

# AFM 측정법에 의한 알루미늄 합금의 초정밀 가공면 평가 연구

이갑조\*, 김종관<sup>+</sup>

(논문접수일 2005. 11. 22, 심사완료일 2006. 1. 19)

## A Study on Machined Surfaces Characteristics of Aluminum Alloy by AFM Measurement

Gab-Jo Lee\*, Jong-Kwan Kim<sup>+</sup>

### Abstract

The machining parts must be produced within the specification of drawing and those will be able to meet function and efficiency. At that time, it is very important not only precision machine and machining technique but also the measurement technique. So, the improvement of measurement technique is to be joined together at once with improvement of machining technique. Finally, the quality and value of the parts are decided by precision measurement. This paper aims to study on the machined surfaces characteristics of aluminum alloy by AFM(Atomic force microscope) measurement. The objective is contribution to ultra-precision machining by exhibit foundation data of surface roughness and tool wear when parts are cutting with diamond tool at the factory.

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

## 1. 서론

20세기 생산성 중심시대에서 21세기는 품질 중심시대로 생산력 확대중심의 양적 패러다임에서 고부가가치 창출을 위한 혁신주도의 질적 패러다임으로 국내산업 사회는 급속 전환되고 있으며, 고품질 저가 부품을 좋은 서비스에 공급하는 것으로 품질의 개념이 바뀌고 있다. 부품의 절삭 가공

부분에서도 초정밀 공작기계는 고속화, 고정밀화를 바탕으로 급속 발전하고 있으며, 고속화 분야에서는 직선구동 모터를 적용한 장비나 병렬형 구조의 공작기계 등이 실질적인 상품화 단계에 도달했고 고정밀화 부분은 각종 오차를 최소화할 수 있는 설계기술 및 부가 장치, 고속절삭 메커니즘 등의 기초기술을 바탕으로 하는 고품위화 추세를 형성하고 있다. 기계부품의 고급화 핵심 기술인 초정밀 가공기술은 1950

\* 조선대학교 대학원 기계공학과 (gj.lee@carrier.co.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 조선대학교 기계공학과

년대부터 극도로 예리한 다이아몬드공구의 개발과 사용으로 표면 거칠기를 50nm이하로 가공을 할 수 있는 기술이 보고 되었으며, 1960년대에 원자로와 같은 고성능 광학기구나 특수기계 부품에서 다이아몬드공구의 가공에 관한 연구가 시작되어 최근에는 광학, 전자, 컴퓨터 메모리디스크, 베어링, 정밀측정 장치 등에서 정밀도나 표면 거칠기의 공차를 맞추는 가공에 이용되는 활발한 연구<sup>(1,2)</sup>가 이루어지고 있다.

따라서 초정밀 가공 공작기계는 높은 강성구조와 정밀도가 요구되며, 특히 고속화 추세에 따른 주축과 이송계는 공작물의 치수 및 형상, 표면 거칠기에 직접영향을 미치는 정밀도와 수명에 대한 중요한 연구 분야로서 Moronuki<sup>(3)</sup>는 공작기계 이송계의 정확성을 위한 마찰 전동기구, Kakino<sup>(4)</sup>는 정밀가공을 위한 공작기계의 운동정도에 대한 초정밀 가공기술, Kang<sup>(5,6)</sup>, Jung<sup>(7)</sup> 등은 초정밀 절삭가공조건 및 표면특성 등의 기초 이론을 제시하였다. 이와 같이 가공기술의 진보에 따라 가공면의 기능은 동특성, 내하중성, 기밀성 등 품질에 대한 요구가 엄격해지고 있으며, 표면 거칠기 또한 가공면의 절삭 특성으로 요구되는 기능과 밀접한 관계 때문에 중요하게 관리되고 있다.

첨단 과학기술의 급속한 발달과 함께 좀더 미세한 영역까지 절삭기술이 요구되면서 광학, 전기, 전자, 및 기계부품의 생산에 있어서 핵심기술인 초정밀 가공기술은 X-선용 천체 망원경이나 현미경 등 광응용 부품의 가공까지 점차 확대되어가고 있어 그에 수반되는 측정기술 또한 더 많은 진보를 요구받고 있으나 이러한 특성을 평가할 수 있는 측정기술은 기존의 틀을 크게 벗어나지 못하고 있다.

정밀 가공된 부품이 의도된 성능과 기능을 발휘하기 위해서는 초정밀 가공정밀도도 필요하겠지만 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지 또는 어느 부분이 잘못 제작되었는지를 판단하기 위해서는 용도에 적합한 정밀 측정기에 의한 측정기술이 필요하다. 따라서 측정기술의 향상은 곧 제품정밀도 향상으로 이어질 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국내 H사에서 제작한 시작용 초정밀선반을 평가하기 위하여 알루미늄합금(Al 6061) 소재를 절삭 길이 500mm까지 천연 다이아몬드공구로 선삭가공하면서 기존의 표면 거칠기 측정기와 본 실험에서 시도하는 원자현미경(AFM) 측정기법을 활용하여 고찰하고, 가공면에 나타난 표면정밀도 특성 등에 대한 정밀가공기술의 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 표면 거칠기 이론

기계 가공된 표면을 현미경으로 살펴보면 수많은 요철을 볼 수 있다. 이와 같이 일정한 간격 사이에 나타나는 요철의 빈도와 크기를 표면 거칠기라 하며, 중심선평균 거칠기( $R_a$ )와 최대높이 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.

### 2.1 이론 표면 거칠기

선단 반지름  $R=0$ 인 경우  $R_a$ 와  $R_{max}$ 는 마찰계수( $f$ )에 비례하나 선단 반지름  $R \neq 0$ 인 경우 공구의 원호선단만으로 절삭 가공할 때의  $R_a$ 와  $R_{max}$ 는 이송에 비례하고, 선단반경  $R$ 에 반비례한다.

$$R_{inax} = \frac{f}{\cot K' + \cot K''} \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 이송(mm/rev),  $R$ 은 바이트의 인선반경(nm),  $K'$ 는 주절인각(deg),  $K''$ 는 부절인각(deg)이다.

### 2.2 실제 표면 거칠기

실제 표면 거칠기는 다음의 5가지로부터 이루어진다.

- 1) 공구형태와 이송, 운동기구에서 기하학적으로 구해지는 거칠기
- 2) 구성인선의 생성, 탈락에 따라 생기는 거칠기
- 3) 절삭기구 자체가 가진 불안정 요소, 재료의 팽창 등에서 생기는 거칠기
- 4) 절삭날-공작물의 상대 위치가 변동하기 때문에 생기는 거칠기
- 5) 절삭날의 손실, 마찰에서 생기는 거칠기

이론적인 표면 특성과 실제적인 표면 특성을 다르게 하는

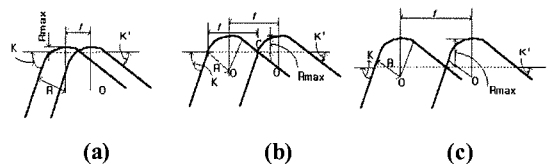


Fig. 1 Surface roughness of vertical radius  $R \neq 0$

요인으로는 기계의 진동, 절삭공구의 예리함 정도 그리고 채터와 같은 절삭 가공에서의 다른 요인들의 불안정성 등이 있다. 실제로 스피들의 진동이나 절삭공구를 지지하고 있는 슬라이드의 진동은 가공된 표면에 영향을 미친다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 및 측정기

본 실험에는 국내 H사에서 최근 개발한 초정밀 선반



Fig. 2 Turning center

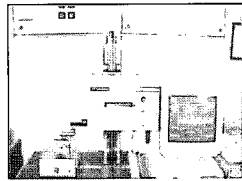


Fig. 3 Roughness tester

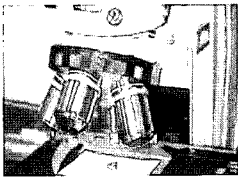


Fig. 4 Metallurgical microscope

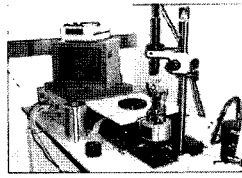


Fig. 5 AFM

Table 1 Specification of equipments

Equipment	Specification
Turning center	Model: UPI-II(Ultra-precision turning) NC system: Mitsubishi Min. movement unit: 10nm/ 50nm
Roughness tester	Model: Form Talysurf Maker: Rank Taylor Hobson(U.K) Accuracy: 1.0um/ 120mm
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
Tool maker's microscope	Model: TUM-170EH Maker: Topcon(Japan) Magnification: x10 ~ x200

(UPI-II)을 사용하였으며, 세부사양은 Table 1, Fig. 2에 나타내었다. UPI-II는 내장형 주축모터를 채용하여 20,000rpm 이상의 고속회전이 가능하고 M64L CNC 시스템에 의해 최소설정단위 10nm급 제어 장치를 장착시킨 국내 산업현장에서 소형부품의 보급형 초정밀 가공 기계로 제작 되었다.

가공면의 특성평가를 위한 표면 거칠기 측정은 Fig. 3, 5와 같이 영국 Rank Taylor Hobson사 촉침식 표면 거칠기 측정기(Talysurf)와, 시료에 손상을 주지 않고 원자단위까지 관찰이 가능한 원자현미경(AFM: Atomic Force Microscope)을 이용하였다.

천연 다이아몬드공구의 인선마모는 인선의 형태와 반경을 구분하여 평가하였으며, 따라서 인선형태 측정은 일본의 Fig. 4의 Nikon사 금속현미경을, 반경 측정은 Topcon사 TUM 공구현미경을 사용하였다.

#### 3.2 시편 및 절삭공구

실험에 사용한 피삭재는 중형항공기와 자동차용 부품 경량화 추세에 따라 초정밀 가공의 수요가 증가되고 있는 내식성과 절삭성이 우수한 알루미늄합금(Al 6061)을 사용하였으며, 가공을 위하여 절삭가공 부분과 척물립 부분을 고려한 형태로 제작하였다. Fig. 6은 제작된 시편재료와 절삭 후 AFM에서 측정을 위해 절단된 상태의 사진이고, Table 2는 피삭재의 화학적 성분을 나타내었다.

#### 3.3 실험방법 및 조건

Fig. 2의 절삭기계에서 천연 다이아몬드공구로 알루미늄합금(Al 6061) 소재를 가공한 후 표면 거칠기, 공구마멸 현상의 특성평가를 실시하였다.

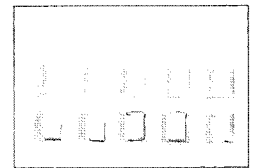


Fig. 6 Experiment work pieces of Aluminum alloy

Table 2 Chemical compositions of Aluminum alloy

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

가공실험방법은 미리 준비된 외경  $\phi$  60mm의 소재 10개를 절삭 길이 50km씩  $F=0.03\text{mm/rev}$ ,  $d=0.005\text{mm}$ ,  $V=1000\text{m/min}$  등의 절삭조건<sup>(5)</sup>에서 건식가공 하였으며, 절삭 길이는 최대 500km까지 비교하였다.

표면 거칠기는 최대높이 거칠기 측정방식을 평가방법으로 삼았으며, 평가 길이는 컷오프 값을 0.8mm로 하여 거칠기 기준 길이 4배 이상에서 평가 되도록 하였다. 측정값은 ISO 필터의 직선면 상태에서 파상도 곡선인 저역 필터를 제거하고 거칠기 곡선인 고역필터를 통해 주어진 컷오프 값 내에서 최대높이 값으로 측정기가 자동 계산하여 나타내도록 하였으며, 표면 거칠기 값은 시편을 최소 3회 이상 반복 측정하여 그 중앙값을 선택 하였다.

공구의 마멸상태는 금속현미경 100배에서 공구 절삭인선을 세운 후 경사면과 여유면의 교차부분인 절삭인선의 형태를 실험편의 절삭량 증가 주기에 따라 측정하여 평가 하였으며, 공구현미경을 이용하여 공구의 절삭인선 반경을 100km의 절삭주기로 측정하여 평가했다.

AFM에 의한 가공면 표면정밀도 측정은 Scan size를 100  $\mu\text{m}$ 로 선정 촬영한 3D 사진을 얻었고, 표면 거칠기 값의 변화에 따른 가공면의 상태와 공구의 절삭인선 형태나 반경의 변화에 따른 가공면의 상태를 육안으로 관찰 평가하였다. 100 $\mu\text{m}$ 의 배율치수 선정은 가공속도에 따른 이송량이 관찰될 수 있도록 하기 위하여 두 가지 단계의 조사를 실시하였는데, 먼저 금속현미경을 X(100~800)으로 배율을 높여가며 절삭속도에 따른 이송량을 관찰하였고, 그 후 AFM에서 (20~100)  $\mu\text{m}$ 로 배율 치수를 낮추어 가며, 이송량 내에서 발생된 변화를 관찰하였다. 금속현미경에서는 가공속도에 따른 이송량은 명확하게 나타나지만, 저 배율인 관계로 이송량 내에서의 변화를 관찰할 수 없었고, AFM에서는 이송량 내에서의 다양한 변화는 관찰이 가능하나 고배율인 관계로 이송량을 구별하기가 어려웠다.

그래서 다시 AFM을 이용하여 저배율로 이송량을 찾고, 이송량 내에서 발생된 가공면의 변화와 가공속도에 의해 발생된 이송량이 사진에서 가장 잘 관찰될 수 있는 100 $\mu\text{m}$ 를 AFM 측정배율로 결정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 공구인선 마멸현상 고찰

공구의 경사각과 여유각의 형태유지를 목적으로 공구수명과 관련된 인선마멸을 평가할 때는 절삭인선의 형태와 반경을 구분 평가하여야 하며, 전단영역에서의 전단, 경사면의

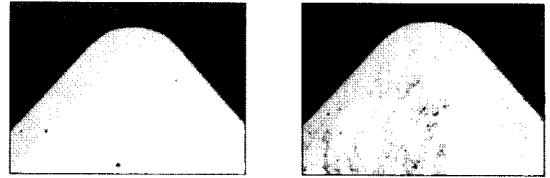


Fig. 7 Diamond new tool & used tool

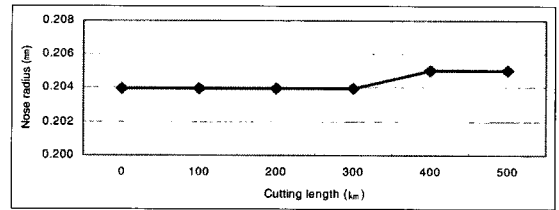


Fig. 8 Graph of nose radius values

마찰, 절삭 날 선단에서의 분리작용으로 구분된다. 초정밀 절삭가공에서는 절삭날의 선단형상이 가공면의 형성에 영향을 주며, 절삭 깊이가 인선반경보다 같거나 작을 경우, 절삭날은 극부적으로 선단에서 음의 경사각으로 절삭되며, 공작물의 일부가 공구의 여유면 쪽으로 밀려들어가 버니싱 작용과 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하게 된다. 이러한 절삭공구의 인선상태와 절삭조건을 상관관계를 알아보기 위하여 금속현미경과 공구현미경으로 절삭인선 상태를 측정 고찰하였다. Fig. 7은 사용공구에 대한 절삭 인선부분의 절삭가공 전과 절삭 길이 500km 가공 후를 비교한 사진으로 절삭인선 형태를 육안으로 살펴보면 절삭가공 전과 후에 대한 윤곽형태는 변화가 없으나 상면 경사면은 칩 유동에 따른 마찰로 변화된 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 8과 같이 절삭공구의 인선반경 값의 변화는 절삭 길이 300km까지는 일정한 값을 나타냈으나, 이후부터는 약간의 증가를 확인하였다. 따라서 500km이후의 지속적인 실험이 필요함을 확인하였다. 그러나 일반적인 절삭에서 연속적인 가공작업을 100km이내에서 이루어지므로 천연다이아몬드공구에 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 표면 거칠기 특성 고찰

천연 다이아몬드공구에 의한 초정밀 가공에서는 앞 절에서 구성인선에 의해 야기되는 절삭저항의 변화가 적기 때문에 본 실험에서는 공작기계가 이상적으로 운동하고 공구의

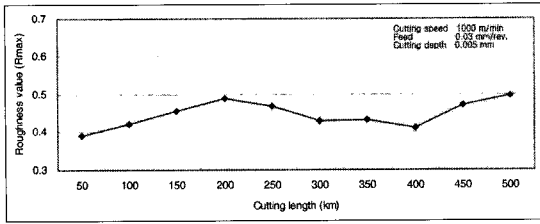


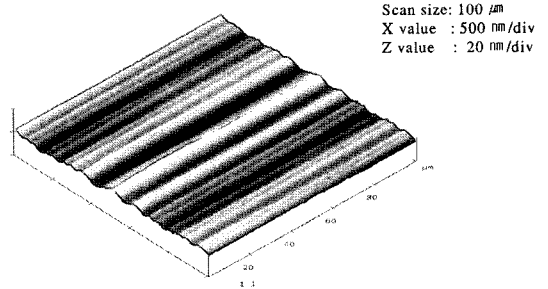
Fig. 9 Grape of surface roughness values

절삭인선 윤곽이 공작물에 전사되어 가공면의 형상을 결정하는 것으로 가정하여 표면 거칠기의 특성을 고찰하였다.

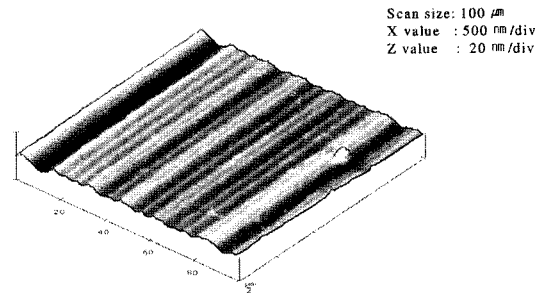
일반적으로 직선절연공구는 반경절연을 갖는 공구에 비하여 가공면 거칠기를 양호하게 할 수 있고, 공구의 지그에 고정 방법에 따라 공구 설치각이 변하여 표면 거칠기를 다르게 할 수 있다. 선단반경이 무한대인 직선절연의 경우 이론적 표면 거칠기는 0이 될 수 있으나, 표면 거칠기가 이론값에 미치지 못하는 절삭도중 공구와 공작물의 상대진동, 기계본체의 불안정 및 주위환경, 공구 설치각의 영향이 작용되기 때문이다. Fig. 9와 같이 알루미늄합금 재료의 축침식 측정기에 의한 표면 거칠기 값의 측정결과를 고찰해 보면, 절삭 길이가 50km 0.390 $\mu$ m에서 200km 0.489 $\mu$ m까지 평균 0.03 $\mu$ m씩 증가되다가 이후 400km에서 0.431 $\mu$ m으로 감소되었으며, 이후 급속 증가되어 500km에서 0.498 $\mu$ m까지 급격히 나빠짐을 확인할 수 있다. 이는 새 공구의 성형과정에서 생성된 불균일한 절삭인선 윤곽이 가공 중 가공표면에 전사되어 200km까지 초기 절삭에서는 불량하게 나타나던 것이 가공이 진행되면 거친인선의 탈락으로 이후 안정된 표면 거칠기로 되돌아오다가 계속 가공 길이가 증가되면 절삭 길이 400km 이후에는 절삭인선 윤곽의 마모가 진행되면서 다시 증가되는 결과로 판단되며, 500km 이후에서의 결과도 향후 실험과제로 생각된다.

### 4.3 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰

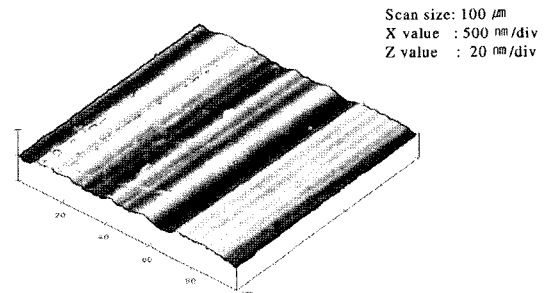
Fig. 10은 원자현미경을 사용한 배율치수 100 $\mu$ m의 3D 가공면 표면 거칠기 측정결과를 나타낸 것으로 이송속도에 따른 이송량은 일정하게 나타나고 있으나, 한 개의 이송량 범위에서 또 다른 크고 작은 굴곡이 형성되고 있음이 확인되고 있는데 이들 특성도 초기절삭에서 새 절삭공구의 인선 탈락현상이 반영된 결과로 생각된다. 또한 이송거리의 결과가 비교적 일정하게 나타나고 있음은 공구인선의 미세 마모나 형태의 변화가 경미하므로 일정하게 나타나고 있음을 뜻하고 반면 이송량 내에서 다양한 형태의 변화는 재료전단과정에서 발생된 초경입자의 영향과 경미하지만 인선마모 등



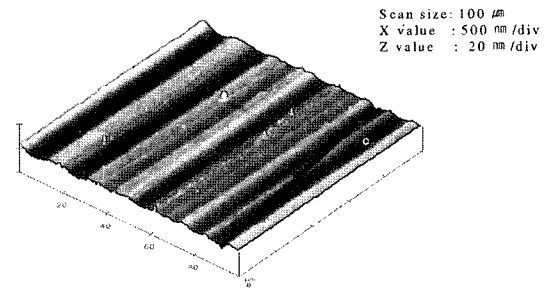
(a) 50km



(b) 100km



(c) 200km



(d) 400km

Fig. 10 AFM photo. of machined surface

이 불균일하게 발생된 결과들이 절삭면에 전사되어 표면 거칠기에 영향을 미치고 있기 때문으로 생각된다.

초기 절삭 길이 50km(Fig. 10 (a))에서는 이송량 형태로 생성된 표면의 형상이 선명하고 비교적 일정하여 표면 거칠기도 비교적 좋게 나타났으나 절삭 길이 100km(Fig. 10 (b))에서는 표면형상이 더 작게 나누어져 불균일하게 되고 200km(Fig. 10 (c))에서는 큰 이송량 형태의 표면을 만들고 표면 거칠기가 0.489 $\mu$ m로 약 25%정도 더 나쁘게 나타났다. 따라서 절삭인선의 탈락이나 마모에 따른 불균일한 형태변화는 표면 거칠기에 큰 영향을 미치고 있는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.

이후 가공이 진행되어 절삭 길이가 계속 증가되면 표면형상은 다시 작게 나누어지고 400km(Fig. 10 (d))에서는 선명하고 매끄럽게 일정한 표면형상을 만들며, 0.412 $\mu$ m로 초기 상태로 좋아지나 절삭 길이 500km에서는 굴곡형태가 무더지고 표면형상이 불균일해지며, 측정된 표면 거칠기 0.498 $\mu$ m으로 초기보다 약 13% 증가되었고, 계속적인 절삭에서도 표면 거칠기는 급속 악화될 것으로 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 할 것이다.

## 5. 결론

보급용 초정밀 가공용으로 국내에서 제작된 시작용 기계에서 천연 다이아몬드공구로 알루미늄합금(Al 6061) 재료를 설정된 절삭 조건하에서 가공한 후 얻어진 가공면의 표면특성과 공구인선 마멸현상을 기존의 표면 거칠기 측정기와 AFM(3D측정), 금속현미경 등을 이용하여 측정하고, 그 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭공구의 인선마멸은 절삭 길이 300km까지는 변화가 없었으나 이후는 증가됨을 확인하였다.
- (2) 표면 거칠기 측정에서 절삭 길이 200km까지는 새 공구의 인선형성 과정에서의 불균일한 인선 윤곽이 가공표면에 전사되어 불량하게 나타났음을 확인하였고, 이후 400km 이상에서 점차 불량해짐을 확인하였다.
- (3) AFM 3D 표면특성을 관찰한 결과 이송속도에 따른 이송량은 일정하나 새 공구의 돌출 인선이나 절삭가공 중 절삭인선의 탈락, 마멸현상이 절삭면에 전사되어 이송량 범위 내에서 또 다른 다양한 형상들이 생성되고 이것들이 표면 거칠기에 영향을 미치고 있는 주요인자임을

확인할 수 있었다.

- (4) AFM 3D 표면특성의 평가는 기존의 표면 거칠기 측정기에 의한 평가에 보다 발전된 3차원 입체 표면의 정보를 제공하고 있어 초정밀 표면 거칠기 평가의 새로운 방법으로 생각된다.
- (5) 향후 사용기계의 진동상태나 주변 환경 등 절삭작용에 미치는 여러 가지 영향이 고려된 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2005년도 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) Moronuk, N. and Furukawa, Y., 1988, "A Study on the Precision Machine with Friction Gearing", *JSPE*, Vol. 54, No. 11, pp. 2113-2130.
- (4) Kakino, Y., Ihara, Y., Nakatsu, Y. and Shinohara, A., 1989, "A Study on the Motion Accuracy of the NC Machine Tool", *JSPE*, Vol. 55, No. 3, pp. 587-600.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Jung, J. H., Lee, G. J. and Kim, J. K., 2003, "An Evaluation of Surface Finish with SEM in Precision Machining", *Proceedings of the KSMPE Autumn Conference 2003*, pp. 47-52.