

SEM 측정법에 의한 초정밀 표면가공 특성연구

강순준*, 오상록*, 이갑조**, 김종관***

A Study on the Surfaces Machining Characteristics of Ultra-precision through SEM Measurement

Soon-Joon Kang*, Sang-Lok Oh*, Gab-Jo Lee**, Jong-Kwan Kim***

Abstract

The purpose of this paper is to look at the characteristics of surface finishing which is one of the form accuracies and to obtain the fundamental technical data from the process of machining with diamond tool through experiment and theoretical analysis. The experiments were conducted with domestic made ultra-precision machine and MCD · PCD tool, with aluminum alloyed material and brass being used for the work pieces. The goal of the size accuracy was set to 100nm. The most suitable tool nose radius and machining conditions were selected, and the variations of the surface roughness were observed using SEM method while machining the distance of up to 500km. These data were evaluated and they examined the variation of the machined surfaces while cutting up to 500km of machining distance. At the same time, the state for the wear of diamond tool nose was analyzed and carefully examined through the newest measuring device. Additionally, the characteristics of ultra-precision machining technology were studied through visual analysis.

Key Words : MCD (천연 다이아몬드), PCD (인조 다이아몬드), SEM(주사전자현미경), Ultra-precision machine(초정밀가공기), Tool nose radius(공구인선반경), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서 론

산업현장에서의 생산리드타임 단축 및 고 품질에 대한 요구는 날이 갈수록 심화되고, 이에 따른 새로운 기술개발과 생산방식이 절실하게 필요하게 되었는데 그 요구에 부응한 연구결실 중의 하나가 초정밀가공기의 등장이라고 할 수 있다. 초정밀가

공이라 함은 시대의 기술수준에 따라 달라지는데 오늘날에는 치수 및 형상정밀도 100nm, 표면거칠기 10nm이하라고 말할 수 있다. 제조기술의 발전에 따라 광학부품, 정밀기계부품, 전자부품 등 각종 첨단산업에 있어 초정밀가공을 필요하지 않는 분야는 거의 없다고 할 만큼 그 중요성은 더욱 강조되고 있다. 비록 아직도 해결해야될 문제가 많

* 강순준, 조선대학교 기계공학과 대학원(ksj@hwacheon.co.kr)
주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375번지
+ 조선대학교 기계공학과 대학원
++ 조선대학교 기계공학과 대학원
*** 조선대학교 기계공학과

이 있지만 제품의 소형화, 경량화 추세에 발맞추어 초정밀 가공분야의 발전은 더욱 박차를 가할 것으로 예상되며, 이것은 또한 절삭가공의 경제성과 생산성의 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다. 그동안 미국, 유럽 및 일본 등 선진국으로부터 수입에만 의존하던 초정밀가공기의 국내 개발은 초정밀가공기술에 대한 국내 연구가 가일층 활발하게 진행될 것으로 판단되며 산업발전에 크게 기여할 것으로 본다.

초정밀 절삭가공에는 다이아몬드 공구를 사용하는 것이 일반화되어 있다. 이는 열전도도, 내마모성, 내식성 측면에서 어느 공구보다도 우수하기 때문이며, 현재까지의 절삭공구로서 절인반경을 가장 작게 할 수 있기 때문이다. 그러나 천연다이아몬드 공구는 제작이 어렵고, 구입비용이 높아 일반 산업 현장에서 적용이 쉽지 않다. 이에 최근에는 인조다이아몬드 공구가 개발되어 적용되고 있으나 천연다이아몬드 공구에 비하여 수명 및 표면거칠기가 양호하지 않아 이에 대한 연구가 거듭되고 있다.

초정밀 관련 국내에서의 연구내용을 보면 Kim⁽¹⁾ 등은 초정밀가공에서 천연 및 인조다이아몬드 공구별 특성에 대한 자료를 제시하였으며, Jung⁽²⁾, Lee⁽³⁾ 등은 알루미늄합금에 대하여 절삭길이에 따른 표면거칠기의 특성을 SEM 측정기법을 통한 고찰 및 인조다이아몬드 공구의 마모에 대한 절삭가공 기초자료를 제시하였다. 또한 Yu⁽⁴⁾는 다이아몬드 공구의 절삭거리에 따른 정밀절삭의 특성을 통하여 공구의 초기마모에 대한 기초자료를, Kang⁽⁵⁾ 등은 인조다이아몬드 공구를 이용한 알루미늄합금의 절삭가공에 대하여 표면거칠기 평가를 통한 최적의 절삭조건을, Ko⁽⁶⁾ 등은 무산소동 소재의 초정밀 가공에 대한 특성을 연구하는 등 1990년 초부터 이 분야에 관심을 갖기 시작하여 산·학·연이 공동으로 기계 개발 및 가공기술에 대한 연구⁽⁷⁾가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구는 국내에서 100nm급 정밀도를 목표로 개발된 초정밀가공기를 실험 대상으로 알루미늄합금과 황동 재료를 절삭길이 0~500 μ m까지 인조 및 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭가공을 진행하면서 가공면의 표면거칠기 변화를 SEM 기법으로 관찰하고 표면거칠기 측정결과와 비교 평가하여 가공표면의 변화를 고찰하고, 이때 다이아몬

드 공구 절삭인선 마모형태를 최신 측정장비로 해석 고찰하여 시각적 평가에 의한 초정밀 가공기술의 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 SEM에 의한 초정밀 가공면의 표면정밀도 측정

주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)은 전자총으로부터 방출된 전자빔을 대상으로 다수의 자기장형 전자렌즈를 이용하여 약 100nm 이하의 직경을 지니는 미세한 빔으로 시료에 주사하고, 이때 전자가 도달된 곳으로부터 공작물의 물성과 형상에 따라 변화되어 방출되는 2차 전자신호를 관측용 CRT의 휘도로 변화시켜 미세한 형상으로 확대되어 나타나게 하는 기구이다. 주사전자현미경은 화상의 초점심도가 광학현미경보다 2배 이상 깊으며 분해능(최대 0.6nm)도 2배 이상 높게 얻을 수 있다. 주로 사용되어지는 2차 전자상은 광학현미경보다도 고 배율(x1000이상)로서 입체감이 있는 화상이므로 상의 해석을 본 그대로 판단할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 최근 초정밀부품에 대한 미세 관찰에 많이 활용되고 있다.

2.2 공구마모

절삭공구 마모 형태에는 여유각과 경사면의 마모로 크게 분류한다. 여유각 마모는 공구의 측면에 생기는 마모로 다듬질면이 거칠어지고 제작 치수에 영향을 주며 공구의 수명 판정에 사용되는 마모의 형태이고 경사면 마모는 칩이 공구에 경사각 상면과 연속 마찰을 일으켜 상면부가 오목하게 패이는 마모의 형태이다.

절삭과정에서 공구의 손상이 어느 이상에 달하면 소정의 가공정밀도를 얻을 수 없거나 공구의 손상이 진행되어 절삭을 수행할 수 없는 경우가 있다.

이 때까지의 정상적인 절삭시간을 공구수명이라 한다. 공구손상은 절삭시간의 경과에 따라 절인의 일부가 기계적, 화학적, 열적요인 등에 의하여 점진적으로 마모되어 손실되어 가는 정상손상과 예기치 못한 시기에 예기치 못한 크기의 균열, 깨짐, 파손, 소성변형 등의 이상손상으로 대변할 수 있다.

용하였으며, 실험한 기계에서 절삭가공이 용이하게 하기 위하여 직경 33mm, 가공길이 25mm, 칩 물림깊이 15mm로 Fig. 3과 같이 제작하였다.



Fig. 3 Test workpiece

공구(Insert) 재종은 내마모성이 우수하고, 실험에 사용된 알루미늄 합금과 친화력이 적어 절삭성 및 표면거칠기가 우수한 천연 및 인조다이아몬드를 사용하였다. 공구에 대한 세부적인 사양은 Table 1과 같으며, 교세라(Kyocera)에서 제작하였다.

Table 1 Specification of tool holder & inserts

Description	PCD	MCD
Tool holder	SCLCR1616H-12	
Insert (Nose radius)	CCMT120400-HPD010 CCMT120401-HPD010 CCMT120402-HPD010 CCMT120404-HPD010	CCMT120402
Rake angle(°)	0	0
Clearance angle(°)	10	10

3.3 실험조건

소재에 따른 최적의 공구인선반경 및 절삭조건 선정을 위하여 Table 2와 같은 실험조건으로 인조다이아몬드 공구와 알루미늄합금을 이용하여 공구인선반경 4종에 따라 절삭속도, 이송속도, 절입깊이에 대한 절삭가공 실험을 실시하여 108종의 시편을 제작하였고, 각각의 시편에 대하여 표면거칠기를 측정하였다.

Table 2 Cutting conditions for each tool nose radius

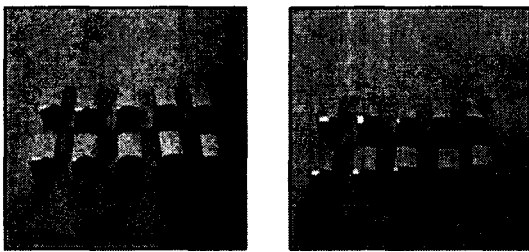
Tool nose radius R (mm)	Depth of cut d (mm)	Feed rate F (mm/rev)	Cutting speed V (m/min)	Spindle speed N (rpm)	Cutting dia. D (mm)	Cutting distance S (mm)	
0.0 0.1 0.2 0.4	0.0005 (0.5 μ m)	0.001	500	5,300 ~ 10,000	ϕ 33	2000	
			800				
			1000				
		0.005	500				
			800				
			1000				
	0.010	0.001	500				
			800				
			1000				
		0.005	0.001				500
							800
							1000
0.0025 (2.5 μ m)	0.001	500					
		800					
		1000					
	0.005	0.001	500				
			800				
			1000				
0.010	0.001	500					
		800					
		1000					
	0.005 (5 μ m)	0.001	500				
			800				
			1000				
0.005		0.001	500				
			800				
			1000				
0.010	0.001	500					
		800					
		1000					

3.4 실험방법

실험은 우선적으로 Table 2와 같은 조건으로 인선반경 R0.0, 0.1, 0.2, 0.4mm의 공구로 절입깊이 0.0005, 0.0025, 0.005mm, 이송속도 0.001, 0.005, 0.010mm/rev, 절삭속도 500, 800, 1,000m/min, 절삭가공거리 2000mm를 절삭가공한 다음 각각의 시편에 대하여 표면거칠기를 측정하여 가장 우수한 결과가 나온 조건을 선정하여 공구별, 조건별로 1개의 조건을 선정하였다. 선정된 조건으로 2종의 공구(PCD/MCD)와 2종의 재료(알루미늄합금/황동)를 절삭가공거리 100mm까지는 10mm 단위로 절삭가공하였으며, 이후 500mm까지는 100mm 단위로 절삭가공하여, 표면거칠기 및 공구의 마모를 평가하였다.

다시 SEM을 통해 저배율(x500, x1,000)로 피치를 찾고, 피치 내에서 발생한 변화와 절삭속도에 의해 발생한 하나의 피치가 사진에서 보일 수 있도록

하기 위하여 배율을 x5,000으로 결정하였고, 피치 내의 다양한 변화를 관찰하기 위해서 배율 x5,000으로 촬영한 동일한 지점을 배율 x10,000으로도 촬영하였다. 배율 x5,000과 배율 x10,000으로 촬영된 SEM 측정 사진을 통해 표면거칠기 값의 변화에 따라 가공면 상태의 변화와, 공구의 절삭인선 마모 상태를 관찰하였으며, 본 실험에서는 배율 x10,000으로 표시하였다. SEM측정을 위해 제작된 시험편은 Fig. 4와 같다.



(a) Aluminum (b) Brass
Fig. 4 SEM specimens

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭조건에 따른 가공특성 고찰

본 실험은 절삭거리 500mm까지 절삭가공하기 위한 절삭조건을 산출하기 위하여 우선적으로 인조 다이아몬드 공구와 알루미늄합금 소재를 공구인선, 절삭속도, 이송속도, 절입깊이 등 일반적으로 산업 현장에서 많이 적용되고 있는 여러 조건으로 실험하여 항목별 특성 및 최적조건을 선정하였다. Fig. 5는 공구인선반경에 따른 표면거칠기 특성을 실험한 결과로서 실험한 공구인선 중 0.2mm가 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 6은 절삭속도에 따른 표면거칠기 특성을 실험한 결과로서 실험한 조건 중 절삭속도가 가장 높은 1,000m/min.가 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 7은 이송속도에 따른 표면거칠기 특성을 실험한 결과로서 이송속도 0.005mm/rev가 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 8은 절입깊이에 따른 표면거칠기 특성을 실험한 결과로서 절입깊이는 표면거칠기에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이상의 실험 결과에 따라 절삭거리에 따른 실

험 절삭조건으로 공구인선반경 0.2mm, 절삭속도 1,000m/min, 이송속도 0.005mm/rev, 절입깊이 0.005mm(반경 값)로 결정하였다.

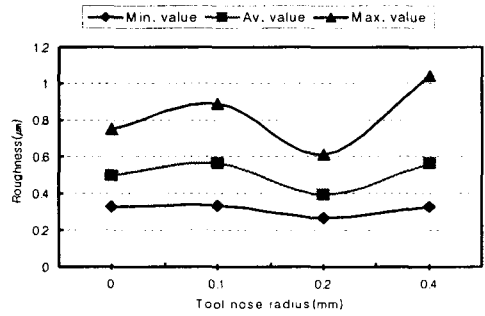


Fig. 5 Graph of surface roughness values with tool nose radius

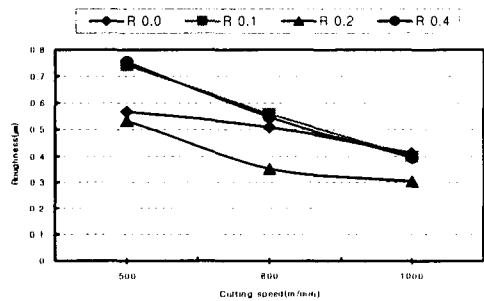


Fig. 6 Graph of surface roughness values with cutting speed

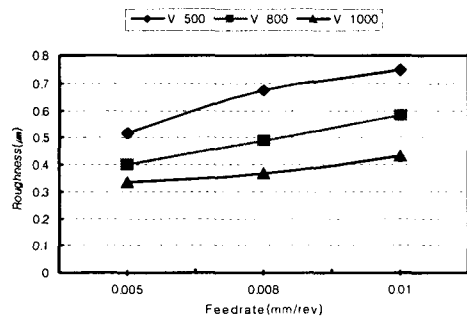


Fig. 7 Graph of surface roughness values with feed rate

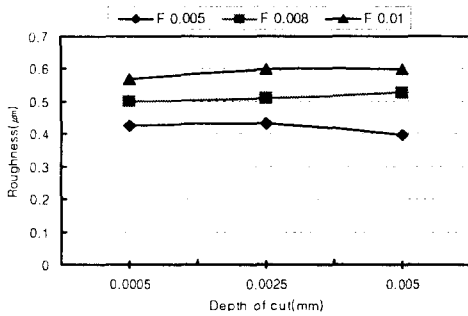
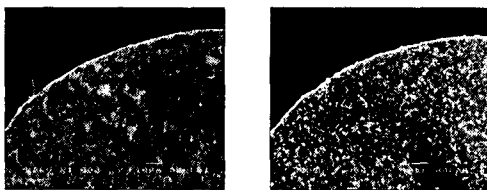


Fig. 8 Graph of surface roughness values with depth of cut

4.2 공구마모 고찰

공구의 경사각과 여유각의 형태 유지를 목적으로 공구수명과 관련하여 마모를 측정하므로 공구의 마모를 평가할 때는 절삭인선 형태와 절삭인선의 반경을 구분하여 평가한다. 절삭가공에서의 기본현상은 전단영역에서의 전단, 경사면에서의 마찰, 절삭날 선단에서의 분리작용으로 나눌 수 있다. 일반 절삭과 달리 마이크론 단위의 절삭깊이를 갖는 미소 절삭가공에 있어서 가공면 형성에 큰 영향을 주는 분리 작용은 절삭날 선단의 형상이 중요한 인자로 작용하게 된다. 이러한 절삭공구의 인선 상태와 미소 절삭조건과의 상관관계를 알아보기 위하여 SEM을 이용하여 절삭인선 상태를 관찰하였다.

Fig. 9는 인조다이아몬드 공구를 배율 x1,000으로 촬영한 것이며, 절삭가공 전과 절삭가공 후 인선의 형상으로 절삭거리 500km 절삭가공 후 인선의 마모는 약 2~3μm 정도이다.

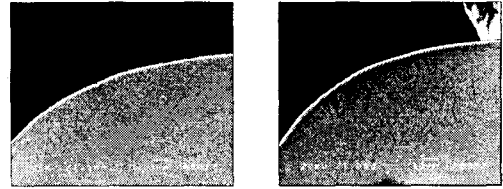


(a) New tool (b) Used tool

Fig. 9 Poly crystal diamond tool (x1,000)

Fig. 10는 천연다이아몬드 공구를 촬영한 것이며, 절삭가공 전과 절삭가공 후 인선의 형상으로 절삭

거리 500km 절삭가공 후 인선의 마모는 약 0.5μm 정도이다.



(a) New tool (b) Used tool

Fig. 10 Mono crystal diamond tool (x1,000)

4.3 가공면의 표면거칠기 고찰

본 실험은 4.1절에서 실험에 의해 가장 이상적인 절삭조건이라고 결정된 공구인선 반경 및 절삭조건으로 절삭가공 실험을 하였으며, 공구는 사전 실험에서 사용한 인조와 천연다이아몬드 공구를 함께 사용하였다. 소재는 알루미늄합금과 황동을 사용하여 동일한 조건으로 절삭 가공된 결과치를 가지고 특성을 파악하였다. 또한 표면거칠기는 최대높이 표면거칠기(R_{max})를 택하여 산출하였다.

Fig. 11은 인조와 천연다이아몬드 공구별로 소재 즉 알루미늄합금과 황동에 대하여 절삭거리 100km까지를 10km 단위로, Fig. 12는 절삭거리 500km까지를 100km 단위로 절삭가공 후 종합적인 표면거칠기를 비교 측정한 결과로서 절삭거리 100km까지는 전체적으로 초기마모 단계이며, Br/PCD일 때 표면거칠기가 가장 불안정하게 나타났으며, 500km까지는 비교적 표면거칠기가 안정적으로 양호해짐을 알 수 있다.

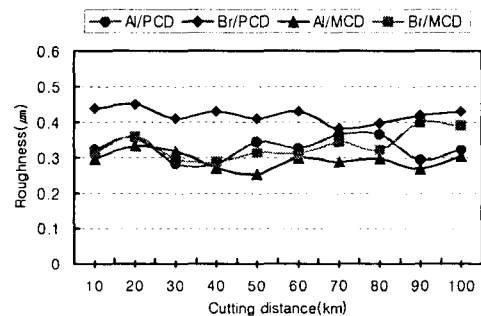


Fig. 11 The effect of cutting distance on the roughness(0 ~100km)

또한 100km 이상부터는 공구별 표면거칠기가 현저하게 구분되는데 Al/MCD의 실험결과가 가장 안정적임을 확인하였다.

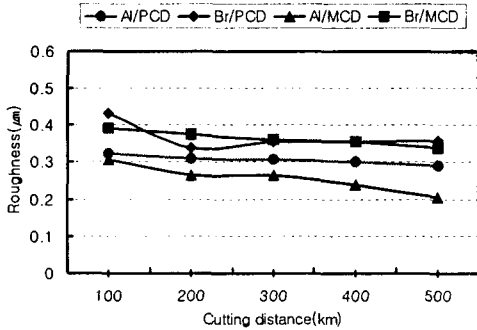


Fig. 12 The effect of cutting distance on the roughness(100 ~500km)

4.4 SEM 측정에 의한 표면거칠기 및 공구마모 특성고찰

본 절에서는 SEM 측정으로 촬영한 사진을 통하여 표면정밀도인 표면거칠기가 절삭길이에 따라 어떤 특성과 변화가 있는가에 대하여 실제 표면거칠기 데이터와 연관하여 관찰하였다.

Fig. 13은 인조다이아몬드 공구로 알루미늄합금을 절삭가공 후 SEM으로 측정한 결과로 피드마크가 선명하며, 표면거칠기 값의 변화에서 알 듯이 절삭초기인 절삭길이 10km인 경우보다 500km 절삭가공 후의 표면상태가 양호함을 알 수 있다.

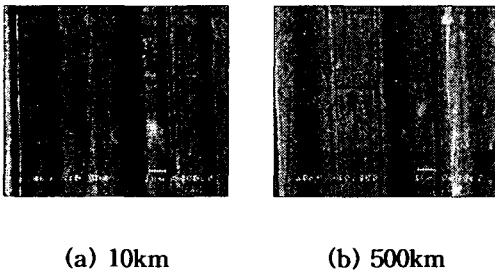


Fig. 13 SEM photo. of surface according to the cutting distance for aluminum alloy(PCD)

Fig. 14는 인조다이아몬드 공구로 황동을 절삭가공한 후 SEM으로 측정한 결과로 알루미늄합금을 절삭가공시와 같은 피드마크가 선명하게 나타나지만 비교적 규칙적이거나 표면거칠기 값에 있어서는

알루미늄합금보다 불안정함을 알 수 있다. 또한 절삭길이 10km와 500km 비교하여 볼 때 절삭길이가 길어짐에 따라 피드마크가 더욱 선명해지나 표면거칠기 값은 양호해짐을 알 수 있다.

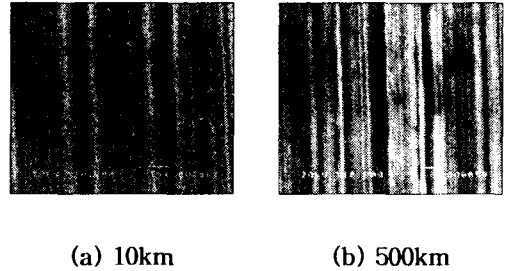


Fig. 14 SEM photo. of surface according to the cutting distance for brass(PCD)

Fig. 15는 천연다이아몬드 공구로 알루미늄합금을 절삭가공 후 SEM으로 측정한 결과로 인조다이아몬드로 절삭가공 할 때와 같은 피드마크는 거의 볼 수 없다는 것을 알 수 있다. 또한 절삭가공 후 칩급 부주의로 인한 긁힘으로 인한 것을 제외하고는 절삭길이에 따른 표면 상태를 평가하기에는 어렵다는 것을 알 수 있다.

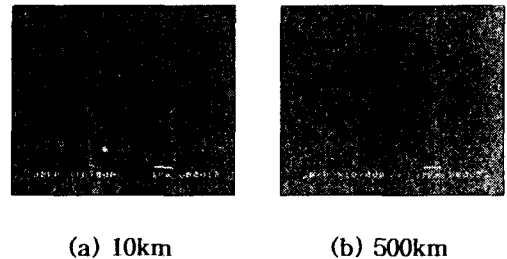
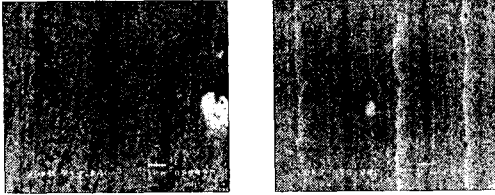


Fig. 15 SEM photo. of surface according to the cutting distance for aluminum alloy (MCD)

Fig. 16은 천연다이아몬드 공구로 황동을 절삭가공 후 SEM으로 측정한 결과로 초기에는 피드마크가 없으나 절삭길이가 길어짐에 따라 인조다이아몬드 공구로 절삭가공할 때 생기는 피드마크가 점진적으로 발생함을 알 수 있다. 또한 표면거칠기에 영향을 주는 검은 반점 및 흰 반점이 다량 발생한 것을 알 수 있는데 성분분석 결과 크롬, 망간, 철 성분 등의 불순물로서 재료적 결함임을 알 수 있었다.



(a) 10km

(b) 500km

Fig. 16 SEM photo. of surface according to the cutting distance for brass(MCD)

5. 결 론

본 연구에서는 경량화 재료로 널리 이용되고 있는 알루미늄합금과 황동에 대하여 인조(PCD)와 천연다이아몬드(MCD) 공구에 의한 절삭가공 시험을 실시하여 가공면에 대한 정밀도를 주사전자현미경(SEM)으로 측정하여 표면거칠기 및 가공특성을 산출하기 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구인선반경의 크기에 따른 표면거칠기는 R0.2 mm일 때 가장 양호하였고, R0.4mm가 가장 거칠고, 불안정함을 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 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 최저 한계 값을 찾는 실험이 필요함을 알 수 있었다.
- (4) 절입깊이는 표면거칠기에 별다른 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었으나, 0.0005mm 이하 및 0.005mm 이상의 조건에서는 어떠한 영향을 미칠 것인지에 대하여 실험이 필요함을 알 수 있었다.
- (5) 인조 및 천연다이아몬드 공구 공히 절삭길이가 100km까지는 표면거칠기가 일정치 않는 초기 마모 단계이며, 100km 이상에서 500km까지는 전반적으로 표면거칠기가 안정적임을 확인 하였다.

였다.

- (6) 주사전자현미경으로 표면거칠기를 측정한 결과 인조다이아몬드 공구의 경우에는 공구인선의 피드마크가 선명한 반면, 천연다이아몬드는 공구인선의 피드마크가 전혀 나타나지 않아서 특성 평가가 어렵다는 것을 알 수 있었다.
- (7) 주사전자현미경 측정에 의한 초정밀 표면가공 특성을 해석하기 위해서는 공구로서는 인조다이아몬드, 재료로서는 황동이 효과적임을 확인 하였다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, H. C., Hahm, S. D., and Hong, W. P., Park, Y. W., 2000, "The comparison of cutting characteristics of PCD and MCD tools in the ultraprecision turning of aluminum alloy", *J. of KSMTE*, Vol17, No. 12, pp. 68~75.
- (2) Jeong, J. H., 2004, "An study on the precision machining surface by SEM measuring method", Master Dissertation, Chosun university.
- (3) Lee, K. J., 2004, "A study on the ultraprecision machining surface by SEM measuring method", Master Dissertation, Chosun university.
- (4) Yu, K. H., 1996, "A study on the precision cutting characteristics by diamond tool" Ph. D. Dissertation, Chonbuk University.
- (5) Kang, S. J., and Kim, J. K., 2004, "Characteristics valuation of surface roughness with ultra precision machining", *Trans. of KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 9~15.
- (6) Ko, J. B., Kim, G. H., and Won, J. H., 2002, "Cutting characteristics of oxygen free using the ultra precision machining", *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 17, pp. 120~126.
- (7) Lee, J. K., Kang, J. H., 1992, "Study on the ultraprecision machining technology with nano-meter order", KIMM.