

초정밀 절삭가공에서 표면거칠기 특성 평가

강순준*, 이갑조*, 김종관**

Characteristics Evaluation of Surface Roughness with Ultra Precision Machining

Kang, Soon Joon*, Lee, Kab Jo*, Kim, Jong Kwan**

Abstract

In this study, experiments were conducted with an ultra-precision machine, developed in domestic, to find the characteristics and the most suitable cutting conditions of ultra-precision machining. To maximize the performance of the machine, the machine was installed in a room that is protected from vibration and is maintained constant temperature and constant humidity. Selected work pieces are an aluminum-alloyed material, which has excellent corrosion resistance and has low deformation. The used tool is synthetic poly crystal diamond, which has excellent abrasion resistance and has low affinity. Four types of tool nose radius were used such as 0, 0.1, 0.2 and 0.4mm. Machining is performed with cutting speed of 500, 800 and 1000m/min., feed rate of 0.005, 0.008, 0.010mm/rev. and cutting depth of 0.0005, 0.0025 and 0.005mm respectively which can generally be used in the field as a cutting condition. As a method of evaluation, surface roughness was measured for each cutting condition, and reciprocal characteristics are computed for each tool nose radius, cutting speed, feed rate and cutting depth. As a result, the most suitable cutting condition and characteristics of ultra-precision machining were identified which can usefully be applied in the industrial field.

Key Word : Synthetic poly crystal Diamond Tool(단결정 인조 다이아몬드 공구), Ultra-Precision Machine(초정밀가공기), Tool Nose Radius(공구인선반경), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서론

최근, 산업현장에서의 생산 리드타임 단축 및 고품질에 대한 요구는 날이 갈수록 더욱 엄격해지고 있다. 이에 따라 새로운 생산방식과 기술개발이 필요하게 되었고, 그 중의 하나가 초정밀가공기의

등장이라고 할 수 있다. 초정밀가공기의 제조 기술의 발전에 따라 초정밀 산업에 필요한 광학부품, 정밀기계부품, 전자부품 등 다양한 분야에 널리 적용되고 있다.^(1,2)

초정밀가공은 다이아몬드의 예리한 인선으로 가공하기 때문에 표면이 미려하고, 피삭재에 전사

* 조선대학교 기계공학과 대학원
501-759, 광주광역시 동구 서석동 375번지
+ 조선대학교 산업대학원
++ 조선대학교 기계공학과

되는 정도가 좋아 치수 및 형상정밀도가 연삭가공보다도 용이하게 얻어질 수 있다. 이로 인하여 기계 가공공정 및 리드타임의 단축은 물론 가공설비, 기계 설치작업장, 작업자의 감축 등 효율성이 검증되어 산업현장에서 활용도가 증가하고 있다. 초정밀가공에 있어서 비철금속 소재의 가공은 탁월한 효과를 가져올 뿐 아니라, 알루미늄합금의 경면가공이나 렌즈가공 등 여러 방면에 적용되고 있다.

최근 국내 공작기계 기술은 독일, 일본등의 초일류 메이커와 동등한 수준까지 육박하고 있으며, 특히 초정밀가공기의 개발은 국내 산업 발전에 크게 기여할 것으로 판단된다. 공작기계에 대한 절삭가공기술은 보편화된 기술 중의 하나지만 초정밀기계, 다이아몬드 공구, 신소재의 출현은 절삭가공공정 및 그 메카니즘에 재조명을 필요로 하고 있다.

Kim⁽³⁾등은 알루미늄 합금에 대한 초정밀 가공에 대한 특성을 연구하였고, Ko, Kim⁽⁴⁾등은 무산소동에 대한 초정밀 가공에 대한 특성을 연구하였으며, Son, Her⁽⁵⁾등은 초정밀 절삭가공에서의 가공깊이 최소화에 대하여 연구하였으나 일반산업현장에서 주로 사용하는 알루미늄합금 소재에 대한 다결정 인조 다이아몬드 공구의 인선반경 0.4mm 이하의 절삭가공 실험 및 기초 데이터가 필요한 실정이다. 일반적으로 볼 때 각 공구업체에서 제시된 절삭기술 및 기초데이터는 자체적인 실험에 의한 자료이지만 실제 산업현장에서 적용하는 데이터로서는 신뢰성이 떨어지는 형편이다. 따라서 산업현장에서 적용할 수 있는 기초 데이터를 산출하는 것은 매우 중요한 일이다.

이에 본 연구에서는 국내에서 개발된 초정밀선반에서 다결정 인조다이아몬드 공구를 사용하여 알루미늄합금 (A/6061)을 공구의 인선반경 종류별로 각 절삭조건(절삭속도, 이송속도, 절입깊이)으로 절삭가공하여 표면거칠기 측정을 통한 알루미늄합금의 초정밀 가공특성 및 최적의 절삭가공조건을 제시하고자 한다.

2. 초정밀가공 이론적 배경

2.1 초정밀가공의 이론

초정밀 가공기술은 광학, 기계 그리고 전자 부품

에서 μm 단위의 형상정밀도를 얻고 가공표면은 nm 이내의 초정밀도를 얻는 기술이다. 초정밀 가공은 기본적으로 창성 운동에 의해서 가공을 함으로 절삭기계의 정밀도가 가공표면에 직접 옮겨져간다. 따라서 공작기계의 정밀도 특히 운동정밀도가 요구되는 가공품의 정밀도를 실현시키는 것이 극히 중요한 함수가 된다. 또 절삭 가공중 공구와 공작물 사이의 상대적인 위치와 운동관계를 완벽하게 하기 위해서는 공작기계의 정적, 동적, 열적변형을 억제해야 하는 것이 필수 요건이 된다.

2.2 초정밀기계와 정밀기계의 비교

일반적으로 기계정밀도는 실제 가공된 결과에 의해 평가하게 되지만, 기본적으로 기계의 구조가 정밀도를 낼 수 있도록 설계 및 적절한 부품의 채용 즉 볼스큐루우, 리니어 가이드, 리니어 스케일, 고정밀 주축베어링 및 쿨링 장치 등이 정상적으로 제작 및 조립되어 효율적으로 기능이 발휘되어야 한다. 특히 초정밀기계에서의 정적, 동적, 열적정밀도는 정밀기계와 반드시 차별화된 성능을 낼 수 있어야 한다.

공작기계에서 등급을 결정하는 기본적인 요소로서는 주축의 진동, 각축의 진격도, 각축의 위치결정도이며, 이에 대한 초정밀급 기계와 정밀급 기계에 대하여 Table 2-1과 같이 비교하였다.

Table 2-1 Comparison accuracy of test cutting machines

Description	Precision	Ultra-precision	
Vibration value of spindle	Radial	0.8 μm	0.3 μm
	Axial	0.8 μm	0.3 μm
Vertical / Horizontal straightness	X axis	2.0 $\mu\text{m}/100\text{mm}$	0.5 $\mu\text{m}/100\text{mm}$
	Z axis	2.0 $\mu\text{m}/100\text{mm}$	0.5 $\mu\text{m}/100\text{mm}$
Accuracy	X axis	20 $\mu\text{m}/250\text{mm}$	10 $\mu\text{m}/250\text{mm}$
	Z axis	20 $\mu\text{m}/220\text{mm}$	10 $\mu\text{m}/220\text{mm}$
Repeatability	X axis	$\pm 0.5\mu\text{m}$ / 7times	$\pm 0.2\mu\text{m}$ / 7times
	Z axis	$\pm 0.5\mu\text{m}$ / 7times	$\pm 0.2\mu\text{m}$ / 7times

또한 기본적인 기계 구성요소가 설계단계에서 부터 차별화 되어야 하며, 제작 및 실 사용시에

도 주변환경을 고려하지 않으면 기계가 가지고 있는 본래의 성능을 발휘할 수 없게된다. Table 2-2는 초정밀급 기계와 정밀급 기계에 대한 구조적 요소부품을 비교하였다.

Table 2-2 Comparison components of test cutting machines

Description	Precision	Ultra-precision
Head Bearing	P1~3±1.0 μ m	P0±0.3 μ m
Ball Screw	C3, pitch error 23 μ m	C1, pitch error 8 μ m
Head Cooling	Grease filled	Oil cooling
Spindle Motor	Built out Motor	Built in Motor
Slide System	Tarcite, LM Guide	Tarcite, LM Guide, Air Sliding
	Overlap slide	Separately Slide
Spindle Speed	3000~7000rpm	Up to 10,000rpm

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 실험에서 사용된 기계는 국내에서 개발된 초정밀선반(Horizontal Ultra Precision Lathe)으로 기계외관은 Fig. 3-1, 기계의 세부사양은 Table 3-1과 같다.

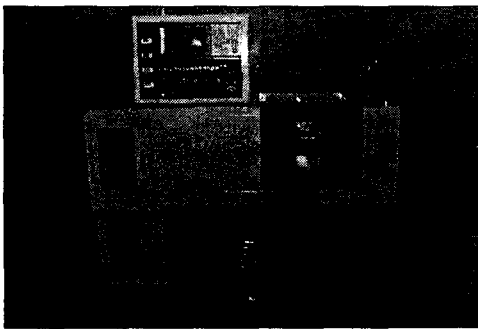


Fig. 3-1. Photograph of ultra-precision turning center

Table 3-1 Specifications of Machine

Description	Specifications
Machine Name	UPL
Max. Spindle Speed	10,000r.p.m
NC System	HYD-3000T
Min. movement unit	0.05 μ m
Head cooling system	Oil Jet
Size of Tool	□16x ϕ 16
Size of Spindle Bearing	ϕ 70
Spindle Motor	3.7/5.5Kw

공구(Insert) 재종은 내마모성이 우수하고, 실험에 사용된 재료인 알루미늄 합금과 친화력이 적어 절삭성 및 표면거칠기가 우수한 다결정 인조 다이아몬드(CCMT120402-HPD010)를 사용하였다.

홀더(Holder)는 SCLCR 1616H-12로서 교세라(Kyocera)에서 제작하였다.

실험용 재료는 내식성이 강하고, 절삭성이 우수한 알루미늄합금 (A/6061)을 채용하였으며, 구성 성분은 Table 3-2과 같다. 시편의 크기는 기계의 주축회전수를 최대한 활용할 수 있도록 하기 위하여 ϕ 33x ℓ 40(실제 절삭가공길이 25mm)으로 준비하였고, 기계에 장착하는데 필요한 장치는 4인치 콜렛 척(Air)을 사용하여 고 회전에 의한 진동이 없도록 하였다.

Table. 3-2 Compositions of work piece used in experiment (A/6061)

Elements	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Al
wt(%)	0.15 ~ 0.4	0.4 ~ 0.8	0.8 ~ 1.2	0.25	0.15	0.04 ~ 0.35	0.7	rest

3-2. 실험조건

기계 가공에 있어서 정밀도에 영향을 미치는 요소 중의 하나가 외부환경인데 실제 기계 자체의 원인보다도 영향을 크게 미치는 경우가 있다.

그러한 문제를 제거하기 위하여 진동이 없고, 향온·향습 시설이 갖추어진 장소에 기계를 설치

하였다. 실험에 적용한 절삭조건은 Table 3-2와 같이 4종의 공구인선반경(Tool Nose Radius) R0.0mm, R0.1mm, R0.2mm, R0.4mm, 절삭속도 V500m/min., V800m/min., V1000m/min., 이송속도 F0.005mm/rev., F0.008mm/rev., F0.01mm/rev., 절입깊이 d0.0005mm, d0.0025mm, d0.005mm이며, 절삭열에 의한 변형을 없도록 하기 위하여 자체 쿨링장치를 부착된 비수용성 절삭유(Metocutt555)를 사용하였고, 절삭길이는 시편의 길이 25mm를 4~8회 반복가공하여 원주길이를 환산하여 조건별 2,000m 절삭가공하였다.

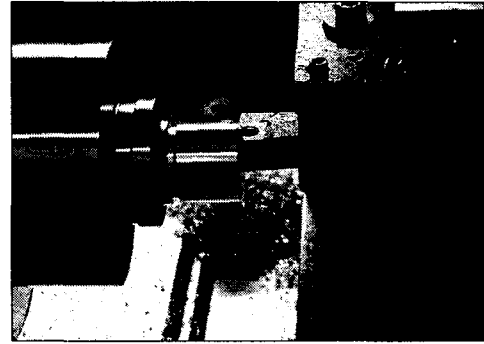


Fig. 3-2 Photograph of experimental set up

Table 3-3 Cutting Conditions

Tool Nose Radius mm	Cutting Speed V m/min.	Feed Rate F mm/rev.	Depth of cut d mm	Cutting Dia. D mm	Spindle Speed N r.p.m	Length of Cut L m
R0.0 R0.1 R0.2 R0.4	500	0.005	0.0005	φ 33	5,000 ~10,000	2,000
			0.0025			
			0.0050			
		0.008	0.0005			
			0.0025			
			0.0050			
	800	0.010	0.0005			
			0.0025			
			0.0050			
		0.005	0.0005			
			0.0025			
			0.0050			
1000	0.008	0.0005				
		0.0025				
		0.0050				
	0.010	0.0005				
		0.0025				
		0.0050				

3-3. 실험방법

초정밀 선반을 이용하여 사전에 준비한 알루미늄 합금시편을 Fig. 3-2와 같이 장착하고, 다결정 인조다이아몬드 공구를 이용하여 절삭특성을 평가하기 위하여 외경을 절삭가공하였다.

초정밀 선반에서 시편을 절삭가공시 사용한 NC 프로그램은 1개 공구인선 반경당 절삭속도, 이송속도, 절입량별 27개의 프로그램을 작성하여 프로그램 1개당 1시편을 사용하였으며, 4종의 공구인선 반경에 총 108개의 시편을 절삭가공하였다.

절삭가공한 시편의 표면거칠기 측정에는 분해능력 $1/10^7$ 을 가진 Taylor Hobson Fig. 3-3을 이용하였으며, 본 실험에서 표면조도의 평가에 사용된 파라메타는 최대높이조도(R_{max})이다. 기계의 부품들은 서로 접촉하여 움직이기 때문에 사용시간이 경과됨에 따라 부품의 표면은 마모가 진행되며, 이때 마모의 진행은 거칠기곡선의 가장 높은 산에서부터 시작되므로 최대높이조도(R_{max})를 평가 방법으로 삼았다. 측정오차 및 정확성을 기하기 위하여 동일 시편에 표면거칠기를 3회 측정하여 평균값으로 하였다.

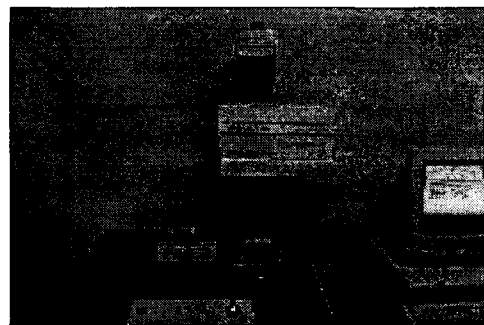


Fig. 3-3 Photograph of experimental set up (Surface Roughness Tester)

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 인선반경에 따른 표면거칠기 특성

표면거칠기에 대한 이론적 공식에 의거하면 공구의 인선반경과 이송에 따라 표면거칠기가 증감된다는 것은 일반적인 사항이다. 그러나 본 실험에 의한 결과를 보면 반드시 이론과 동일하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 즉 공구인선반경 0, 0.1, 0.2, 0.4mm를 동일한 절삭속도, 이송속도, 절입깊이로 절삭가공하여 표면거칠기를 측정하여 Fig. 4-1과 같이 최저치, 평균치, 최고치를 산출한 결과 인선반경 0.2mm일 때 표면거칠기가 가장 양호함을 알 수 있었고, 인선반경 0.4mm는 실험한 공구인선 반경 중 가장 안정되지 않은 결과가 나왔음을 알 수 있었다. 표면거칠기가 가장 불안정할 것으로 예상되었던 인선반경 0mm는 0.2mm 다음으로 양호함을 확인하였다.

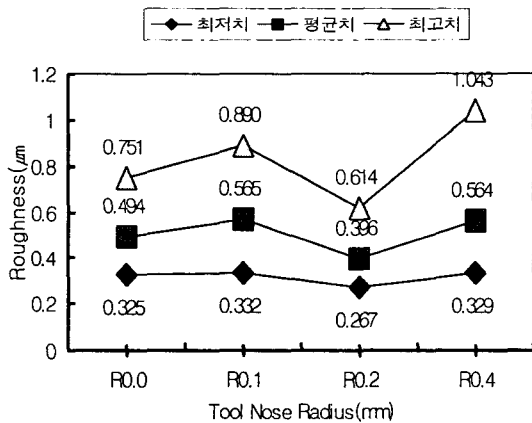


Fig. 4-1 Graph of surface roughness values with tool nose radius

4-2. 절삭속도에 따른 표면거칠기 특성

절삭속도 500, 800, 1000m/min. 조건으로 실험한 결과 Fig. 4-2와 같이 절삭속도가 높아질수록 표면거칠기가 양호하며, 공구인선 반경이 0.2mm일 때 가장 안정적인 표면거칠기가 나왔으며, 나머지 공구는 절삭속도 1000m/min.일 때 상호 근접함을 알 수 있었다.

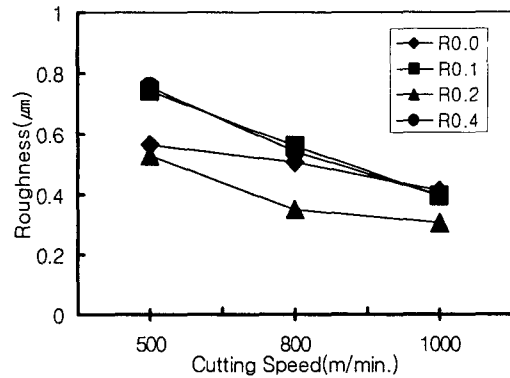


Fig. 4-2 Graph of surface roughness values with cutting speed

4-3. 이송속도에 따른 표면거칠기 특성

이송속도와 절삭속도를 비교 실험한 결과 Fig. 4-3과 같이 절삭속도가 높을수록, 이송속도는 낮을수록 표면거칠기가 양호함을 알 수 있다. 즉 이송속도가 가장 낮은 F0.005mm/rev.일 때 가장 양호하며, F0.008, F0.01mm/rev. 순으로 표면거칠기가 거칠어짐을 알 수 있는데 이는 표면거칠기 이론과 일치함을 확인할 수 있었다.

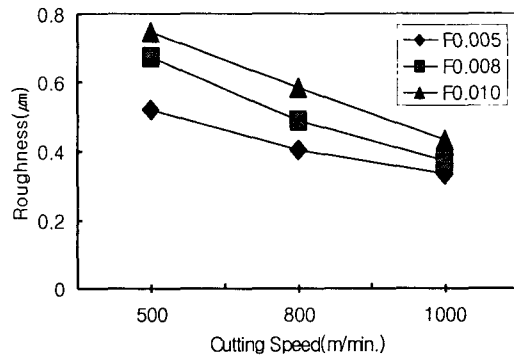


Fig. 4-3 Graph of surface roughness values with feed rate

4-4. 절입깊이에 따른 표면거칠기 특성

절입깊이와 이송속도를 비교 실험한 결과 절입깊이에 의한 변화는 Fig. 4-4와 같이 표면거칠기에 크게 영향을 주지 않고, 이송속도가 낮을수록 표면거칠기가 양호함을 확인할 수 있었다.

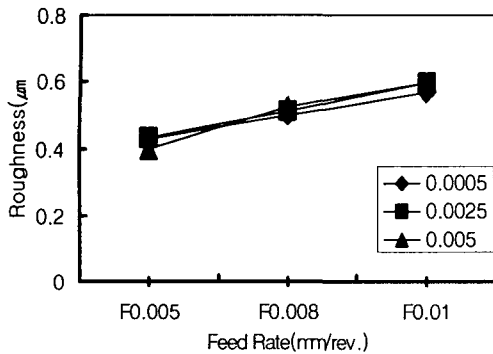


Fig. 4-4 Graph of surface roughness values with depth of cut

4-5. SEM에 측정에 의한 표면거칠기 특성

실험한 조건 중 공구 인선반경 0.2mm, 절삭속도 1000m/min., 이송속도 0.005mm/rev., 절입깊이 0.010mm로 절삭가공한 외경면의 표면거칠기에 대한 특성을 Fig. 4-5와 같이 SEM으로 측정(10,000배)하여 관찰하였다.

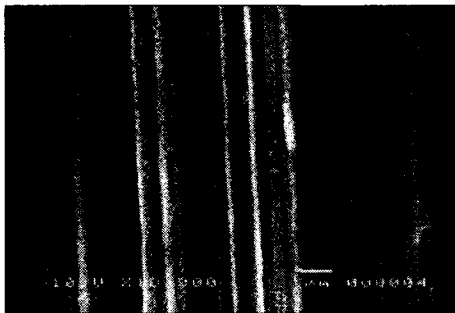


Fig. 4-5 SEM photograph of cutting surface

5. 결 론

초정밀기계에서 절삭속도, 이송속도, 절입깊이에 대하여 공구의 인선반경에 따른 표면거칠기 평가를 통한 절삭특성 및 최적의 절삭조건 산출을 위한 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구인선반경의 크기(R0, 0.1, 0.2, 0.4mm)에 따른 표면거칠기는 R0.2mm일 때 가장 양호하였고, R0.4mm가 가장 거칠고, 불안

정함을 확인하였다.

- (2) 절삭속도에 따른 표면거칠기는 절삭속도가 높을수록 양호함을 확인하였으며, 실험한 조건 중 1000m/min.이상의 조건에서 실험이 필요함을 알 수 있었다.
- (3) 이송속도에 따른 표면거칠기는 이송속도가 낮을수록 우수한 표면거칠기를 얻을 수 있었으며, 실험에 포함하지 않은 F0.009, F0.007, F0.006, F0.004mm/rev. 등의 이송속도에 대한 실험 및 경향에 대하여 검증할 필요성을 확인하였다.
- (4) 절입깊이는 표면거칠기에 별다른 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었으나, 0.0005mm 이하 및 0.005mm 이상의 조건에서는 어떠한 영향을 미칠것인지에 대하여 실험이 필요함을 알 수 있었다.

후 기

본 실험은 H사에서 나노가공의 전 단계로 최근 개발한 100nm급의 초정밀 CNC선반에 대하여 성능검사를 통한 최적의 절삭조건 자료를 얻기 위해 실시되었다.

참 고 문 헌

- (1) Joseph Dean Drescher, 1991, "Tool force, tool edge, and surface finish relationships in Diamond turning"
- (2) Christopher Arcona, 1996, "Tool force, chip formation and surface finish in Diamond turning"
- (3) Woo-Soon Kim 2003 " A study on the Ultra Precision turning of Al-alloy" KSMTE pp. 416~421
- (4) Jun-Bin Ko, Geon-Hee Kim, Jong-Ho Woo, 2002, "Cutting characteristics of oxygen-free using the ultra precision machining" JKSP, vol. 19, No. 12, pp. 120~126
- (5) Seong-Min Son, Sung-Woo Her, Jung-Hwan Ahn, 2003, " A study on the minimizing of cutting depth in sub-micro machining" KSMTE, pp. 376~381