 조건의 영향을 실험적으로 고찰함으로써 초정밀 절삭 가공의 실질적인 정보를 제시하여 산업현장에서 활용할수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 시제품으로 제작 된 초정밀 선삭 가공용 공작기계 시스템을 이용하여 절삭조건인 절삭속도, 이송율, 절입 깊이 공구 설치각을 변화하면서 미소 절삭 특성을 파악하기 위하여 알루미늄합금에 대하여 PCD 공구로 절삭 실험을 하였다.

#### 2.1.1 실험 장치

Fig. 2-1은 공기 정압 스피들 시스템의 구성도이다. 에어 스피들에는 간극이 미소한 관계로 일정 압력 유지 및 충격 해소위한 에어 탱크, 수분을 제거하기위한 에어 드라이어, 불순물제거용 에어필터등을 통하여 들어온 압축공기는 스피들의 회전축을 부상시키고 이 스피들을 회전하기위한 주파수 컨버터로 주파수 변환에 따라 회전을 조절한다.

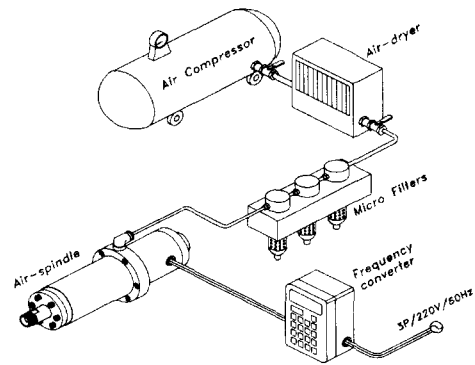


Fig. 2-1 Configuration of the air spindle system

Fig. 2-2는 연구에 사용한 기계로 직접 설계 제작한 초정밀 선삭용 공작 기계 시스템이다. 주축은 에어를 이용한 공기 스피들을 사용하였고 이송 및 컨트롤 장치는 日本産 HSR15A을 셋트로 장착하였고 이송모터는 AC 서보 모터이다. 또한 이를 유지하는 베드는 진동 감쇠가 큰 확장압을 이용하였고 외부의 진동 단절 및 진동 감소를 위하여 공기 방진 패드를 사용하였다.

Table 2-1은 초정밀 절삭 가공 실험을 수행하기 위해 사용된 장비 및 측정장비이다. 특히 미소 초정밀 가공면을 측정하기 위하여 표면거칠기 측정기를 광학식인 INTEK-PLUS사 광학식 치수,형상,표면조도 측정기를 사용하였다. 측정 속도는 1 $\mu$ m/sce, 측정분해능 WSI(1nm), PSI(0.1nm), 측정정밀도는 $\pm 3\%$ 이다

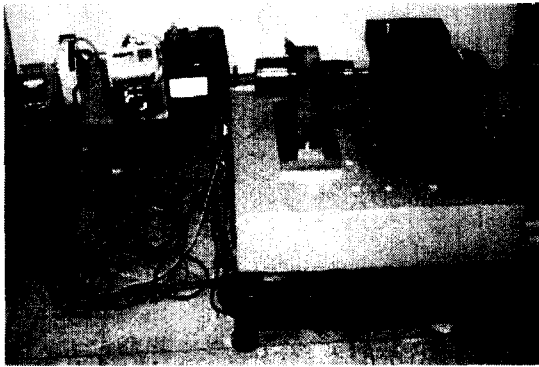


Fig. 2-2 Photograph of the prototype ultra-precision lathe

Table. 2-1 List and specification of the experimental apparatus

No.	Name	Description & specification
1	Surface roughness tester	Intek Engineering X-Ytable : 100×100 Model Accure-1500M Resolution 0.5μ
2	Oilless scroll air compressor	AL-L5PAJ
3	Position controller	Type PS-101A
4	Variable filter	Type VFA-3
5	Digital storage oscilloscope	GS-VC 6023 20MHz
6	Data acquisition system	GLOBAL Lab. DT2831-G
7	IBM PC	80586, CPU 233MHz
8	Signal analyzer unit	Type 2035
9	Impact hammer	Type 8202
10	Force-transducer	Type 8200
11	Accelerometer	Type 4371, 4383

Table. 2-2 Chemical compositions and mechanical properties of workpiece

Chemical compositions(Wt. %)								
Al 7075	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	
	1.2	0.4	0.5	0.3	2.1	5.1	0.18	
Mechanical properties								
Al 7075	Tensile strength(MPa)				Hardness(Hr)			
	574				130			

Table 2-2는 본 실험에 사용된 시편의 형상, 치수, 화학 성분 및 기계적 성질을 나타낸 것이다.

### 2.1.2 실험 방법

실험을 위하여 prototype 선삭용 공작기계 시스템을 이용하여 공구설치각, 절삭속도, 이송율, 절입깊이를 변화하면서 절삭 실험을 행하였다.

시험편은 공기 정압 스피들에 부착된 콜릿 척에 장착하고 사용된공구는 대한중석의 SSDCR2020K12를 이용하여 알루미늄합금가공에 사용되는 PCD(Poly-crystalline diamond) SNMA120404를 사용하였으며 오실로스코프(GS VC-6023 20MHz)를 이용하여 가공 상태를 실시간에서 확인하면서 실험하였다. 시험편을 콜릿 척에 고정하였을 때 발생하는 편심을 제거하기 위하여 매 시험편마다 전가공을 하였다.

본 연구에 사용된 실험 조건은 Table 2-3과 같다.

Table. 2-3 Cutting conditions

Item	Workpiece
	Aluminum alloy
Cutting speed (m/min)	300, 400, 500, 600,
Feed rate (μm/rev)	5, 10, 15, 20
Depth of cut (μm)	5, 10, 15, 20
Tool material	PCD
Air pad input pressure	2 bar
Cutting fluid	Dry cutting
tool setting angle	75°, 60°, 45°, 30°

## 2.2 시스템 특성 실험

초정밀 절삭 가공을 위하여 정밀공작기계의 특성이 파악 되어야 한다. 특히 본실험에서는 초정밀 절삭 가공을 위한 시스템이 없는 관계로 prototype 시스템이므로 각각의 특성을 파악하였다.

### 2.2.1 공기 정압 스피들

볼 베어링을 사용하는 기존의 스피들은 볼의 구름 접촉에 의하여 마찰열이 발생하며, 볼과 궤도면의 진원도 차이에 의하여 진동 발생 등의 문제점이 있기 때문에 초정밀 가공기용 스피들로는 부적합하다. 공기 정압 스피들은 공기압에 의하여 축이 부상하는 방식으로 진동과 마찰열 문제를 해결할 수 있기 때문에 초고속, 초정밀 공작기계등 많은 분야에서 이용이 증가되고 있다. 따라서, 본 초정밀 선삭 가공 시스템에 회전 정밀도가 우수한 공기 정압 스피

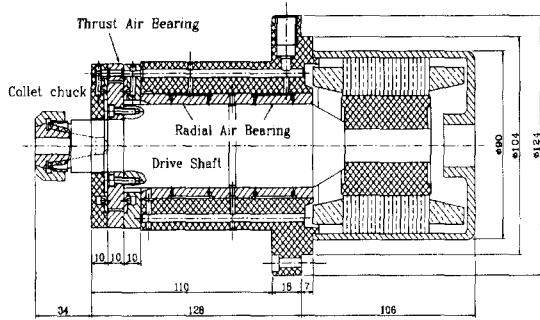


Fig. 2.3 Assembly of the air spindle

핀들을 사용하였다.

Fig. 2.3은 트러스트 공기 정압 베어링을 위한 공기 공급구가 설치되는 트러스트 베어링의 설계도이다. 여기에는 1열의 12개 급기구가 원주 방향으로 설치된다.

스핀들의 발열온도를 측정하기 위하여 사용한 열전대(Thermo-couple)는 Type J로서 측정온도범위 0~277℃이고 철(+)과 콘스탄탄(-)으로 구성되어 있다. 열전대에서 발생한 열기전력을 Analog사의 AD594AQ칩을 이용하여 증폭하였고, 필터로 신호의 잡음(Noise)을 제거하였으며, PC-Labcard 사의 PCL-714 A/D 변환기를 이용하여 PC로 온도를 측정하였다

Fig. 2.4는 10,000rpm으로 회전하고 있는 공기 정압 스펀들의 베어링부와 실험실의 온도변화를 1분 간격으로 1시간 동안 측정 한 결과이다. 실험 결과 실험실의 온도는 20~22℃범위로 안정적인 상태를 나타내고 있으며, 스펀들 베어링부의 온도는 최초 20℃에서 운전시작 후 약 5분이 지나면 2℃정도가 낮아진 18℃에 이르게 되며, 그 이후

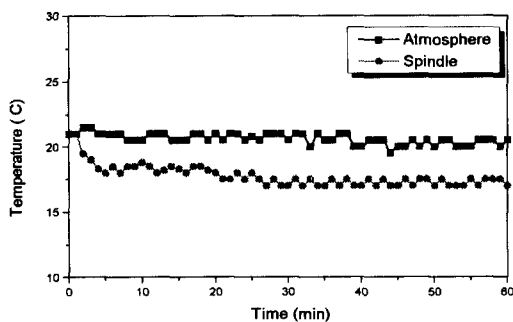


Fig. 2.4 Temperatures of the air spindle with respect to the driven time in 10000 rpm

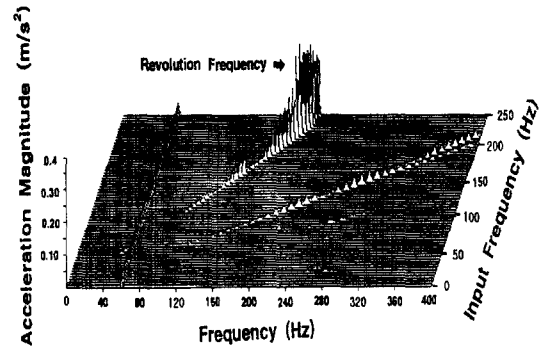


Fig. 2.5 Power spectra of the acceleration obtained in accelerating the air spindle

에는 안정적인 온도를 유지함을 알 수 있었다. 또한 모터의 고정자부의 온도상승도 전혀 발생하지 않았다. Fig. 2.5는 스펀들 운전시의 진동실험결과를 나타낸 것이다. 실험은 입력 주파수를 0~240Hz까지 30초 동안에 도달되도록 일정가속지령제어로서 스펀들을 구동하고, 가속구간 동안의 진동특성을 검출하였다.

실험결과 입력 주파수 100Hz 부터 스펀들의 회전진동수에 해당하는 진동주파수가 검출되고 있으며, 200Hz에 도달하면 진동성분의 진폭이 급격히 증가하고 있다. 회전체의 진동은 회전체의 회전축에 대한 질량 불평형(Unbalance)에 의한 진동과 회전축의 회전주파수와 시스템의 고유진동수와의 공진에 의한 것이다. 회전체가 이상적으로 질량평형이 이루어져 있다면 질량 불평형에 의한 진동은 나타나지 않는다.

초정밀 가공 제품의 정밀도는 공작기계 자체에서 발생하는 진동과 외부로부터 가공 시스템에 전달되는 진동에 가장 큰 영향을 받는다. 이와 같은 진동을 억제하기 위해서는 공작기계 구조 재료로 감쇠 성능이 우수한 재료를 선택하여야 하며, 방진 시스템이 필요하다. 시스템을 지지하는 공기 패드의 공급 압력 변화에 따른 진동 특성을 보다 자세히 분석하기 위하여 감쇠 시간 및 주파수 분석을 행하였다.

Fig. 2.6은 시간을 공급 압력 변화에 따라 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 공기 패드에 압축공기가 공급되지 않은 상태인 0기압 일 때 가장 낮은 감쇠 시간을 보이고, 공기 패드에 공급된 공기 압력이 1~2기압에서 가장 빠른 감쇠 시간을 나타내고 있으며, 공기 압력이 증가함에 따라 공기 패드의 강성이 증가하면서 진동의

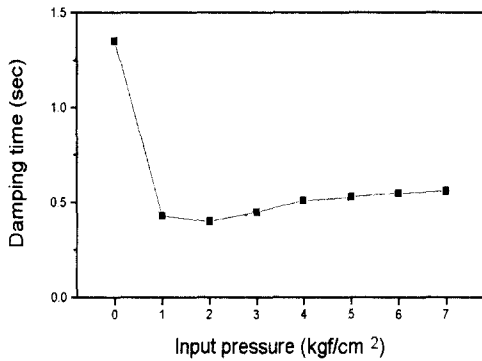


Fig. 2.6 Damping time of the air pad w. r. t. input pressure

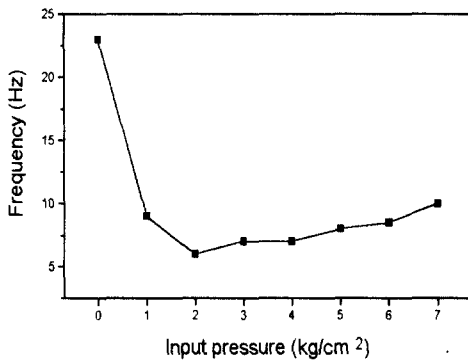


Fig. 2.7 Frequency of the bed-air pad system w. r. t. input pressure

감쇠능이 작게 나타났다.

Fig. 2.7은 공기 패드의 공급 압력 변화에 따른 진동 1차 모드(first mode)의 주파수 값을 측정한 결과이다.

측정 결과에서 알 수 있는 것처럼 공급 압력이 2기압일 경우가 1차 모드의 주파수 값이 가장 작고 공급 압력이 증가할수록 주파수 값이 증가하고 있으며, 공급 압력이 0인 경우가 가장 큰 주파수 값을 나타내고 있다. 초정밀 가공 시스템의 경우 가공 정밀도에 영향을 미치는 진동은 10Hz 이상의 주파수 성분으로 0기압 즉, 방진 패드가 설치되지 않은 경우에는 진동 주파수가 20Hz 이상이 되어 상대적으로 취약함을 볼 수 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해서 공기 패드를 설치하면 우수한 방진 효과를 얻을 수 있다. 2기압 이상의 영역에서 진동 주파수가 증가하는 것은 공기 패드의 강성 증가에 의한 것이다. 우수한 방진 효과를 얻기 위해서는 진동 주파수가 가장 적으면서 진동

감쇠가 우수하여야 한다.

이러한 결과로부터 본 초정밀 선삭가공 시스템에서 외부 충격의 방진을 위한 공기 패드 시스템의 적용이 타당함을 입증할 수 있었으며, 공기 패드에 2기압의 압축 공기를 공급하는 것이 가장 우수한 방진 효과를 얻을 수 있었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 절삭공구의 설치각과 이송율에 따른 가공특성

공구홀더는 SSDCR2020K12에 공구재종 PCD SNMA120404를 이용하여 공구설치각 30°, 45°, 60°, 75°,로 각각 변화시키면서 가공을 한결과 Fig. 3.1과 같은 결과를 얻었다. 절삭 조건은 절삭속도 300m/min, 절입깊이 15 $\mu$ m, 이송율을 5 $\mu$ m/rev, 10 $\mu$ m/rev, 15 $\mu$ m/rev, 20 $\mu$ m/rev의 조건으로 가공하였다.

그림에서와 같이 이송율의 증가에 따라 거칠기는 나빠진다. 일반적으로 공구 설치각이나 부절삭각이 작아질수록 표면거칠기는 양호해진다. 본 실험에서는 미소량의 절입깊이로 부절삭각에 따른 가공면의 거칠기는 각이 중앙(45°)으로 갈수록 거칠어지고 다시 작을수록 양호해지고 부절삭각과 설치각과 비교하면 부절삭각이 작을수록 표면거칠기는 양호하다. 이는 정밀한 에어스핀들과 이송이 작고 다이아몬드 공구를 사용하지만 진동, 깊이, 이송 등으로 절삭저항의 변화에 따른 영향으로 생각된다. 특히 범용절삭에서 설치각에 따라 배분력이 증가<sup>(1)</sup>하는데 이것이 미소절삭시 버니싱작용과 소성변형을 증가시키는 원인이라 생각된다.

따라서 초정밀가공을 위하여 부 절삭각을 작게하는 것

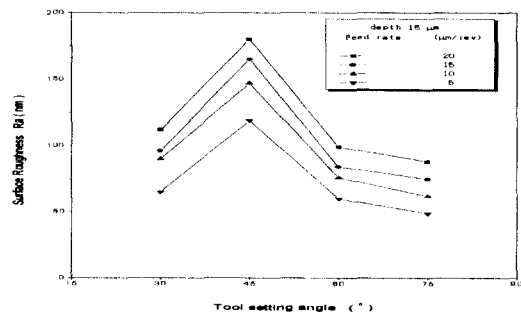


Fig. 3.1 Surface roughness according to tool setting angle (Tool : PCD, feedrate 15 $\mu$ m/rev, Cutting speed 300m/min)



(a) MCD(×5000)



(b) PCD(×2000)

Fig. 3.2 Edge of the Diamond bite

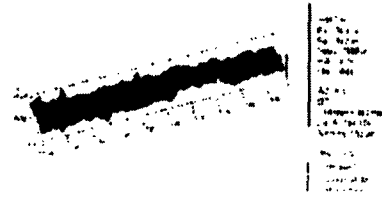
이 바람직하다.

Fig. 3.2에서와 같이 바이트 날부위를 확대 해보면 천연 다이아몬드 바이트는 인선이 완전 균질한 반면 PCD바이트는 입자가 불 균일함을 볼수 있다. 이는 초정밀에서 바이트 형상을 공작물에 전사하는 것이 가장 이상적인 절삭 형태인데 PCD공구의 경우 인선의불균일로 일정한계까지 초정밀 가공이 가능함을 알수 있다.

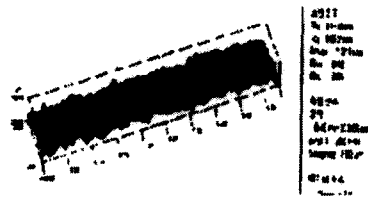
Fig. 3.3은 비접촉식 광학 표면거칠기 측정기를 이용하여 측정한 표면 형상이다.

Fig. 3.3에서 설치각이 60°에서 거칠기가 양호하다. 이는 부절삭각이 공작물과 직선에 가깝게 접촉하고 배분력이 작아지기 때문에 소성변형도 줄어드는 효과라 생각된다.

특히 거칠기형상을 보면 소성변형 및 마찰형상을 볼수 있는데 이는 초정밀 미소가공에서 공구의 날형상이 중요함을 말해준다. 따라서 초정밀가공을 위하여 천연 다이아몬드 공구를 사용하는 것이 바람직하다.



(a) Setting angle 60°



(b) Setting angle 30°

Fig. 3.3 Surface Roughness for various cutting conditions

### 3.2 공구 설치각과 절삭 깊이와의 관계

Fig. 3.4는 절삭속도 500m/min, 이송 5μm/rev, 절입 깊이 5μm, 10μm, 15μm, 20μm 로 변화시키고, Fig. 3.5는 절삭속도 600m/min, 이송 10μm/rev, 절입 깊이 5μm, 10μm, 15μm, 20μm로 공구 설치각 30°, 45°, 60°, 75°로 변화시키면서 가공한 특성이다.

정밀절삭이 이루어 질 때 미소 절삭으로 절입깊이와 이송이 아주 작기 때문에 절삭 혹은 탄성효과나 버니싱 현

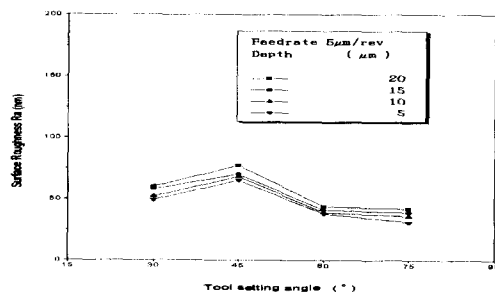


Fig. 3.4 Surface roughness according to tool setting angle and cutting speed Tool : PCD, feedrate 5μm/rev, Cutting speed 500m/min )

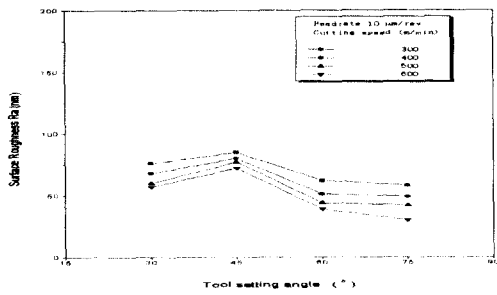


Fig. 3.5 Surface roughness according to setting tool edge angle( Tool : PCD, Cutting speed 500m/min, Feed rate 10µm/rev)

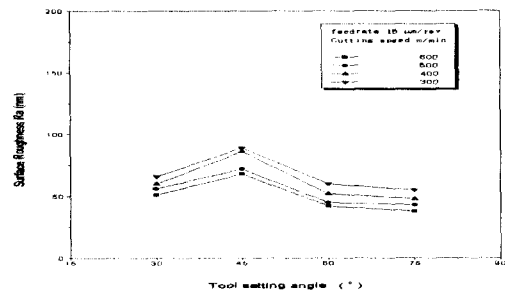


Fig. 3.7 Surface roughness according to setting tool edge angle( Tool : PCD, depth 15µm, feedrate 15µm/rev)

상을 일러줄 수 있다.

즉 공구 형상이 직선일 경우 일정한 절삭 깊이가 절삭되지만 라운드형상에서는 설치각도에 따라 절입부분은 조금절삭되고 점입날 바깥쪽으로 갈수록 많이 절삭되는 현상이 일어난다. 이는 절삭날의 예리함이 적고 주분력 보다 배분력의 증가에 따른 버니싱 영향으로 사료된다.

### 3.3 공구 설치각과 절삭 속도와의 관계

일반적으로 정밀가공을 위하여 고속가공을 한다. 고속가공을 함으로 미세한칩을 유동형칩으로 형성하여 배출시키며 이로 인한 표면거칠기 향상과 잔유응력 감소효과가 있다. Fig. 3.6 Fig. 3.7은 공구 설치각을 변화시키며(30°, 45°, 60°, 75°) 절입 깊이를 15µm, 이송율을 각각 10µm/rev, 15µm/rev, 절삭속도를 300m/min, 400m/min, 500m/min, 600m/min로 변화시키면서 실험을 하였다.

그림에서와 같이 절삭속도를 높임에 따라 표면거칠기는

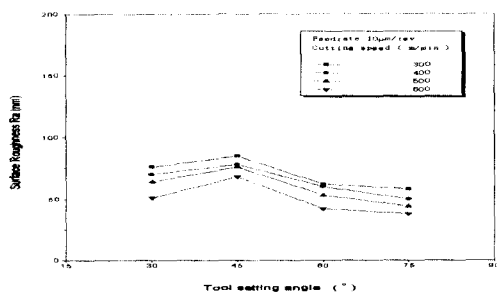


Fig. 3.6 Surface roughness according to setting tool edge angle and cutting speed ( Tool : PCD, depth 15µm, feedrate 10µm/rev)

양호하여졌다. 또한 공구 설치각이 45° 부근 에서는 거칠어지고 설치각을 작게 할수록 양호한 거칠기를 얻었다.

또한 부절삭각이 작을수록 설치각과 비교시 더욱 양호하였다. 이는 설치각이 작을수록 바이트의 원호부분으로 절삭이 일어나고 부절삭각이 작을수록 직선날로 절삭되는 효과가 발생되기 때문이다. 특히 부절삭각이 작아질수록 배분력이 작아지는 효과라 생각 되어진다. 따라서 정밀가공을 위하여 고속가공과 공구의 설치각을 작게 설정하여 가공하는 것이 효과적이다.

## 4. 결론

첨단 산업의 발달과 초정밀가공품이 급속히 필요로 하고 있고 외국의존에서 국산화하고 초정밀 선삭 가공을 실현하기 위해 초정밀 선삭 가공용 공작 기계 시스템의 각 구성 요소에 대한 동적 특성을 파악하고 알루미늄 합금을 초정밀 선삭 가공하였다. PCD 공구로 공구 설치각과 이송률, 절입 깊이, 절삭 속도 등의 절삭 조건을 변화시켜 가면서 절삭 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초정밀 선삭 가공을 실현하기 위하여 시스템의 안정성이 중요하다.
- (2) PCD공구를이용한 초정밀 절삭을 위하여 가능한한 공구설치각을 작게하면 양호한 거칠기를 얻을수 있다.
- (3) 초정밀가공을 위하여 공구 설치각을 작게 하고 부절삭각을 작게 선정하는 것이 정밀가공에 유리하다.
- (4) 이송률과 절삭 깊이가 증가하면서 공구로 가공시 표면 거칠기가 나빠지는 경향을 나타내지만 절입깊이가 너무 작으면 시스템이 안정되어도 바이트 입도의

형태가 다결정이므로 정밀가공에서 일정 한계 이상은 불가능하다.

## 후 기

본 연구는 대전산업대학교 학술 연구비 지원금에 의하여 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) S. Nakamura, "High-Speed Spindles for Machine Tools", *Int. J. Japan Society Precision Engineering*, Vol.30, No.4, pp. 291~294, 1996.
- (3) T. Moriwaki, A. Horiuchi, "Effect of Cutting Heat on Machining Accuracy in Ultra-Precision Diamond Turning", *Annals of the CIRP*, Vol.39, No.1, pp. 81~84, 1990.
- (4) N. Ikawa, "Technology of Diamond Tool for Ultra-precision Metal Cutting", *Bulletin of JSPE*, Vol.21, No.4, pp. 233~238, 1987.
- (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, 1988.
- (6) K.E. Puttick, "Single-Point Diamond Machining of Glasses", *Proc. R. Soc. Lond.*, 1989, pp. 19~30.
- (7) T. Sugano, K. Takeuchi and Y. Yoshida, "Diamond Turning of Oxygen-Free Copper for Mirrors", *JSME International Journal Series C*, Vol.36, No.4, pp. 549~555, 1993.
- (8) S. Takasu, M. Masuda, "Influence of Study Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining", *Annals of the CIRP*, Vol.34, 1, pp. 463~467, 1985.
- (9) T. Moriwaki, K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-precision Micro Diamond Cutting", *Annals of the CIRP*, Vol.38, No.1, pp. 115~118, 1989.
- (10) 前田幸男, 田正美, 西口隆, 尺眞司, 伊藤立, *ダイヤモンド*

工工具による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.

- (11) 신근하, 이수용, "선삭에서 절삭 조건에 따라 설치 각이 절삭 저항에 미치는 영향", *한국공작기계학회*, 제6권 제3호, pp. 103~110, 1997.