



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2009년 8월

碩士學位論文

AFM 測定法에 의한 알루미늄 재질의
超精密 加工面 特性 研究

朝鮮大學校 教育大學院

技術家庭教育科

崔 有 廷

AFM 測定法에 의한 알루미늄 재질의 超精密 加工面 特性 研究

A Study on Characteristics of Ultra-precision Machined
Surfaces of Aluminum materials by AFM Measurement

2009 年 8 月 日

朝鮮大學校 教育大學院

技術家庭教育科

崔 有 廷

AFM 測定法에 의한 알루미늄 재질의
超精密 加工面 特性 研究

指導教授 金 鍾 寬

이 論文을 教育碩士學位申請 論文으로 提出함.

2009 年 4 月 日

朝鮮大學校 教育大學院

技術家庭教育科

崔 有 廷

崔有廷의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 韓吉永 印

委員 朝鮮大學校 教授 曹圭宰 印

委員 朝鮮大學校 教授 金鍾寬 印

2009 년 6 월 일

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of tables	3
List of figures	4
List of photographs	6
Nomenclatures	7
ABSTRACT	8

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 동향	1
1.2 연구목적 및 내용	2

제 2 장 이론적 배경

2.1 절삭공구	3
2.2 가공면의 표면거칠기 이론	6
2.2.1 표면거칠기 이론	7
2.2.2 실제 표면거칠기	10
2.3 AFM에 의한 초정밀 가공면의 측정	11
2.4 초정밀 가공이론	13

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치	16
3.2 실험방법	23
3.3 AFM 측정에 의한 가공면 특성 평가	25

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 공구인선 마모현상 고찰	29
4.2 가공면 표면거칠기 특성 고찰	31

4.3 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰	38
제 5 장 결 론	50
References	51

List of Tables

Table 2.1 Comparison accuracy of test turning center	15
Table 2.2 Comparison components of test turning center	15
Table 3.1 Specification of testing machine	17
Table 3.2 Specification of roughness tester	18
Table 3.3 Specification of experimental equipment	20
Table 3.4 Specification of abrasive testing machine	21
Table 3.5 Specification of atomic force microscope	22
Table 3.6 Cutting condition	23
Table 3.7 Chemical compositions of <i>Al</i> ₆₀₆₁	23
Table 4.1 Measured nose radius values of cutting tool	30
Table 4.2 Surface roughness values of <i>Al</i> ₆₀₆₁	32

List of Figures

Fig. 2.1 Contact area analysis	4
Fig. 2.2 Flank and crater wear	5
Fig. 2.3 Average arithmetic roughness	6
Fig. 2.4 Maximum height roughness	7
Fig. 2.5 Surface roughness of vertical radius $R=0$	8
Fig. 2.6 Surface roughness of vertical radius $R\neq 0$	9
Fig. 2.7 Principle of AFM equipment	11
Fig. 3.1 AFM photograph for select magnification (Scan size 20 μm)	26
Fig. 3.2 AFM photograph for select magnification (Scan size 60 μm)	27
Fig. 3.3 AFM photograph for select magnification (Scan size 100 μm)	28
Fig. 4.1 Measured nose radius values of cutting tool	30
Fig. 4.2 Surface roughness graph of Al_{6061}	32
Fig. 4.3 Surface roughness value (50 μm)	33
Fig. 4.4 Surface roughness value (100 μm)	33
Fig. 4.5 Surface roughness value (150 μm)	34
Fig. 4.6 Surface roughness value (200 μm)	34
Fig. 4.7 Surface roughness value (250 μm)	35
Fig. 4.8 Surface roughness value (300 μm)	35
Fig. 4.9 Surface roughness value (350 μm)	36
Fig. 4.10 Surface roughness value (400 μm)	36
Fig. 4.11 Surface roughness value (450 μm)	37
Fig. 4.12 Surface roughness value (500 μm)	37
Fig. 4.13 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/ 50\mu\text{m}$)	40
Fig. 4.14 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/ 100\mu\text{m}$)	41
Fig. 4.15 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/ 150\mu\text{m}$)	42
Fig. 4.16 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/ 200\mu\text{m}$)	43
Fig. 4.17 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/ 250\mu\text{m}$)	44

Fig. 4.18 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/300\text{km}$)	45
Fig. 4.19 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/350\text{km}$)	46
Fig. 4.20 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/400\text{km}$)	47
Fig. 4.21 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/450\text{km}$)	48
Fig. 4.22 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/500\text{km}$)	49

List of Photograph

Photo. 3.1 Ultra-precision turning center(H-M64LCNC)	17
Photo. 3.2 Surface roughness tester(Talysufr PGI 800)	18
Photo. 3.3 Metallurgical microscope	19
Photo. 3.4 Tool maker's microscope	20
Photo. 3.5 Abrasive testing machine	21
Photo. 3.6 Atomic force microscope	22
Photo. 3.7 Cutting diamond tool	24
Photo. 3.8 Measured AFM specimens	25
Photo. 4.1 Cutting diamond new tool & used tool	30

Nomenclatures

a	Distance of single atom
A	Uncut-chip section area(μm^2)
A_a	Apparent contact area
A_r	Real contact area
d	Depth of cutting(mm)
D_1	Working diameter before cutting(mm)
D_2	Working diameter after cutting(mm)
f	Feed rate(mm/rev.)
h	Height of nose radius(mm)
H	Hardness of soft metal among contact metals
L	Cutting length(mm)
N	Spindle speed(r.p.m)
R	Tool nose radius(mm)
R_a	Average arithmetic roughness(μm)
R_{max}	Maximum height roughness(μm)
R_t	Maximum height of the profile
R_p	Maximum peak height
R_v	Maximum valley depth
S	Cutting distance(mm)
T	Time of cutting(min.)
V	Cutting speed(m/min.)
Z	Worn number of atoms

ABSTRACT

A Study on Characteristics of Ultra-precision Machined Surfaces of Aluminum materials by AFM Measurement

Choi Yu-jeong

Advisor : Prof. Kim Jong-Kwan Ph.D.

Department of Technology & Home Economics,

Chosun University Graduate School of Education

Based on recent advances in processing technology the management of the surface roughness is important because it is closely related in function and quality required as an attribute of the surface features of the cutting process.

In this study, paper purposes to evaluate characteristics of machined surface using Atomic Force Microscope in the precision cutting of aluminum(Al_{6061}) by natural diamond tool.

For this study, the machine is installed in the constant temperature and humidity facilities where there is no vibration. Because the external environment is one of the elements which affect the precision in machining and it may actually affect larger than the cause of the machine itself.

The length of processing was a maximum of 500km. Then, the results of the experiment were compared.

The results were speculated and the final results were obtained as follows:

1. Change of radius value is slight by $1\mu\text{m}$ low, when edge of cutting tool processes cutting length to 500 μm and transformation by wear could confirm that do not happen.
2. By using new tool, surface roughness of early cutting processing, poor result was come out by effect of super hard particle. But it was confirmed that roughness was reduced as a result of some measure of cutting.
3. Evaluation of surface peculiarity by AFM 3D provides evaluation of existent surface roughness tester with visible information of three dimensional surface which is more developed. Therefore, this study suggests new method to characteristics of ultra-precision machined surfaces by AFM measurement.
4. This study suggests that future research should consider several factors that influence cutting such as vibration of machines or ambient environment.

Key Words : Surface roughness(표면거칠기), Atomic Force Microscope(AFM: 원자현미경), Ultra-Precision Machining(초정밀 가공),

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 연구동향

지금까지 진행된 자동차, 항공 우주, 컴퓨터 등 첨단산업들이 급속도로 성장 할 수 있었던 것은 높은 정밀도가 필요한 주요 핵심 부품들을 가공할 수 있는 초정밀 가공기의 개발로 가능했다고 할 수 있다. 1960년대에 개발이 시작된 미국의 Union Carbide사의 마이크로인치 정밀 다이아몬드 선반으로 가공 정밀도가 0.1 μm (100nm)에 도달하였고, 1990년대에는 상업용 초정밀 다이아몬드 선반의 개발로 가공 정밀도가 0.01 μm (10nm)에 이르게 되어 본격적인 초정밀 가공시대를 열었다.

또한 부품의 절삭가공에서도 사용되는 초정밀 공작기계는 고속화, 고정밀화를 바탕으로 급속하게 발전하고 있으며, 고속화 분야에서는 직선구동 모터를 적용한 장비나 병렬형 구조의 공작기계 등이 실질적인 상품화 단계에 도달하였고 고정밀화 부분은 각종 오차를 최소화할 수 있는 설계기술 및 부가 장치, 고속절삭 메커니즘 등의 기초기술을 바탕으로 하는 고도의 가공기술에 대한 연구 결과를 나타내고 있다.

또한 초정밀 공작기계에 의하여 가공된 부품이 의도된 성능과 기능을 발휘하기 위해서는 고도의 가공기술도 필요하겠지만 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되고, 어느 부분이 잘 못 되었는지를 판단하기 위해서는 적합한 측정기술이 필요하며, 측정기술의 향상은 곧 제품 정밀도 향상으로 이어질 수 있다.

천연 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭가공기술은 전기, 전자, 정밀기계, 반도체, 항공우주산업 등에서 그 구성부품들이 고정도 가공에 필요한 기술로서 1960년대 이후부터 이미 미국, 유럽 및 일본을 비롯한 여러 선진국가에서 지속적인 연구가 진행되고 있으며 초정밀 절삭가공에서는 절삭깊이가 황삭의 경우 보통 수십 마이크로미터에서 정삭의 경우 수십 나노미터에 달한다.

초정밀 가공을 위한 공작기계는 높은 강성의 구조와 정밀도가 요구되며, 주축과 이송계는 공작물의 치수 및 형상, 표면거칠기에 직접적인 영향을 주게 되므로 이 부분의 정밀도와 수명에 대한 많은 연구가 필요하게 되었다. 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다. Moronuki⁽¹⁾ 등은 공작기계 이송계의 정확성을 위해 마찰 전동 기구에 대해 설명하였으며, Shimokobe⁽²⁾ 는 정밀 절삭가공을 위한 공작기계의 구

동과 기구에 대한 중요성을 보고 하였고, Kakino⁽³⁾ 등은 정밀 절삭가공을 위한 공작기계의 운동정도에 대하여 연구하였다. 또한 Kang^(4~5), Jung⁽⁶⁾, Lee^(7~8), Oh⁽⁹⁾ 등은 초정밀 절삭가공 조건 및 표면특성 등의 기초 이론을 제시 하였다. 그러나 기계 가공된 부품이 의도된 성능과 기능을 발휘하기 위해서는 정밀한 가공도 중요하지만 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지를 판단하기 위한 가공면의 측정기술이 필요하다. 따라서 초정밀 가공면 측정기술의 향상은 곧 제품정밀도 향상으로 이어질 수 있을 것이다.

1.2 연구목적 및 내용

최근 가공기술의 진보에 따라 가공면의 표면거칠기는 가공표면의 절삭 특성으로 요구되는 기능 및 품질에 밀접한 관계가 있기 때문에 중요하게 관리되고 있다. 일반적으로 공작기계의 정밀도라 하면 치수 및 형상의 정밀도와 다듬질면의 표면거칠기를 말하며, 그 중 표면거칠기는 정밀도를 정하는 중요한 인자로 마찰, 마모 및 내구성과 밀접한 관계를 가지고 있어 그 제품의 성능 및 수명에도 지대한 영향을 주고 있다. 때문에 치수나 형상을 측정하여 오차를 알아내는 것도 중요하지만 엄격한 생산과정의 마지막 단계에서 나타나는 표면거칠기를 측정하여 제품 정밀도를 높이는 것은 매우 중요하다.

이와 같은 초정밀 가공면의 특성평가에 있어서 표면거칠기는 사용한 공작기계의 종류에 따라 형태가 달라지며, 같은 공작기계를 사용했을 경우에도 기계의 마모, 절삭공구의 조건, 가공표면의 성분, 절삭방법, 작업자의 습관, 환경조건 등에 따라 달라진다. 그러나 수반되는 측정기술은 개발된 전용 측정기 사용의 한계성으로 기존의 틀을 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내 H사에서 제작한 초정밀 선반을 이용하여 알루미늄 합금(Al_{6061})소재의 피삭재를 절삭길이 50~500 μ m까지 천연 다이아몬드 공구로 절삭가공 하면서 가공면에 나타난 표면거칠기와 표면특성 등을 기존의 표면거칠기 측정기와 본 연구에서 특별히 도입한 원자현미경(AFM: Atomic Force Microscope)의 3차원 형상측정 기법을 활용하여 측정 결과를 고찰하고 평가하였으며, 절삭길이에 따른 공구의 마모현상이나 절삭인선의 형태변화 등에 대한 기초 자료를 제시하여 산업현장에서 수행되는 초정밀 가공의 측정기술로 원자현미경에 의한 3차원 가공표면 측정기법을 새로운 방법으로 제안하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 절삭공구

초정밀 절삭가공을 위해 사용 공구와 공작물과의 관계는 표면거칠기 생성에 큰 영향을 미친다. 따라서 양호한 표면거칠기를 얻기 위해서는 보다 작은 절삭깊이로 가공 할 수 있어야하고, 이를 위해서는 공구의 절삭날 끝 반경을 작게 해주어야 한다.

또한 사용 공구의 열전도도, 내마모성, 내식성 및 강도가 높아야 경면 가공 능력을 높일 수 있다. 현재까지 절삭공구로서 절삭날 끝 반경을 가장 작게 할 수 있는 것은 천연 다이아몬드 재료의 공구가 가장 유용하지만 공구재료가 고가여서 사용에 한계성을 가지고 있는 실정이다.

절삭 공구에서 마모의 이론을 고찰해보면 접촉면의 미끄럼 운동에 의해 표면이 미소량씩 떨어져 나가는 것을 말한다. 절삭공구의 마모는 통상 기계부품의 마모와는 다르며, 칩의 전단강도에 가까운 경사면이나 여유면의 마찰응력이나 접촉면에서 발생하는 고온 등의 가혹한 조건에서 이루어진다.

R. Holms은 Fig. 2.1와 같이 실접촉면적(A_r)에서 단일 원자 간격을 a 로 표시하였다. 위 측의 재료가 아래 측에 대해 어떤 거리 d 만큼 움직인 경우를 생각하면 위 측의 원자는 d/a 만큼 아래 측의 원자와 접촉할 것이다. 따라서 실 면적(A_r) 내에서 접촉한 원자의 수는

$$\frac{A_r}{a^2} \cdot \frac{d}{a} = \frac{A_r \cdot d}{a^3} \quad (1)$$

되고, 단위체적 당 마모된 원자의 수 Z 는

$$Z = \frac{V}{a^3} / \frac{A_r \cdot d}{a^3} = \frac{V}{A_r \cdot d} \quad (2)$$

이 되며, 이를 Holm의 마모 확률이라 한다.

Z 는 접촉 금속의 종류, 분위기, 마모속도, 온도에 의해 크게 변화한다.

M.C. Show는 접촉면의 작용하중 N 을

$$N = A_r \cdot H \quad (3)$$

로 나타내었다. 여기서 식 (2)을 식 (3)에 대입하면 마모원자 Z 와 마모체적 V 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{V \cdot H}{N \cdot d} \quad (4)$$

$$V = \frac{Z \cdot N \cdot d}{H} \quad (5)$$

이동층의 거리 d 에 대한 마찰이 직선적일 때 길보기 면적으로부터 이동 층의 두께 t 는 다음과 같은 식이 된다.

$$t = \frac{V}{A_a} = \frac{Z \cdot N \cdot d}{H \cdot A_a} = \frac{Z \cdot d \cdot \sigma}{H} \quad (6)$$

식 (6)의 해석을 절삭공구에 적용시키면 공구의 경사면 또는 여유면 마모는 그 면의 수직응력에 관계하고 칩과 공구의 상대적 경도에 관계하며 경도는 절삭온도와 함수 관계에 있다.

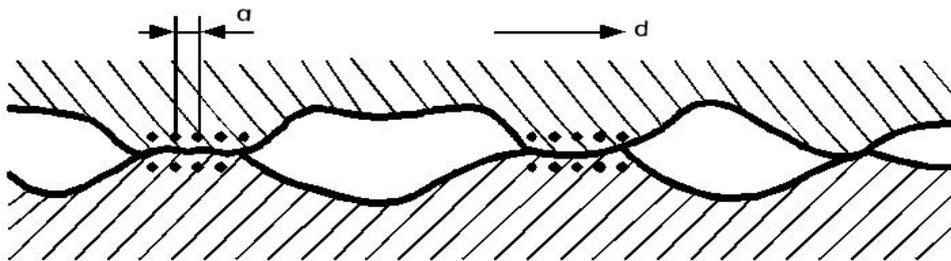


Fig. 2.1 Contact area analysis

절삭공구 마모 형태에는 여유각과 경사면의 마모로 크게 분류한다. 여유면 마모는 공구의 측면에 생기는 마모로 다듬질면이 거칠어지고 제작 치수에 영향을 주며 공구의 수명 판정에 사용 되는 마모의 형태이고 경사면 마모는 칩이 공구에 경사

각 상면과 연속 마찰을 일으켜 상면부가 오목하게 파이는 마모의 형태이다. 경사면 마모의 크기(h_c)와 깊이는 동일하며, 아래와 같이 표시한다.

$$h_c = \frac{e}{c} \quad (7)$$

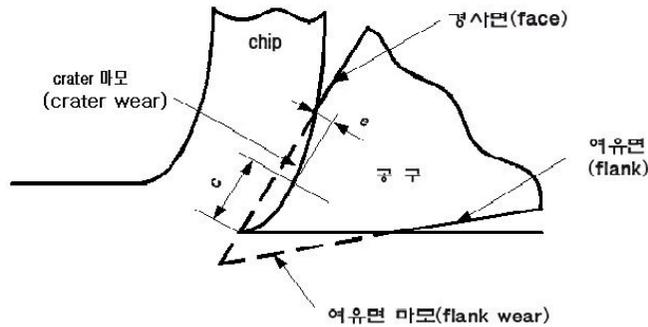


Fig. 2.2 Flank Wear and Crater Wear

절삭과정에서 공구의 손상이 어느 이상에 달하면 소정의 가공정밀도를 얻을 수 없거나 공구의 손상이 진행되어 절삭을 수행할 수 없게 되며, 이때까지의 정상적인 절삭시간을 공구수명이라 한다. 공구 손상은 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. 따라서 공구수명의 판정은 가공정밀도와 경제절삭을 동시에 만족하도록 가공면의 광택, 가공물의 치수변화, 절삭저항의 증대, 공구의 경사면 및 여유면의 마모 등을 통해서 정한다.

2.2 가공면의 표면거칠기 이론

가공면의 표면 거칠기란 절삭 가공된 표면에 일정한 간격 사이에 나타나는 요철(凹凸)의 빈도와 크기를 말한다. 이는 정밀도를 정하는 중요한 인자로서 표면거칠기가 작은 것이 정밀도가 좋다고 말할 수 있으며, 이러한 표면거칠기를 표시하는 방법에는 여러 가지가 있으나 일반적으로 중심선 평균 거칠기(R_a)와 최대 높이 거칠기(R_{max})가 가장 많이 사용되고 있다. 중심선 평균 거칠기는 국제적으로 가장 많이 사용되는 표면거칠기의 표시 방법으로 거칠기 곡선의 요철과 그 중심선에 포함된 면적의 합을 측정 길이로 나눈 것, 즉 중심선에 대한 산술평균 편차에 해당하는 것으로써 Fig. 2.3에 나타내었다. 최대 높이 거칠기는 기준길이 내에서 중심선에 평행한 최고점과 최저점을 지나는 두 직선사이의 상하 거리로 표시되며, Fig. 2.4은 최대 높이 거칠기를 나타낸 것이다.

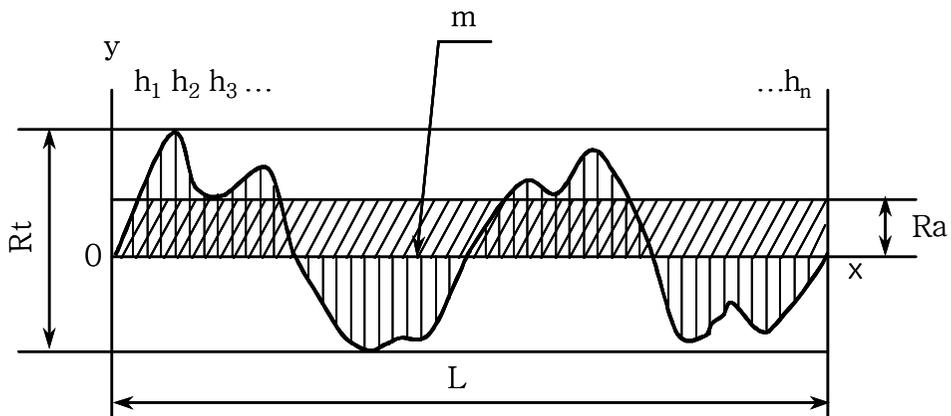


Fig. 2.3 Average arithmetic roughness (R_a)

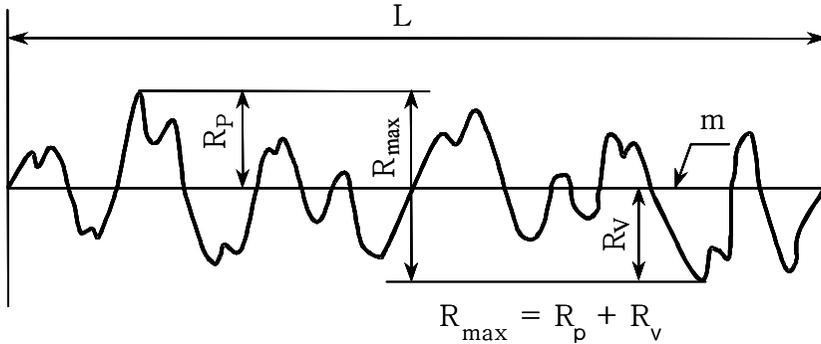


Fig. 2.4 Maximum height roughness(R_{\max})

실제 기계가공에서 얻어지는 표면거칠기는 두 가지 독립적 효과가 합쳐진 형태로 볼 수 있다. 즉 공구의 이송이나 이송속도의 기하학적 결과인 이론 표면거칠기 (Ideal surface roughness)와 절삭가공의 불규칙성으로 인한 실제 표면거칠기 (Natural surface roughness)이다. 절삭가공에서의 이론 표면거칠기라 함은 구성 인선, 진동, 공작기계의 부정확성 등이 없이 주어진 공구형상이나 이송에 의하여 기하학적으로 구해지는 거칠기이다.

2.2.1 표면거칠기 이론

인선 반지름 $R=0$ 인 경우는 Fig. 2.5에서 중심선 평균 거칠기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_a = \frac{|\Delta abc| + |\Delta cde|}{f} \quad (8)$$

$$R_a = \frac{2 \times \Delta abc}{f} = \frac{2}{f} \times \frac{1}{2} \left(\frac{f}{2} \cdot \frac{R_{\max}}{2} \right) = \frac{R_{\max}}{4} \quad (9)$$

$$\frac{f}{2} = \frac{R_{\max}}{2} \cdot \cot K + \frac{R_{\max}}{2} \cdot \cot K' \quad (10)$$

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K'} \quad (11)$$

식 (9)와 (11)에서

$$R_a = \frac{f}{4(\cot K + \cot K')} \quad (12)$$

여기서, R_{\max} 와 R_a 는 이송(f)에 비례하며, R_a 는 R_{\max} 의 1/4임을 알 수 있다.

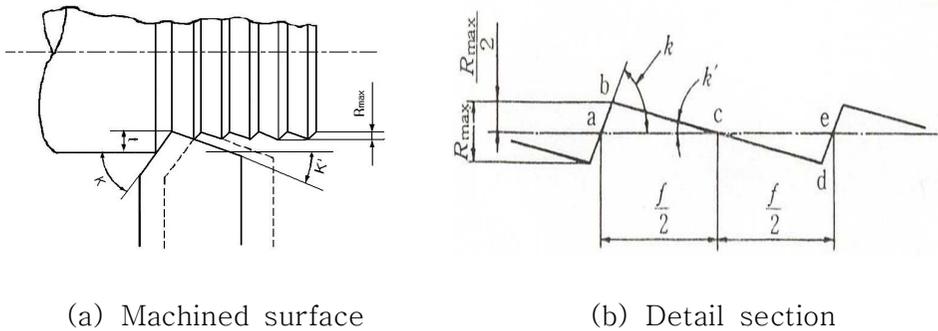


Fig. 2.5 Surface roughness of vertical radius ($R=0$)

인선 반지름 $R \neq 0$ 인 경우는 Fig. 2.6의 (a)에서 이송이 극히 적고, 표면거칠기의 산이 원호인 경우, 즉 $f \leq 2R \sin K'$ 인 경우에는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - f^2} \approx R - \frac{1}{2} \left(2R - \frac{f^2}{4R} \right) = \frac{f^2}{8R} \quad (13)$$

Fig. 2.6의 (b)에서 이송량이 약간 큰 경우, 즉 $f > 2R \sin K'$ 인 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{\max} &= R \left[1 - \cos K' \left(1 - \frac{f}{R} \sin K' \right) - \sin K' \sqrt{2 \frac{f}{R} \sin K' - \left(\frac{f}{R} \sin K' \right)^2} \right] \\ &= R \left[1 - \cos K' + T \cos K' - \sin K' \sqrt{T(2-T)} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Fig. 2.6의 (c)에서 주절인과 부절인의 무늬가 양측에서 나타나는 경우에는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R + \frac{f}{\cot K + \cot K'} - \frac{R \cdot \cos\left(\frac{K - K'}{2}\right)}{\cos\left(\frac{K + K'}{2}\right)} \quad (15)$$

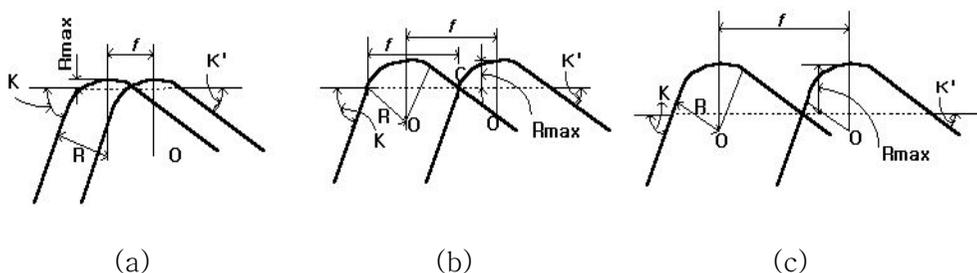


Fig. 2.6 Surface roughness of vertical radius ($R \neq 0$)

식 (15)에서 $f > R$ 라 하고 1항과 3항을 무시하면 다음식과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (11)과 같게 됨을 알 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K'} \quad (16)$$

여기서, R_{\max} : 최대 높이 거칠기
 f : 이송 (mm/rev.)
 R : 바이트의 Nose radius (nm)
 K' : 주절인각 (deg.)
 K : 부절인각 (deg.)
 T : $(f/R) \sin K'$

따라서 공구의 원호선단만으로 절삭 가공할 때의 중심선 평균 거칠기는 최대 높이 거칠기와 같이 이송에 비례하고, 선단 반지름 R 에 반비례한다.

2.2.2 실제 표면거칠기

기계의 진동, 절삭공구의 예리함 정도 그리고 Chatter와 같은 절삭 가공에서의 다른 요인들의 불안정성 등은 이론적 표면 거칠기와 실제 표면거칠기를 다르게 한다. 실제로 스피들의 진동이나 절삭공구를 지지하고 있는 슬라이드의 진동은 가공된 표면에 영향을 미친다.

절삭공구의 예리함도 최소 칩 두께를 발생시킴으로서 재료 제거와 표면거칠기에 영향을 미친다. 절삭공구의 예리함과 관련된 가공응력은 제품의 변형을 야기 시킨다. 이 현상은 예리한 공구로 절삭가공을 하여 매우 작은 절삭 깊이를 가지고 있을 때 전체 절삭 에너지의 중요한 부분이 된다. 이러한 변형의 결과로 가공된 표면은 절삭 진행과 탄성응력을 제거하기 위해 다시 복원한다. 최소 칩 두께는 절삭공구의 완벽한 실행 조건에서 제품이 제거되어질 수 있을 때 가장 작은 재료 두께로 명시할 수 있다. 최초의 표면 파고와 절삭공구 인선형상은 D/T 절삭가공의 표면특성과 연관이 있다.

일반적으로 표면거칠기는 주절인각이 작을수록 향상되나 너무 작아지면 배분력이 증대하고, 공구와 가공물간의 진동이 발생하여 오히려 악화시킬 수 있으며, 공구의 인선반경에 역비례 하여 반경이 클수록 표면거칠기는 향상된다. 정밀절삭에서 표면거칠기를 좋게 하려면 이송을 작게 하고 절삭속도를 크게 하는 것이 유리하다.

2.3 AFM에 의한 초정밀 가공면의 측정

초정밀 가공에서 측정은 필수적인 의미를 갖는다. 이는 초정밀 가공의 실현을 위해서는 원하는 가공정밀도를 확인검증할 수 있는 측정 기술이 반드시 확보되어야 한다는 상황적 요구를 뜻한다. 측정기술이 확보되지 않아 측정할 수 없는 가공정밀도는 아무리 훌륭한 가공법이 있다하더라도 공업적인 용도를 목적으로 반복적으로 구현할 수 없다는 실용적 한계의 의미로 해석된다.

원자현미경 (AFM: Atomic Force Microscope)은 기본적으로 수 나노 크기의 끝을 가진 미세 탐침을 시료 표면에 주사시켜 표면의 형상을 나노 스케일의 해상도로 측정하는 표면 형상화 기술이다. 이 기술에서 탐침과 시료 표면간의 힘을 측정하고 일정하게 유지시키는 것이 매우 중요하다. Fig. 2.7은 원자현미경의 측정 원리를 도식한 것이다.

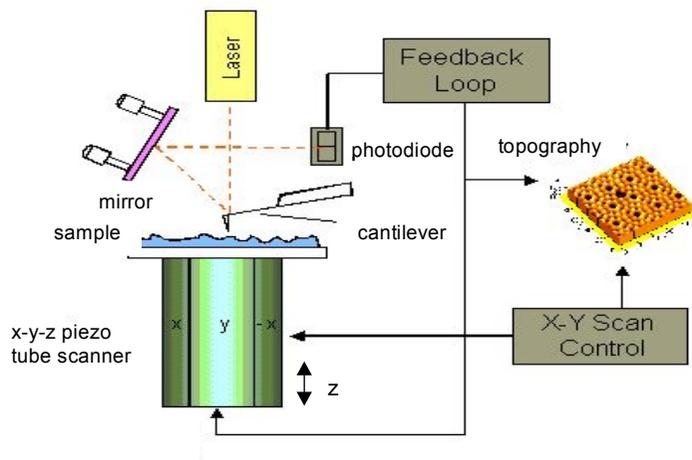


Fig. 2.7 Principle of AFM equipment

전자현미경이 진공에서만 작동되고 전기적 부도체인 시료는 볼 수 없다는 것에 비해 원자현미경은 대기 중에서도 사용이 가능하고, 물체의 형상뿐만 아니라 시료의 전기적, 자기적, 물리적 특성 등도 알아 낼 수 있어서 반도체는 물론 정밀화학, 분자 생물학, 콤팩트나 자기 디스크, 광자기 디스크 등 각종 연구와 산업 분석 용으로 활용이 급증하고 있다.

원자현미경은 제1세대인 광학현미경과 제2세대인 전자현미경 다음의 제3세대 현미경으로 자리를 잡아가고 있으며, 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자현미경의 배율이 최고 수십만 배인데 비해 원자현미경의 배율은 최고 수천만 배로서, 개

개의 원자를 관찰할 수 있다. 전자현미경은 수평방향의 분해능은 원자 단위이나 수직방향의 분해능은 훨씬 떨어져 개개의 원자를 관찰할 수 없지만 원자현미경의 수직방향 분해능은 수평방향보다 더욱 좋아서 원자 지름의 수십 분의 일(0.01 nm)까지도 측정할 수 있다.

원자현미경의 탐침은 전자현미경의 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 마이크로 머시닝으로 제조된 Cantilever라고 불리는 작은 막대를 쓴다. Cantilever는 길이가 100 μm , 폭 10 μm , 두께 1 μm 로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어져 있으며, 끝 부분에는 뾰족한 바늘이 달려있다. 이 바늘의 끝은 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하여 탐침을 시료 표면에 접근 시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나(인력) 밀치는 힘(척력)이 작용한다. 이러한 탐침은 시료의 종류에 따라 접촉식과 비접촉식으로 구분하여 사용한다. 접촉식은 탐침이 시료 표면을 좌우로 주사할 때 Cantilever는 표면의 높낮이에 따라 아래위로 휘뿐만 아니라 탐침과 시료 표면사이의 수평 마찰력에 의해 옆으로 비틀리게 되고 그 비틀리는 정도는 Cantilever에서 반사되어 나오는 레이저 광선의 수평성분 각도에 비례하므로 쉽게 측정될 수 있다.

접촉식 탐침이 시료의 표면과 접촉했을 때 Cantilever는 시료의 표면에 수직하게 반발력을 받으며, 이러한 반발력은 시료와 탐침 끝에 있는 원자사이의 거리가 매우 가까울 때만 작용하고 거리에 따라 그 힘의 크기가 변하게 된다. 따라서 시료 표면에 원자 또는 분자들의 결합을 파괴할 수 있을 정도의 힘이 인가되면 측정하는 동안 시료가 손상되거나 표면의 형상이 변화되어 원래 표면형상을 측정하기 어렵기 때문에 Cantilever의 스프링 상수 값 k 를 0.01~0.05 N/m 로 작게 하여 탐침이 시료표면을 지나갈 때 받는 힘의 대부분이 Cantilever가 휘어짐으로 나타나 시료의 변형을 상대적으로 줄일 수 있게 한다.

그러나 부드러운 시료인 경우는 Cantilever에 인가하는 힘을 낮추고 이미지를 향상화하기에는 기술적인 한계가 있기 때문에 비접촉식 탐침을 사용한다. 비접촉식 탐침은 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01 nN 정도로 시료에 인가하는 힘이 접촉식 탐침에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료 측정에 적합하고 탐침의 수명도 높일 수 있다. 그러나 원자간 인력의 크기가 너무 작아 Cantilever가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 Cantilever를 고유 진동수 부근에서 기계적으로 진동시켜 시료표면에 접근하게 되면 원자간 인력에 의해 고유 진동수가 변하게 되는데 이때 생긴 진폭과 위상 변화를 이용하여 측정한다. 원자간 상호 작용하는 힘은 시료의 전기적 성질에 관계없이 항상 존재하므로 도체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 관찰할 수 있다.

2.4 초정밀가공 이론

초정밀 가공(Ultra precision machining)이라는 것은 특별한 조건이 만족되는 때에만 달성되는 최고의 정도를 실현하는 가공이라고 정의하고 있는데 이 정의에서 보면 초정밀 가공으로 실현되는 최고의 정도는 일정하게 정해져 있는 것이 아니라 그 시대의 기술 수준에 따라 변화하게 되었는데, 현재의 시점에서 초정밀 가공은 가공물의 치수 및 형상 정밀도 $0.1\mu\text{m}$, 표면거칠기 $0.01\mu\text{m } R_{\text{max}}$ 또는 그 이하를 말하고 있다.

초정밀 가공방법 중에서도 가장 많이 활용되는 가공방법이 초정밀 절삭가공인데, 모든 기계 부품들의 90% 이상이 절삭가공에 의해 다듬어지고 있다고 한다. 이 절삭가공법은 공구의 끝이 매우 예리하고 마모가 매우 적은 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 공구 움직임에 공작물에 그대로 전사시켜 가공하는 방법으로, 연마입자를 이용한 래핑이나 폴리싱 가공에 비해 가공비용을 줄이고, 다량가공과 정밀도 향상 그리고 부품의 안정화를 이룰 수가 있는 장점이 있다.

초정밀 가공은 기본적으로 창성 운동에 의해서 가공을 함으로 절삭기계의 정밀도가 가공표면에 직접 옮겨간다. 따라서 공작기계의 정밀도 특히 운동정밀도가 요구되는 가공품의 정밀도를 실현시키는 것이 극히 중요한 함수가 된다. 또 절삭 가공 중 공구와 공작물 사이의 상대적인 위치와 운동 관계를 완벽하게 하기 위해서는 공작기계의 정적, 동적, 열적 변형을 억제해야 하는 것이 필수 요건이 된다.

초정밀 가공은 주로 단결정 다이아몬드 공구를 사용하는 초정밀 절삭(UPMC: Ultra Precision Machining Cutting), 초정밀 Grit으로 된 다이아몬드 휠로 하는 초정밀 연삭, 극소한 Grit을 이용하는 초정밀 폴리싱 등으로 분류할 수 있으며, Diamond 공구에 미소한 초음파 진동을 가해 줌으로서 Stainless강이나 열처리한 강철의 초정밀 절삭이 가능한 초정밀 초음파 진동 절삭법, 초미세 Grit diamond wheel을 연속 전해 Dressing 시키는 방법 등이 개발되어 사용되고 있다.

1970년대부터 복잡한 형상의 광학렌즈를 제작하기 위해 Diamond turning 연구가 시작되었고, 이에 따른 측정기술의 발전과 함께 초정밀 가공을 가능하게 하기 위한 고정도, 고강성의 절삭 가공 기계를 개발하여 구성인선(Build-up edge)이 발생하지 않은 예리한 다이아몬드 공구를 사용한 절삭가공에 의해서 고도의 형상 정밀도와 매우 정밀한 표면거칠기를 가지는 부품을 얻을 수 있게 가공하는 기술을

초정밀 Diamond 절삭 가공이라 하며 초정밀 가공기술은 미국의 군수산업에서 초정밀스핀들, 초정밀이송기구의 발명과 그것을 이용한 공작기계의 발달과 더불어 발달되었다. 초정밀가공은 nm 단위의 정밀도와 표면을 얻어야 하기 때문에 공작기계의 각 요소가 근본적으로 종래 공작기계와 다르며 정밀도는 $0.2\mu\text{mPV}$, 표면은 0.2 nm 단위에 도달하고 있다.

일반적으로 기계정밀도는 실제 가공된 결과에 의해 평가하게 되지만, 기본적으로 기계의 구조가 정밀도를 낼 수 있도록 볼스크루, 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 요소로는 주축의 진동, 각축의 진직도, 각축의 위치결정도이며, 이에대한 초정밀급기계와 정밀급기계에 대하여 Table 2.1 과 같이 비교하였다.

또한, 기본적인 기계구성요소가 설계단계에서부터 차별화 되어야 하며, 제작 및 실 사용 시에서도 주변환경을 고려하지 않으면 기계가 가지고 있는 본래의 성능을 발휘할 수 없게 된다. 초정밀급 기계와 정밀급 기계에 대한 구조적 요소부품을 비교를 Table 2.2에 도시 하였다.

Table 2.1 Comparison accuracy of test turning center

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

Table 2.2 Comparison components of test turning center

Description	Precision cutting grade	Ultraprecision cutting grade
Spindle bearing	P1 ~ 3 \pm 1.0 μ m	P0 \pm 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

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

AFM을 사용한 초정밀절삭 가공면의 평가를 위하여 알루미늄 시험편을 이용하였다. 실험에서 사용된 가공기계는 국내 H사에서 시작품으로 최근 개발한 Nano급 초정밀선반을 사용하였다. 실험기계는 내장형 주축모터를 채용하여 10,000 rpm 회전이 가능하고, M64L CNC시스템에 의해 최소설정단위 10nm급 제어장치를 장착시킨 국내 산업현장에서 소형부품의 보급형 정밀가공용 기계로 제작되었다. 기계의 외관과 세부사양을 Photo. 3.1, Table 3.1에 도시하였다.

평가를 위한 시험편의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 레이저 조절변환기에 의해 넓은 범위의 측정이 가능하고, 컴퓨터에서 신호를 받아 데이터를 처리하기 때문에 한 번의 측정으로 다양한 파라메타를 제공할 수 있는 Photo. 3.2와 같은 Rank Taylor Hobson사의 촉침식 표면 거칠기 측정기(Taylsurf)를 사용하였다. 이 측정기는 다이아몬드 촉침에 의한 표면 거칠기의 수직방향 측정범위는 8mm이며, 분해능은 3.2nm, 정확도는 200mm/0.125 μ m이고, 측정 가능한 파라메타는 R_a , R_{max} (R_t), R_z , R_p , R_v , R_k 등이며 측정 시 사용되는 필터는 ISO, PC, No filter로 발생할 수 있는 오차가 3.2nm 이내이고, 컷오프 값은 0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8, 25에서 자유롭게 선정이 가능하다. 특히 측정 시 측정에 대한 오차를 줄이기 위해 공작물의 형상에 따라 Convex, Concave, Straight, Multiple 등으로 다양하게 기준 형상을 선정할 수 있는 것이 특징이다. 표면 측정기의 세부사양은 Table 3.2와 같다.



Photo. 3.1 Ultra-precision turning center(H-M64L CNC)

Table 3.1 Specification of testing machine

Description	Specifications
Model name	UPL II
Max. spindle speed	20,000r.p.m
N.C system	Mitsubishi
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



Photo. 3.2 Surface roughness tester (Taylsurf PGI 800)

Table 3.2 Specification of roughness tester

Description	Specification
Manufacture	Rank talyor Hobson U.K
Model name	Form Taylsurf PGI 800
Accuracy	200 mm/ 0.125 μm

인조다이아몬드 공구의 인선마모를 평가할 때 인선 형태와 인선의 반경을 구분하여 평가하였다. 형태측정에는 금속현미경을 반경측정에는 공구현미경을 사용하여 공구마모현상을 측정하였다. Photo. 3.3은 인선형태 측정에 사용된 금속현미경, Photo. 3.4는 절삭인선 반경측정에 사용된 공구현미경이다.

인선형태 측정에 사용된 금속현미경은 일본의 Nikon사 Optiphot-M으로. 접안렌즈가 x10, x15이고 대물렌즈가 x5, x10, x20, x40, x60, x100로 구성되어 있어 측정배율은 x50~x1500이며 공작물을 지탱하는 테이블의 크기가 180mm x 140mm로 가로축으로 210mm 세로축으로 45mm의 이송이 가능하다.

인선반경 측정에 사용된 공구현미경(Tool maker's microscope)은 일본의 Topcon사 Model TUM-170EH으로 대안렌즈가 x10이고 대물렌즈가 x1, x3, x5, x10, x20이며 사용 배율은 x10~x200 이다. 작업 테이블이 1초의 정확도로 360도 회전하며 가로 170mm, 세로 75mm의 이송이 가능하고 이송 정확도는 0.5mm이다. Table. 3.3은 실험에 사용된 측정 장비의 세부 사양이다.



Photo. 3.3 Metallurgical microscope



Photo. 3.4 Tool maker's microscope

Table. 3.3 Specification of experimental equipment

Description	Specification
Metallurgical microscope	Model: Optiphot-M Maker: Nikon (Japan) Magnification: x50~x1500 Photograph: Polaroid film
Tool maker's microscope	Model: TUM-170EH Maker: Topcon (Japan) Magnification: x10~x200 Measuring range: 170mm × 75mm

절삭 가공한 시편을 AFM(Atomic Force Microscope)에서 측정하기 용이하도록 적절한 크기로 제작하기 위한 장치로는 Photo. 3.5와 같은 Abrasive cutting machine을 사용하였으며, 철, 비철금속, 비금속 등 모든 부품의 절삭이 가능한 장치로 Table 3.4과 같이 스피ن들의 회전수가 3440rpm, 절삭 속도는 45m/s, 절삭 깊이가 75mm까지의 사양을 가지고 있다.



Photo. 3.5 Abrasive testing machine

Table 3.4 Specification of abrasive testing machine

Description	Specifications
Manufacture	Struers Denmark
Model name	Discotom-2
Motor power	2.1 KW (3 HP)

실험에서 피치 내의 변화를 알아보고, 절단한 미세구조를 관찰하기 위한 목적으로 사용된 AFM(Atomic Force Microscope)은 Digital instruments사에서 제작한 Multi-mode Bio-scope 모델로 Photo. 3.6와 같으며 세부 사양은 Table. 3.5에 나타내었다.



Photo. 3.6 Atomic Force Microscope

Table 3.5 Specification of atomic force microscope

Description		Specification
X-Y Scanner	Scan size	$100 \times 100 \mu\text{m}$
	Resolution	0.15nm
Z Scanner	Scan size	$12 \mu\text{m}$
	Resolution	0.05nm
Z Stage	Travel length	30mm
	Resolution	$0.08 \mu\text{m}$
	Max. speed	30,000 steps/sec

3.2 실험방법

기계 가공에 있어서 정밀도에 영향을 미치는 요소 중의 하나가 외부환경인데 실제 기계 자체의 원인보다도 영향을 크게 미치는 경우가 있다. 그러한 문제를 해결하기 위하여 진동이 없고, 항온항습 시설이 갖추어진 장소에 기계를 설치하였다.

실험에 사용한 시험편은 내식성이 강하고, 절삭성이 우수한 알루미늄 소재를 채용하여 외경치수가 $\phi 60\text{mm} \times L31\text{mm}$, 선반의 척에 물림부위 치수가 $\phi 40\text{mm} \times L30\text{mm}$ 로 되도록 3단의 환봉 상태로 10개를 천연 다이아몬드공구로 제작하였으며, Table 3.7은 알루미늄 시험편의 화학적성분이다.

초정밀 가공 실험방법은 미리 준비된 외경이 $\phi 60\text{mm}$ 인 알루미늄 가공소재 10개를 절삭길이 50km씩, 이송속도 = 0.005mm/rev, 절삭속도 = 1000m/min, 절입길이 = 0.005mm 등의 절삭조건에서 건식가공 하였으며 절삭 길이는 50km부터 최대 500km까지 실험하여 결과를 비교하였다.

Table. 3.6 Cutting condition

Cutting condition	
Cutting speed	V=1000 m/min.
Spindle speed	N= 5,300 ~ 10,000 rpm
Feed rate	F=0.005 mm/rev.
Cutting depth	d=0.005 mm (ϕ 0.05mm)
Cutting length	$l_{chip} = 500\text{km}$ (per 50 km)
Material	Al ₆₀₆₁
Material size	ϕ 60 mm
Cutting method	Dry cutting

Table 3.7 Chemical compositions of Al₆₀₆₁

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

표면 거칠기를 표시하는 방법에는 중심선평균 거칠기, 최대높이 거칠기, 10점 평균 거칠기, 자승평균 거칠기 등이 있으나 기계의 부품들은 서로 접촉하여 움직이기 때문에 사용시간이 경과됨에 따라 부품의 표면은 마모가 진행되며, 이때 마모의 진행은 거칠기 곡선의 가장 높은 산에서부터 시작되므로 최대높이 거칠기(R_{max})를 본 실험의 평가방법으로 삼았다. 사용된 표면 거칠기 측정기는 Photo. 3.2와 같으며, 측정기의 촉침이 측정물체의 표면과 접촉하면서 이송하는 평가길이는 컷오프값을 0.8mm로 하여 거칠기 기준길이의 4배 이상에서 평가 되도록 하였다.

측정값은 ISO 필터의 직선면 상태에서 파상도 곡선인 저역 필터를 제거하고 거칠기 곡선인 고역 필터를 통해 주어진 컷오프값 내에서 최대높이 값으로 측정기가 자동 계산하여 나타내도록 하였으며 본 실험에서 평가된 표면 거칠기 값은 시험편을 최소 3회 이상 반복 측정하여 그 중앙값을 선택하였다.

공구의 인선마모상태는 두 가지 방법으로 평가 하였다. 먼저 Photo. 3.3의 금속현미경 배율 100배에서 공구의 절삭인선을 예리하게 세운 후 경사면과 여유면의 교차부분인 절삭인선의 형태를 100km의 절삭주기에 따라 측정하여 공구의 마모상태를 평가 하였다. 공작기계가 이상적으로 운동하고 절삭인선의 윤곽이 가공면에 완전히 전사된다면 공구인선의 거칠기가 가공면의 거칠기를 결정하는 하나의 중요한 인자가 되기 때문이다. 두 번째는 Photo. 3.4의 공구현미경을 이용하여 공구의 절삭인선 반경을 50km의 절삭주기로 측정하여 평가했다. 절삭될 층이 절인에 접근하여 와서 미끄러져 나가면 칩이 되고, 절삭 층으로부터 분리되어 절인 밑으로 유동하면 절인의 반경에 의하여 압축을 받아 가공면이 되기 때문이다.

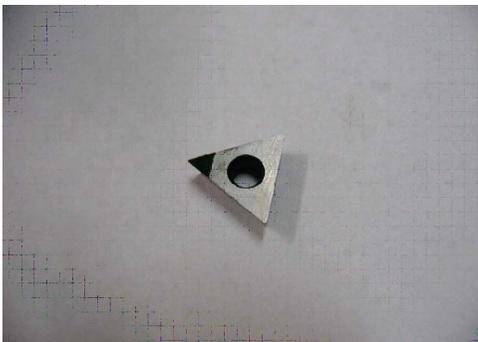


Photo. 3.7 Cutting diamond tool

3.3 AFM 측정에 의한 가공면 특성 평가

표면 거칠기 측정 후 시편을 Photo 3.5의 절단장비를 사용하여 Photo. 3.8과 같이 가로, 세로를 각 10mm 크기로 절단하였다.

AFM(Atomic Force Microscope)에 의한 가공면 표면정밀도 측정은 Scan size를 100 μm 로 선정 촬영한 AFM(Atomic Force Microscope) 3D 사진을 얻고 표면 거칠기 값의 변화에 따라 가공면의 상태를 육안으로 관찰 평가하였다.

100 μm 의 배율치수 선정은 가공속도에 따른 이송량이 관찰될 수 있도록 하기 위하여 두 가지 단계의 조사를 실시하였는데, 먼저 금속 현미경을 x100~x800으로 배율을 높여가며 절삭속도에 따른 이송량을 관찰하였고 그 후 AFM(Atomic Force Microscope)에서 Fig. 3.1~3.3와 같이 20 μm , 60 μm , 100 μm 로 스캔배율 치수를 변화시키면서, 이송량 내에서 발생된 변화를 관찰하였다. 금속현미경에서는 가공속도에 따른 이송량은 명확하게 나타나지만, 저 배율인 관계로 이송량 내에서의 변화를 관찰할 수 없었고, AFM(Atomic Force Microscope)에서는 이송량 내에서의 다양한 변화는 관찰이 가능하나 고배율인 관계로 이송량을 구별하기가 어려웠다. 그래서 다시 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하여 저배율로 이송량을 찾고 이송량 내에서 발생된 가공면의 변화와 가공속도에 의해 발생된 이송량이 사진에서 가장 잘 관찰될 수 있는 100 μm 를 AFM(Atomic Force Microscope) 측정배율로 결정하였다.

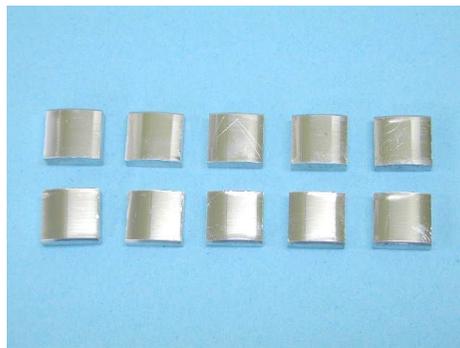
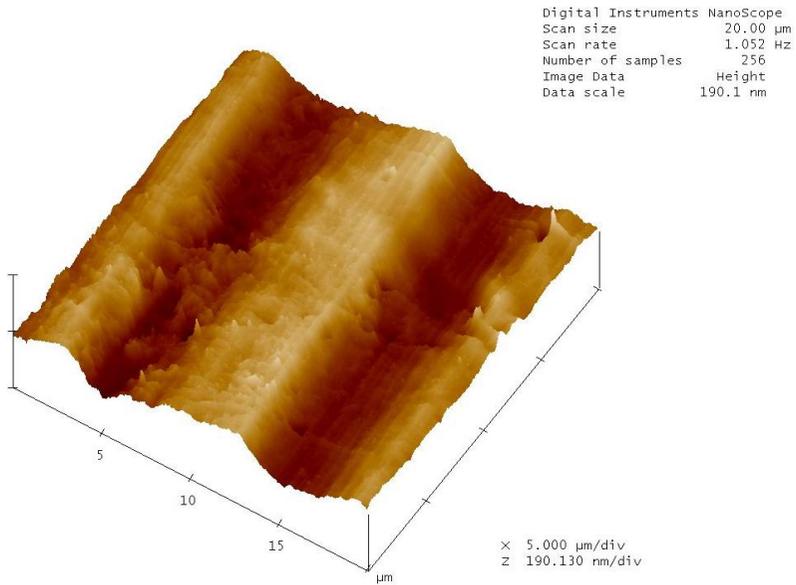
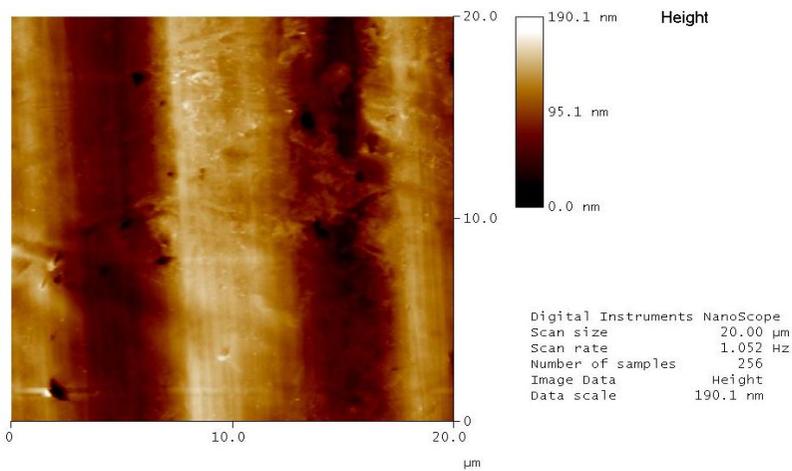


Photo. 3.8 Measured AFM specimens

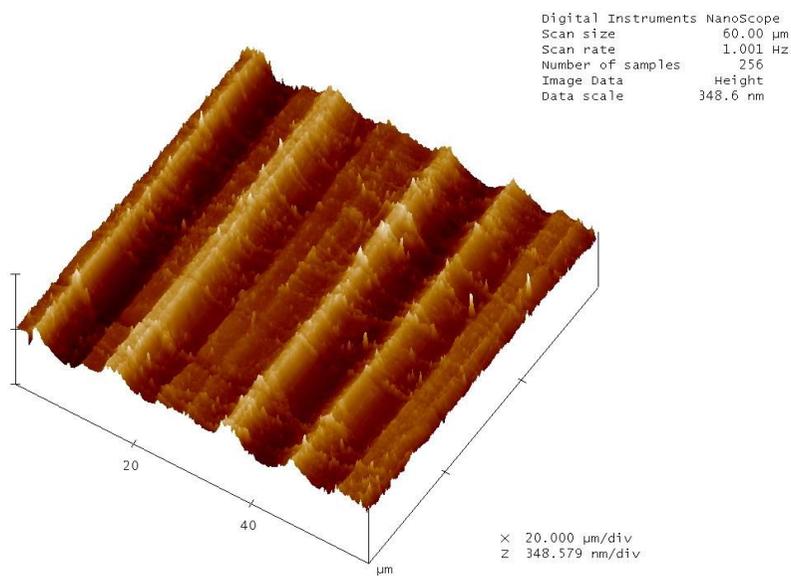


(a) 3 Dimensional surface

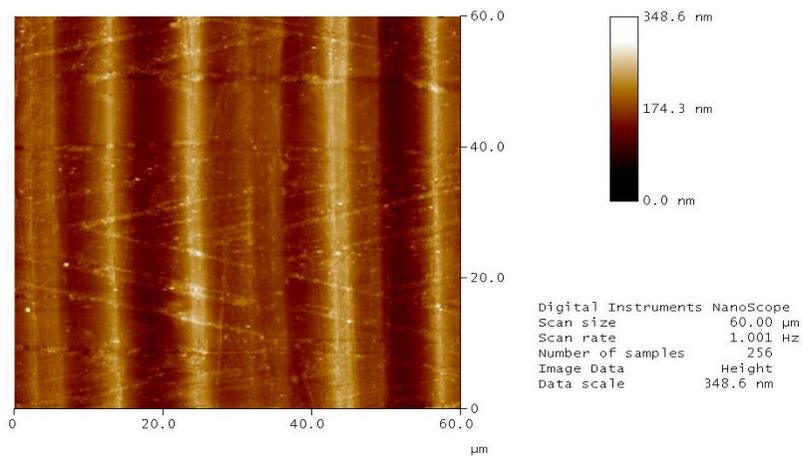


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 3.1 AFM photograph for select magnification (Scan size 20 μm)

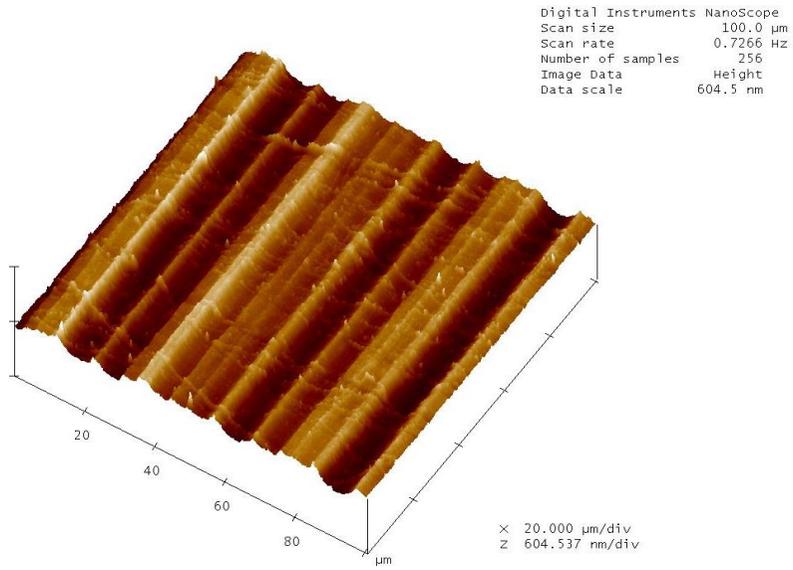


(a) 3 Dimensional surface

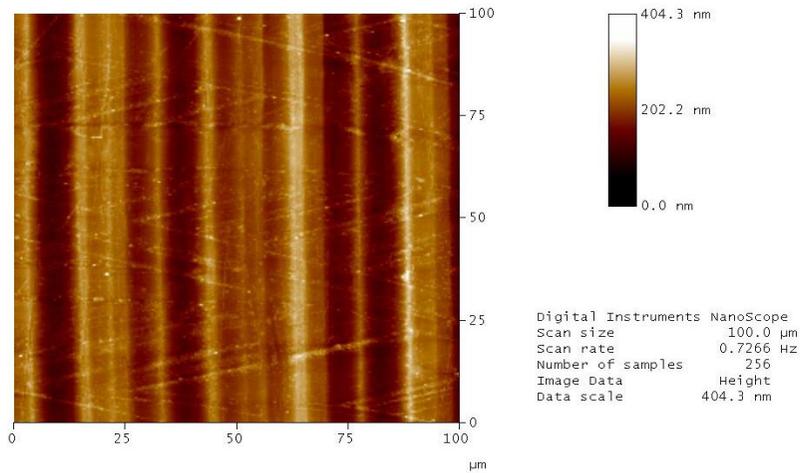


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 3.2 AFM photograph for select magnification (Scan size 60 μm)



(a) 3 Dimensional surface



(b) 2 Dimensional surface

Fig. 3.3 AFM photograph for select magnification (Scan size 100 μm)

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 공구인선 마모현상 고찰

공구의 경사각과 여유각의 형태유지를 목적으로 공구수명과 관련된 인선마모를 평가할 때는 절삭인선의 형태와 반경을 구분 평가하여야 하며, 전단영역에서의 전단, 경사면의 마찰, 절삭 날 선단에서의 분리작용으로 구분된다. 초정밀 절삭가공에서는 절삭날의 인선형상이 가공면의 형성에 영향을 주며, 절삭 깊이가 인선 반경보다 같거나 작을 경우, 절삭 날은 국부적으로 인단에서 음의 경사각으로 절삭되며, 공작물의 일부가 공구의 여유면 쪽으로 밀려들어가 버니싱 작용과 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하게 된다. 이러한 절삭공구의 인선상태와 절삭조건에 상관관계를 알아보기 위하여 금속현미경과 공구현미경으로 절삭인선 상태를 측정 고찰하였다.

먼저 절삭인선의 형태를 측정하기 위하여 500km까지 절삭가공을 하면서 매 100km의 주기마다 금속현미경의 배율을 $\times 100$ 으로 하여 공구의 절삭인선의 형태를 측정하였다. Photo. 4.1은 절삭가공전과 가공 후를 비교한 사진으로 절삭인선형태를 육안으로 살펴보면 절삭가공 전과 후에 대한 윤곽형태에는 약간의 인선탈락과 상면 경사면의 칩 유동에 따른 마찰로 변화된 현상을 관찰할 수 있었다.

성형 연삭된 새 공구임에도 불구하고 절삭인선의 윤곽이 매우 불균일함을 관찰할 수 있었고, 점점 절삭이 진행되어 감에 따라 절삭인선의 윤곽이 다소 변해가며, 특히 상면 경사면은 절삭공구가 마모되어 절삭이 둔화되면서 칩의 유동에 따라 색깔이 변화됨을 관찰할 수 있었다.

Table 4.1과 Fig 4.1과 같이 절삭공구의 인선반경 값의 변화는 절삭 길이 300 km까지는 일정한 값을 나타냈으나, 이후부터는 약간의 증가를 확인하였다. 그러나 일반적인 절삭에서 연속적인 가공작업은 100km이내에서 이루어지므로 천연 다이아몬드 공구에 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.

Table 4.1 Measured nose radius values of cutting tool

Cutting length (km)		0	100	200	300	400	500
Nose radius (mm)	<i>Al</i> ₆₀₆₁	0.204	0.204	0.204	0.204	0.205	0.205

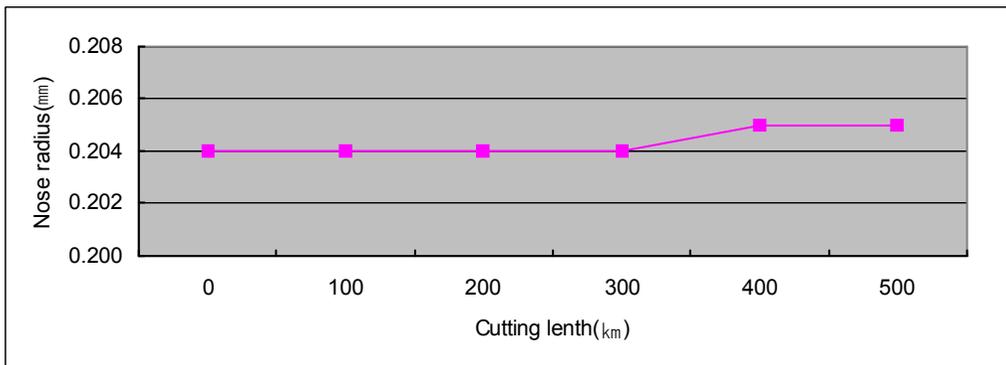


Fig. 4.1 Measured nose radius values of cutting tool

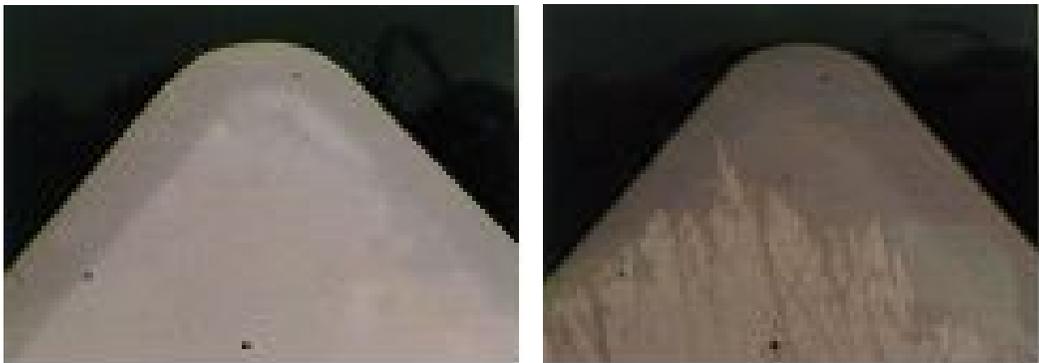


Photo. 4.1. Cutting diamond new tool & used tool

4.2 가공면 표면 거칠기 특성 고찰

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

일반적으로 직선인선공구는 반경 인선을 갖는 공구에 비하여 가공면 거칠기를 양호하게 할 수 있고, 공구의 고정방법에 따라 공구 설치각이 변하여 표면 거칠기를 다르게 할 수 있다. 이선반경이 무한대인 직선인선의 경우 이론적 표면 거칠기는 0이 될 수 있으나, 이론값에 미치지 못하는 절삭도중 공구와 공작물의 상대진동, 기계본체의 불안정 및 주위환경, 공구 설치각의 영향이 작용되기 때문이다.

알루미늄 재료의 축침식 측정기에 의한 표면 거칠기 값의 측정결과를 고찰해 보면, Fig. 4.2와 같이 절삭 길이가 50km 0.2668 μm 에서 150km 0.2908 μm 까지 0.0240 μm 증가되다가 이후 300km에서 0.2460 μm 으로 감소되었으며, 이후 급속 증가되어 500km에서 0.3336 μm 까지 급격히 나빠짐을 확인할 수 있다. 이는 새 공구의 성형과정에서 생성된 불균일한 절삭인선 윤곽이 가공 중 가공표면에 전사되어 150km까지 초기 절삭에서는 불량하게 나타나던 것이 가공이 진행되면 거친 인선의 탈락으로 이후 안정된 표면 거칠기로 되돌아오다가 계속 가공 길이가 증가되면 절삭 길이 300km 이후에는 절삭인선 윤곽의 마모가 진행되면서 다시 증가되는 결과로 판단된다.

Fig 4.3~13는 절삭길이 50km에서 500km까지 일반적으로 이용되는 축침식 표면거칠기 측정기를 이용한 측정된 결과로 가시적 상태만으로는 표면상태의 순간적 판단이 난해한 결과로 생각이 되므로 보다 발전된 초정밀 가공면 측정법으로 3D AFM(Atomic Force Microscope)측정결과를 관찰하였다.

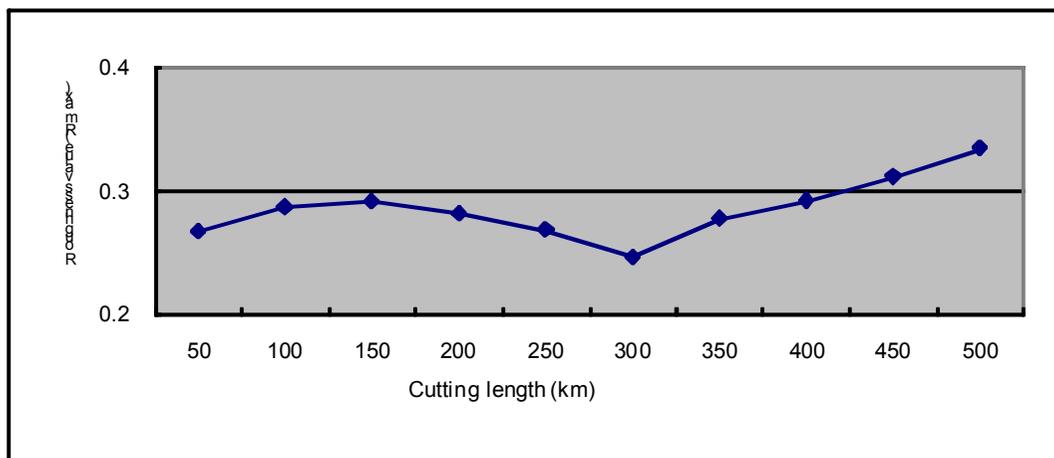


Fig. 4.2 Surface roughness graph of Al_{6061}

Table 4.2 Surface roughness values of Al_{6061}

Cutting length (km)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Roughness value (R_{max})	0.2668	0.2863	0.2908	0.2810	0.2677	0.2460	0.2777	0.2914	0.3108	0.3336

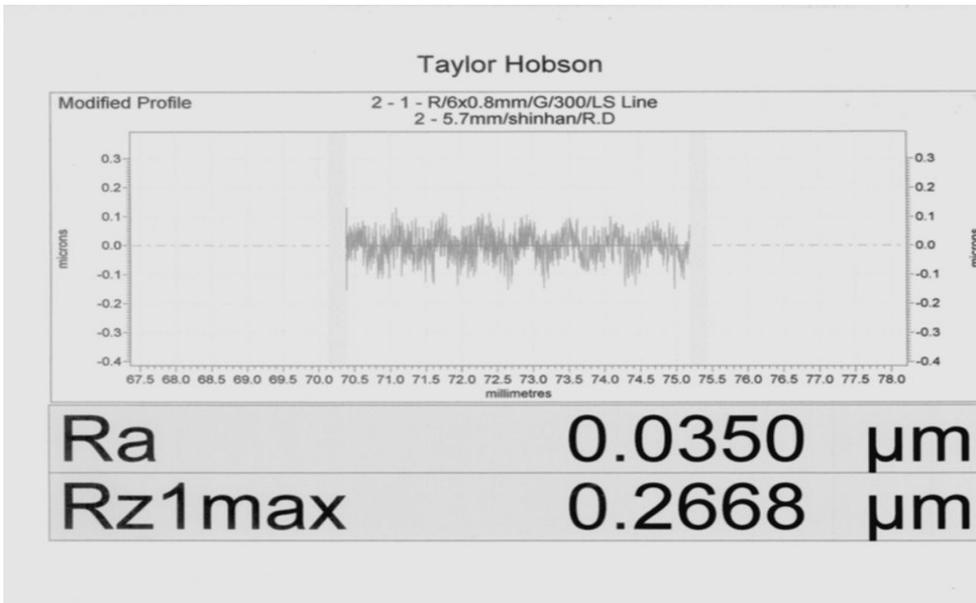


Fig. 4.3 Surface roughness value (Al_{6061} / 50 km Cutting length)

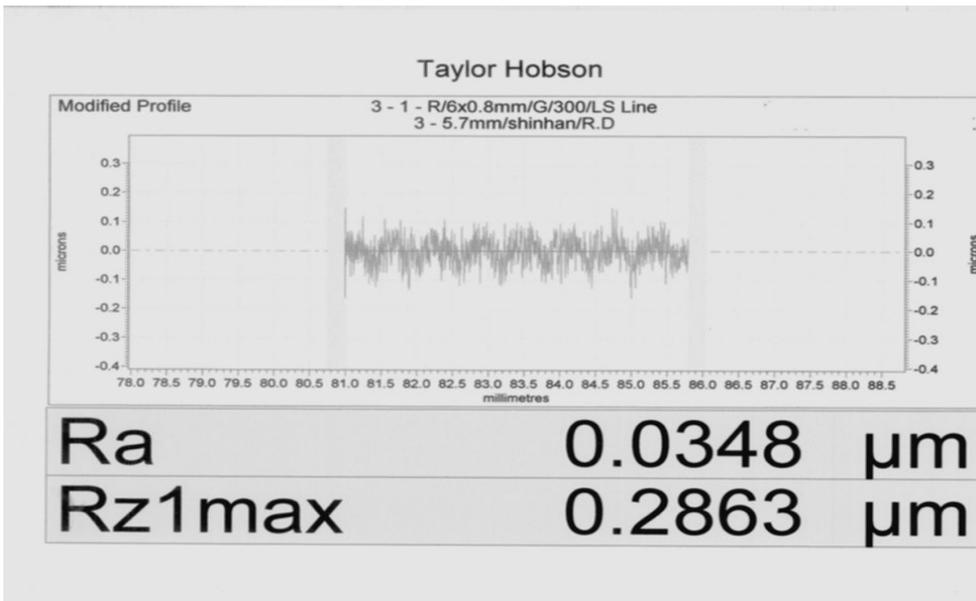


Fig. 4.4 Surface roughness value (Al_{6061} / 100 km)

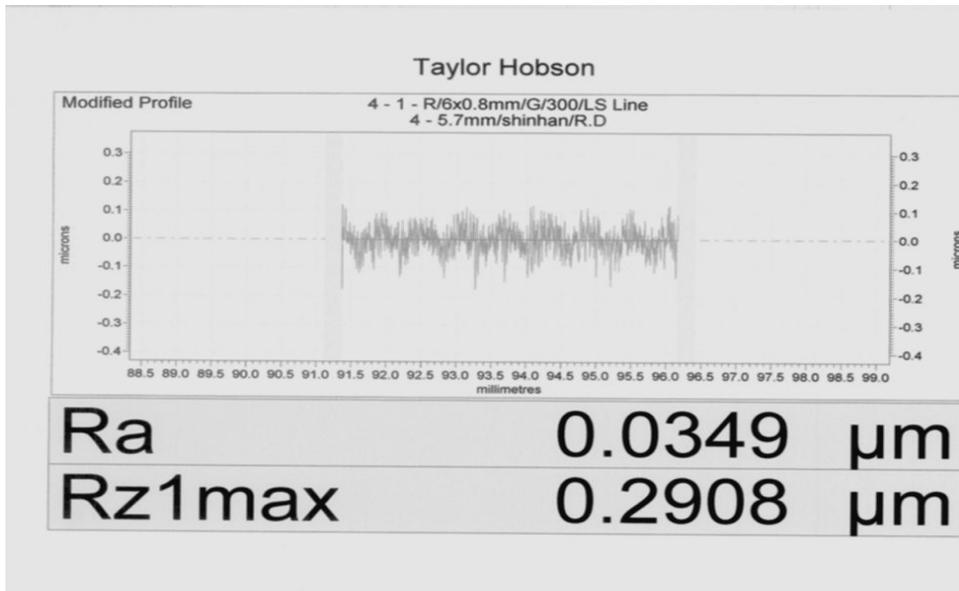


Fig. 4.5 Surface roughness value ($A_{6061}/150\text{ km}$)

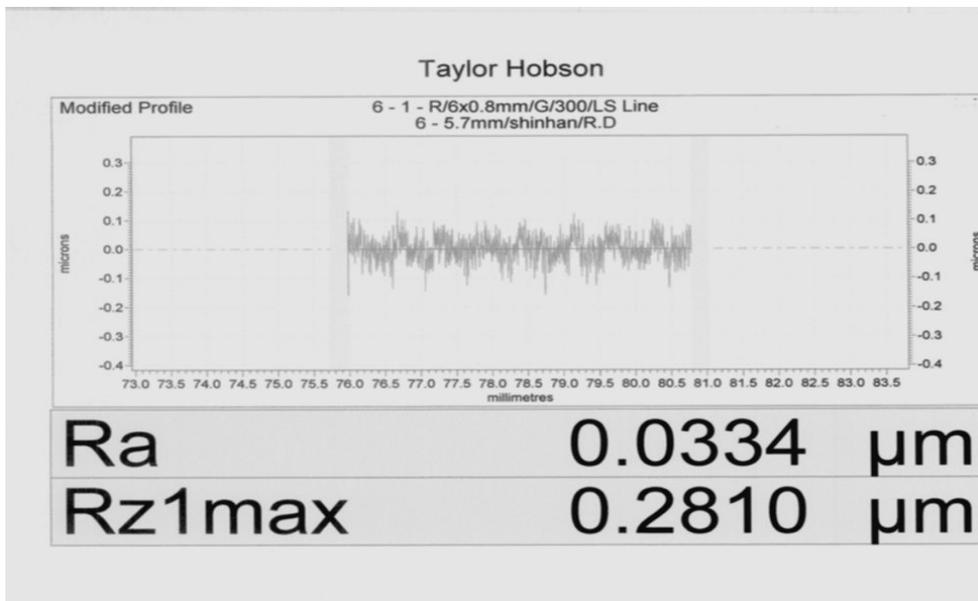


Fig. 4.6 Surface roughness value ($A_{6061}/200\text{ km}$)

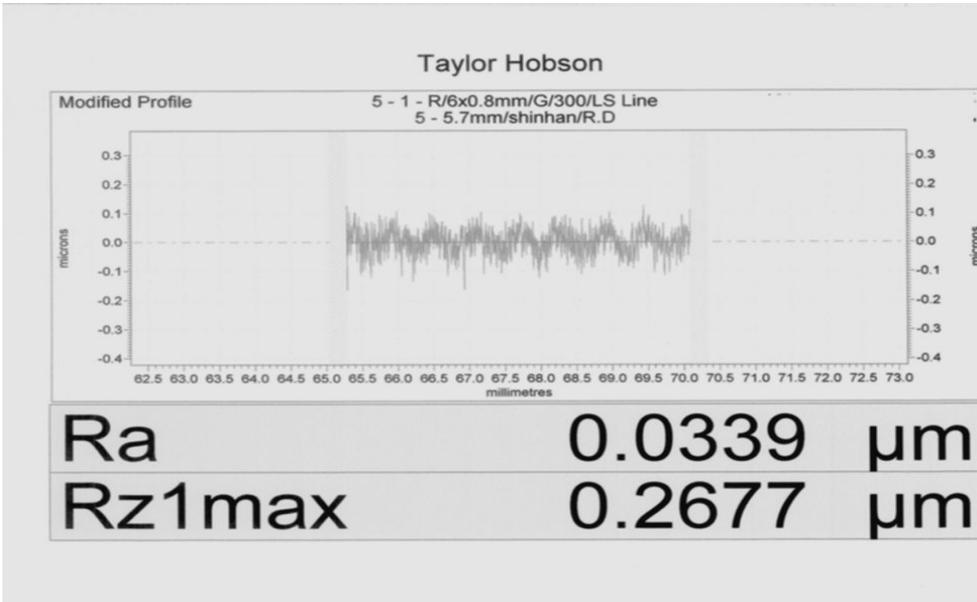


Fig. 4.7 Surface roughness value ($AI_{6061}/250\text{ km}$)

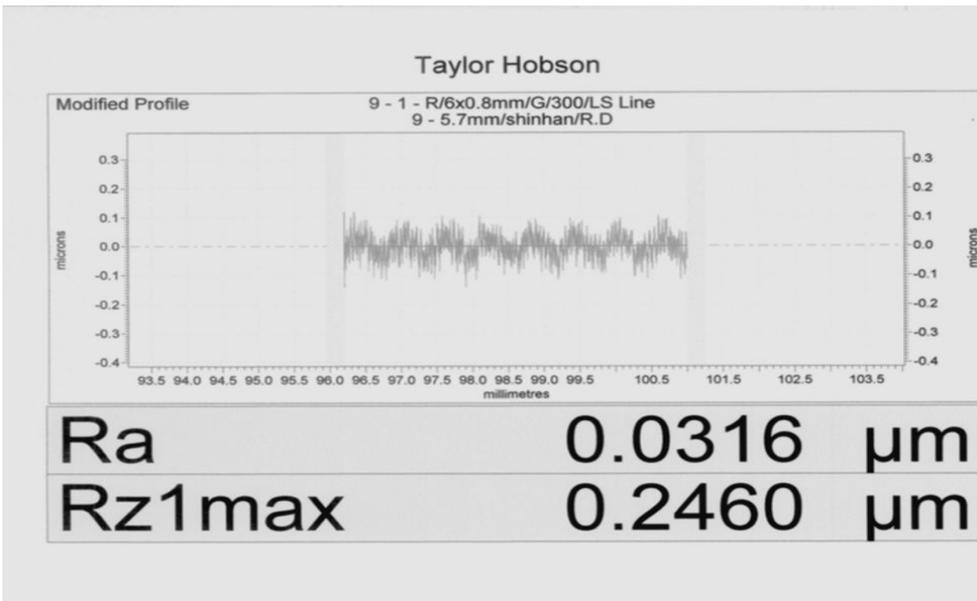


Fig. 4.8 Surface roughness value ($AI_{6061}/300\text{ km}$)

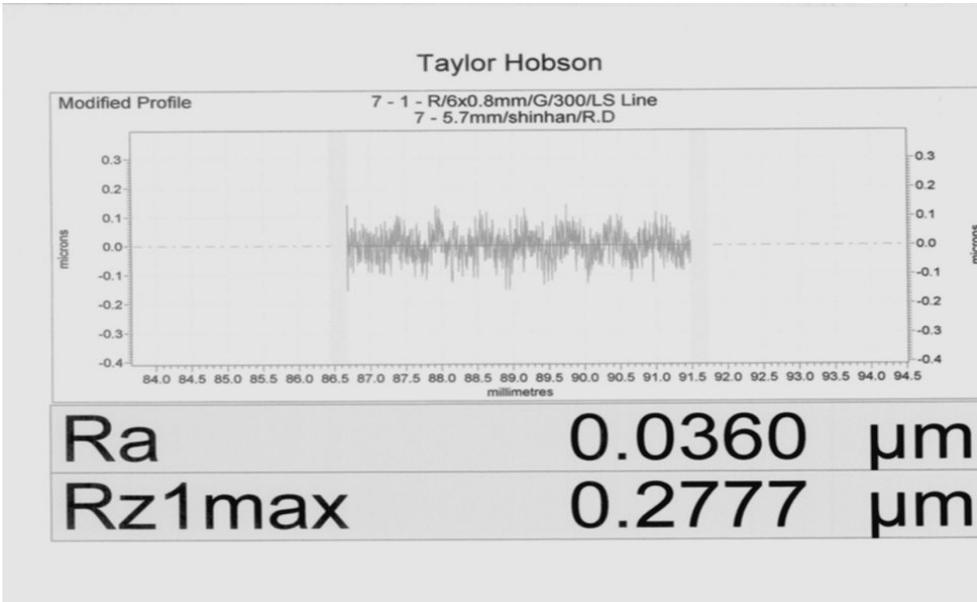


Fig. 4.9 Surface roughness value ($AI_{6061}/350\text{ km}$)

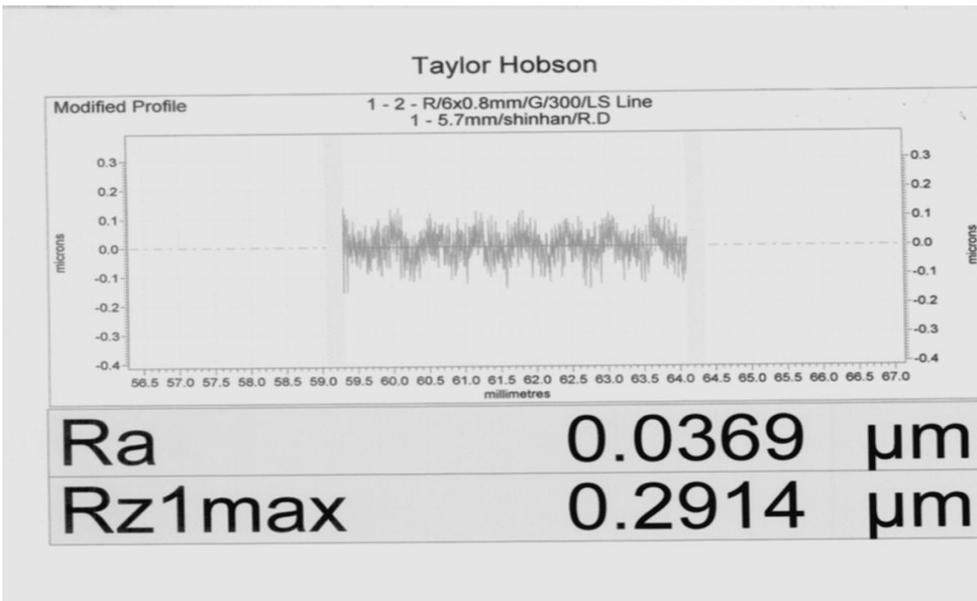


Fig. 4.10 Surface roughness value ($AI_{6061}/400\text{ km}$)

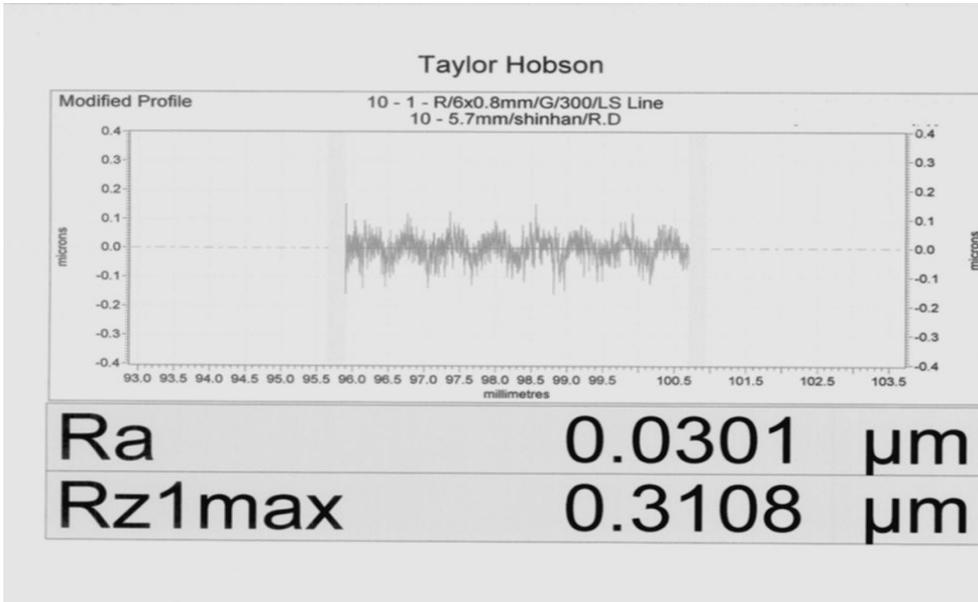


Fig. 4.11 Surface roughness value (*Al*₆₀₆₁/ 450 km)

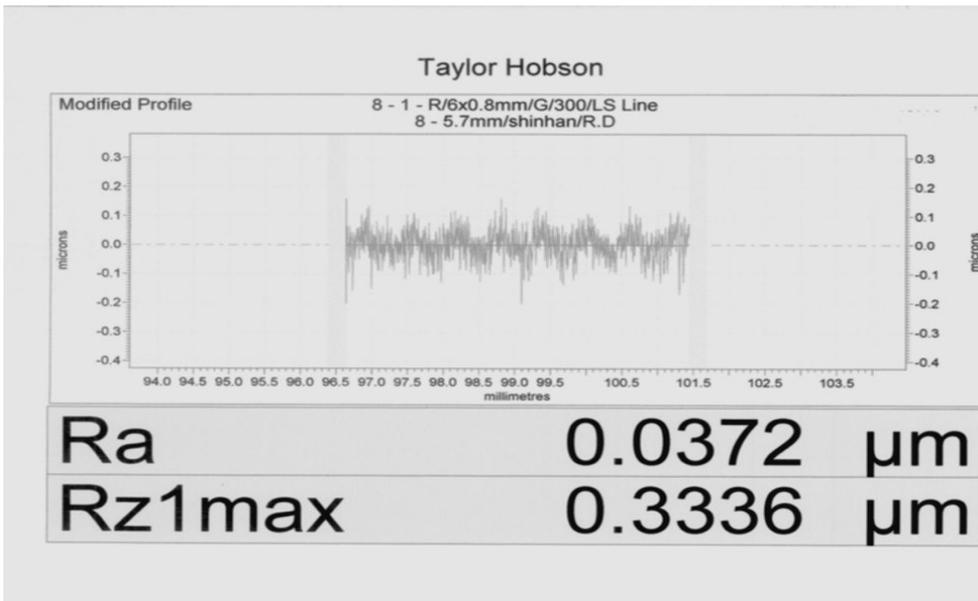


Fig. 4.12 Surface roughness value (*Al*₆₀₆₁/ 500 km)

4.4 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰

AFM 사진을 관찰해 보면 이송속도에 따른 이송량은 일정하게 나타나고 있으나 한 피치의 이송량 범위에서 또 다른 크고 작은 굴곡들이 형성되고 있음을 볼 수 있으며, 이러한 현상은 절삭공구의 절삭인선 반경 값의 변화와 인선의 탈락현상에 따른 형태변화로 구분하여 고찰해 볼 수 있다. 먼저 이송량이 일정하게 나타나고 있음은 공구인선의 미세 마모나 형태의 변화가 경미하고 공구의 절삭인선의 반경이 $1\ \mu\text{m}$ 이내에서 일정하게 나타나고 있음을 뜻한다. 반면 한 피치의 이송량 내에서 다양한 형태의 크기로 변화를 보이고 있는 것은 경미하지만 재료 전단과정에서 발생된 절삭인선의 형태변화, 즉 불균일하게 발생된 절삭인선의 탈락이나 마모현상이 절삭면에 전사되어 수행된 실험조건하에서 표면거칠기에 영향을 미치고 있음을 뜻하는 것이며, 그 형태변화의 크기는 절삭 재료에 따라 각각 다르게 나타나고 있는 것으로 확인 되었다

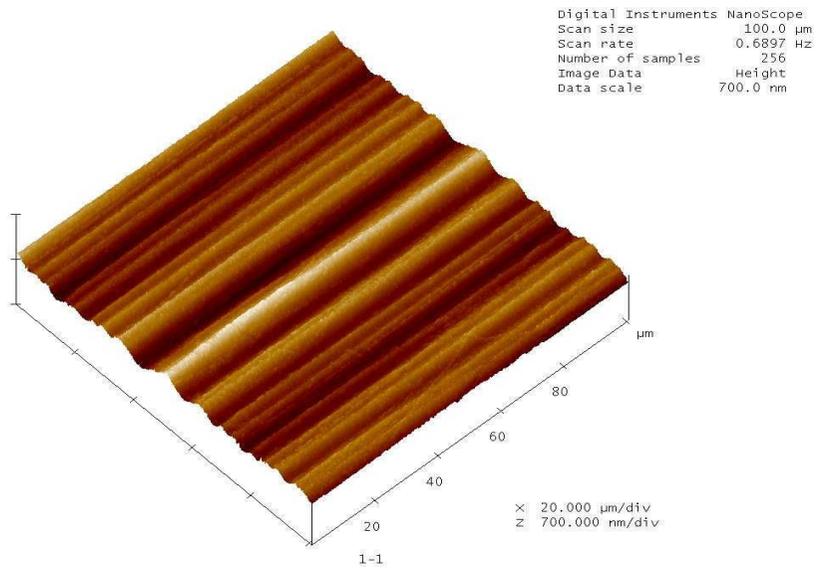
수행된 실험조건에서 절삭 가공된 알루미늄 합금 재료의 표면특성에 대한 현상을 Fig. 4.13~4.22에 나타난 AFM 사진을 통하여 관찰해 보면 전체적으로 이송속도에 따른 이송량은 비교적 뚜렷하고 일정하나 한 피치의 이송량 내에서 크고 작은 다양한 산과 골들이 또 다른 굴곡형태로 생성되어 표면의 형상이 다소 다르게 나타나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.

초기 50 km에서는 이송량 형태로 생성된 표면의 형상이 선명하고 일정하여 표면거칠기가 $0.2668\ \mu\text{m}$ 로 비교적 좋게 나타났으나 절삭길이 100km에서는 일정하던 표면형상이 더 작게 나누어져 불균일하게 되고 150 km에서는 다시 통합되어 큰 이송량 형태의 표면을 만들며, 표면거칠기가 $0.2908\ \mu\text{m}$ 로 약 9.3% 정도 더 나쁘게 나타났다. 이는 미세하지만 절삭공구의 구성인선이 탈락되거나 마모된 상태로 시편의 절삭면에 전사되어 표면거칠기의 변화에 $0.025\ \mu\text{m}$ 의 범위에서 직접적인 영향을 미치고 있음을 뜻한다. 따라서 절삭인선의 탈락이나 마모에 따른 불균일한 형태변화는 표면거칠기에 큰 영향을 미치고 있는 주요 인자임을 확인할 수 있었다. 이후 가공이 진행되어 절삭길이가 계속 증가되면 표면형상은 다시 작게 나누어지고 300km에서는 선명하고 매끄럽게 일정한 표면형상을 만들며, $0.2460\ \mu\text{m}$ 로 초기보다 약 7.5% 가까이 좋아지나 절삭길이 500km에서는 굴곡형태가 무더지고 표면형상이 불균일해지며, 표면거칠기는 $0.3336\ \mu\text{m}$ 로 다시 25.4% 정도 나쁘게 나타났고 있음을

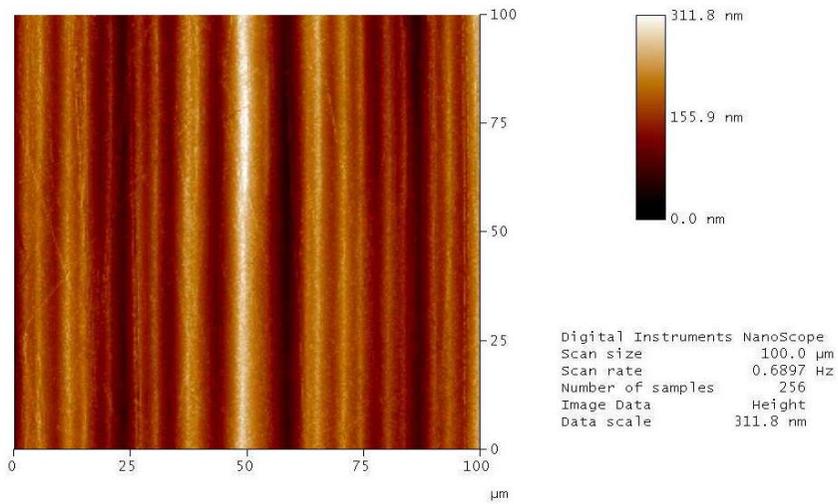
확인하였다.

이는 새로운 공구에 의한 초기 절삭가공에서 미세한 윤곽의 탈락 현상으로 절삭길이 200km까지 평균 2.5%의 비율로 표면거칠기가 나빠지다가 계속해서 일정량의 절삭길이가 증가되면 인선의 윤곽이 안정되어 절삭길이 300km까지 평균 1.5%의 비율로 다시 좋아지나 이후 계속해서 가공이 진행되고 절삭길이가 최대 500 km까지 증가되면 마모도 점차 진행되어 평균 2.9% 비율로 또 다시 나빠지고 있기 때문에 판단된다.

그러나 측정값으로 나타난 모든 변화량을 절삭공구에 의한 것으로 볼 수는 없을 것이며, 본 연구에서 생략된 공작기계의 진동이나 강성, 주위환경 등 절삭작용에 미치는 여러 가지 영향이 고려되어 평가되어야 보다 명확한 판단결과를 얻을 수 있을 것이다.

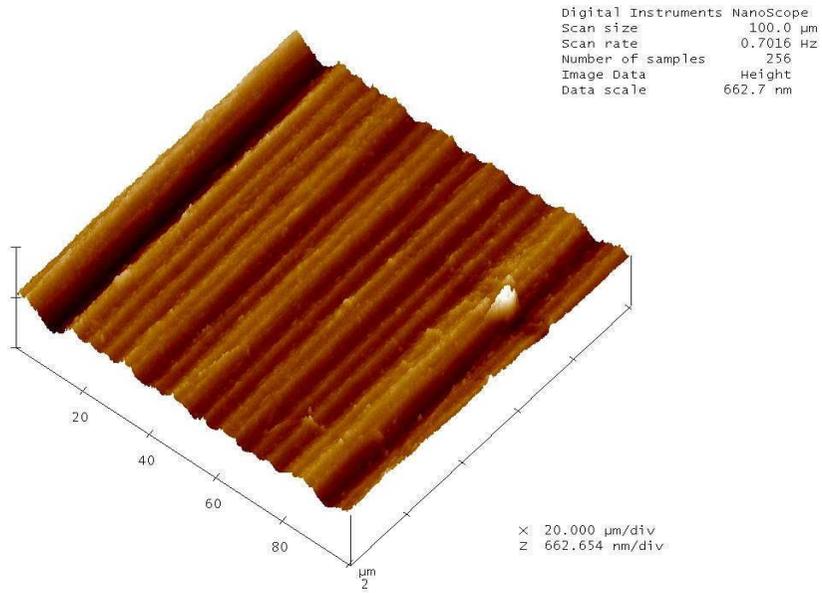


(a) 3 Dimensional surface

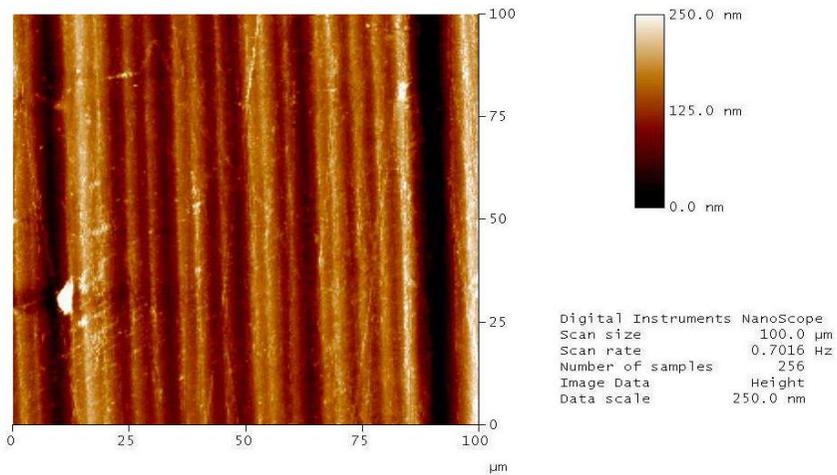


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.13 AFM photo. of cutting surface (AI_{6061} / 50 km Cutting length)

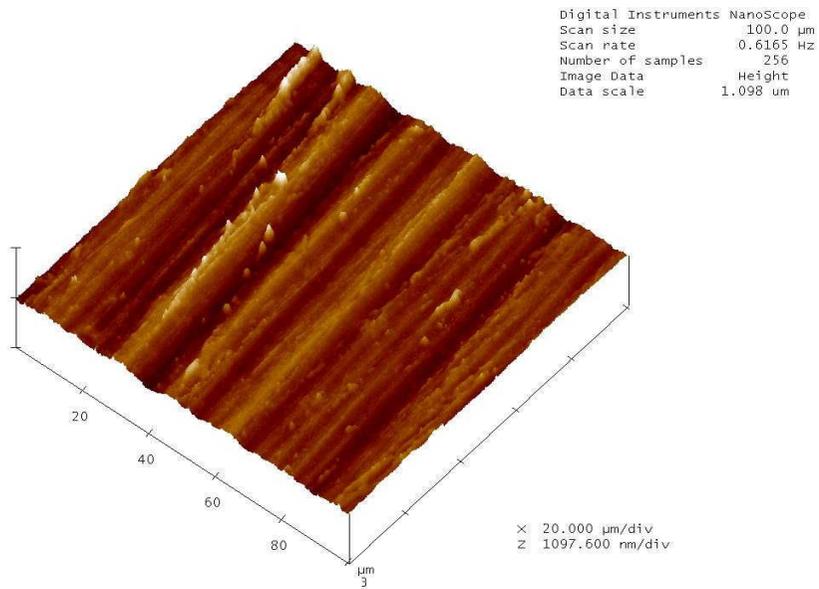


(a) 3 Dimensional surface

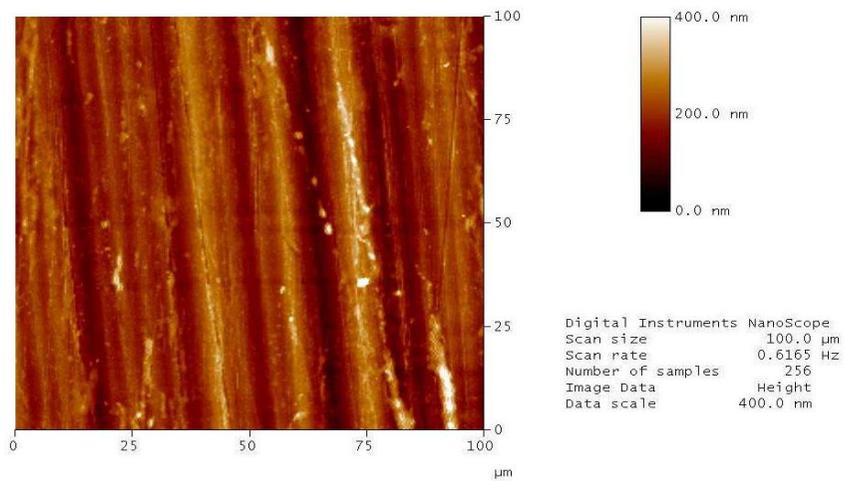


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.14 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/100 \text{ km}$)

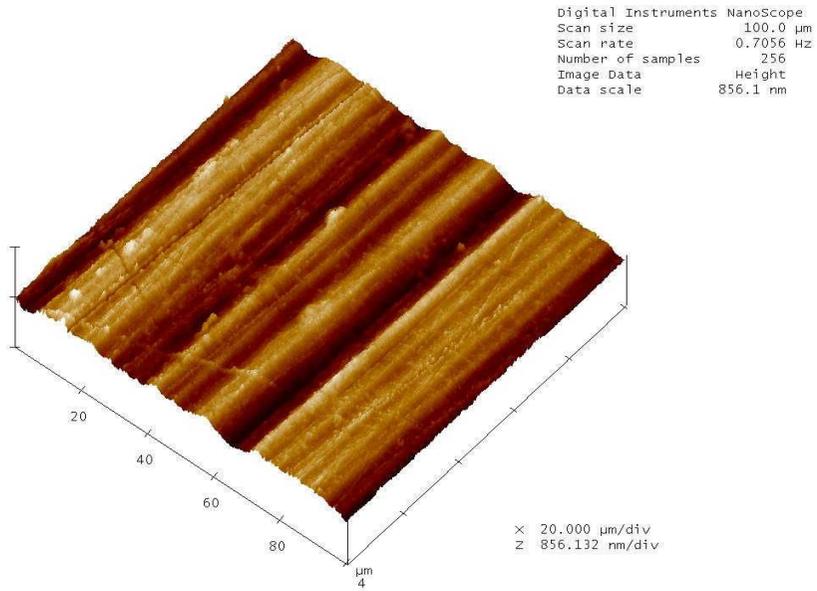


(a) 3 Dimensional surface

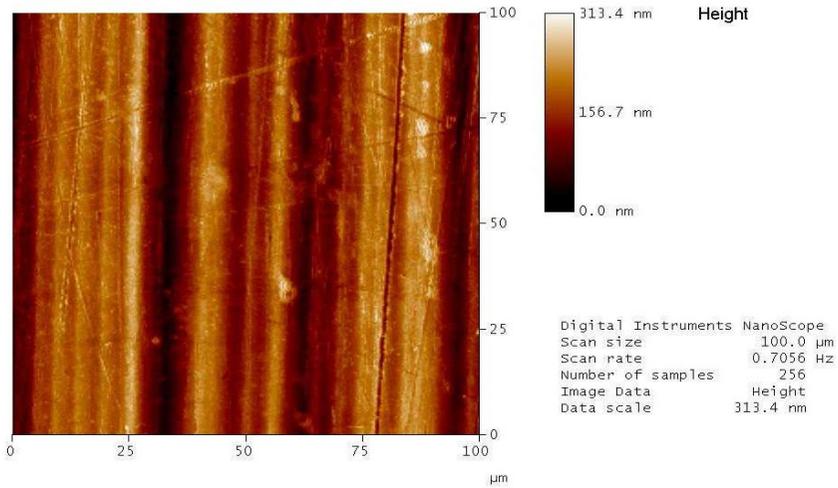


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.15 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/150 \text{ km}$)

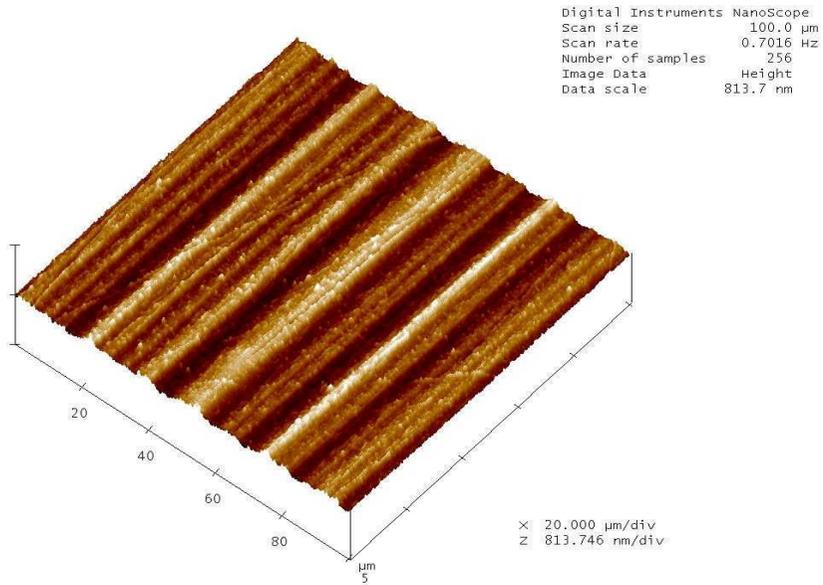


(a) 3 Dimensional surface

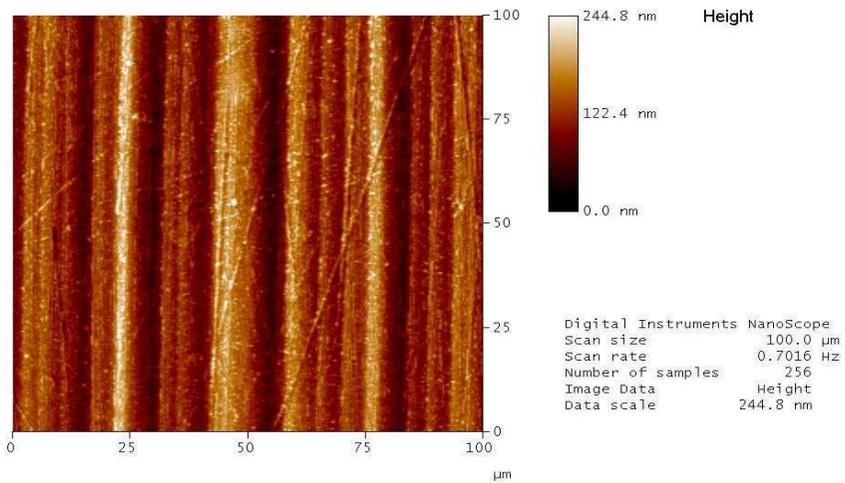


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.16 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/200\text{ km}$)

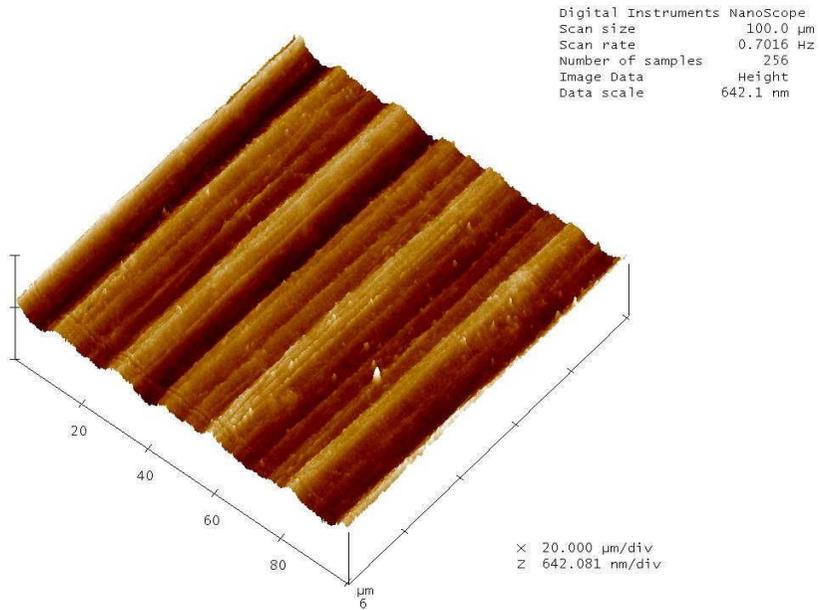


(a) 3 Dimensional surface

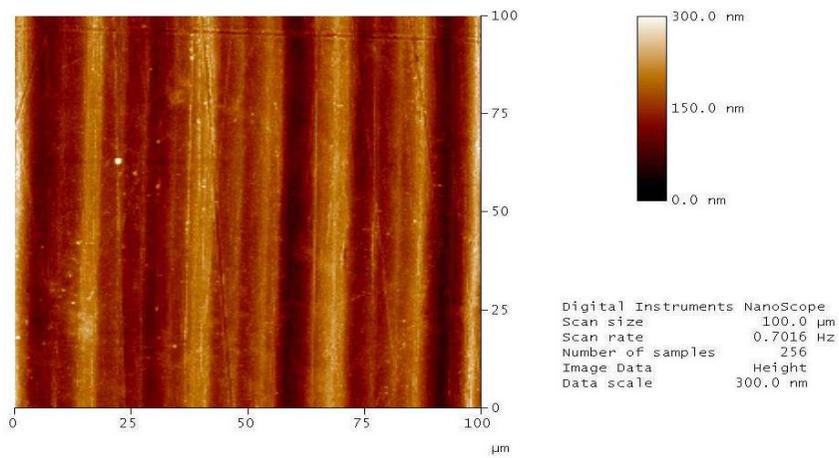


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.17 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/250 \text{ km}$)

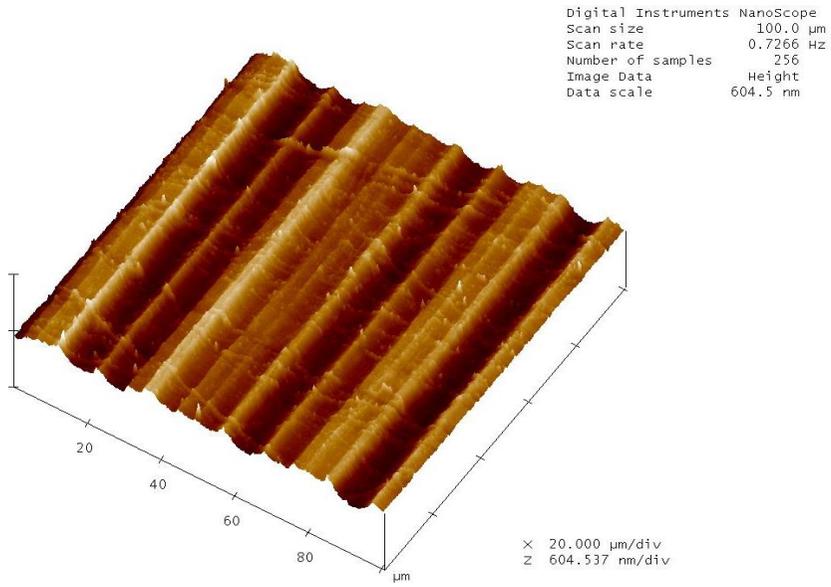


(a) 3 Dimensional surface

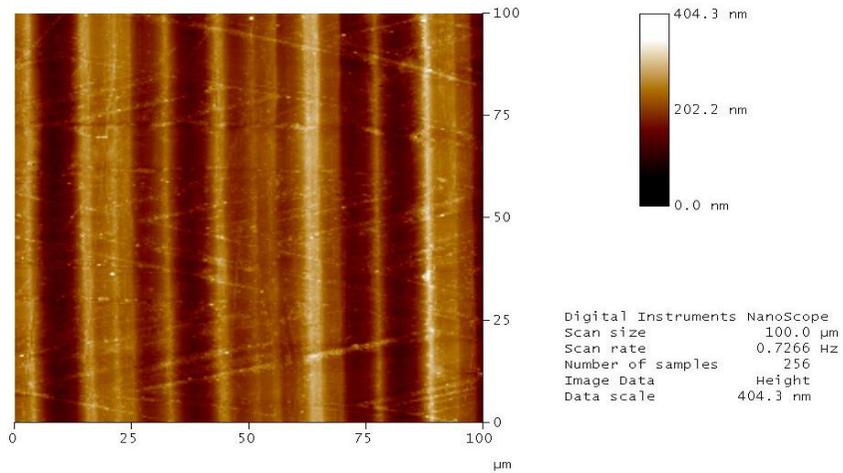


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.18 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/300\text{ km}$)

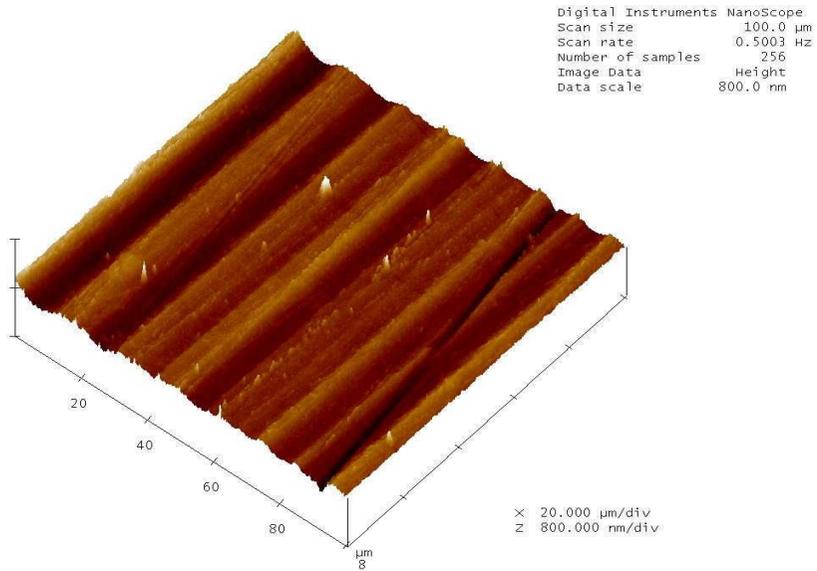


(a) 3 Dimensional surface

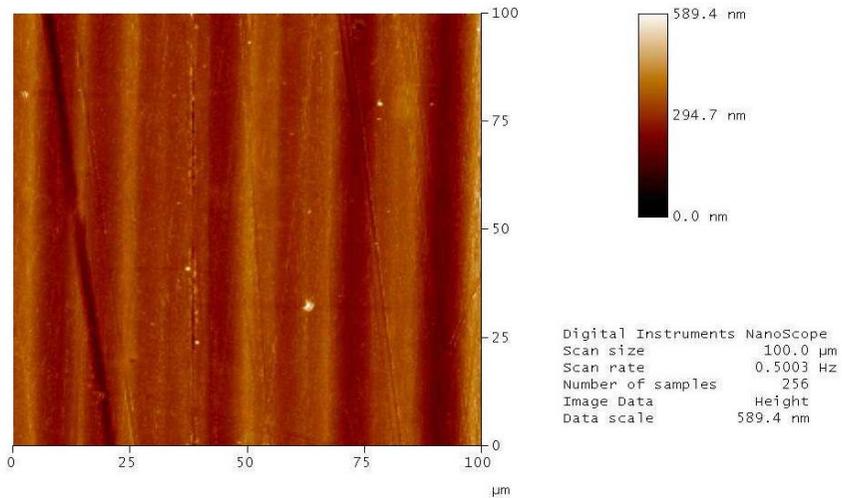


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.19 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/350\text{ km}$)

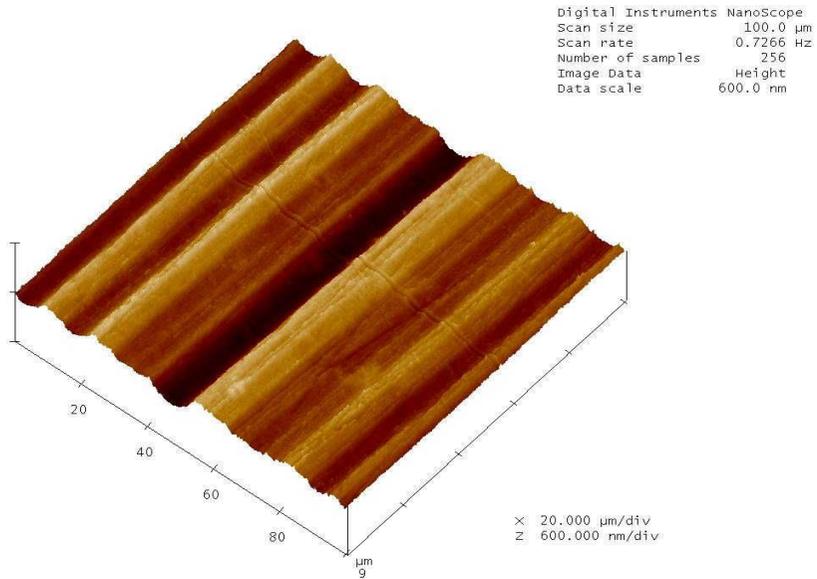


(a) 3 Dimensional surface

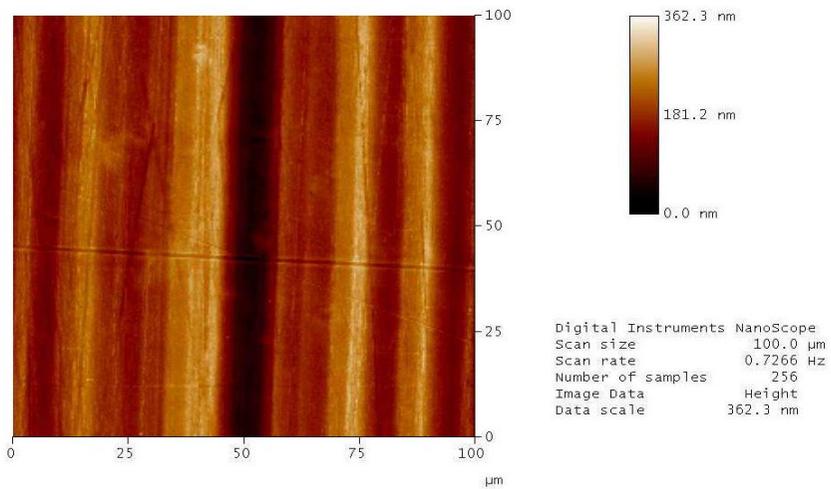


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.20 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/400\text{ km}$)

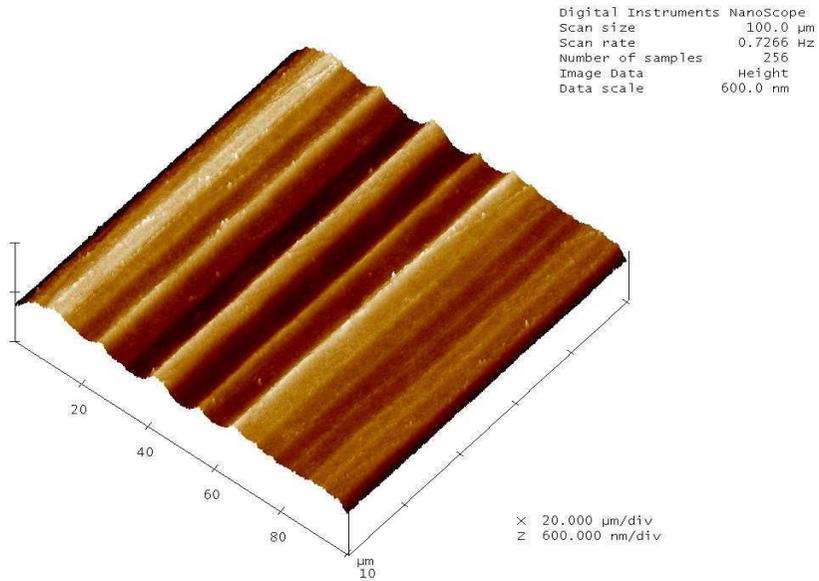


(a) 3 Dimensional surface

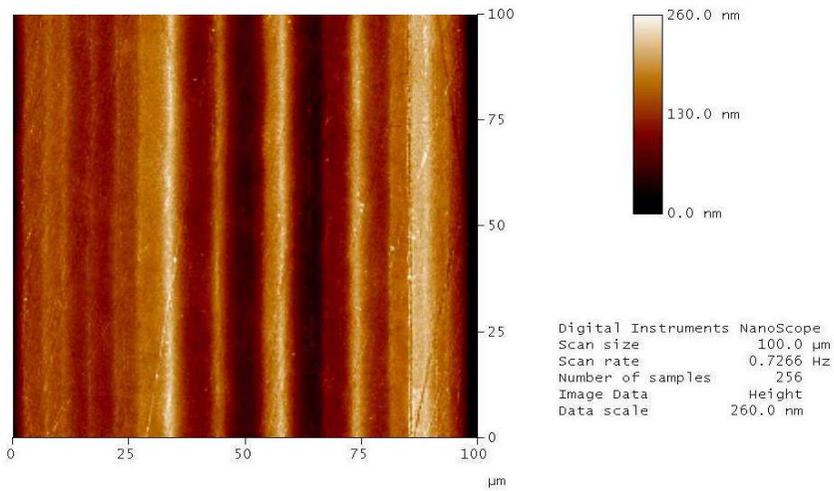


(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.21 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/450 \text{ km}$)



(a) 3 Dimensional surface



(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.22 AFM photo. of cutting surface ($Al_{6061}/500\text{ km}$)

제 5 장 결 론

Nano급 초정밀 가공용으로 국내 제작된 터닝센터로 알루미늄(Al_{6061}) 재료를 설정된 절삭 조건하에서 천연 다이아몬드공구로 가공한 후 얻어진 가공면 표면특성과 공구 인선마모 현상을 기존의 표면 거칠기 측정기와 Atomic Force Microscope을 이용하여 측정하고, 그 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭공구의 절삭 인선은 절삭 길이를 500 μm 까지 가공할 경우 반경 값의 변화는 1 μm 이하로 경미하여 표면거칠기에는 영향을 미치지 않는 것으로 간주되며, 절삭인선 마모나 변형은 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.
2. 절삭가공 초기의 표면거칠기는 새로운 공구의 사용으로 공구연삭시 형성되는 초경 입자의 영향을 받아 불량한 결과가 나오지만 어느 정도 절삭이 진행되면서 거칠기가 작아지며 안정됨을 확인하였다.
3. AFM(Atomic Force Microscope) 3D 표면특성의 평가는 기존의 표면 거칠기 측정기에 의한 평가에 보다 발전된 3차원 입체 표면의 가시적인 정보를 제공하고 있어 초정밀 가공면 평가의 새로운 방법으로 제안한다.
4. AFM에 의한 가공면 평가는 표면거칠기 측정에 새로운 정보를 제공하고 있지만 보다 정밀한 결과를 얻기 위해서는 향후 사용기계의 공구의 입자나 진동상태 등 절삭가공에 미치는 여러 가지 환경의 영향이 고려된 연구가 필요함을 확인하였다.

References

- (1). Moronuki N., Furukawa Y., 1988, "摩擦轉動による精密送り機械に関する研究", *JSPE*, vol.54, No.11, pp. 2113~2130
- (2). Shimokobe, A., "超精密工作機械の駆動系構造と機構", 東京工業大學精密工學研究所, *超精密加工 series-27*.
- (3). Kakino Y., Ihara Y., Nakatsu Y., and Shinohara A., 1989, "NC 工作機械の運動程度に関する研究", *JSPE*, vol.55, No.3, pp. 587~600
- (4) Kang S. J., Kim J. K., 2004, "Characteristics Evaluation of Surface Roughness with Ultra-precision Machining", *Trans. of KSMTE*, vol.13, No.1, pp. 9~15.
- (5) Kang S. J., Oh S. R., Lee G. J., 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.
- (6). Jung J. H., Lee G. J., Kim J. K., 2003, "An Evaluation of Surface Finish with SEM in Precision Machining", *Proceedings of the KSMPE Autumn Conference 2003*, pp. 47~52.
- (7) Lee G. J., 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
- (8) Lee G. J., Jung J. S., Kang S. J., Kim S. B., 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.
- (9) Oh S. R., "A Study on Characteristics of Ultra-precision Cutting Surface by AFM Measurement Method", *Master Dissertation, Chosun university*, 2005.

저작물 이용 허락서

학 과	기술가정교육과	학 번	20068270	과 정	석사
성 명	한글: 최 유 정 한문 : 崔 有 廷 영문 : Choi Yu-jeong				
주 소	광주광역시 서구 풍암동 금호아파트 103-1103				
연락처	E-MAIL : hotelafrica82@hanmail.net				
논문제목	한글 : AFM 측정법에 의한 알루미늄 재질의 초정밀 가공면 특성 연구				
	영문 : A Study on Characteristics of Ultra-precision Machined Surfaces of Aluminum materials by AFM Measurement				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.
다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2009년 8월
저작자: 최 유 정 (인)

조선대학교 총장 귀하