

초정밀 절삭가공에서 표면거칠기 특성 평가

강순준*, 김종관⁺

(논문접수일 2003. 10. 27, 심사완료일 2003. 12. 23)

Characteristics Evaluation of Surface Roughness with Ultra Precision Machining

Soon-Joon Kang*, Jong-Kwan Kim⁺

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 Words : Synthetic Poly Crystal Diamond Tool(다결정 인조다이아몬드 공구), Ultra-Precision Machine(초정밀가공기), Tool Nose Radius(공구인선반경), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서론

최근, 산업현장에서의 생산 리드타임 단축 및 고 품질에

대한 요구는 날이 갈수록 더욱 엄격해지고 있다. 이에 따라 새로운 생산방식과 기술개발이 필요하게 되었고, 그 중의 하나가 초정밀가공기의 등장이라고 할 수 있다. 초정

* 주저자, 조선대학교 기계공학과 대학원 (ksj@hwacheon.co.kr)

주소: 501-759 광주광역시 북구 서석동 375번지

+ 조선대학교 기계공학과

밀가공기의 제조기술의 발전에 따라 초정밀 산업에 필요한 광학부품, 정밀기계부품, 전자부품 등 다양한 분야에 널리 적용되고 있다⁽¹⁾.

초정밀가공은 다이아몬드의 예리한 인선으로 가공하기 때문에 표면이 미려하고, 피삭재에 전사되는 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, 일본 등의 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.

Yu⁽²⁾는 다이아몬드 공구에 의한 정밀절삭의 특성, 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 인조다이아몬드 공구의 인선반경 0.4mm 이하의 절삭가공 실험 및 기초 데이터가 필요한 실정이다. 일반적으로 볼 때 각 공구업체에서 제시된 절삭기술 및 기초데이터는 실제 산업현장에서 적용하는 데이터로서는 신뢰성이 떨어지는 형편이다. 따라서 산업현장에서 적용할 수 있는 기초 데이터를 산출하는 것은 매우 중요한 일이다.

이에 본 연구에서는 국내에서 개발된 수평형 초정밀선반에서 다결정 인조다이아몬드 공구를 사용하여 알루미늄합금(Al 6061)을 공구의 인선반경에 여러가지 절삭조건 즉 절삭속도(V), 이송속도(F), 절입깊이(d) 등 산업현장에서 사용될 수 있는 적절한 데이터 값을 적용하여 실험하고 절삭가공된 시편의 외경에 대한 표면거칠기 측정을 통한 알루미늄합금의 초정밀 가공특성 및 최적의 절삭가공 조건을 제시하고자 한다.

2. 초정밀가공 이론적 배경

2.1 초정밀가공 기술

초정밀 가공기술은 광학, 기계 그리고 전자 부품에서 마이크로메타 또는 서브 마이크로메타 단위의 형상정밀도를 얻고 가공표면은 수 나노메타이내의 초정밀도를 얻는 기술이다. 초정밀 가공은 기본적으로 창성 운동에 의해서 가공을 함으로 절삭기계의 정밀도와 사용하는 공구의 형상정도가 가공표면에 직접 옮겨져간다. 따라서 공작기계의 정밀도 특히 운동정밀도가 요구되는 가공품의 정밀도를 실현시키는 것이 극히 중요한 함수가 된다. 또 절삭가공 중 공구와 공작물 사이의 상대적인 위치와 운동관계를 완벽하게 하기 위해서는 공작기계의 정적, 동적, 열적변형을 억제해야 하는 것이 필수 요건이 된다.

2.2 초정밀기계와 정밀기계의 비교

공작기계에서 정밀도 등급을 결정하는 기본적인 요소로서는 주축의 진동, 각축의 진직도, 각축의 위치결정 정밀도, 열적정밀도이며, 이에 대한 정밀급 기계와 초정밀급 기계에 대한 기본적인 사양을 Table 1과 같이 비교하였다.

또한 기본적인 기계 구성요소가 설계단계에서부터 차별화 되어야 하며, 제작 및 실 사용시에도 주변환경을 고려하지 않으면 기계가 가지고 있는 본래의 성능을 발휘할 수 없게된다. Table 2는 정밀급 기계와 초정밀급 기계에 대한 요소부품을 비교하였다.

Table 1 Comparison accuracy of test machines

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

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용된 기계는 국내에서 개발된 수평형 초정밀선반(Horizontal ultra-precision lathe)으로 기계외관은 Fig. 1에 나타내고 있으며, 기계의 세부사양은 Table 3과 같다.

공구 재질은 내마모성이 우수하고, 실험에 사용된 재료인 알루미늄 합금과 친화력이 적어 절삭성 및 표면거칠기가 우수한 다결정 인조다이아몬드와 이를 고정하는 공구홀더는 Kyocera에서 제작하였으며, 종류 및 규격은 Table 4와 같다.

실험용 재료는 내식성이 강하고, 절삭성이 우수한 알루미늄 합금(Al 6061)을 채용하였으며, 구성 성분은 Table 5와 같다. 시편의 크기는 기계의 성능을 충분하게 발휘할 수 있도록 사전에 척킹 및 실 가공부의 직경과 길이 선정을 위한 실험을 실시하여 최적의 조건인 $\phi 33 \times \ell 40$ (실 절삭가공

길이 25mm)으로 준비하였고, 기계에 장착하는데 필요한 장치는 4인치 콜렛 칩(Air)을 사용하여 고속 회전엔 의한 진동이 없도록 하였다.

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, 항온·항습 시설이 갖추어진 장소에 기계를 설치하였다. 실험에 적용한 절삭조건은 Table 6과 같이 공구인선반경(Tool nose radius), 절삭속도, 이송속도, 절입깊이를 산업현장에서 초정밀부품 절삭가공에 일반적으로 적용하는 조건을 선정하였으며, 절삭열에 의한 변형을 최소화하기 위하여 자체 쿨링장치가 부착된 Metolubes사에서 제조한 비수용성 절삭유 Metocutt 555를 사용하였다.

절삭길이는 시편의 길이 25mm를 4~8회 반복가공하여

Table 2 Comparison components of machines

Description	Precision	Ultra-precision
Head bearing	P1 ~ 3 ± 1.0 μm	P0 ± 0.3 μm
Ball screw	C3, pitch error 23 μm	C1, pitch error 8 μm
Head cooling	Grease filled	Oil cooling
Spindle motor	Built out motor	Built in motor
Slide system	Tarcite, L.M guide	Tarcite, L.M guide, Air sliding
	Overlap slide	Separately slide
Spindle speed	3000~7000 rpm	Up to 10,000 rpm



Fig. 1 Photograph of ultra-precision lathe

Table 3 Specifications of test machine

Description	Specifications
Machine model	UPL
Max. spindle speed	10,000 r.p.m
N.C system	Mitsubishi M64L
Min. movement unit	50 nm
Head cooling system	Oil Jet
Size of tool	□16 x φ 16
Size of spindle bearing	φ 70
Spindle motor	3.7/5.5Kw

Table 4 Specifications of test tools

Description	Insert	Holder
Nose radius(mm)	0, 0.1, 0.2, 0.4	SCRCL1616H-12
Rake angle(°)	0	
Relief angle(°)	10	

Table 5 Compositions of work piece used in experiment (Al 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

원주길이로 환산하여 조건별 2,000m 절삭가공 하였다.

3.3 실험방법

초정밀 선반을 이용하여 사전에 준비한 알루미늄합금 시편을 Fig. 2와 같이 장착하고, 다결정 인조다이아몬드 공구를 이용하여 절삭특성을 평가하기 위하여 외경 절삭가공 하였다.

Table 6 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			
		0.010	0.0005			
			0.0025			
			0.0050			
	800	0.005	0.0005			
			0.0025			
			0.0050			
		0.008	0.0005			
			0.0025			
			0.0050			
0.010		0.0005				
		0.0025				
		0.0050				
1000	0.005	0.0005				
		0.0025				
		0.0050				
	0.008	0.0005				
		0.0025				
		0.0050				
	0.010	0.0005				
		0.0025				
		0.0050				

였다.

초정밀 선반에서 시편을 절삭가공시 사용한 NC 프로그램은 1개 공구인선 반경 당 절삭속도, 이송속도, 절입깊이를 대입하여 27개의 프로그램을 작성하였고, 공구인선 반경에 따라 변경되는 절삭조건만 수정하여 총 108 종의 시편을 절삭가공 하였다. 절삭가공한 시편의 표면거칠기 측정에는 분해능 $1/10^7$ 을 가진 Taylor hobson사의 표면조도 측정기 Fig. 3을 이용하였으며, 본 실험에서 표면조도의 평가에 사용된 파라메타는 최대높이조도(Rmax)이다.

기계의 부품들은 서로 접촉하여 움직이기 때문에 사용시간이 경과됨에 따라 부품의 표면은 마모가 진행되며, 이때 마모의 진행은 거칠기곡선의 가장 높은 산에서부터 시작되므로 최대높이조도를 평가방법으로 삼았다. 측정오차 및 정확성을 위하여 동일 시편에 표면거칠기를 3회 측정하여 평

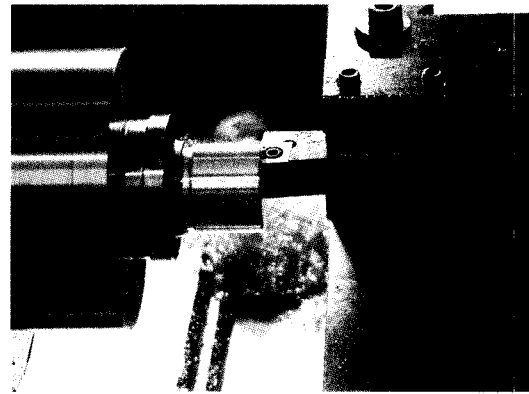


Fig. 2 Photograph of experimental set up



Fig. 3 Photograph of experimental set up (Surface roughness tester)

균값으로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 실험결과는 절삭조건표인 Table 6의 공구인선반경별 27종, 4종 공구(R0, R0.1, R0.2, R0.4)합계 108종의 시편을 절삭가공 후 측정된 표면거칠기 값을 평균치로 환산하여 평가하였다.

4.1 인선반경에 따른 표면거칠기 특성

Table 6과 같은 절삭조건에 의하여 실험한 결과 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. 4와 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 나왔을 수 있었다.

표면거칠기가 가장 불안정할 것으로 예상되었던 인선반경 0mm는 0.2mm 다음으로 안정됨을 확인하였다. 이는 미세한 절삭으로 인한 절삭부하, 수용성 절삭유를 실험한 공구에 동일한 조건으로 공급하여 절삭가공하였기 때문에 구성인선 및 절삭가공 후 표면층의 잔류응력으로 인한 것보다는 공구의 연삭문제로 사료되며, 이에 대한 검증은 동일한 인선반경의 공구를 다수 제작하여 동일한 절삭조건으로 실험하여 비교했을 때 가능하리라 판단되며, 본 건에 대해서는 공구의 제작 준비하여 향후 실험 및 검증을 하고자 한다.

4.2 절삭속도에 따른 표면거칠기 특성

절삭속도 500, 800, 1000m/min 조건과 Table 6과 같은 이송속도, 절입깊이로 실험한 결과 Fig. 5와 같이 절삭속도가 높아질수록 표면거칠기가 양호하며, 공구인선 반경이 0.2mm일 때 가장 안정적인 표면거칠기가 나왔으며, 나머지 공구는 절삭속도 1000m/min일 때 상호 근접함을 알 수 있었다. 이는 절삭속도가 높아짐에 따라 실제 절삭보다 전조현상으로 인하여 표면거칠기 값이 양호해진 것으로 판단된다.

4.3 이송속도에 따른 표면거칠기 특성

절삭이송속도를 0.005mm/rev, 0.008mm/rev, 0.010mm/rev로 변화시켜 절삭속도와 비교 실험한 결과 Fig. 6과 같이

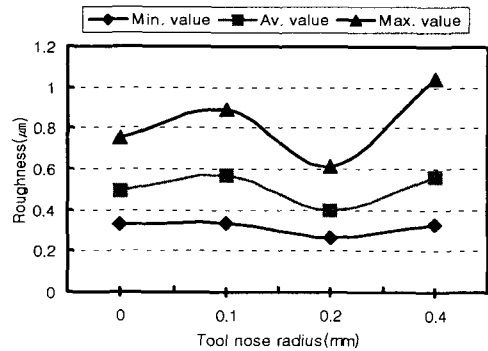


Fig. 4 Graph of surface roughness values with tool nose radius

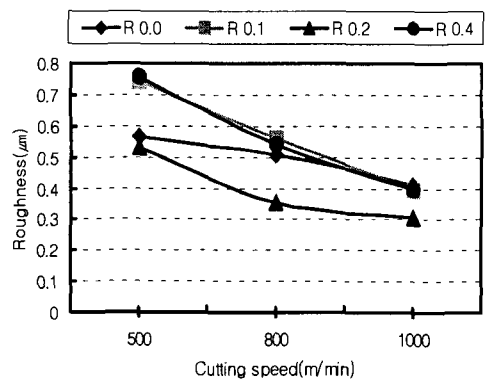


Fig. 5 Graph of surface roughness values with cutting speed

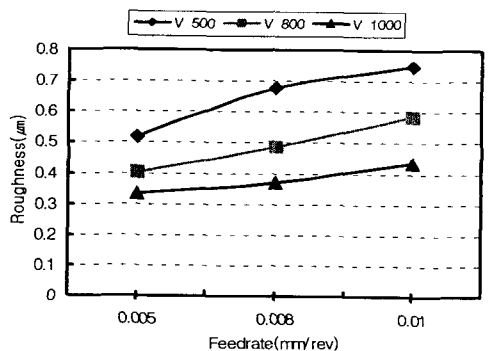


Fig. 6 Graph of surface roughness values with feed rate

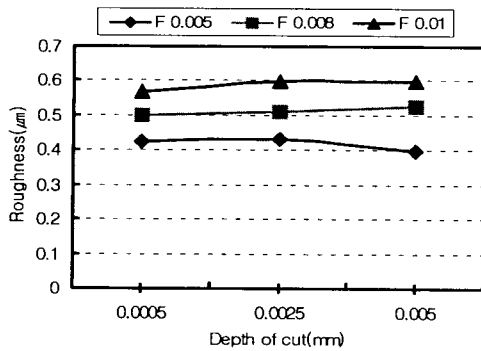


Fig. 7 Graph of surface roughness values with depth of cut

절삭속도가 높을수록, 이송속도는 낮을수록 표면거칠기가 양호함을 알 수 있다. 즉 이송속도가 가장 낮은 F 0.005mm/rev 일 때 가장 양호하며, F 0.008, F 0.01mm/rev 순으로 표면 거칠기가 거칠어짐은 알 수 있는데 이는 표면거칠기 이론과 일치함을 확인할 수 있었다.

4.4 절입깊이에 따른 표면거칠기 특성

절입깊이를 0.005mm, 0.0025mm, 0.0005mm로 변화시켜 이송속도와 비교 실험한 결과 절입깊이에 의한 변화는 Fig. 7과 같이 표면거칠기에 크게 영향을 주지 않고, 이송속도가 낮을수록 표면거칠기가 양호함을 확인할 수 있었다.

4.5 SEM에 측정에 의한 표면거칠기 특성

실험한 결과 최적의 조건으로 선정된 공구 인선반경 0.2mm, 절삭속도 1000m/min, 이송속도 0.005mm/rev, 절입깊이 0.005mm로 절삭가공한 외경면을 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 SEM으로 측정하였다. SEM 측정시 배율은 최소 500배부터 시작하여 최대 10,000배로 확대 관찰한 결과 표면 특성 관찰에 가장 적절하다고 판단된 배율 10,000배로 결정 측정하였다.

공구마모가 거의 없는 초기상태의 표면을 Fig. 8과 같이 관찰한 결과 절삭 이송피치가 일정하고, 선명하나 공구마모가 어느정도 진행된 경우의 표면을 Fig. 9와 같이 관찰한 결과 이송피치가 불균일하고, 일정구간별로 정상 절삭가공이 되지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 공구마모로 인하여 유동칩이 발생되어 신속하게 배출되지 못하고 순간적으로 공구와 소재사이에 끼여 정상 절삭가공이 되지 못한 경우와 기계의 진동 및 공구의 마모로 인하여 정상적인 절삭가공보다는 전조 형태의 가공이 된 것으로 판단되며, Fig. 8보다는

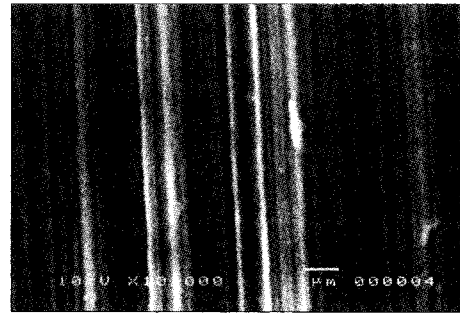


Fig. 8 SEM photograph of cutting surface(After cutting 1km)

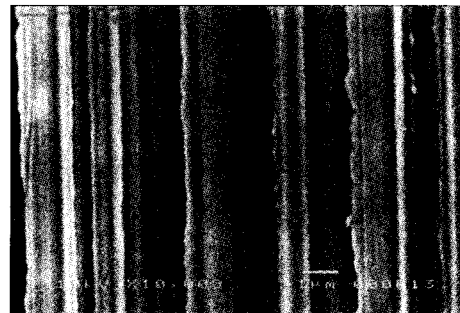


Fig. 9 SEM photograph of cutting surface(After cutting 100km)

Fig. 9의 구간이 표면거칠기가 비교적 커짐을 확인하였다.

5. 결론

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

- (1) 공구인선반경의 크기에 따른 표면거칠기는 R0.2mm 일 때 가장 양호하였고, R0.4mm가 가장 거칠고, 불안정함을 확인하였다.
- (2) 절삭속도에 따른 표면거칠기는 실험한 조건 중 1000 m/min일 때 가장 양호함을 확인하였으며, 이 이상의 조건에 대해서는 필요에 따라 향후 실험이 필요함을 알 수 있었다.
- (3) 이송속도에 따른 표면거칠기는 실험한 조건 중 이송속도가 가장 낮은 0.005mm/rev에서 가장 양호한 결과를 얻었으며, 최저한계값을 찾는 실험이 필요함을 알 수

있었다.

- (4) 절입깊이에 따른 표면거칠기는 별다른 영향을 미치지 않지만 절입깊이가 적을 때가 비교적 양호함을 알 수 있었다.

이상과 같이 공구인선반경(radius) 0.2mm, 절삭속도 1000m/min, 이송속도 0.005mm/rev, 절입깊이 0.0005mm 일때 다결정 인조다이아몬드 공구로 알루미늄합금 가공에 최적의 절삭조건임을 실험결과 확인하였다.

후 기

본 실험은 H사 나노가공 전 단계로 개발한 초정밀 CNC 선반 검사 자료를 얻기 위해 실시되었음.

이 논문은 2001년도 조선대학교 교원 연구년제 해외파견 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Drescher, J. D., 1991, *Tool force, tool edge, and surface finish relationships in Diamond turning*, Ph. D. Dissertation, North Carolina State University, USA.
- (2) Yu, K. H., 1996, *A study on the precision cutting characteristics by the Diamond tool*, Ph. D. Dissertation, Chonbuk National University, Chonbuk.
- (3) Kim, W. S., Kim, D. H., and Namba, Y., 2003, "A study on the characteristics of ultra-precision cutting for Al-alloy", *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 6, pp. 44~49.
- (4) 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. 12, pp. 120~126.
- (5) Son, S. M., Her, S. W., and Ahn, J. H., 2003, "A study on the minimizing of cutting depth in sub-micro machining", *Proceeding of KSMTE Spring Conference*, pp. 376~381.