

AFM 측정법에 의한 초정밀 가공면의 특성 평가 연구

김종관*, 이갑조⁺, 정종수⁺⁺

(논문접수일 2006. 11. 29, 심사완료일 2007. 1. 8)

A Study on Characteristics of the Precision Machined Surfaces by AFM Measurement

Jong-Kwan Kim*, Gab-Jo Lee⁺, Jong-Soo Jung⁺⁺

Abstract

High speed cutting is a machining process which cuts materials with the fast movement and rotation of a spindle in a machine tool. High speed cutting leaves a plastically deformed layer on the machined surface. This deformed layer affects in various forms to the surface roughness of machined parts such as the dimensional instability, the micro crack. The surface roughness is called surface integrity which is very important in precision cutting. This paper aims to study on the machined surfaces characteristics of aluminum alloy and brass by AFM(Atomic force microscope) measurement. The objective is contribution to ultra-precision cutting by exhibit foundation data of surface roughness and tool wear when parts are cutting with diamond tool at the factory.

Key Words : Surface roughness(표면 거칠기), AFM(Atomic force microscope:원자 현미경), Ultra-precision cutting(초정밀 가공), Tool wear(공구 마멸)

1. 서론

최근 산업의 발달에 따라 각종 기계요소들은 강도, 경량화, 정밀도와 같은 측면에서 엄격한 설계 기준이 요구되고 있으며, 첨단 기술이 적용되는 다양한 부품에서 초정밀 가공을 필요로 하는 경우가 급격히 증가하고 있다. 이러한 기계

가공 제품들의 품질 향상을 위해서는 가공 표면에 관한 연구가 필연적으로 뒷받침 되어야 한다.

기계 부품의 고급화 핵심 기술인 초정밀 가공 기술은 1950년대에 극도로 예리한 다이아몬드공구의 개발과 사용으로 표면 거칠기를 50nm이하로 가공을 할 수 있는 기술이 보고 되었으며, 1960년대에 원자로와 같은 고성능 광학기기

* 조선대학교 기계공학과 (jkkim@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
+ 캐리어주식회사 품질경영팀
++ 조선대학교 대학원 기계공학과

나 특수 기계 부품에서 다이아몬드공구 가공에 관한 연구가 시작되어 최근에는 광학, 전자, 컴퓨터 메모리디스크, 베어링, 정밀측정 장치 등에서 정밀도나 표면 거칠기의 공차를 맞추는 가공에 이용되는 활발한 연구^(1,2)가 이루어지고 있다.

초정밀 가공 공작기계는 높은 강성의 구조와 정밀도가 요구되며, 주축과 이송계는 공작물의 치수 및 형상, 표면 거칠기에 직접 영향을 미치는 정밀도와 수명에 대한 중요한 연구 분야로서 Kang^(3,4), Lee^(5,6), Oh⁽⁷⁾ 등은 초정밀 절삭가공 조건 및 표면특성 등의 기초 이론을 제시 하였다. 기계 가공된 부품이 의도된 성능과 기능을 발휘하기 위해서는 정밀한 가공도 중요하지만 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지를 판단하기 위한 측정기술이 필요하다. 따라서 측정기술의 향상은 곧 제품정밀도 향상으로 이어질 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국내 H사에서 제작한 시작용 초정밀 선반을 이용하여 알루미늄합금(Al 6061)과 황동(HBsC3C) 소재를 절삭 길이 500mm까지 천원 다이아몬드공구로 절삭가공하면서 가공면에 나타난 표면특성을 표면 거칠기 측정기와 원자현미경(AFM) 측정기법을 활용하여 고찰 평가하고, 공구 마모현상과 표면정밀도 특성 등에 대한 가공기술의 기초 자료를 제시 하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 표면 거칠기

기계 가공된 표면을 현미경으로 살펴보면 수많은 요철을 볼 수 있다. 이와 같이 일정한 간격 사이에 나타나는 요철의 빈도와 크기를 표면 거칠기라 하며, 중심선 평균 거칠기(R_a)와 최대 높이 거칠기(R_{max}) 등으로 표시되고 있다. 절삭가공에서 얻어지는 표면 거칠기는 공구의 형상이나 이송속도의 기하학적 결과인 이론 표면 거칠기(ideal surface roughness)와 절삭가공의 불규칙성으로 인한 실제 표면 거칠기(natural surface roughness)의 두 가지 독립적 효과가 합쳐진 형태로 볼 수 있다.

이론 표면 거칠기는 선단 반지름 $R=0$ 인 경우 R_a 와 R_{max} 는 마찰계수에 비례하나 선단 반지름 $R \neq 0$ 인 경우 R_a 와 R_{max} 는 이송에 비례하고, 선단반경에 반비례한다. 실제 표면 거칠기는 공구형태와 이송, 운동기구 등에서 기하학적으로 구해지는 거칠기로 대표적인 요인은 기계의 진동, 절삭공구의 예리함 정도 그리고 채터와 같은 절삭 가공의 불안정성 등이 있다.

2.2 공구의 마멸

절삭공구의 마멸형태는 크게 여유각과 경사면의 마멸로 분류한다. 여유각의 마멸은 공구의 측면에 생기는 마멸로 다듬질 면이 거칠어지고 제작 치수에 영향을 주며, 공구의 수명판정에 사용되는 마멸형태고 경사면의 마멸은 칩이 공구의 경사각 상면과 연속적인 마찰을 일으켜 오목하게 패이는 마멸의 형태다.

공구손상은 절삭시간의 경과에 따라 절연의 일부가 기계적, 화학적, 열적요인 등에 의하여 점진적으로 마멸되어가는 정상 손상과 예기치 못한 크기의 균열, 깨짐, 파손 등의 이상 손상으로 구분할 수 있으며, 절삭과정에서 소정의 정밀도를 얻을 수 없거나 절삭을 수행할 수 없을 경우 이 때까지의 절삭을 공구 수명이라 한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 측정기

본 실험에는 국내 H사에서 시작품으로 개발한 초정밀 선반(UPL-II)을 사용 하였으며, 세부 사양은 Table I과 Fig. 1에 나타내었다. UPL-II는 20,000rpm이상의 고속 회전이 가능하고 CNC 시스템에 의해 최소 단위 10nm급 제어 장치를 장착시켜 국내 산업현장에서 소형 부품의 보급형 초정밀 가공용으로 제작 되었다.

가공면의 특성 평가를 위한 표면 거칠기 측정은 Fig. 2, 4와 같이 영국 Rank Taylor Hobson사 측정식 표면 거칠기 측정기와, 시료에 손상을 주지 않고 원자단위까지 관찰이 가

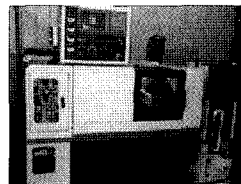


Fig. 1 Turning center

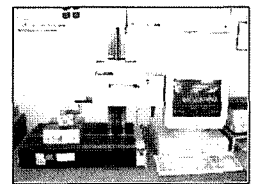


Fig. 2 Roughness tester

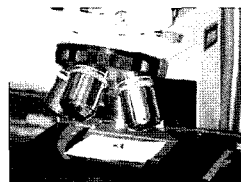


Fig. 3 Metallurgical microscope

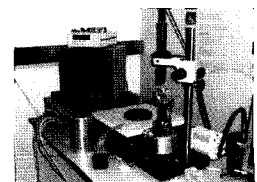


Fig. 4 AFM

Table 1 Specification of equipments

Equipment	Specification
Turning center	Model: UPL-II NC system: Mitsubishi Min. movement unit: 10nm/ 50nm
Roughness tester	Model: Form Talysurf Maker: Rank Taylor Hobson (U.K) Accuracy: 1.0 um/ 120 mm
Atomic force microscope	Model: Multi-mode bio-scope Maker: Digital instruments Scan size: 100 x 100μm
Metallurgical microscope	Model: Optiphot-M Maker: Nikon (Japan) Magnification: x50 ~ x1500

능한 원자현미경(AFM)을 이용하였다.

천연 다이아몬드공구의 인선마멸은 인선 형태와 반경을 구분하여 평가하였으며, 일본 Nikon사에서 제작한 Fig. 4의 금속현미경을 사용하였다.

3.2 시편 및 절삭공구

절삭가공 실험에 사용한 피삭재는 중형항공기와 자동차 용 부품 경량화 추세에 따라 초정밀 가공의 수요가 증가되

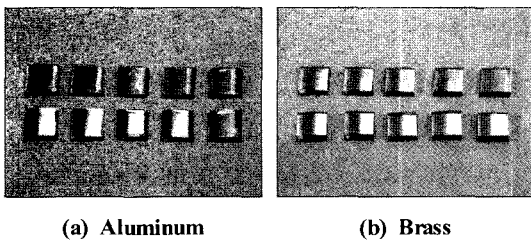


Fig. 5 Experiment specimens

Table 2 Chemical compositions of aluminum

Specimen	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Al
Al 6061	0.15 ~0.4	0.4 ~0.8	0.8 ~1.2	0.25	0.15	0.04 ~0.35	0.7	rest

Table 3 Chemical compositions of brass

Specimen	Cu	Pb	Fe	Sn	Al	Mn	Si	Zn
HBsC3C	60.0	0.2	2.0 ~4.0	0.5	3.0 ~7.5	2.5 ~5.0	0.01	rest

고 있는 내식성과 절삭성이 우수한 알루미늄합금(Al 6061)과 황동(HBsC3C)을 사용 하였으며, 실험을 위하여 절삭가공 부분과 척물립 부분을 고려한 형태로 제작하였다. Fig. 5는 AFM에서 표면특성 측정을 위해 절단된 상태의 시편 사진 이고, Table 2는 화학적 성분을 wt.(%)로 나타낸 도표이다. 절삭공구(insert)는 내마모성이 우수하고 실험에 사용된 알루미늄합금 및 황동과 친화력이 적어 절삭성이 우수한 천연 다이아몬드공구(CCMT20402)를 사용하였다.

3.3 실험방법 및 조건

Fig. 1의 기계에서 천연 다이아몬드공구로 알루미늄합금(Al 6061)과 황동(HBsC3C) 소재를 절삭가공한 후 표면 거칠기, 공구마모 현상의 특성 평가를 실시하였다.

가공방법은 미리 준비된 외경 ϕ 60mm의 소재 각각 10개를 절삭 길이 50k씩 F=0.03mm/rev., V=1,000m/min., d=0.005mm 등의 절삭조건에서 건식가공 하였으며, 절삭 길이는 최대 500k까지 비교하였다.

표면 거칠기는 최대높이 측정방식을 평가방법으로 삼았으며, 평가 길이는 컷오프 값을 0.8mm로 하여 거칠기 기준 길이 4배 이상에서 평가 되도록 하였고 측정값은 시편을 3회 이상 반복 측정하여 그 중앙값을 선택 하였다.

공구의 마멸상태는 금속현미경을 이용하여 절삭 길이 500km의 가공전,후 절삭인선 형태를 사진으로 촬영 육안 관찰 비교하였으며, 절삭인선 반경을 100km의 절삭주기로 측정하여 평가했다.

AFM에 의한 가공면의 표면정밀도 측정은 Scan size를 100μm로 선정 촬영한 3D 사진을 얻었고, 표면 거칠기 값의 변화에 따른 가공면의 상태와 공구의 절삭인선 형태나 반경의 변화에 따른 가공면의 상태를 육안으로 관찰 평가하였다. 100μm의 배율치수 선정은 금속현미경의 저배율로 가공속도에 따른 이송량을 찾고, AFM의 고배율로 이송량 내에서의 발생된 다양한 변화를 찾아 결과적으로 가공속도에 의해 발생된 이송량과 이송량 내에서 발생된 가공면의 다양한 변화가 사진에서 가장 잘 관찰된 100μm를 AFM 측정 배율로 결정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 공구인선 마모현상 고찰

공구의 경사각과 여유각의 형태유지를 목적으로 공구수명과 관련된 인선마모를 평가할 때는 절삭인선의 형태와 반경을 구분 평가하여야 한다. 초정밀 절삭가공에서는 절삭날

의 선단형상이 가공면의 형성에 영향을 주며, 절삭 깊이가 인선반경보다 같거나 작을 경우, 절삭날은 국부적으로 선단에서 음의 경사각으로 절삭되어 버니싱 작용과 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하게 된다. 이러한 절삭공구의 인선상태와 절삭조건과의 상관관계를 알아보기 위해 금속현미경으로 절삭인선 상태를 측정 고찰하였다.

Fig. 6~7은 사용공구에 대한 절삭 인선부분의 절삭가공 전과 절삭 길이 500km 가공 후를 비교한 사진으로 절삭인선 형태를 육안으로 살펴보면 가공 전,후에 대한 윤곽형태에는 변화가 없으나 상면 경사면은 칩 유동에 따른 마찰로 변화된 현상을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8은 절삭공구의 반경 값을 측정한 결과로 알루미늄합금은 절삭 길이 300km까지, 황동은 절삭 길이 200km까지는 일정하게 나타났으나, 이후부터는 0.001mm로 약간의 증

가를 확인하였다. 그러나 일반적인 절삭에서 연속적인 가공작업은 100km이내에서 이루어지므로 천연 다이아몬드공구에 의한 인선의 변화는 무시할 수 있는 문제로 생각되며, 공작기계의 미세 진동과 공구의 설치각의 변화 등에 따른 영향으로 표면 거칠기 값에만 변화를 주고 있는 것으로 확인할 수 있었다.

4.2 가공면 표면거칠기 특성 고찰

천연 다이아몬드공구에 의한 초정밀 가공은 구성인선에 의해 야기되는 절삭저항의 변화가 적기 때문에 본 실험에서는 공작기계가 이상적으로 운동하고 공구의 절삭인선 윤곽이 공작물에 전사되어 가공면의 형상을 결정하는 것으로 가정하여 표면 거칠기의 특성을 고찰하였다.

Fig. 9의 측정결과를 통해 알루미늄합금과 황동 재료의 표면 거칠기 특성을 고찰해보면, 두 재료의 측정평균 값은 알루미늄합금 0.447 μ m, 황동 0.716 μ m로 알루미늄합금이 황동보다 0.269 μ m 더 우수한 결과를, 최대와 최소 편차 값은 알루미늄합금 0.108 μ m, 황동 0.161 μ m를 나타내고 있어 역시 알루미늄합금이 황동보다 더 안정적인 결과를 얻고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 천연 다이아몬드공구를 이용하여 절삭 길이 500km이내에서 알루미늄합금과 황동을 절삭가공 할 경우 황동 보다는 알루미늄합금이 표면 거칠기 값이 더 우수하고 안정적인 결과를 얻을 수 있음을 뜻한다.

또한 두 재료 모두 초기 절삭에서 거칠기 값이 나쁘게 나타나고 있으며, 절삭 길이 300km까지 다시 좋아지나 이후 절삭 길이가 증가되면 450km에서 급격히 나빠짐을 확인할 수 있다. 이는 새 공구의 성형과정에서 생성된 불균일한 절삭인선 윤곽이 가공 중 가공표면에 전사되어 초기 절삭에서는 불량하게 나타났던 것이 가공이 진행되면 거친 인선의 탈락으로 이후 안정된 표면 거칠기로 되돌아오다가 계속 절삭 길이가 증가되면 450km 이후에는 마모가 진행되면서 다시 증가되는 결과로 판단된다.

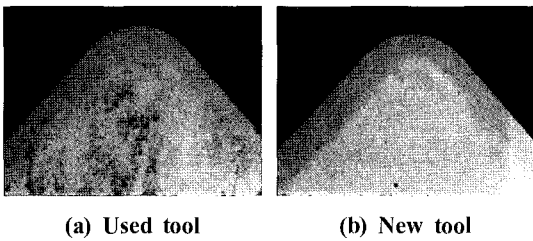


Fig. 6 Diamond tool to be machined aluminum

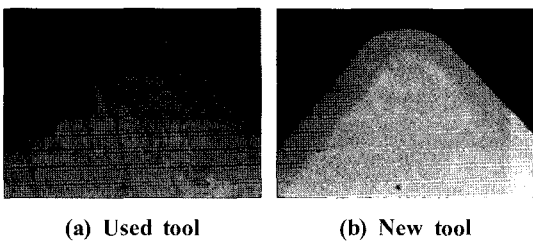


Fig. 7 Diamond tool to be machined brass

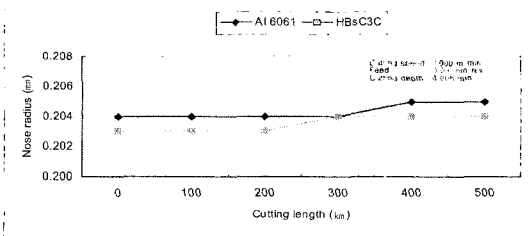


Fig. 8 Grape of nose radius values

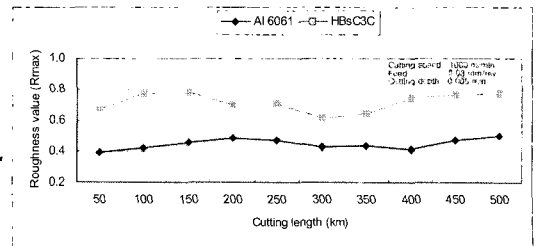


Fig. 9 Grape of surface roughness values

4.3 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰

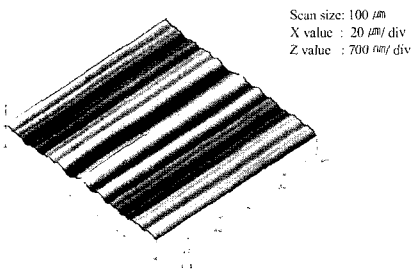
Fig. 10~11은 절삭가공면의 표면특성을 AFM으로 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 먼저 알루미늄합금의 표면특성을 고찰해보면 초기 절삭 길이 50km에서는 이송량 형태로 생성된 표면의 형상이 선명하고 비교적 일정하여 표면 거칠기도 좋게 나타났으나 절삭 길이 100km에서는 표면형상이 더 작게 나누어져 불균일하게 되고 200km에서는 큰 이송량 형태의 표면을 만들고 표면 거칠기가 더 나쁘게 나타났다. 따라서 절삭인선의 탈락이나 마모에 따른 불균일한 형태변화는 표면 거칠기에 큰 영향을 미치고 있는 주요 인자임을 확인할 수 있었다. 이후 가공이 진행되어 절삭량이 계속 증가 되면 표면형상은 다시 작게 나누어지고 400km에서는 선명하고 매끄럽게 일정한 표면형상을 만들며, 초기 상태로 좋아 지나 절삭 길이 450km 이후에는 이송량 형태가 무너지고 표면형상이 불균일해지며, 측정된 표면 거칠기도 초기보다 증가되었다. 황동 재료의 표면특성 또한 이송량 형태로 생성된 표면의 형상변화나 표면 거칠기 값의 변화는 절삭 길이만 다소 차이를 나타낼 뿐 알루미늄합금과 거의 일치된 유형을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

두 재료를 종합하여 고찰해보면 이송속도에 따른 이송량은 일정하게 나타나고 있으나, 한 개의 이송량 범위에서 또 다른 크고 작은 굴곡이 형성되고 있음이 확인되고 있는데 이들 특성은 초기 절삭에서 새 절삭공구의 인선 탈락현상이 반영된 결과로 생각되며, 이송량 내에서 다양한 형태의 변화는 재료전단 과정에서 발생한 다이아몬드입자의 영향과 경미하지만 인선마멸 등이 불균일하게 발생된 결과들이 절삭면에 전사되어 표면 거칠기에 영향을 미치고 있기 때문으로 생각된다.

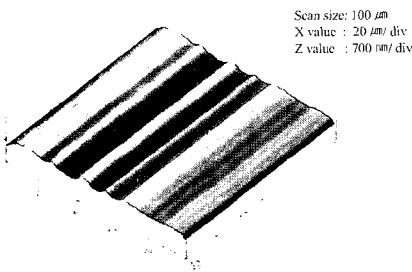
그러나 측정값으로 나타난 모든 변화량은 절삭공구에 의한 것으로 볼 수는 없을 것이며, 본 연구에서 생략된 공작기계의 진동이나 주위환경 등 절삭작용에 미치는 여러 가지 영향이 고려되어 평가되어야 하며, 500km 이후의 절삭 길이에서도 실험이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

보급용 초정밀 가공용으로 국내에서 제작된 시작용 기계에서 천연 다이아몬드공구로 알루미늄합금(Al 6061)과 황동

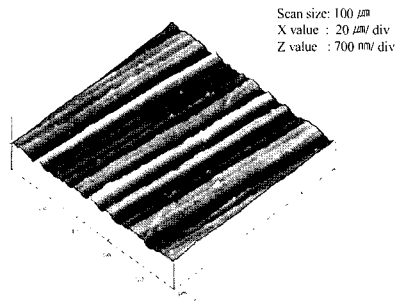


(a) 50km machined surface

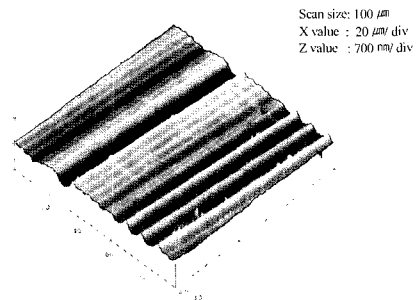


(b) 500km machined surface

Fig. 10 AFM photo. of aluminum alloy



(a) 50km machined surface



(b) 500km machined surface

Fig. 11 AFM photo. of brass

(HBsC3C) 재료를 설정된 절삭 조건하에서 가공한 후 얻어진 가공면의 표면특성과 공구 마멸현상을 표면 거칠기 측정기와 AFM 등을 이용하여 측정하고, 그 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭공구의 절삭인선은 절삭 길이를 500 μ m 이내로 가공할 경우 형태나 반경 값의 변화는 0.001mm 이하로 경미하며, 마모나 변형은 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.
- (2) 표면 거칠기는 절삭가공 초기 새로운 공구의 사용으로 오히려 불량한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였고, 절삭길이 500 μ m 이내에서는 알루미늄합금은 0.108 μ m, 황동은 0.161 μ m의 편차를 나타내고 있어 알루미늄합금이 황동보다 0.053 μ m 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- (3) AFM 3D 표면특성을 관찰한 결과 이송속도에 따른 이송량은 일정하나 절삭가공 중 새 공구의 돌출인선 탈락이나 경미한 마모현상 등이 절삭면에 전사되어 이송량 범위 내에서 또 다른 다양한 형상들이 생성되고 이것들이 표면 거칠기에 영향을 미치고 있는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.
- (4) 향후 사용기계의 진동상태나 주변 환경 등 절삭작용에 미치는 여러 가지 영향이 고려된 연구가 필요하며, 500 μ m 이후의 절삭 길이에서도 실험이 필요함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Ansi, S., Taguchi, Y., Horio, K., Kasai, T. and Kobayashi, A., 1990, "Measuring the Very Small Cutting- Edge Radius for a Diamond Tool Using a New Kind of SEM Having Two Detectors," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, part1, pp. 85~88.
- (2) IKawa, N., 1991, "Ultra-precision Metal Cutting- The Past, the Present and the Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 2, pp. 587~594.
- (3) Kang, S. J. and Kim, J. K., 2004, "Characteristics Evaluation of Surface Roughness with Ultra-precision Machining," *Trans. of KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 9~15.
- (4) Kang, S. J., Oh, S. R., Lee, G. J. and Kim, J. K., 2004, "A Study on the Surface Machining Characteristics of Ultra-precision through SEM Measurement," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2004*, pp. 34~41.
- (5) Lee, G. J. and Kim, J. K., 2006, "A Study on machined Surfaces Characteristics of aluminum alloy by AFM Measurement," *Trans. of KSMTE*, Vol. 15, No. 2, pp. 81~86.
- (6) Lee, G. J., Jung, J. S., Kang, S. J., Kim, S. B. and Kim, J. K., 2006, "A Study on machined Surfaces Characteristics of brass by AFM Measurement," *Proceedings of the KSMPE Spring Conference 2006*, pp. 47~52.
- (7) Oh, S. R., *A Study on Characteristics of Ultra-precision Cutting Surface by AFM Measurement Method*, Master Dissertation, Chosun university, 2005.