

2007년 2월
博士學位論文

AFM 測定法에 의한 超精密
加工面の 特性 研究

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李 鉀 兆

AFM 測定法에 의한 超精密
加工面の 特性 研究

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

2007 年 2 月 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李 鉀 兆

AFM 測定法에 의한 超精密
加工面の 特性 研究

指導教授 金 鍾 寬

이 論文을 工學博士學位申請 論文으로 提出함.

2006 年 10 月 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李 鉀 兆

李鉀兆의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 曹圭宰 印

委員 建陽大學校 教授 鄭喆燮 印

委員 南部大學校 教授 金相卜 印

委員 朝鮮大學校 教授 韓吉永 印

委員 朝鮮大學校 教授 金鍾寬 印

2006 년 12 월 일

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of tables	iii
List of figures	iv
List of photographs	vii
Nomenclatures	viii
ABSTRACT	ix

제 1 장 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구목적 및 내용	6

제 2 장 이론적 배경

2.1 AFM에 의한 초정밀 가공면의 측정	8
2.2 절삭공구의 마모	12
2.3 가공면의 표면거칠기	15
2.3.1 이론 표면거칠기	16
1) 선단 반지름 $R=0$ 인 경우	16
2) 선단 반지름 $R\neq 0$ 인 경우	17
2.3.2 실제 표면거칠기	19
2.4 초정밀 가공	22

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 측정기	26
3.2 시편 및 절삭공구	35
3.3 실험방법 및 조건	39
3.4 AFM 측정에 의한 가공면의 특성 평가	43
3.5 절삭길이 및 절삭시간 산정	48

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 최적 절삭조건 고찰	50
4.2 절삭공구의 마모현상 고찰	53
4.3 가공면의 표면거칠기 특성 고찰	59
4.3.1 알루미늄 합금 재료의 표면거칠기 특성	60
4.3.2 황동 재료의 표면거칠기 특성	67
4.3.3 가공재료에 따른 표면거칠기 특성 비교	74
4.4 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰	76
4.4.1 알루미늄 합금 재료의 표면특성	76
4.4.2 황동 재료의 표면특성	88

제 5 장 결 론

99

References

101

List of Tables

Table 2.1	Comparison accuracy of machine	24
Table 2.2	Comparison components of machine	24
Table 3.1	Specification of ultra-precision turning center	27
Table 3.2	Specification of roundness tester	28
Table 3.3	Specification of atomic force microscope	30
Table 3.4	Specification of abrasive cutting machine	31
Table 3.5	Specification of metallurgical microscope	33
Table 3.6	Specification of tool maker's microscope	34
Table 3.7	Chemical compositions of aluminum alloy (<i>Al</i> ₆₀₆₁)	36
Table 3.8	Chemical compositions of brass (HBsC3C)	36
Table 3.9	Mechanical properties of specimens	37
Table 3.10	Cutting conditions	40
Table 4.1	Roughness values affected cutting condition	52
Table 4.2	Nose radius values of tool	54
Table 4.3	Surface roughness values of aluminum alloy	61
Table 4.4	Surface roughness values of brass	68
Table 4.5	Measurement results of surface roughness	75

List of Figures

Fig. 2.1	Principle of AFM equipment	8
Fig. 2.2	Cantilever contact image of AFM	9
Fig. 2.3	Relation between atomic force and distance	10
Fig. 2.4	Contact area analysis	13
Fig. 2.5	Flank wear and crater wear	14
Fig. 2.6	Average arithmetic roughness	15
Fig. 2.7	Maximum height roughness	16
Fig. 2.8	Surface roughness of vertical radius $R=0$	17
Fig. 2.9	Surface roughness of vertical radius $R\neq 0$	18
Fig. 2.10	Surface generation of ideal conditions	20
Fig. 2.11	Effect of minimum chip thickness on surface roughness ..	21
Fig. 2.12	Finish cutting edge of diamond tool	23
Fig. 3.1	Drawing of specimen	35
Fig. 3.2	Measurement method of nose radius	42
Fig. 3.3	AFM photo. for select magnification(scan size 20 μm)	45
Fig. 3.4	AFM photo. for select magnification(scan size 60 μm)	46
Fig. 3.5	AFM photo. for select magnification(scan size 100 μm)	47
Fig. 3.6	Calculation method of cutting distance	48
Fig. 4.1	Relation between surface roughness & cutting condition ..	52
Fig. 4.2	Relation between tool nose radius & cutting length	54
Fig. 4.3	Surface roughness graph of aluminum alloy	61

Fig. 4.4	Surface roughness value($A_{6061}/50$ km cutting length)	62
Fig. 4.5	Surface roughness value($A_{6061}/100$ km)	62
Fig. 4.6	Surface roughness value($A_{6061}/150$ km)	63
Fig. 4.7	Surface roughness value($A_{6061}/200$ km)	63
Fig. 4.8	Surface roughness value($A_{6061}/250$ km)	64
Fig. 4.9	Surface roughness value($A_{6061}/300$ km)	64
Fig. 4.10	Surface roughness value($A_{6061}/350$ km)	65
Fig. 4.11	Surface roughness value($A_{6061}/400$ km)	65
Fig. 4.12	Surface roughness value($A_{6061}/450$ km)	66
Fig. 4.13	Surface roughness value($A_{6061}/500$ km)	66
Fig. 4.14	Surface roughness graph of brass	68
Fig. 4.15	Surface roughness value($HB_{sC3C}/50$ km cutting length)	69
Fig. 4.16	Surface roughness value($HB_{sC3C}/100$ km)	69
Fig. 4.17	Surface roughness value($HB_{sC3C}/150$ km)	70
Fig. 4.18	Surface roughness value($HB_{sC3C}/200$ km)	70
Fig. 4.19	Surface roughness value($HB_{sC3C}/250$ km)	71
Fig. 4.20	Surface roughness value($HB_{sC3C}/300$ km)	71
Fig. 4.21	Surface roughness value($HB_{sC3C}/350$ km)	72
Fig. 4.22	Surface roughness value($HB_{sC3C}/400$ km)	72
Fig. 4.23	Surface roughness value($HB_{sC3C}/450$ km)	73
Fig. 4.24	Surface roughness value($HB_{sC3C}/500$ km)	73
Fig. 4.25	Relation between surface roughness & cutting length	75
Fig. 4.26	AFM Photo. of cutting surface($A_{6061}/50$ km cutting length) ..	78

Fig. 4.27 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/100$ km) 79

Fig. 4.28 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/150$ km) 80

Fig. 4.29 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/200$ km) 81

Fig. 4.30 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/250$ km) 82

Fig. 4.31 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/300$ km) 83

Fig. 4.32 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/350$ km) 84

Fig. 4.33 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/400$ km) 85

Fig. 4.34 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/450$ km) 86

Fig. 4.35 AFM Photo. of cutting surface($A/_{6061}/500$ km) 87

Fig. 4.36 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/50 km cutting length) 89

Fig. 4.37 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/100 km) 90

Fig. 4.38 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/150 km) 91

Fig. 4.39 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/200 km) 92

Fig. 4.40 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/250 km) 93

Fig. 4.41 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/300 km) 94

Fig. 4.42 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/350 km) 95

Fig. 4.43 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/400 km) 96

Fig. 4.44 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/450 km) 97

Fig. 4.45 AFM Photo. of cutting surface(HBsC3C/500 km) 98

List of Photograph

Photo. 3.1	Ultra-precision turning center	27
Photo. 3.2	Surface roughness tester	28
Photo. 3.3	Atomic force microscope	30
Photo. 3.4	Abrasive cutting machine	31
Photo. 3.5	Metallurgical microscope	33
Photo. 3.6	Tool maker's microscope	34
Photo. 3.7	Photo. of specimen	36
Photo. 3.8	Diamond insert	38
Photo. 3.9	Tool holder & diamond insert	38
Photo. 3.10	Photo. of cutting specimen	40
Photo. 3.11	Photo. of measuring surface roughness	41
Photo. 3.12	Photo. of measuring AFM	44
Photo. 3.13	Photo. of specimens	44
Photo. 4.1	Diamond new tool($A/_{6061}$)	55
Photo. 4.2	Diamond tool after cutting($A/_{6061}$)	56
Photo. 4.3	Diamond new tool(HBsC3C)	57
Photo. 4.4	Diamond tool after cutting(HBsC3C)	58

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)
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 by AFM Measurement

Lee Gab-Jo

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

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, ultra-precision machining technology has been developed competitively in the advanced countries for high precision mechanical components. Now they have inquired into high technology for acquiring machining quality such as surface roughness with nano-meter degree to produce high priced parts.

In this study, paper aims to evaluate characteristics of machined surface using surface roughness tester and atomic force microscope in the ultra-precision cutting of aluminum alloy and brass material by diamond tool. For the purpose of this experiment, specimens were lathed each 10 pieces per 50 km for total 500 km with dry cutting.

These results will be contributed to ultra-precision machining by foundation data of surface roughness and tool wear when parts are cutting with diamond tool at the factory.

The results obtained by experimental study are summarized as follows;

- (1) At the result of experiment, roughness value was verified the theory "will be obtain a best data at the highest speed and lowest feed" but It was not influenced on roughness below 5 μm cutting depth.
- (2) Nose radius of the cutting tool was changed to smaller than 1 μm within 500 μm cutting length but tool wear and deformation was not occurred.
- (3) The result of surface roughness was not good with diamond new tool at the initial cutting and the machinability of aluminum alloy was better than brass. Those variations are 0.108 μm aluminum alloy and 0.161 μm brass within 500 μm cutting length.
- (4) Observed results of surface finish characteristics through AFM, the formation of track according to cutting speed was observed to be uniform but additional small track occurred within the regular track on the machined surface was checked out. It is main factor influencing surface roughness.
- (5) Evaluation of surface finish characteristics through AFM added more information to results of roughness tester but several influences of cutting condition that are machine vibration, strength, coolant etc. will be studied continuously for obtaining accurate results.

Key Words : Surface roughness(표면거칠기), Atomic force microscope(AFM: 원자현미경), Ultra-precision machining(초정밀 가공), Tool wear(공구마모)

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

공작기계는 기계공업에서 각종 기계를 생산하는데 필요한 생산설비를 공급하는 핵심 산업으로서 전체 기계공업 발전의 기반이 될 뿐만 아니라 기술 발전의 원동력이 되는 산업이다. 그러므로 세계 각국에서는 공작기계 산업을 일반 기계공업과 별도로 구분하여 전문적으로 육성하고 발전시키기 위한 노력을 더욱 강화하고 있다.

최근 공작기계의 발달 경향은 기계류 제품의 품질향상, 생산성향상 및 기술개발을 좌우하는 필수적인 산업분야로서 고속화, 정밀화, 자동화, 시스템화, 환경친화적 방향으로 진행되고 있다. 특히 국제적 환경보호 정책에 따라 인체에 유해한 윤활유 및 절삭유를 배제하고 환경친화 및 저비용 측면에서 윤활유가 필요치 않는 부품들의 채용과 건식 가공이 가능한 기계들도 연구 개발되어 산업현장에 보급되고 있다.

우리나라는 1916년 현대식 공작기계인 황삭 연마기(rough grinding machine)가 도입된 것이 최초의 공작기계라 할 수 있으며, 이후 선진기술을 적극적으로 도입하여 개량함에 따라 범용 기종의 자체 개발이 가능해졌고, 꾸준한 국산화율의 증가로 발전을 하여 최근에는 초정밀 가공을 할 수 있는 세계 10위권의 제작기술 수준에 접근하였으나, 반면 설계, 검사, 측정기술 등은 취약성을 보이며, 고유 모델의 개발이나 제품의 고부가 가치화는 미진한 상태이다.

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.

일반적으로 치수 및 형상 정밀도가 100 nm 이내의 가공기술을 초정밀 가공¹⁾이라하며, 국내에서도 1990년대 초반부터 이 분야에 관심을 갖기 시작하여 지금은 초정밀 가공의 자립적 달성을 위한 기술개발 및 체계적인 연구가 대학, 산업체, 연구기관 공동 연구로 활발히 진행되고 있다.

초정밀 공작기계의 가공 정밀도가 유지되기 위해서는 기계 본체의 구조물과 스피들 장치, 공구 및 홀더 장치, 기어박스, 이송장치 등 각부의 정밀도와 조립 상태에서 전체 정밀도가 유지되어야 하고, 이와 같은 정밀도 유지와 관리에 기초가 되는 공작기계 구조물은 형상 및 치수 정밀도가 안정되어야 하고, 가공 중에 생기는 내부 및 외부 진동의 흡수성과 감쇠성이 뛰어나야 하며, 정·동적 특성이 고려된 충분한 강성의 구조물이 설계·제작 되어야 한다. 그리고 중요한 것은 이것들의 특성을 평가할 수 있는 측정기술이 뒷받침 되어야 한다. 따라서 이에 수반되는 보다 새로운 측정기술이 요구되고 있는 실정이다.

1.2 연구동향

공작기계는 기계공업의 중요한 산업분야로서 최근 초고속화, 초정밀화 단계로 급속한 발전을 이루고 있으며, 이러한 발전의 근본이 되는 공작기계의 정밀도는 정적, 동적 및 열적 특성에 의해 좌우된다. 이들 특성 중 동적 특성은 공구와 공작물의 상대운동에 의해 절삭가공 중 발생하는 미세 진동으로 표면거칠기와 관련되며, 가공기술의 향상과 공작기계의 진보에 매우 중요한 과제이다.

Taniguchi¹⁾, Loewen²⁾, McKeown³⁾ 등은 1980년대부터 각각 정밀공학의 중요성을 이론적으로 제기하였고 일본, 미국 등 공업 선진국을 중심으로 막대한 연구비를 투자하여 범국가적인 차원의 대형 연구 과제를 수행하고 있다. 일본은 1985년도에 일본 정밀공학회의 사업부회가 “Nano-technology 체계화”를 위한 분과회를 설치하여 정밀계측, 제어장치, 가공법 등 각 분야의 연구 현황과 동향 등의 조사 및 연구를, 영국은 1986년에 NION Project가 NPL을 중심으로 시작되어 산·학·연이 공동 연구를, 미국은 Molecular measuring machine 등의 개발이 NIST을 중심으로 정부와 대학, 기업간의 공동 연구를, 국내의 경우는 1990년 초부터 관심을 갖기 시작하여 산·학·연 공동으로 초정밀 기계의 개발 및 가공기술에 대한 연구⁴⁾가 이루어지고 있다.

초정밀 가공은 극도로 예리한 다이아몬드 공구의 개발과 사용으로 50 nm보다 적게 가공할 수 있는 것으로 보고^{5~7)} 되었으며, 원자로와 같은 고성능 광학기계의 조립이나 특수기계 부품에서 다이아몬드 공구의 가공에 관한 연구^{8~9)}가 시작되어 최근에는 광학, 전자, 렌즈, 컴퓨터 메모리 디스크, 베어링, 정밀측정장치 등에서 정밀도나 표면거칠기의 공차를 맞추는 가공에 이용되며, 활발한 연구 활동이 이루어지고 있다.

초정밀 가공에 사용되는 공작기계는 높은 강성과 정밀도가 요구되며, 특히 고속화 추세에 따른 주축과 이송계는 공작물의 치수 및 형상, 표면거칠기에

직접적인 영향을 미치는 중요한 분야로서 Moronuki¹⁰⁾ 등은 공작기계 이송계의 정확성을 위한 마찰 전동기구에 대해서, Shimokobe¹¹⁾는 정밀 절삭가공을 위한 공작기계의 구동과 기구에 대한 중요성을, Kakino¹²⁾ 등은 정밀 가공을 위한 공작기계의 운동정도에 대한 연구를 실시하여 기초 이론을 제시하였다.

초정밀 가공에는 열전도도, 내마모성, 내식성이 우수한 다이아몬드 공구를 사용하는 것이 일반화 되어있다. 그러나 산업현장에서는 천연 다이아몬드 공구는 구입비용이 높아 그 대용품으로 인조 다이아몬드 공구를 널리 활용하고 있으며, 수명 및 표면거칠기의 향상을 위한 연구·개발이 활발히 진행되고 있다. 연구 현황으로는 Kim¹³⁾ 등이 초정밀 가공에서 천연 및 인조 다이아몬드 공구별 특성에 대한 자료를, Lee¹⁴⁾, Oh¹⁵⁾ 등이 알루미늄 합금에 대하여 절삭길이에 따른 표면거칠기의 특성을 각각 SEM과 AFM 해석 기법으로 고찰하고 인조 다이아몬드 공구의 마모에 대한 기초 자료를, Brookes¹⁶⁾ 등은 인조 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭 과정에서 공구의 마모현상에 대한 자료를 제시하였다.

절삭조건은 이송속도와 절입깊이를 작게 하고 절삭속도를 크게 하는 것이 유리하지만 기계의 진동이나 공구의 인선반경에 따라 최적의 절삭조건을 찾는 것이 중요하다. 이 분야는 Sugano¹⁷⁾ 등이 알루미늄 합금을 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭가공하고 절삭조건에 따른 표면거칠기를, Kang¹⁸⁾ 등이 인조 다이아몬드 공구를 이용하여 알루미늄 합금을 절삭가공하고 표면거칠기 평가를 통한 최적의 절삭조건을 제시하였다.

초정밀 가공에 사용되는 피삭재로는 주로 알루미늄 합금이나 동합금 등이 많이 사용되고 있으나, 최근 산업의 발전으로 에너지 절감 및 기계제품의 경량화가 요구되어짐에 따라 정밀기계 부품이나 전자기기 부품 등 새로운 신소재의 출현으로 인해 피삭재의 재질 변화에 따른 다이아몬드 공구의 마모현상에 대한 연구도 활발해지고 있다. Keen¹⁹⁾ 등은 자동차 피스톤 재료인 Al-Si 합금의 절삭가공 특성을, Nishiguchi²⁰⁾는 알루미늄·마그네슘 합금에 대한 미소 칩 형성을, Ko²¹⁾ 등은 무산소동에 대한 초정밀 가공특성을, Kim²²⁾ 등은 알루미늄 합금

에 대한 초정밀 가공특성을 발표하였다.

초정밀 가공기술의 발달과 더불어 향상된 정밀측정기술의 역사는 다른 계측기술의 역사에 비하면 그렇게 오래된 것은 아니다. 측정기술을 요구하는 가공기술이 날로 까다로워지고 대량생산에 의한 호환성이 요구되는 정밀한 부품을 만들기 시작하면서부터였다. 우리나라는 1970년대 말 선진국으로부터 3차원측정기가 도입됨에 따라 본격적으로 기하학적 특성의 부품을 측정하기 시작하였으며, 최근에는 원자현미경을 이용하여 초정밀 가공부품의 표면특성을 측정하는 등 측정 분야에서도 산·학 합동으로 다양한 연구가 이루어지고 있다. Lee²³⁾ 등은 정밀 가공부품 검사에 사용되는 3차원 측정기의 측정불확도를, Oh²⁴⁾ 등은 정밀 가공부품의 진원도 특성 평가를, Lee^{25~26)} 등은 정밀 절삭가공 부품의 검사에 사용되는 공정게이지의 편차 값 보정에 관한 기초 이론과 원자현미경 (AFM: atomic force microscope) 측정기법을 이용하여 정밀 가공부품의 표면 특성 분석에 대한 기초 이론을 제시하였다.

최근 산업이 선진화, 고도화되고 경제의 세계화가 진행되어 생산 제품의 품질이 기업이나 국가의 기술 경쟁력을 결정짓는 중요한 요인이 되기 때문에 부품의 품질검사에 사용된 측정기술이 생산 제품의 품질향상을 위하여 더욱더 중요시 되어가고 있다. 이에 따라 ISO는 관련 국제기구와 합동으로 모든 나라에서 통일적으로 적용할 수 있는 각종 측정기술을 채택하고 있으며, 우리나라도 수년 동안 정부와 국가 투자 연구기관에서 ISO 지침서를 기준으로 측정기술 보급에 앞장서고 있으며, 산·학·연의 연구가 이루어지고 있다.

1.3 연구목적 및 내용

절삭가공 부문에 있어서도 초정밀 공작기계는 고속화, 고정밀화를 바탕으로 발전하고 있으며, 고속화 분야에서는 직선구동 모터를 적용한 장비나 병렬형 구조의 공작기계 등이 실질적인 상품화 단계에 도달했고 고정밀화 부분은 각종 오차를 최소화 할 수 있는 설계기술 및 부가장치, 고속절삭 메커니즘 등의 기초 기술을 바탕으로 하는 고품위화 추세를 형성하고 있다.

최근 가공기술의 진보에 따라 가공면의 기능은 동특성, 내하중성, 기밀성 및 외관 품질에 대한 요구가 엄격해지고 있으며, 표면거칠기 또한 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 생산과정의 마지막 단계에서 나타나는 표면거칠기를 측정하여 제품을 엄격하게 통제하는 것도 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 기존의 틀을 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 국내 H사에서 제작한 초정밀 선반을 이용하여 알루미늄 합금(AI₆₀₆₁)과 황동(HBsC3C) 소재의 피삭재를 절삭길이 0~500 mm까지 천연 다이아몬드 공구로 절삭가공 하면서 가공면에 나타난 표면거칠기와 표면특성 등을 기존의 표면거칠기 측정기와 지금까지 시도되지 않았던 원자현미경(AFM)의 3차원 형상측정 기법을 활용하여 고찰, 평가하였으며, 절삭길이에 따른 공구의

마모현상이나 절삭인선의 형태변화 등에 대한 기초 자료를 제시하여 산업현장에서 수행되는 초정밀 가공에 기여하고자 하며, 산업현장에 원자현미경에 의한 3차원 가공표면 측정기법을 제안하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 AFM에 의한 초정밀 가공면의 측정

사람이 사물을 보거나 관찰할 수 있는 것은 눈의 수정체가 광학적으로 상을 맺는 역할을 하기 때문이다. 그러나 사람의 수정체는 0.1 mm이하의 미세한 구조는 분석할 수 없어 보다 작은 것을 확대하여 관찰하는 보조 수단으로써 확대경이 필요하게 되었다. 근대 자연과학의 발전과 더불어 광학현미경이 물질의 미세구조 탐구용으로 개발되어 0.2 μm 까지 읽을 수 있게 되었고 1935년에는 산업 기술의 발전과 더불어 전자현미경(SEM: scanning electron microscope)이 개발되어 그보다 더 미세한 구조를 구별하였으나 최근에는 원자는 너무 작아서(0.1 ~ 0.5 nm) 아무리 좋은 현미경으로도 볼 수 없다는 기존의 통념을 깨뜨리고 물질의 원자 단위까지 볼 수 있는 차세대 초정밀 측정 장비인 원자현미경(AFM: atomic force microscope)이 개발되어 각종 연구 및 산업 측정용으로 활용되고 있다. Fig. 2.1은 원자현미경의 측정원리를 도식한 것이다.

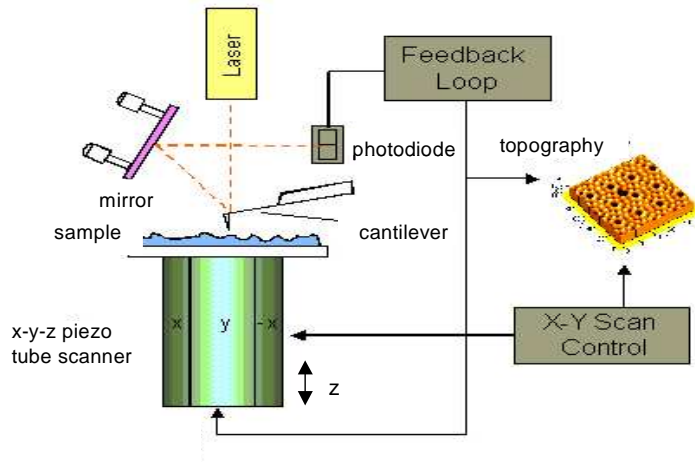
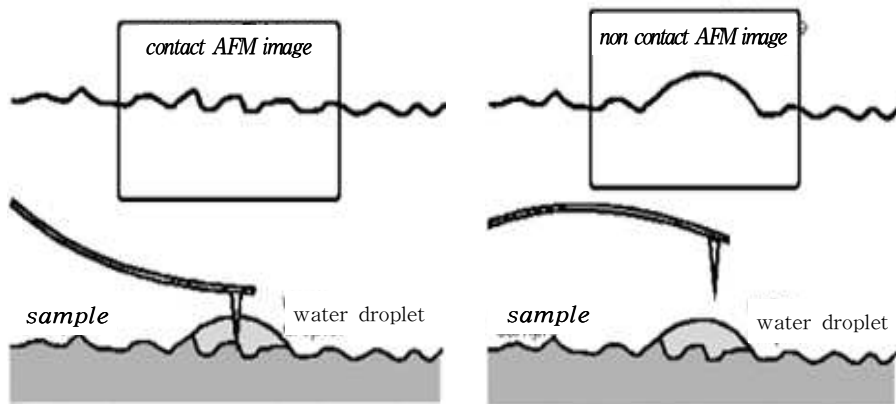


Fig. 2.1 Principle of AFM equipment

전자현미경이 진공에서만 작동되고 전기적 부도체인 시료는 볼 수 없다는 것에 비해 원자현미경은 대기 중에서도 사용이 가능하고, 물체의 형상뿐만이 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 분석용으로 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, 개개의 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.



(A) Contact image mode (b) Non contact image mode

Fig. 2.2 Cantilever contact image of AFM

원자현미경의 탐침은 전자현미경의 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 마이크로 머시닝으로 제조된 캔틸레버(cantilever)라고 불리는 작은 막대를 쓴다. 캔틸레버는 길이가 100 μm , 폭 10 μm , 두께 1 μm 로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어져 있으며, 끝 부분에는 뾰족한 바늘이 달려 있다. 이 바늘의 끝은 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하여 탐침을 시료 표면에 접근 시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자사이에서 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 캔틸레버는 표면의 높낮이에 따라 아래위로 휘지만 아니라 탐침과 시료 표면사이의 수평 마찰력에 의해 옆으로 비틀리게 되고 그 비틀리는 정도는 캔틸레버에서 반사되어 나오는 레이저 광선의 수평성분 각도에 비례하므로 쉽게 측정될 수 있다.

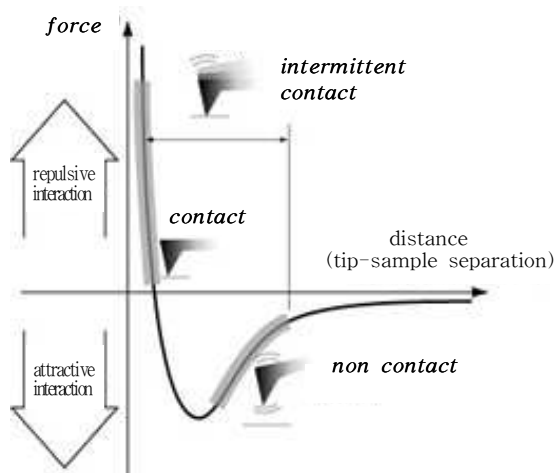


Fig. 2.3 Relation between atomic force and distance

접촉식 탐침이 시료의 표면과 접촉했을 때 캔틸레버는 시료의 표면에 수직하게 반발력을 받으며, 이러한 반발력은 시료와 탐침 끝에 있는 원자사이의 거리가 매우 가까울 때에만 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 표면형을 측정하기 어렵기 때문에 캔틸레버의 스프링 상수 값 k 를 0.01~0.05 N/m로 작게 하여 탐침이 시료표면을 지나갈 때 받는 힘의 대부분이 캔틸레버가 휘어짐으로 나타나 시료의 변형을 상대적으로 줄일 수 있게 한다.

그러나 부드러운 시료인 경우는 캔틸레버에 인가하는 힘을 낮추고 이미지를 형상화하기에는 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 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 캔틸레버를 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.

2.2 절삭공구의 마모

접촉면의 미끄럼 운동에 의하여 표면이 미소량씩 떨어져 나가는 것을 마모라 한다. 절삭공구의 마모는 통상 기계부품의 마모와는 다르며, 칩의 전단강도에 가까운 경사면이나 여유면의 마찰응력이나 접촉면에서 발생하는 고온 등의 가혹한 조건에서 이루어진다.

R. Holms²⁷⁾은 Fig. 2.4와 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. Show²⁸⁾는 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.

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

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

d 의 거리에 대한 마찰이 직선적일 때 걸보기 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.

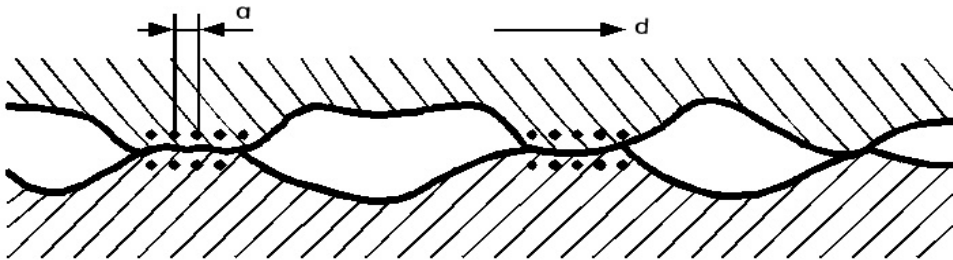


Fig. 2.4 Contact area analysis

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

$$h_c = \frac{e}{c} \tag{7}$$

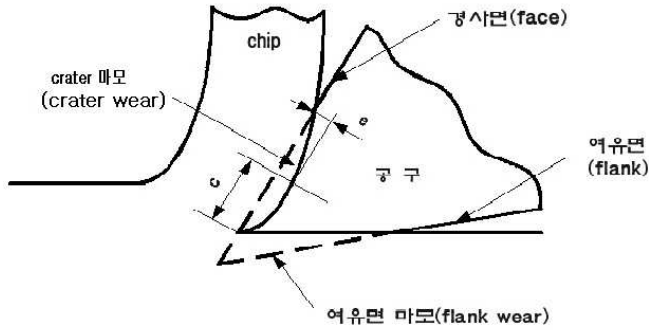


Fig. 2.5 Flank wear and crater wear

절삭과정에서 공구의 손상이 어느 이상에 달하면 소정의 가공정밀도를 얻을 수 없거나 공구의 손상이 진행되어 절삭을 수행할 수 없는 경우가 있다. 이때까지의 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. 공구수명의 판정은 가공정밀도, 경제절삭을 동시에 만족하도록 가공면의 광택, 가공물의 치수변화, 절삭저항의 증대, 공구의 경사면 및 여유면의 마모 등을 통해서 정한다.

2.3 가공면의 표면거칠기

기계 가공된 표면을 현미경으로 살펴보면 수많은 요철을 볼 수 있다. 이와 같이 일정한 간격 사이에 나타나는 요철의 빈도와 크기를 표면거칠기라 하며, 정밀도를 정하는 중요한 인자이다. 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. 2.6에 나타내었다. 최대 높이 거칠기는 기준길이 내에서 중심선에 평행한 최고점과 최저점을 지나는 두 직선사이의 상하 거리로 표시되며, 최근 국제 규격의 변경으로 R_v 로 표기되고 있다. Fig. 2.7은 최대 높이 거칠기를 나타낸 것이다.

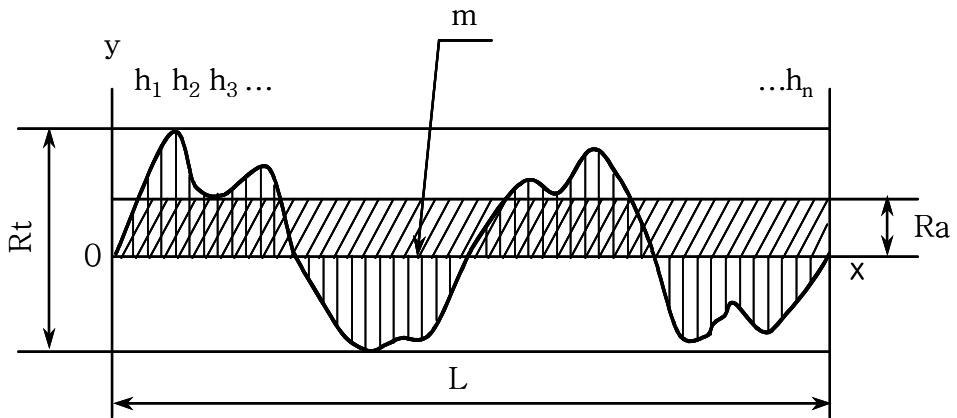


Fig. 2.6 Average arithmetic roughness

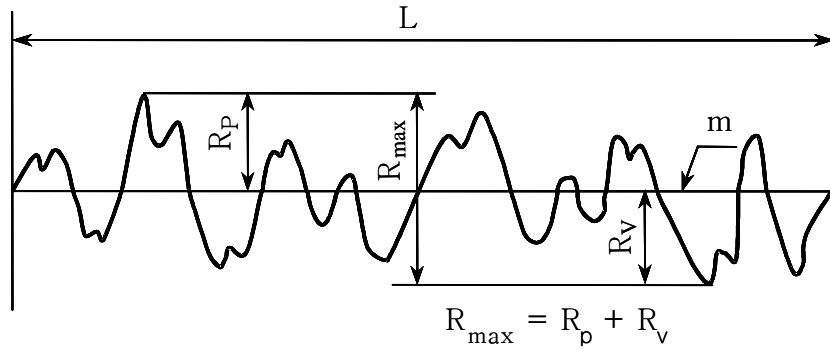


Fig. 2.7 Maximum height roughness

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 구성인선, 진동, 공작기계의 부정확성 등이 없이 주어진 공구형상이나 이송에 의하여 기하학적으로 구해지는 거칠기이다.

2.3.1 이론 표면거칠기

1) 선단 반지름 $R=0$ 인 경우

Fig. 2.8에서 중심선 평균 거칠기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

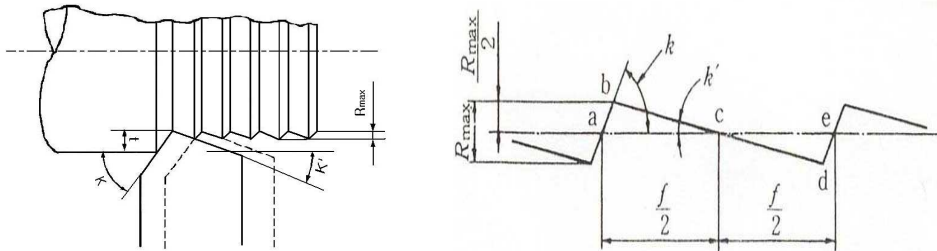
$$\frac{f}{2} = \frac{R_{\max}}{2} \cdot \cot K + \frac{R_{\max}}{2} \cdot \cot K' \quad (10)$$

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

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.



(a) Machined surface

(b) Detail section

Fig. 2.8 Surface roughness of vertical radius $R=0$

2) 선단 반지름 $R \neq 0$ 인 경우

Fig. 2.9의 (a)에서 이송이 극히 적고, 표면거칠기의 산이 원호인 경우, 즉 $f \leq 2R \cdot \sin K'$ 인 경우에는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

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

Fig. 2.9의 (b)에서 이송량이 약간 큰 경우, 즉 $f > 2R \cdot \sin K'$ 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. 2.9의 (c)에서 주절인과 부절인의 무늬가 양측에서 나타나는 경우에는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

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

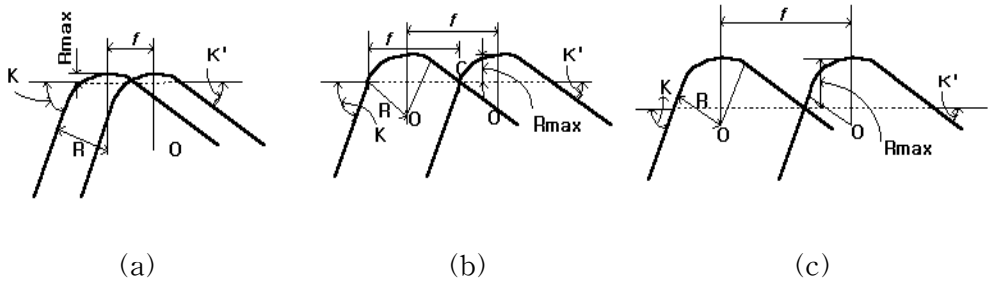


Fig. 2.9 Surface roughness of vertical radius $R \neq 0$

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.

2.3.2 실제 표면거칠기

실제 표면거칠기는 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

즉, 이론적인 표면 특성과 실제적인 표면 특성을 다르게 하는 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 영향^{29~30)}을 미친다.

절삭공구의 예리함도 최소 칩 두께를 발생시킴으로서 재료 제거와 표면거칠기에 영향을 미친다. 절삭공구의 예리함과 관련된 가공응력은 제품의 변형³¹⁾을 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 표면특성³²⁾과 연관이 있다. Fig. 2.10은 고속으로 칩이 제거되면서 공구의 인선반경이 재현되는 현상을 가공된 표면에 묘사했으며, Fig. 2.11은 최소 칩 두께의 개념을 묘사했다.

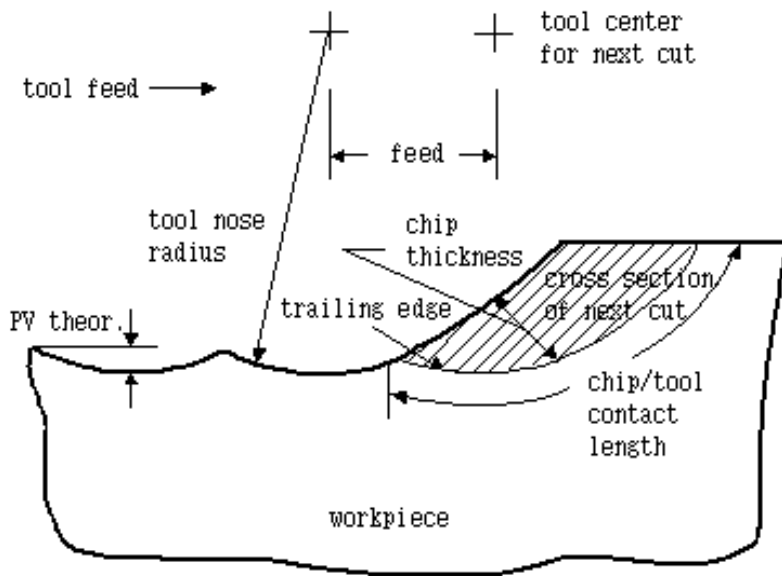


Fig. 2.10 Surface generation of ideal conditions

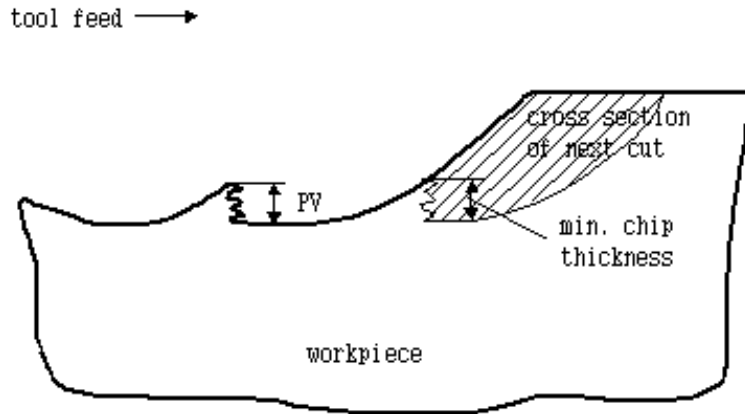


Fig. 2.11 Effect of minimum chip thickness on surface roughness

일반적으로 표면거칠기는 주절인각이 작을수록 향상되나 너무 작아지면 배분력이 증대하고, 공구와 가동물간의 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.

2.4 초정밀 가공

초정밀 가공기술은 광학, 기계 그리고 전자 부품에서 마이크로미터 혹은 서브 마이크로미터 단위의 형상 정밀도를 얻고 가공표면은 수 나노미터 이내의 초정밀도를 얻는 기술을 말한다.

초정밀 가공은 기본적으로 창성운동에 의해서 가공을 하므로 절삭기계의 정밀도가 가공표면에 직접 옮겨져 간다. 따라서 공작기계의 정밀도, 특히 운동정밀도가 요구되는 가공품의 정밀도를 실현시키는 것이 극히 중요한 함수가 된다. 또 절삭가공 중 공구와 공작물 사이의 상대적인 위치와 운동 관계를 완벽하게 하기 위해서는 공작기계의 정적, 동적, 열적 변형을 억제해야 하는 것이 필수 조건이 된다. 최초의 공작기계인 Wilkinson의 수평 보링 머신은 실현 가능한 치수 정밀도가 1 mm였으나 1900년대에는 1000배인 1 μm 에 도달할 수 있었고, 200년이 지난 최근에는 0.1 μm 까지 발전하고 있다. 가공표면의 정밀도는 치수 정밀도의 10배 내지 100배인 나노미터 단위가 된 것이다.

연구결과에 의하면, 정밀도가 10 μm 일 경우에는 그 공작기계의 요소 중 베어링은 볼 또는 롤러 베어링으로 충분하고 이송장치는 정밀 리드 스크류를 사용하면 충분하나 정밀도가 1 μm 을 요구할 때는 유체 베어링 또는 유체를 사용해야 한다고 보고 되고 있다. 여기서 초정밀 가공은 주로 단결정 다이아몬드 공구를 사용하는 초정밀 가공, 초정밀 크레이터 된 다이아몬드 휠로 하는 초정밀 연삭, 극소한 크레이터를 이용하는 초정밀 폴리싱 등으로 분류할 수 있으며, 다이아몬드 공구에 미소한 초음파 진동을 가해줌으로서 스테인레스강이나 열처리한 강철의 초정밀 절삭이 가능한 초정밀 초음파 진동절삭법, 초미세 다이아몬드 휠을 연속 전해드레싱 시키는 방법 등이 개발되어 사용되고 있다.

복잡한 형상의 광학 렌즈를 제작하기 위해 다이아몬드 공구의 연구가 시작되었고, 이에 따른 측정기술의 발전과 함께 고정도, 고정성의 절삭가공 기계를 개발하여 Build-up edge가 발생하지 않은 예리한 다이아몬드 공구를 사용하여

고도의 형상 정밀도와 매우 정밀한 표면거칠기를 얻는 가공기술을 초정밀 절삭 가공이라 하며, 미국의 군수산업에서 초정밀 스피들, 초정밀 이송기구의 발명과 그것을 이용한 공작기계의 발전과 더불어 발달되었다. 초정밀 가공은 나노미터 단위의 정밀도와 표면을 얻어야 하기 때문에 공작기계의 각 요소가 근본적으로 종래 공작기계와 다르며, 현재 치수는 $0.01 \mu\text{m}$, 표면거칠기는 $0.2 \text{ nm} R_{\text{max}}$, 형상 정밀도는 $0.1 \mu\text{m}$ 정도에 도달하고 있다.

Fig. 2.12는 초정밀 가공을 위한 헤르바이트 모양 다이아몬드 공구의 다듬질 절삭날의 예를 나타낸 것이다.

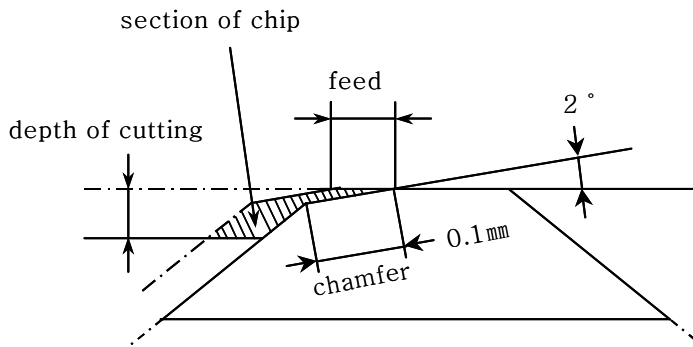


Fig. 2.12 Finish cutting edge of diamond tool

Table 2.1은 초정밀급 공작기계와 정밀급 공작기계에 대한 정밀도의 비교표이며, Table 2.2는 사용된 요소 부품들의 정밀도 비교표이다. 본 실험은 국내 공작기계 전문 제작회사에서 개발시험 중인 다이아몬드 공구의 절삭이 가능한 초정밀급 CNC 선반으로 치수공차 $0.01 \mu\text{m}$, 표면거칠기 $0.1 \mu\text{m} R_{\text{max}}$, 형상 정밀도 $0.1 \mu\text{m}$ 정도를 얻을 수 있는 공작기계의 성능시험을 위하여 수행하였다.

Table 2.1 Comparison accuracy of machine

Description		Precision machine	Ultra-precision machine
Vibration value of main spindle	Radial	0.8 μm	0.3 μm
	Axial	0.8 μm	0.3 μm
Vertical/ Horizontal straightness	X	2.0 $\mu\text{m}/$ 100 mm	0.5 $\mu\text{m}/$ 100 mm
	Z	2.0 $\mu\text{m}/$ 100 mm	0.5 $\mu\text{m}/$ 100 mm
Accuracy	X	20 $\mu\text{m}/$ 250 mm	10 $\mu\text{m}/$ 250 mm
	Z	20 $\mu\text{m}/$ 220 mm	10 $\mu\text{m}/$ 220 mm
Repeatability	X	$\pm 0.5 \mu\text{m}/$ 7 times	$\pm 0.2 \mu\text{m}/$ 7 times
	Z	$\pm 0.5 \mu\text{m}/$ 7 times	$\pm 0.2 \mu\text{m}/$ 7 times

Table 2.2 Comparison components of machine

Description	Precision machine	Ultra-precision machine
Head bearing	P1~3 $\pm 1.0 \mu\text{m}$	P0 $\pm 3.0 \mu\text{m}$
Ball screw	C3, Pitch error 23 μm	C3, Pitch error 8 μm
Head cooling	Grease filled	Oil cooling
Spindle motor	Build out motor	Build in motor
Slider system	Turcite, LM guide	Turcite, LM guide, Air sliding
	Overlap slide	Separately slide
Spindle speed	3,000~7,000 rpm	Up to 10,000 rpm

초정밀 가공의 범용 재료로서는 Cu 및 Cu합금, Al 및 Al합금을 많이 사용하고 있으며, Cu계가 피삭성이 좋고, 좋은 다듬질면을 얻을 수 있는 반면, Al계는 다이아몬드 공구상에 피삭재가 얇게 피복되는 현상이 있어 절삭조건에 따라서는 좋은 다듬질면을 얻기 어려운 경우가 있다. Union carbide Y-12 플랜트에 의하면, 가공하기 쉬운 초정밀 가공용 금속 재료로는 Cu, Au, Ag, Al, Pt, Pb, Electroless Ni, Be, Cu, Brass 등을, 가공하기 곤란한 재료로는 Be, Ta, Fe, Mo, U 등을 들고 있다. 이들 가공하기 쉬운 재료에서는 $20\sim 50\text{ nm}R_{\max}$ 의 표면 거칠기를 얻을 수 있으나 이 거칠기는 다이아몬드 절삭 고유의 한계라기보다는 가공기계의 운동 정밀도나 가공조건의 영향일 가능성이 더 크다.

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 측정기

본 실험에서 사용된 기계는 국내 H사에서 시작품으로 최근 개발한 초정밀 선반(UPL-II)으로 기계의 외형과 세부 사양은 Photo. 3.1, Table 3.1에 나타내었다. 실험기계인 UPL-II는 내장형 주축 모터를 채용하여 20,000 rpm이상의 고속회전이 가능하고 M64L의 CNC 시스템에 의해 최소 이동거리 0.05 μm , 최소 설정단위 10 nm급 제어장치를 장착시킨 국내 산업현장에서 소형부품의 보급형 초정밀 가공용 기계로 제작되었다.

가공면의 특성 평가를 위한 표면거칠기 측정은 레이저 조질 변환기에 의해 넓은 범위의 측정이 가능하고, 컴퓨터에서 신호를 받아 데이터를 처리하기 때문에 한 번의 측정으로 다양한 파라미터를 제공할 수 있는 Photo. 3.2와 같은 영국 Rank taylor hobson사의 축침식 표면거칠기 측정기 Talysurf-253을 사용하였다. 이 측정기는 다이아몬드 축침에 의한 표면거칠기의 수직방향 측정범위는 4 mm이며, 분해능은 10 nm, 정확도는 1.0 $\mu\text{m}/120$ mm이다. 측정 가능한 파라미터는 R_a , $R_{\max}(R_y)$, R_t , R_z , R_p , R_v , R_k 등이며, 측정 시 사용되는 필터는 ISO, PC, No filter로 발생할 수 있는 오차가 0.004 μm 이내이고, 컷오프 값은 0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8, 25에서 자유롭게 선정이 가능하다. 특히 측정 시 오차를 줄이기 위해 공작물의 형상에 따라 Convex, Concave, Straight, Multiple 등으로 기준 형상을 다양하게 선정할 수 있는 것이 특징이다. 표면거칠기 측정기의 세부 사양은 Table 3.2와 같다.



Photo. 3.1 Ultra-precision turning center

Table 3.1 Specification of ultra-precision turning center

Description	Specification
Model name	UPL-II
Max. spindle speed	20,000 rpm
Head cooling system	Oil jet
Tool size	□16 x Ø16
Min. movement unit	0.05 μm
Spindle bearing size	Ø70 mm
Main spindle motor	3.7/ 5.5 kw
CNC system	Mitsubishi M64L



Photo. 3.2 Surface roughness tester

Table 3.2 Specification of roughness tester

Description	Specification
Model name	Talysurf-253
Accuracy	1.0 $\mu\text{m}/$ 120 mm
Resolution	10 nm
Height rang	4 mm
Maker	Rank taylor hobson (U.K)

본 실험에서 절삭가공 면에 대한 표면특성의 변화를 알아보고, 미세구조를 관찰하기 위한 목적으로 사용된 AFM은 Digital instruments사에서 제작한 Multi-mode bio-scope 모델로 Photo. 3.3과 같으며, 세부 사양은 Table 3.3에 나타내었다. 원자현미경은 시료에 손상을 주지 않고 원자 단위까지 관찰이 가능한 측정 장비로서 반도체의 표면측정이나 결점분석, 자기 디스크나 광자기 디스크 등에 쓰이는 비트(bit)의 모양새 조사, 연마된 광학 렌즈나 증착막의 두께 및 굴곡도 측정에서부터 천연광석의 표면분석에 이르기까지 종래보다 더 작은 단위로 측정하려는 모든 곳에 활용된다. 최근에는 SEM을 대체한 차세대 정밀측정 장비로써 물체의 절단면에 대한 미세구조의 관찰은 물론 유기물이나 금속의 미세입자를 원자 단위까지 관찰할 수 있어 산업 활동이나 각종 연구에 널리 활용되고 있다. 특히 원자현미경을 통해 분석된 자료나 사진은 Window창에서 마우스 작동으로 고해상도의 이미지로 관찰되고 LAN에 연결되어 관찰된 이미지나 데이터를 공유할 수 있으며, 플로피 디스켓에 받아 자유롭게 활용이 가능하여 최근에 더욱 사용이 증가되고 있다.

절삭가공한 시편을 AFM에서 측정하기 용이 하도록 적정한 크기로 제작하기 위한 장치로는 Photo. 3.4와 같은 절편기(abrasive cutting machine)를 사용하였다. 절편기는 스피들의 회전수 3440 rpm, 절삭속도 45 m/s, 절삭 깊이가 75 mm이며, 세부 사양은 Table 3.4와 같다. Cut-off wheel은 Al_2O_3 , SiC, 다이아몬드를 재료로 사용하며, 철, 비철, 금속, 비금속 등 모든 부품의 절삭이 가능하고 절삭 중에는 절삭유를 사용해야 한다. 시편의 제작 과정에서 시편의 표면에 이물질이 침입하거나 스크래치가 발생할 가능성이 있어 절삭가공물 1개당 최소 5개의 시편을 제작하여 알코올로 깨끗이 세척한 다음 금속현미경에서 400배의 배율로 표면의 상태를 미리 검사한 후 표면의 상태가 최적인 것만 골라서 AFM 측정에 활용하였다. 시편의 선별에 사용된 금속현미경 사진은 Photo. 3.5, 세부 사양은 Table 3.5와 같다.



Photo. 3.3 Atomic force microscope

Table 3.3 Specification of atomic force microscope

Description		Specification
Model name		Multi-mode bio-scope
X-Y Scanner	Scan size	100 x 100 μm
	Resolution	0.15 nm
Z Scanner	Scan size	12 μm
	Resolution	0.05 nm
Z Stage	Travel length	30 mm
	Resolution	0.08 μm
	Max. speed	30,000 steps/sec
Maker		Digital instruments



Photo. 3.4 Abrasive cutting machine

Table 3.4 Specification of abrasive cutting machine

Description	Specification
Model name	Discotom-2
Power	3Ø 220 V/ 60 Hz, 2.2 kw(3Hp)
Spindle rpm	3,440 rpm
Cutting speed	45 m/s
Cutting Depth	75 mm
Cut off wheel	Ø350 mm x t 1 mm
Maker	Struers (Danmark)

공구의 마모는 절삭인선의 형태와 절삭인선의 반경을 구분하여 평가함에 따라 사용된 측정기도 Photo. 3.5의 절삭인선의 형태측정기와 Photo. 3.6의 절삭인선의 반경측정기로 구분하여 나타내었다.

절삭인선의 형태측정에 사용된 금속현미경(metallurgical microscope)은 일본 Nikon사의 Optiphot-M으로 접안렌즈가 X10, X15, 대물렌즈가 X5, X10, X20, X40, X60 X100으로 구성되어 있어 측정 배율은 X50~X1,500이며, 공작물을 지탱하는 테이블의 크기가 180 x 140 mm이고, 가로축 210 mm, 세로축 45 mm로 이송이 가능하다. 사진 촬영은 즉석 필름 홀더를 사용하는 방식으로 필름의 크기는 85 x 108 mm이며, 빛의 밝기 모드를 "0"으로 하여 ASA100으로 셋팅하면 금속의 표면과 렌즈의 초점거리에 따른 사진의 촬영시간이 분 혹은 초로 자동 결정된다. 금속현미경은 절삭인선의 형태 측정 외에도 AFM 측정용 시편의 선별, AFM 측정에 의한 표면특성 평가 시 배율결정 등에 동시에 사용되었으며, 세부 사양은 Table 3.5와 같다.

절삭인선의 반경측정에 사용된 공구현미경(tool maker's microscope)은 일본의 Topcon사 Model TUM-170EH으로 대안렌즈는 X10이고 대물렌즈는 X1, X3, X5, X10, X20이며, 사용 배율은 X10~X200이다. 작업 테이블이 1초의 정확도로 360도 회전하며, 가로 170 mm, 세로 75 mm의 이송이 가능하고 이송 정확도는 0.5 μm 이다. 측정 물체와 접안할 수 있는 높이는 60 mm이며, 필요시 카메라를 부착하여 사진을 촬영할 수 있고 보조 장치를 사용할 경우 모니터를 통해 육안으로 물체의 상을 관찰할 수 있다. Table 3.6은 본 실험에 사용된 공구현미경의 세부 사양이다.



Photo. 3.5 Metallurgical microscope

Table 3.5 Specification of metallurgical microscope

Description	Specification
Model name	Optiphot-M
X - Axis	0~210 mm
Y - Axis	0~45 mm
Table size	180 x 140 mm
Magnification	X50~X1,500
Photomicrography	Polaroid film
Maker	Nikon (Japan)



Photo. 3.6 Tool maker's microscope

Table 3.6 Specification of tool maker's microscope

Description	Specification
Model name	TUM-170EH
X - Axis	0~170 mm
Y - Axis	0~75 mm
Travels accuracy	0.5 μm
Magnification	X10~X200
Working table	Rotary table
Maker	Topcon (Japan)

3.2 시편 및 절삭공구

본 실험에서 절삭시편으로 사용한 피삭재는 중형 항공기와 자동차용 부품의 경량화 추세에 따라 초정밀 가공의 수요가 증가되고 있는 내식성과 절삭성이 우수한 알루미늄 합금(AI 6061)과 고강도 및 내마모성이 우수한 고력황동(HBsC3C)을 사용하였으며, 절삭가공을 위하여 고려된 형태인 가공부의 외경 치수가 $\varnothing 60$ mm x L31 mm, 선반의 척에 물림부의 외경 치수가 $\varnothing 40$ mm x L30 mm가 되도록 3단의 환봉 상태로 제작하여 각각 10개를 준비하였다.

Fig 3.1은 절삭시편의 제작 도면을 나타내었으며, Photo. 3.7은 제작된 절삭시편의 사진을, Table 3.7~3.9는 절삭시편의 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

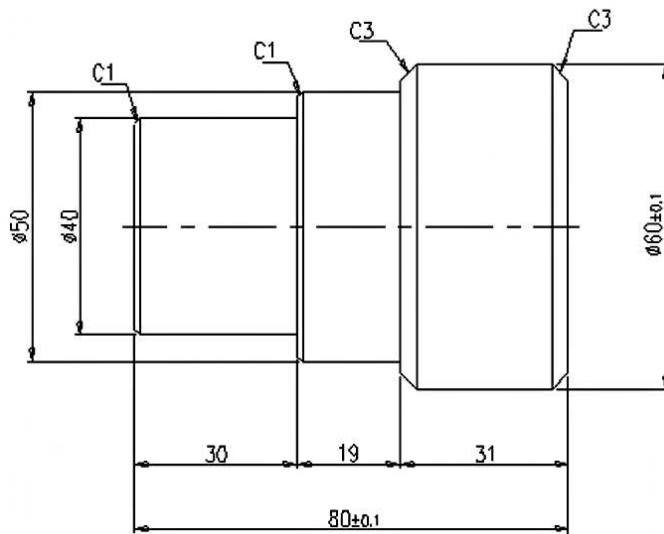


Fig. 3.1 Drawing of specimen



Photo. 3.7 Photograph of specimens

Table 3.7 Chemical compositions of aluminum alloy (*A/ 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

Table 3.8 Chemical compositions of brass (HBsC3C)

Elements	Cu	Pb	Fe	Sn	Al	Mn	Si	Zn
wt.(%)	60.0↑	0.2↓	2.0~ 4.0	0.5↓	3.0~ 7.5	2.5~ 5.0	0.01↓	rest

Table 3.9 Mechanical properties of specimens

Work piece	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation thickness (%)	Hardness (HB)	Shear strength (kgf/mm ²)
A/ 6061	26.7	30.1	18.8	17	21.0
HBsC3C	65.5	27.5	18.0	165	31.0

공구(insert)는 내마모성이 우수하고 실험에 사용된 알루미늄 합금 및 고력황동과 친화력이 적어 절삭성 및 표면거칠기가 우수한 다이아몬드 공구를 사용하였다. 공구의 홀더는 SCLCR1616h-12를 사용하였으며, 경사각은 0도, 여유각은 10도, 인선반경이 CCMT120402인 천연 다이아몬드(MCD)를 사용하였다.

천연 다이아몬드 공구는 예리한 절삭날 모서리의 가공이 가능하고, 강성이 크기 때문에 형상 윤곽의 전사성이 뛰어나 초정밀 가공에서 일반적으로 많이 사용하고 있다. 그러나 천연 다이아몬드는 화학적 조성에 있어서 비철금속 재료에만 가공이 가능하고, 절삭에 있어서 방향성을 가지고 있어 제작이 어렵고 고가라는 단점을 가지고 있다. 따라서 산업현장에서는 제작이 용이하고, 가격이 저렴한 인조 다이아몬드(PCD)가 더 선호되어 사용된다. 인조 다이아몬드 공구는 절삭가공의 방향성과 곡률을 가진 미세 홈의 가공 등을 위하여 수 마이크로미터 크기의 미세한 다이아몬드 입자를 고온, 고압에서 소결시켜 만들어 진다.

Photo. 3.8은 천연 다이아몬드 공구를, Photo. 3.9는 공구홀더에 천연 다이아몬드 공구가 체결된 상태를 나타낸 것이다.

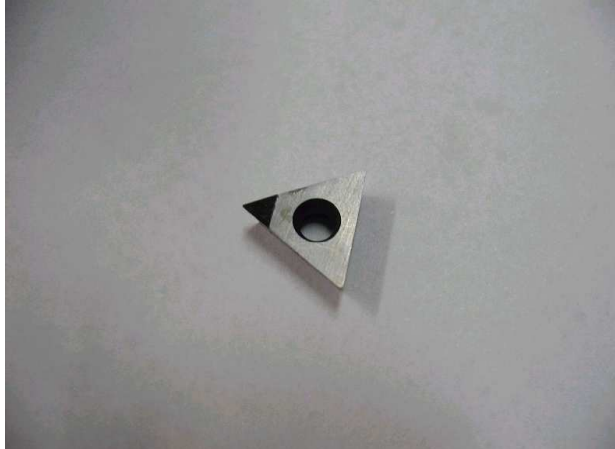


Photo. 3.8 Diamond insert

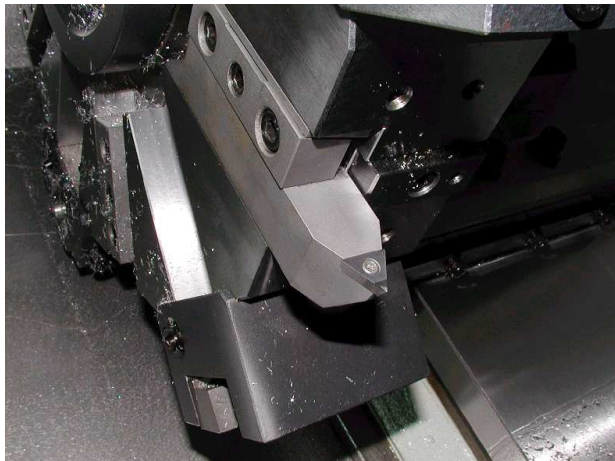


Photo. 3.9 Tool holder and diamond insert

3.3 실험방법 및 조건

본 실험은 Photo. 3.1의 초정밀 선반에서 Photo. 3.8의 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 알루미늄 합금(Al_{6061}) 소재와 황동(HBsC3C) 소재를 절삭가공한 후 표면거칠기 값의 변화와 공구마모 현상, AFM에 의한 가공면의 특성평가 등을 실시하였다.

초정밀 가공방법은 미리 준비된 외경이 $\varnothing 60$ mm이고, 성분과 기계적 성질이 Table 3.7~3.9와 같은 알루미늄 합금 소재 및 황동 소재 각각 10개를 실험용 시편으로 사용할 수 있도록 한 개당 50 mm씩 Table 3.10과 같이 이송속도 $F=0.03$ mm/rev., 절삭속도 $V=1000$ m/min., 절삭깊이 $d=0.005$ mm로 시편에 가장 적합한 절삭조건에서 건식가공 하였으며, 절삭가공 길이는 최대 500 mm까지 실험하여 결과를 비교하였다.

다음은 초정밀 가공에서 시편절삭 시 사용한 CNC 선반가공 프로그램이다.

O1101; (V=1000 m/min., F=0.03 mm/rev., d=0.005 mm, L=31 mm)

N1 G50 X200.000 Z150.000 S10000 T100;

N2 G96 G00 X65.000 Z55.000 S1000 T102 M04;

N3 G90 X59.990 Z0.000 F0.03 M08;

N4 X59.980;

N5 X59.970;

~

N264 X57.380;

N265 X57.370; (Step: 0.01)

N267 G28 X200.000 Z150.000 T100 M05;

N268 M30;

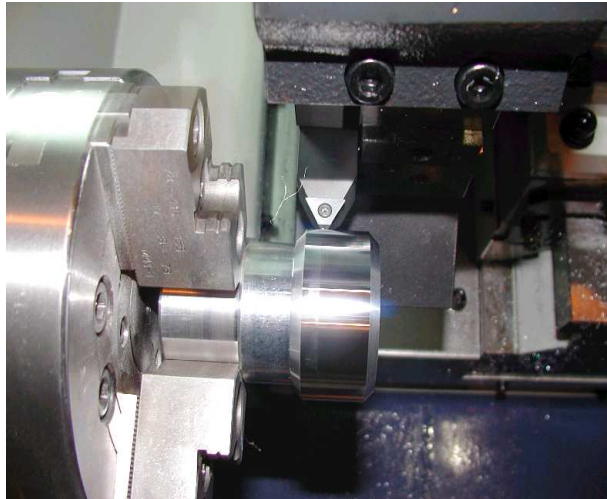


Photo. 3.10 Photograph of cutting specimen

Table 3.10 Cutting conditions

Description	Conditions
Cutting speed	$V=1,000$ m/min.
Spindle speed	$N=5,300 \sim 10,000$ rpm
Feed rate	$F=0.03$ mm/rev.
Cutting depth	$d=0.005$ mm
Cutting length	$l_{chip}=500$ km(per 50 km)
Material	Al_{6061} & HBsC3C
Material size	$\varnothing 60$ mm
Cutting method	Dry cutting

표면거칠기를 표시하는 방법에는 중심선 평균 거칠기, 최대 높이 거칠기, 10 점 평균 거칠기, 자승 평균 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 최대 높이 거칠기(R_{max})를 본 실험의 평가 방법으로 삼았다. 사용된 표면거칠기 측정기는 Photo. 3.2와 같으며, 측정기의 촉침이 측정물체의 표면과 접촉하면서 이송하는 평가 길이는 컷오프 값을 0.8 mm로 하여 거칠기 기준 길이의 4배 이상에서 평가 되도록 하였다.

측정값은 ISO 필터의 직선면 상태에서 파상도 곡선인 저역필터를 제거하고 거칠기 곡선인 고역필터를 통해 주어진 컷오프 값 내에서 최대 높이 값(peak to valley)으로 측정기가 자동 계산하여 나타내도록 하였으며, 본 실험에서 평가된 표면거칠기 값은 시편을 최소 3회 이상 반복 측정하여 그 중앙값을 측정값으로 하였다.

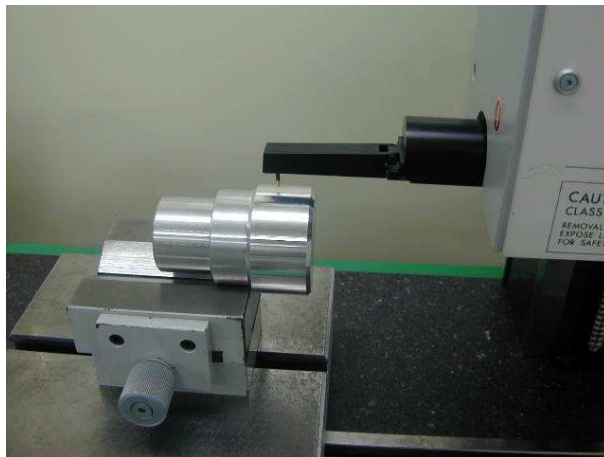


Photo. 3.11 Photograph of measuring surface roughness

공구의 마모상태는 두 가지 방법으로 평가 하였다. 먼저 Photo. 3.5의 금속현미경을 이용하여 배율 X200, X800에서 공구의 절삭인선을 세운 후 경사면과 여유면의 교차부분인 절삭인선의 형태를 100 km의 절삭주기에 따라 측정하여 공구의 마모상태를 평가 하였다. 공작기계가 이상적으로 운동하고 절삭인선의 윤곽이 가공면에 완전히 전사된다면 인선의 거칠기가 가공면의 거칠기를 결정하는 하나의 중요한 인자가 되기 때문이다.

다음은 Photo. 3.6의 공구현미경을 이용하여 공구의 절삭인선 반경을 100 km의 절삭주기로 측정하여 평가하였다. 절삭인선의 반경측정에 사용된 방법은 Fig. 3.2에서 식(18)으로 나타낼 수 있는 곡률반경 측정법을 사용하였다.

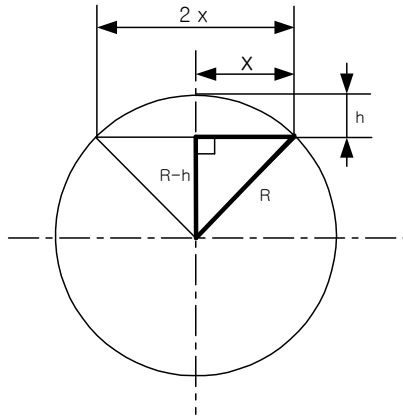


Fig. 3.2 Measurement method of nose radius

$$R^2 = x^2 + (R-h)^2 = x^2 + R^2 - (2Rh) + h^2 \quad (17)$$

$$\therefore R = \frac{x^2 + h^2}{2h} \quad (18)$$

3.4 AFM 측정에 의한 가공면의 특성평가

AFM 측정에 의한 가공표면의 특성은 가로, 세로의 배율치수(scan size)를 100 μm 로 선정하여 촬영한 AFM 사진을 통해 표면거칠기 값의 변화에 따라 가공면의 상태가 어떻게 변하는지, 공구의 절삭인선 형태나 반경의 변화에 따라 가공면의 상태가 어떻게 변하는지를 육안으로 관찰하여 평가하였다.

100 μm 의 배율치수 선정은 가공속도에 따른 이송량($F=0.03 \text{ mm/rev.}$)이 관찰될 수 있도록 하기 위하여 두 가지 단계의 조사를 실시하였는데, 먼저 금속현미경을 통하여 X100, X200, X400, X800으로 배율을 높여가며 절삭속도에 따른 이송량을 관찰하였고, 그 후 AFM에서 Fig. 3.3~3.5와 같이 20 μm , 60 μm , 100 μm 로 배율 치수를 낮추어 가며, 이송량 내에서 발생된 변화를 관찰하였다. 금속현미경에서는 가공속도에 따른 이송량은 명확하게 나타나지만 저배율인 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 μm 를 AFM 측정 배율로 결정하였다.

본 실험에 사용된 AFM은 Photo. 3.3, Table 3.3과 같으며 물체의 미세구조 분석이나 세포내의 분열 등을 관찰하기 위한 목적에서 제작된 원자현미경으로 진공상태나 대기상태 뿐 아니라 액체 내에서도 관찰이 가능한 측정기이다. 비접촉식 탐침을 통해 상을 얻으므로 시료의 손상 없이 외부구조를 입체적으로 관찰하는데 적합한 장비로 재료공학 분야에서도 다양한 활용이 가능하다.

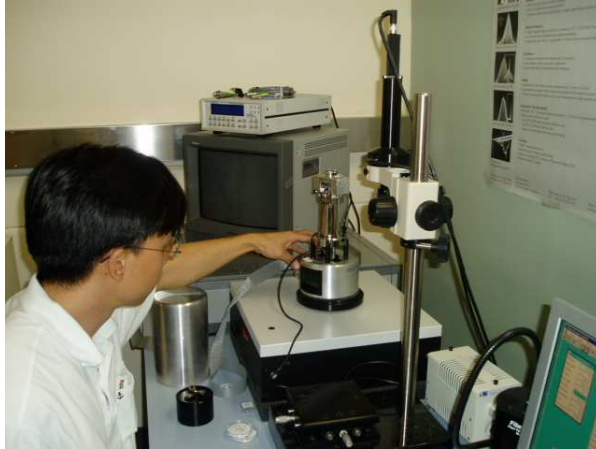
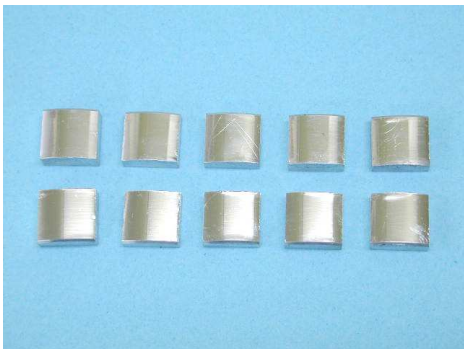


Photo. 3.12 Photograph of measuring AFM

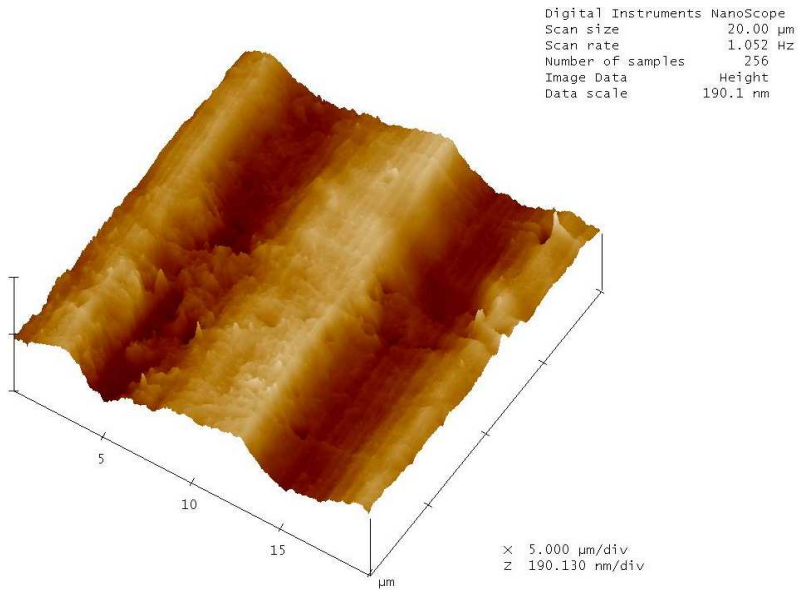


(a) Aluminum

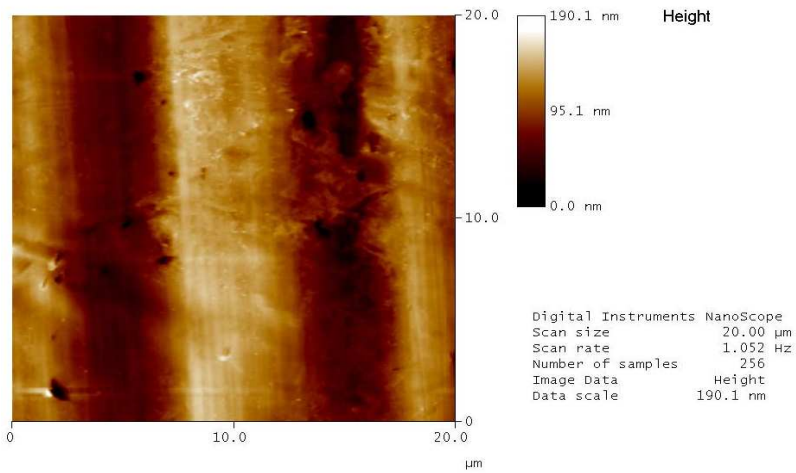


(b) Brass

Photo. 3.13 Photograph of specimens

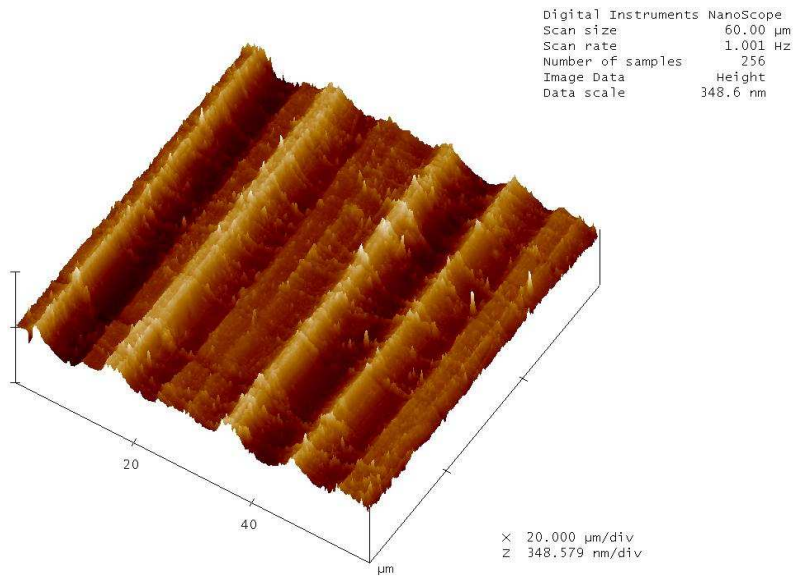


(a) 3 dimensional surface

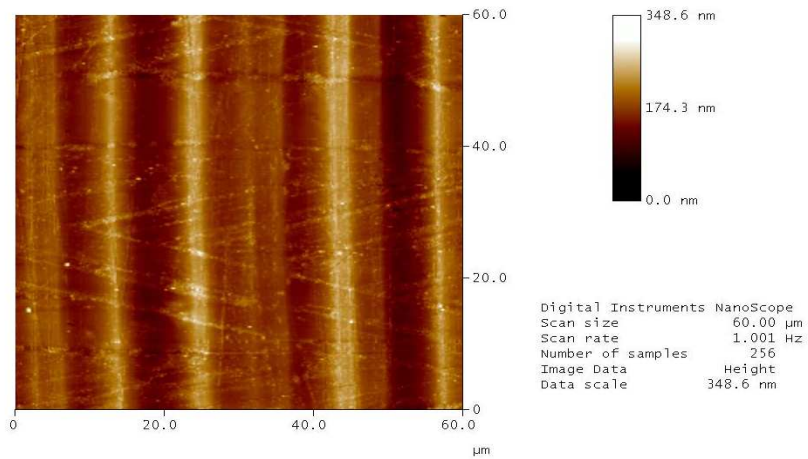


(b) 2 dimensional surface

Fig. 3.3 AFM photograph for select magnification (scan size 20 μm)

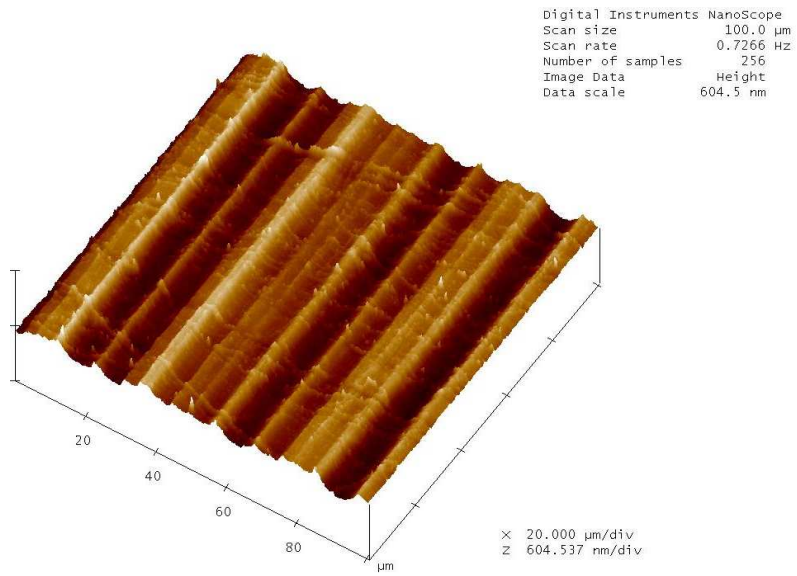


(a) 3 dimensional surface

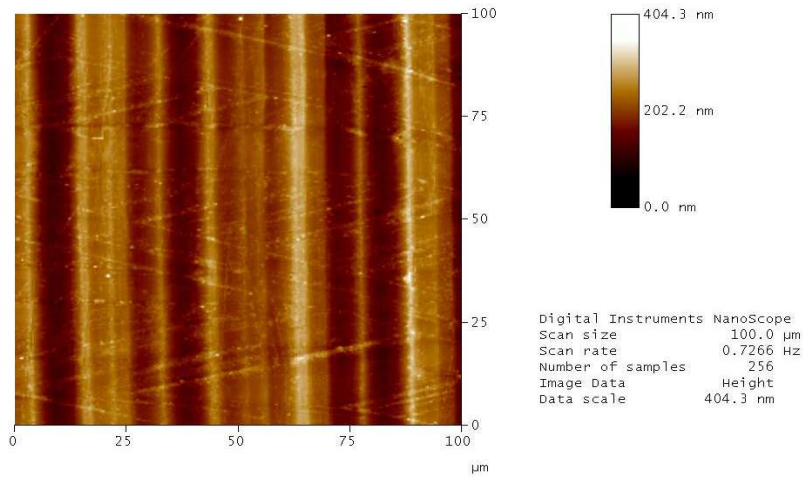


(b) 2 dimensional surface

Fig. 3.4 AFM photograph for select magnification (scan size 60 μm)



(a) 3 dimensional surface



(b) 2 dimensional surface

Fig. 3.5 AFM photograph for select magnification (scan size 100 μm)

3.5 절삭길이 및 절삭시간 산정

본 실험에서 절삭가공 표면의 특성을 평가하기 위한 절삭길이는 0~500 mm로 하였다. 실제적으로 공작기계가 가지고 있는 절삭길이에 한계가 있기 때문에 공작기계에 적합한 일정한 소재를 사용하여 절삭가공을 하였으며, 동일한 소재의 반복가공을 통해 정확한 절삭길이를 계산하여 실험을 실시하였다. 절삭길이를 계산하는 방법은 이미 알고 있는 소재의 직경과 길이, 이송속도, 절입깊이 등을 이용하여 식(20)과 같이 산정하였다.

$$AS = \frac{\pi (D_1^2 - D_2^2)}{4} L \quad (A = F \times d) \quad (19)$$

$$\therefore S = \frac{\pi (D_1^2 - D_2^2)}{4 F d} L \quad (20)$$

단, 여기서 F : 이송(mm/rev.), d : 절입깊이(mm), A : 절삭 단면적(mm²)
 S : 절삭길이(mm), L : 소재길이(mm), D_1 : 가공전의 직경(mm)
 D_2 : 가공후의 직경(mm)

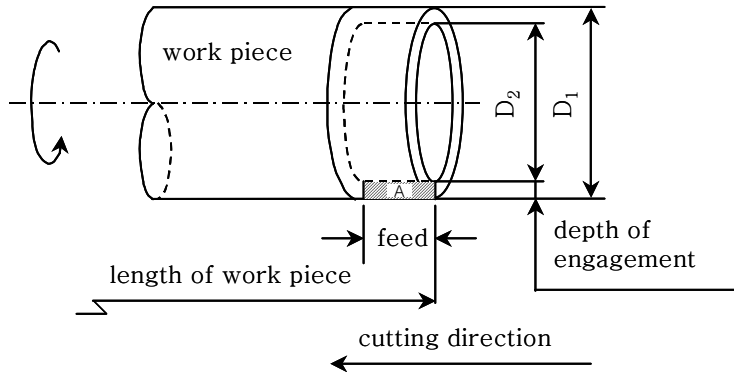


Fig. 3.6 Calculation method of cutting distance

절삭길이에 따른 실제 시간도 산출이 가능하며, 이는 식(21)과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$T = \frac{L \times R}{N \times F} \quad (21)$$

단, 여기서 T : 가공시간(min.), N : 주축 회전수(rpm), R : 반복회수
 L : 절삭길이(mm), F : 이송(mm/rev.)

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 최적 절삭조건 고찰

본 연구에서는 초정밀 가공면에 대하여 절삭길이에 따른 표면거칠기의 특성을 AFM으로 측정하여 고찰하고자 한다. 이에 따라 초정밀 가공에 사용된 다이아몬드 공구와 알루미늄 합금에 대하여 최적의 절삭조건 및 특성을 찾는 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 공구는 인조 다이아몬드 공구이며, 실험은 공구의 인선반경, 절삭속도, 이송속도, 절입깊이 등 절삭조건 변화에 따른 가공을 실시하고 나타난 결과의 분석을 통해 최적 절삭조건을 확인하였다. 확인은 Photo. 3.2의 표면거칠기 측정기로 주어진 조건의 변화에 따라 절삭된 시편의 표면거칠기를 각각 최소 3회 이상씩 측정하고, 그 평균값을 산출하여 비교 분석 하였다. Table 4.1은 실험조건과 측정결과를, Fig. 4.1은 실험조건과 측정결과에 대한 관계 그래프를 나타낸 것이다.

공구의 인선반경은 0.0, 0.2, 0.4 mm를 동일한 조건의 절삭속도, 이송속도, 절입깊이에서 절삭가공한 다음 표면거칠기를 측정하여 비교 하였다. 표면거칠기 이론식(식 13)에 의하면 공구의 인선반경과 이송에 따라 표면거칠기 값이 변하는 것이지만, 본 실험에 의한 결과를 보면 반드시 이론과 동일하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 표면거칠기 값은 공구의 인선반경이 0.2 mm일 때 $0.404 \mu\text{m}$ 로 가장 좋았으며, 0.4 mm일 때 $0.495 \mu\text{m}$ 로 가장 나쁘게 나타났다. 이론적으로 표면거칠기가 가장 나쁘게 나타날 것으로 예상되었던 인선반경 0.0 mm는 $0.458 \mu\text{m}$ 로 인선반경 0.2 mm 다음으로 좋게 나타났다. 이는 기계의 진동이나 절삭가공의 불균일성 등의 영향으로 인선반경 0.4 mm에서 실제 표면거칠기 이론 표면거칠기 보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

절삭속도에 따른 특성은 절삭속도 500, 800, 1000 m/min.에서 표면거칠기가

가장 좋게 나타난 인선반경 0.2 mm인 공구를 이용하여 동일한 조건의 이송속도와 절입깊이로 실시하였다. 절삭속도의 변화에 따라 측정된 표면거칠기 값을 분석하여 보면 0.648, 0.491, 0.378 μm 로 절삭속도가 가장 높은 1000 m/min.에서 가장 낮은 500 m/min.보다 0.270 μm 만큼 좋게 나타났다. 실험결과를 통해 절삭속도가 높을수록 표면거칠기가 좋게 나타남을 확인할 수 있었다.

이송속도에 따른 특성은 0.03, 0.05, 0.08 mm/rev.로 변화시켜가며, 표면거칠기가 가장 좋게 나타났던 공구의 인선반경 0.2 mm, 절삭속도 1000 m/min.의 조건에서 동일한 절입깊이로 실시하였다. 이송속도의 변화에 따른 표면거칠기 값은 0.323, 0.384, 0.435 μm 로 이송속도가 낮을수록 양호함을 알 수 있다. 즉, 이송속도가 낮을수록 표면거칠기가 양호하고, 커질수록 불량해지는 표면거칠기 이론(식 13)과 일치함을 확인하였다.

절입깊이에 따른 특성은 절입깊이를 반경 값으로 5, 2.5, 0.5 μm 로 점점 축소 변화시켜가며, 표면거칠기가 가장 좋게 나타났던 공구의 인선반경 0.2 mm, 절삭속도 1000 m/min., 이송속도 0.03 mm/rev.의 조건에서 실시하였다. 실험결과 절입깊이의 변화에 따른 표면거칠기 값은 0.398, 0.439, 0.437 μm 로 절입깊이가 표면거칠기에 미치는 영향은 특정한 경향을 가지고 있지 않음을 확인할 수 있다. 이는 절입깊이가 미세하기 때문에 이송에 비하여 절입깊이의 변화가 표면거칠기에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

위와 같은 절삭조건에 따른 가공 특성의 실험결과를 통하여 본 연구를 위한 최적의 절삭가공 조건은 공구의 인선반경 0.2 mm, 절삭속도 1000 m/min., 이송속도 0.03 mm/rev., 절입깊이 5 μm (반경 값)임을 확인 하였다.

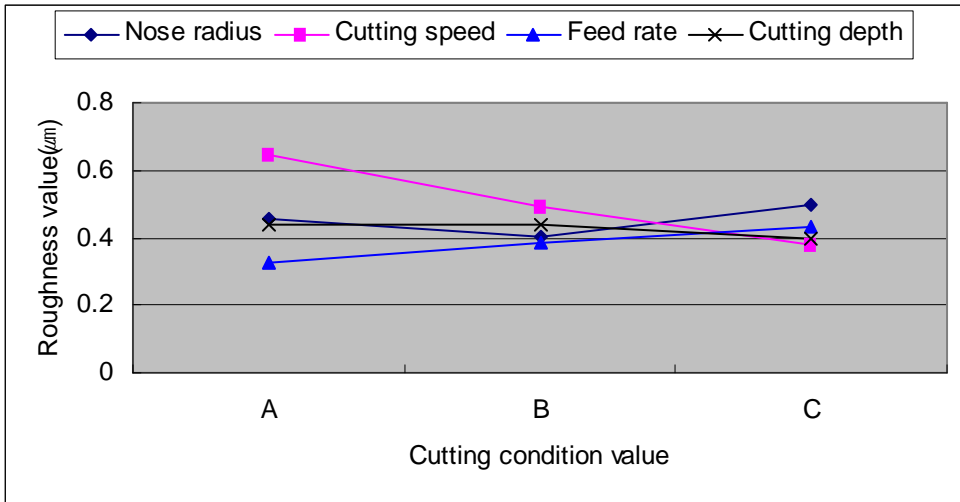


Fig. 4.1 Relation between surface roughness and cutting condition

Table 4.1 Roughness values affected cutting condition

Items	Description	A	B	C
Nose radius	Condition value	0.0 mm	0.2 mm	0.4 mm
	$R_{max}(\mu m)$	0.458	0.404	0.495
Cutting speed	Condition value	500 m/min.	800 m/min.	1000 m/min.
	$R_{max}(\mu m)$	0.648	0.491	0.378
Feed rate	Condition value	0.03 mm/rev.	0.05 mm/rev.	0.08 mm/rev.
	$R_{max}(\mu m)$	0.323	0.384	0.435
Cutting depth	Condition value	0.5 μm	2.5 μm	5 μm
	$R_{max}(\mu m)$	0.437	0.439	0.398

4.2 절삭공구의 마모현상 고찰

공구의 경사각과 여유각의 형태유지를 목적으로 공구수명과 관련된 인선마모를 평가할 때는 절삭인선의 형태와 반경을 구분 평가하여야 하며, 전단 영역에서의 전단, 경사면의 마찰, 절삭날 선단에서의 분리작용으로 구분된다. 초정밀가공에서는 절삭날의 선단형상이 가공면의 형성에 영향을 주며, 절삭 깊이가 인선반경보다 같거나 작을 경우, 절삭날은 국부적으로 선단에서 음의 경사각(negative rake angle)으로 절삭되며, 공작물의 일부가 공구의 여유면 쪽으로 밀려들어가 절삭공구와 공작물 사이의 절삭압력이 증가되어 거친 요철이 매끄럽게 되어지는 버니싱(burnishing) 작용과 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하게 된다. 이러한 절삭공구의 인선상태와 절삭조건의 상관관계를 알아보기 위하여 금속현미경과 공구현미경으로 절삭인선 상태를 측정 고찰하였다.

먼저 공구의 절삭인선 형태를 측정하기 위하여 500 km까지 천연 다이아몬드 공구로 절삭가공을 하면서 매 100 km의 주기로 금속현미경의 배율을 X200과 X800으로 비교하며, 절삭인선의 변화를 측정하였다. Photo. 4.1~4.2는 알루미늄 합금의 절삭가공 전·후를, Photo. 4.3~4.4는 황동의 절삭가공 전·후를 비교한 사진으로 각각 절삭인선의 형태를 육안으로 살펴보면 절삭가공 전·후에 대한 윤곽의 마모나 변형은 없는 것으로 판단되나 상면 경사면은 칩 유동에 따른 마찰로 채색된 현상을 관찰할 수 있었다.

공구현미경에서 측정된 절삭공구의 인선반경 값의 변화는 Fig. 4.2, Table 4.2와 같이 알루미늄 합금은 300 km까지, 황동은 200 km까지 일정하였으나 이후부터는 약 1 μm 씩 증가함을 확인하였다. 따라서 500 km이후의 지속적인 실험이 필요함을 확인하였다. 그러나 일반적인 절삭에서 연속적인 가공작업은 100 km 이내에서 이루어지므로 천연 다이아몬드 공구에 의한 인선의 변화는 무시할 수 있는 문제로 생각되며, 공작기계의 미세 진동과 공구의 설치각의 변화 등에 따른 영향으로 표면거칠기 값에만 변화를 주고 있는 것으로 확인할 수 있다.

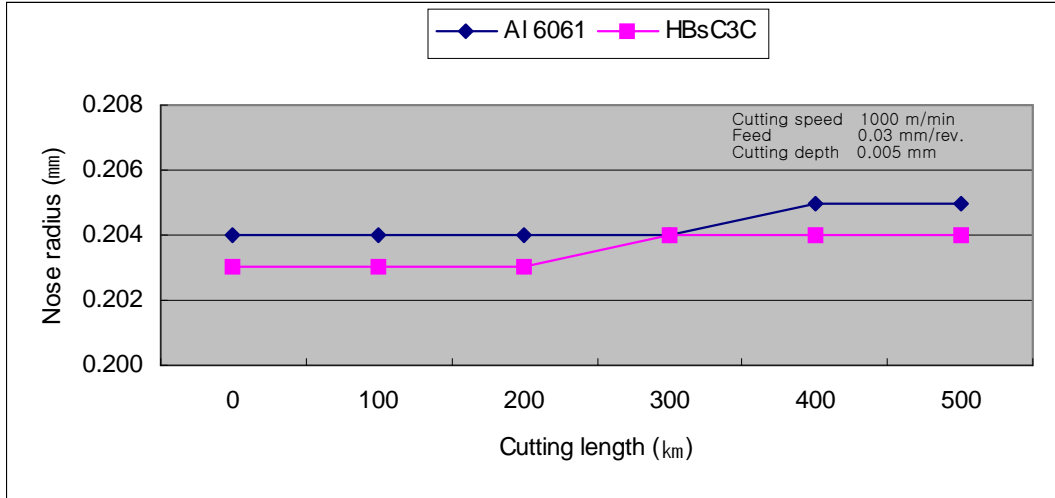


Fig. 4.2 Relation between tool nose radius and cutting length

Table 4.2 Nose radius values of tool

Cutting length (km)		0	100	200	300	400	500
Nose radius (mm)	Al ₆₀₆₁	0.204	0.204	0.204	0.204	0.205	0.205
	HBsC3C	0.203	0.203	0.203	0.204	0.204	0.204



(a) Magnification : X200



(b) Magnification : X800

Photo. 4.1 Diamond new tool (*AI*₆₀₆₁)



(a) Magnification : X200

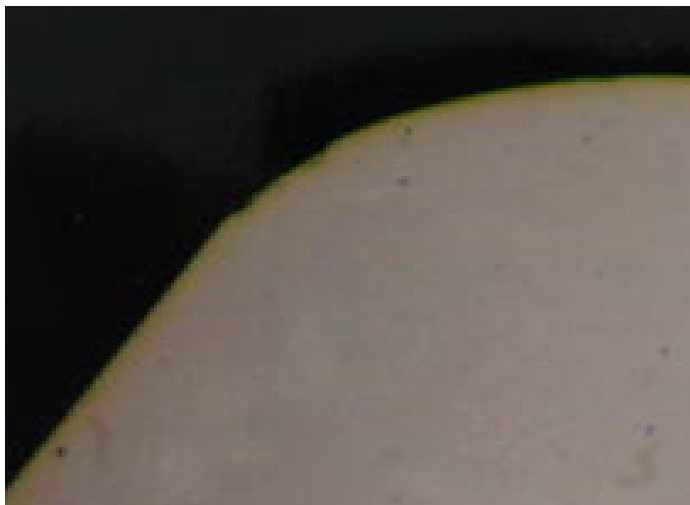


(b) Magnification : X800

Photo. 4.2 Diamond tool after cutting ($A/_{6061}$)



(a) Magnification : X200



(b) Magnification : X800

Photo. 4.3 Diamond new tool (HBsC3C)



(a) Magnification : X200



(b) Magnification : X800

Photo. 4.4 Diamond tool after cutting (HBsC3C)

4.3 가공면의 표면거칠기 특성 고찰

초정밀 가공에서의 가공정밀도나 표면거칠기는 가공기술, 환경, 절삭재료, 사용된 공구 및 지그 등에 따라 상호 복합적으로 다양하게 나타날 수 있겠으나 최종적으로는 절삭공구와 가공물간의 상대운동을 통해 절삭가공이 이루어지고 그 결과에 따라 가공물의 형상과 면이 결정된다고 볼 수 있다. 천연 다이아몬드 공구에 의한 초정밀 가공에서는 앞 절에서 구성인선에 의해 야기되는 절삭저항의 변화가 적기 때문에 본 실험에서는 공작기계가 이상적으로 운동하고 절삭 공구의 절삭인선 윤곽이 공작물에 전사되어 가공면의 형상을 결정하는 것으로 가정하여 표면거칠기의 특성을 고찰하였다.

일반적으로 직선절인 공구는 반경절인을 갖는 공구에 비하여 가공면의 거칠기를 양호하게 할 수 있고, 공구를 지그에 고정하는 방법에 따라 공구의 설치각이 변하여 표면거칠기를 다르게 할 수 있다. 선단반경이 무한대인 직선절인의 경우 이론적 표면거칠기는 0이 될 수 있으나, 표면거칠기가 이론값에 미치지 못하는 절삭도중 공구와 공작물의 상대진동, 기계 본체의 불안정 및 주위환경, 공구 설치각의 영향이 작용되기 때문이다.

본 연구를 위한 절삭가공은 4.1절의 실험방법에 따라 가장 이상으로 결정된 Table 3.10의 절삭조건과 공구의 인선반경 0.2 mm로 실시하였으며, 절삭공구는 천연 다이아몬드 공구를 알루미늄 합금과 황동 재료용으로 각각 구분하여 사용하였다. 초정밀 가공에서 가장 효율적인 공구로는 천연 다이아몬드 공구로서 그 어느 공구보다도 성능이 뛰어나지만 제작이 어렵고 구입비용이 높아 일반 산업현장에서는 많이 사용되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 초정밀급 부품의 제작에 사용하지 않으면 원하는 제품의 성능을 얻을 수 없기 때문에 점진적으로 그 사용분야와 수량이 늘어나고 있다. 따라서 천연 다이아몬드 공구를 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 공구에 대한 특성 및 활용 방법을 충분한 실험을 통하여 찾아낼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 알루미늄 합금 재료와 황

동 재료에 대하여 절삭길이 50 km단위로 각각 500 km까지 동일한 절삭조건에서 절삭가공을 실시하여 표면거칠기의 특성을 고찰하였다.

4.3.1 알루미늄 합금 재료의 표면거칠기 특성

Fig. 4.3과 Table 4.3에 나타난 알루미늄 합금 재료의 측심식 표면거칠기 측정기에 의한 표면거칠기 값의 측정결과를 고찰해 보면, 절삭길이가 50 km에서 0.390 μm 이던 것이 200 km에서는 0.489 μm 로 절삭가공 초기에는 평균 0.032 μm 씩 점진적으로 나빠지다가 400 km에서 0.412 μm 로 일정량의 가공이 계속 진행됨에 따라 0.077 μm 정도 좋아지나 500 km에서 0.498 μm 로 다시 0.086 μm 정도 급격히 나빠짐을 확인할 수 있다.

이는 새 공구의 불균일한 절삭인선 윤곽이 절삭가공 중 가공표면에 전사되어 200 km까지 초기 가공에서는 표면거칠기가 불량하게 나타나던 것이 일정 길이의 절삭가공이 진행되면서 거친 인선의 탈락이 점진적으로 없어지고 이후 안정된 표면거칠기로 되돌아오다가 계속 가공 길이가 증가되면 절삭길이 400 km 이후에는 공구의 절삭인선 마모가 진행되면서 다시 나빠지는 것으로 판단된다.

결과적으로 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 알루미늄 합금 재료를 절삭가공 할 경우 표면거칠기는 가공 초기 새로운 공구 사용으로 오히려 불량한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 500 km 이후의 결과도 향후 연구해야 할 실험과제로 생각된다. Fig. 4.4~4.13은 알루미늄 합금 재료의 시편에 대한 각각의 표면거칠기 측정값을 나타낸 것이다.

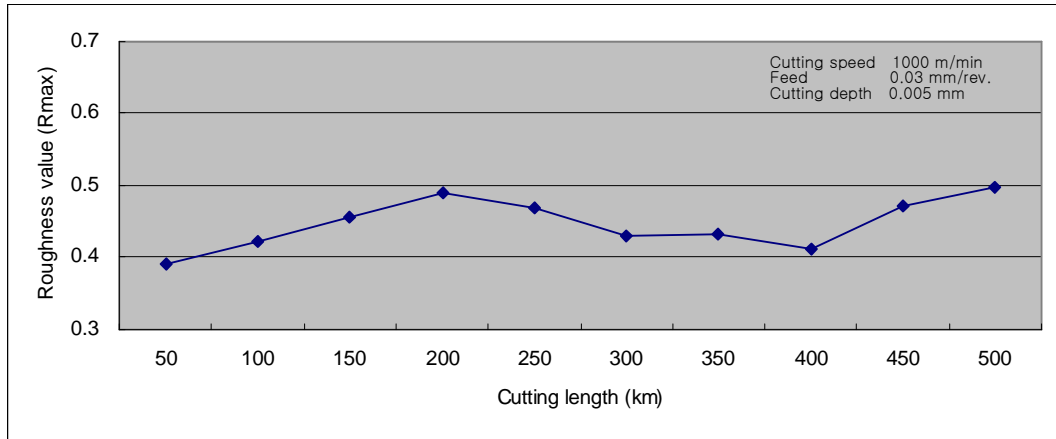


Fig. 4.3 Surface roughness graph of aluminum alloy

Table 4.3 Surface roughness values of aluminum alloy

Cutting length (km)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Roughness value (R_{max})	0.390	0.421	0.456	0.489	0.469	0.431	0.433	0.412	0.472	0.498

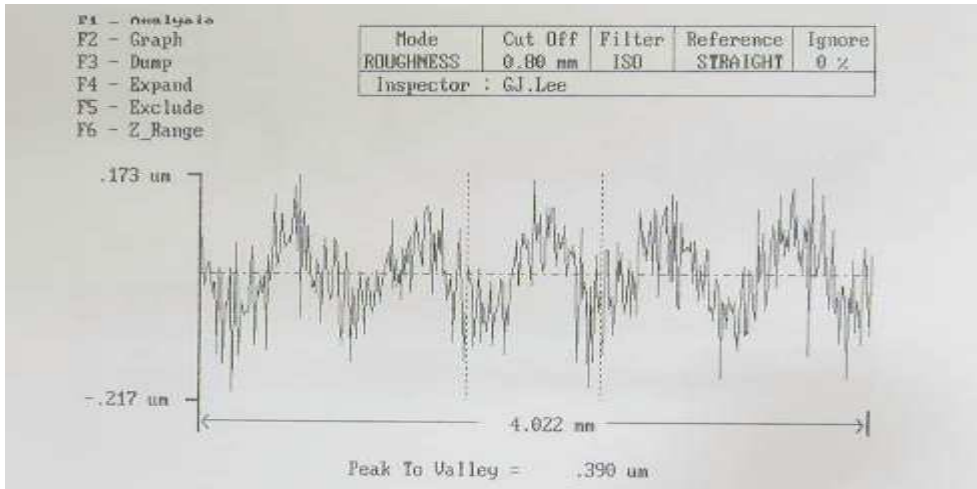


Fig. 4.4 Surface roughness value ($Az_{6061}/50$ km cutting length)

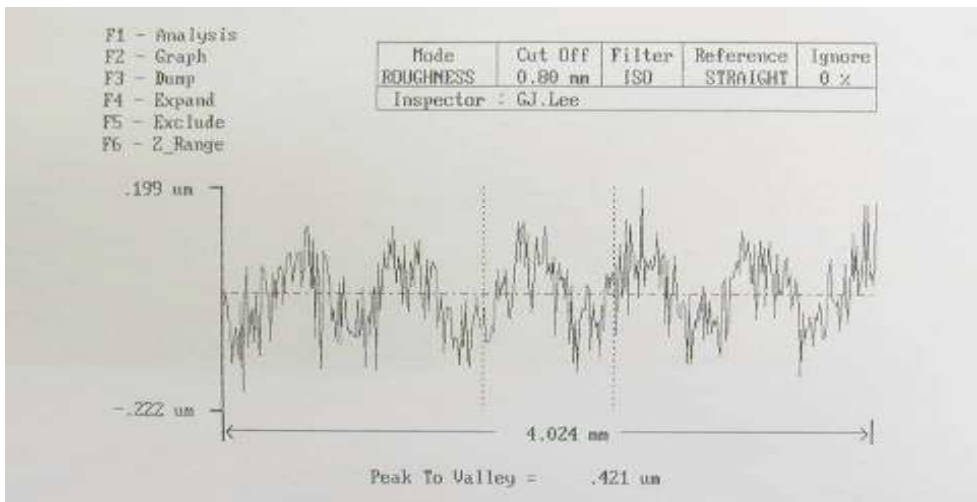


Fig. 4.5 Surface roughness value ($Az_{6061}/100$ km)

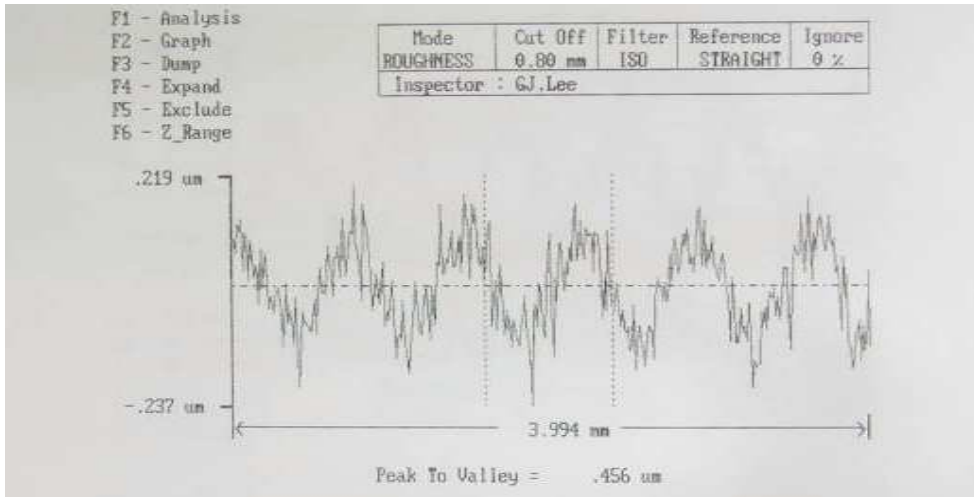


Fig. 4.6 Surface roughness value ($A/_{6061/ 150 \text{ km}}$)

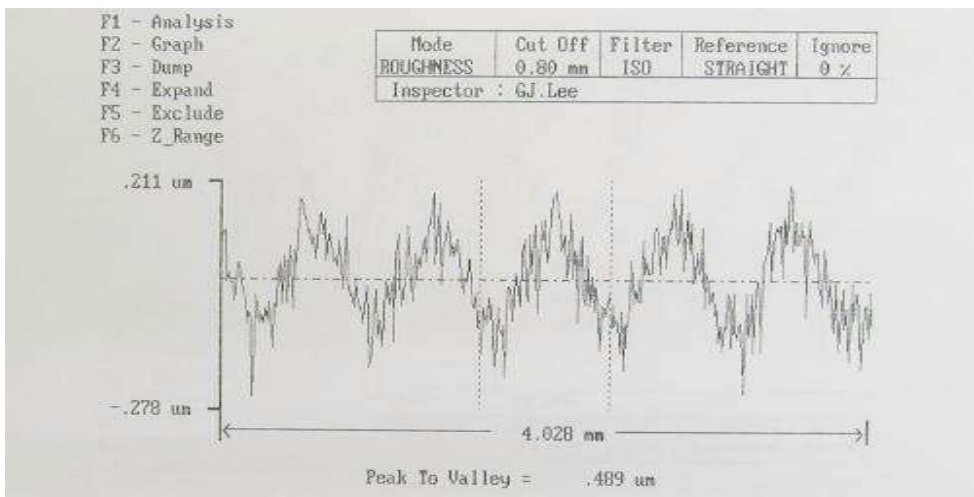


Fig. 4.7 Surface roughness value ($A/_{6061/ 200 \text{ km}}$)

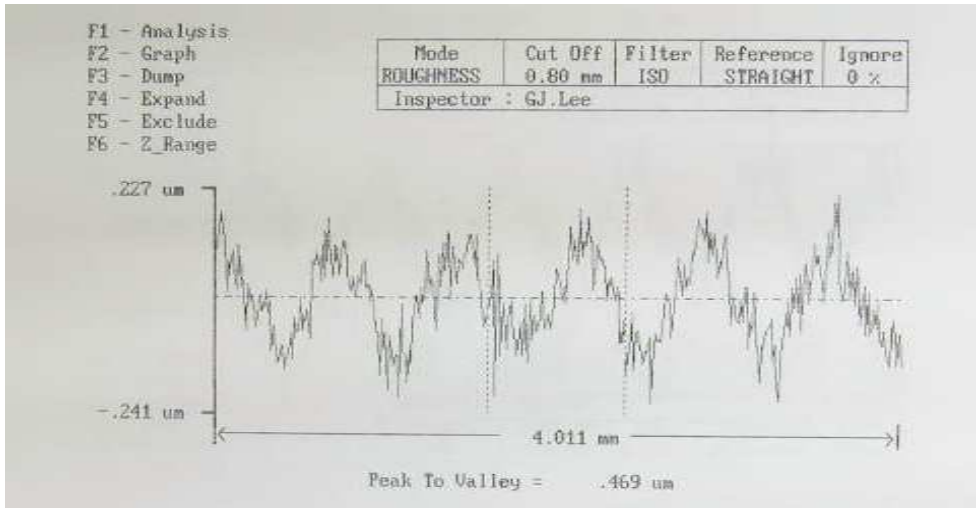


Fig. 4.8 Surface roughness value ($A/_{6061/250}$ km)

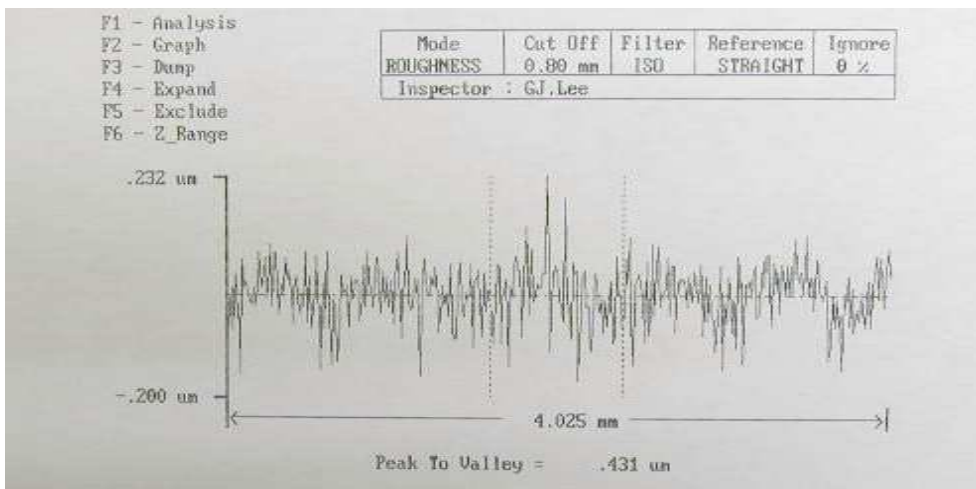


Fig. 4.9 Surface roughness value ($A/_{6061/300}$ km)

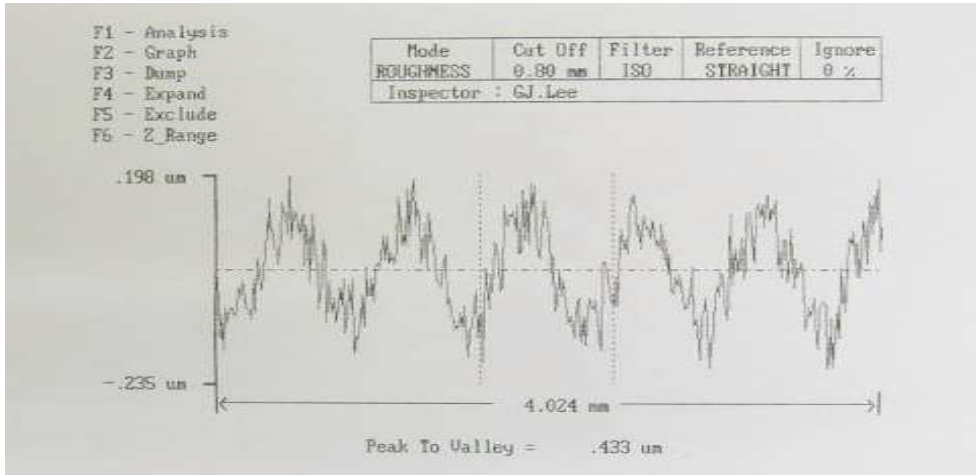


Fig. 4.10 Surface roughness value ($A/_{6061}/ 350$ km)

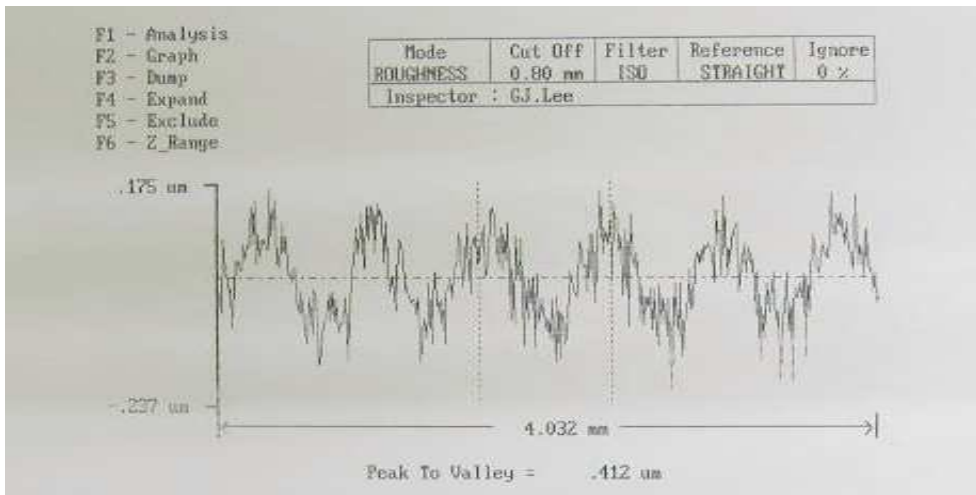


Fig. 4.11 Surface roughness value ($A/_{6061}/ 400$ km)

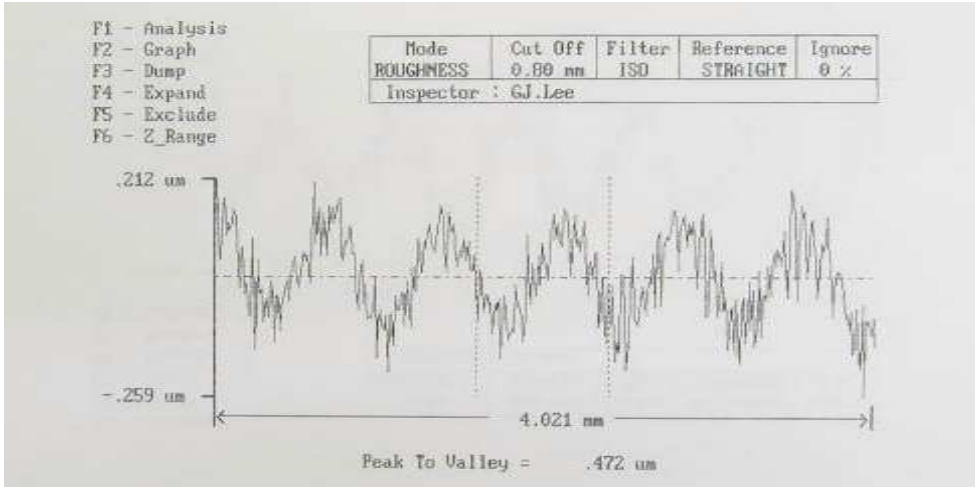


Fig. 4.12 Surface roughness value ($AI_{6061/450}$ km)

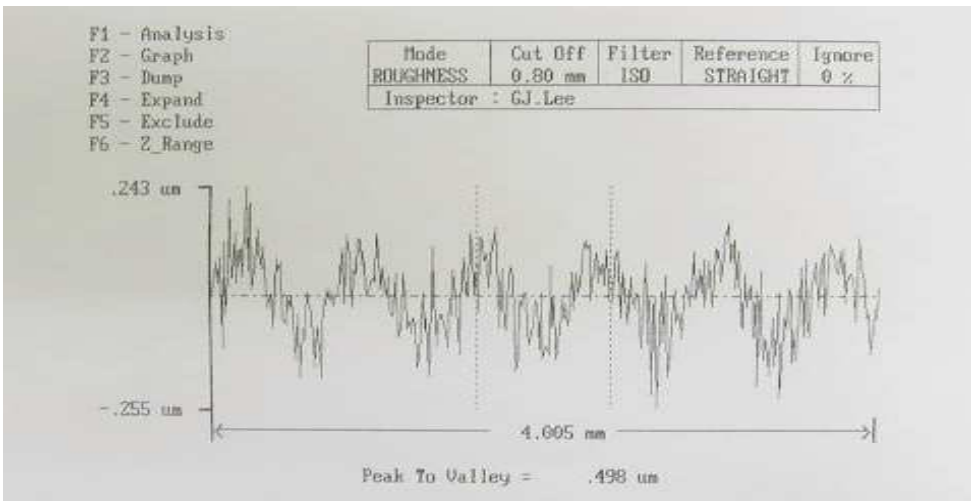


Fig. 4.13 Surface roughness value ($AI_{6061/500}$ km)

4.3.2 황동 재료의 표면거칠기 특성

Table 4.4와 Fig. 4.14는 황동 재료의 가공면에 대한 표면거칠기 특성을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 그 결과를 고찰해보면, 절삭길이가 50 km에서 0.672 μm 이던 것이 150 km에서는 0.781 μm 로 가공 초기에 0.109 μm 정도 크게 나빠지다가 300 km에서 0.612 μm 로 일정량의 절삭가공이 계속 진행된 후 가장 좋은 결과를 보이나 500 km에서 0.773 μm 로 다시 점진적으로 나빠짐을 확인할 수 있었다. 황동 재료 역시 알루미늄 합금 재료와 마찬가지로 새 공구의 불균일한 절삭인선 윤곽이 절삭가공 중 가공표면에 전사되어 150 km의 초기 절삭에서 표면 거칠기가 불량하게 나타나고, 일정 길이의 가공이 진행되면서 거친 윤곽의 탈락이 점진적으로 없어지며 일정량까지 좋아지나 300 km 이후 계속 가공 길이가 증가되면서 공구의 절삭인선 윤곽의 마모현상이 진행되므로 다시 표면거칠기가 나빠지는 것으로 확인 되었다.

이와 같은 결과를 고찰해 보면, 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 황동 재료를 가공할 경우 알루미늄 합금 재료와 같이 초기 일정 길이의 가공에서 새로운 공구 사용으로 오히려 불량한 결과를 얻게 됨을 확인할 수 있었으며, 절삭길이만 다소 차이를 보일뿐 표면거칠기 값의 변화 현상은 알루미늄 합금 재료와 거의 일치된 유형을 나타내고 있음을 확인 하였다.

Fig. 4.15~4.24는 황동 재료의 시편에 대한 각각의 표면거칠기 측정값을 나타낸 것이다.

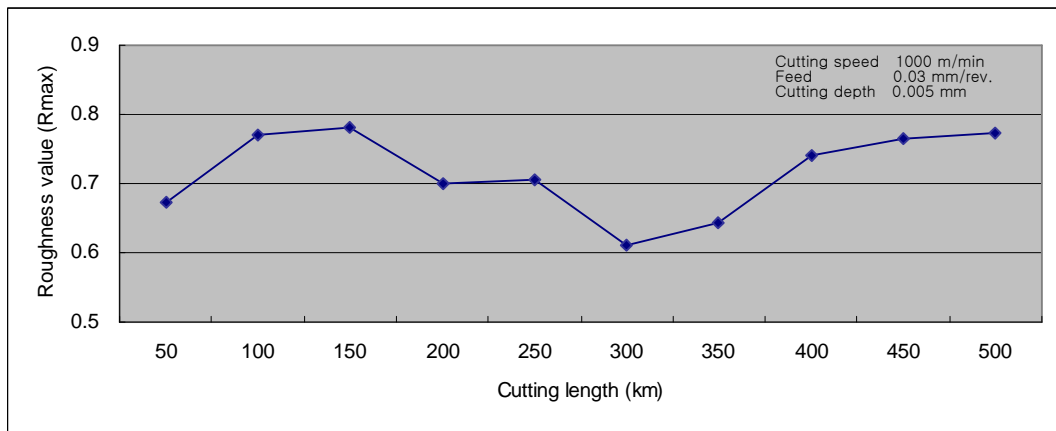


Fig. 4.14 Surface roughness graph of brass

Cutting length (km)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Roughness value (R_{max})	0.672	0.769	0.781	0.699	0.705	0.612	0.642	0.741	0.765	0.773

Table 4.4 Surface roughness values of brass

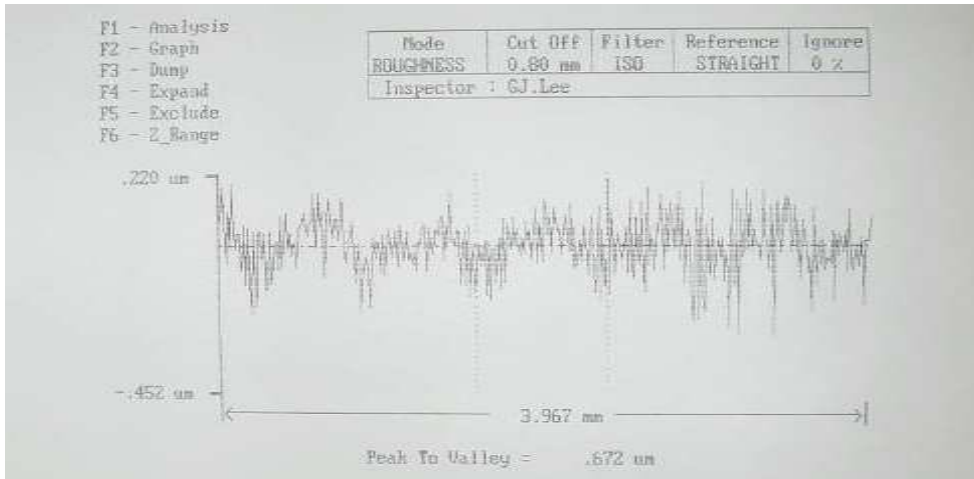


Fig. 4.15 Surface roughness value (HBsC3C/ 50 km cutting length)

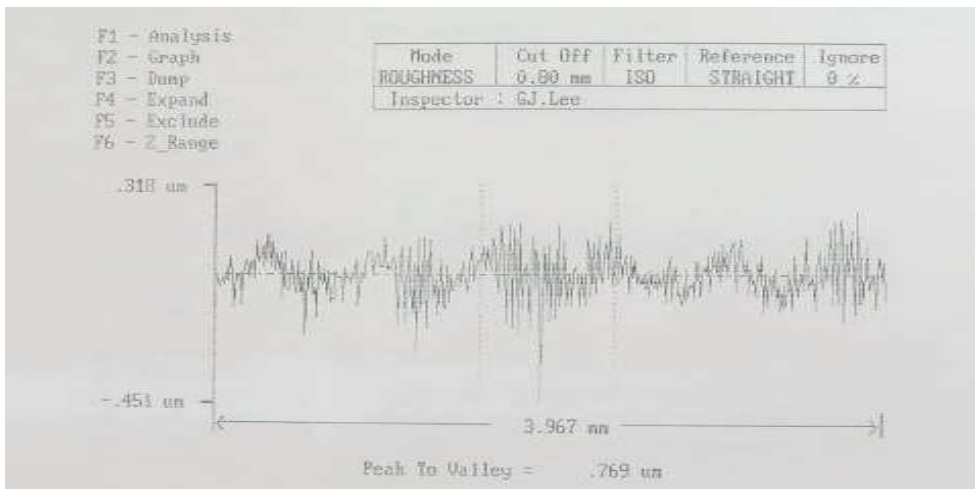


Fig. 4.16 Surface roughness value (HBsC3C/ 100 km)

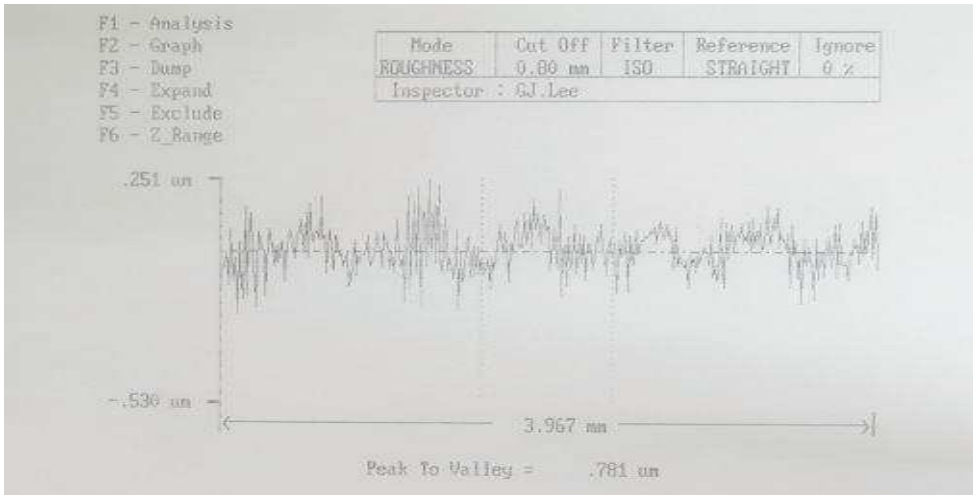


Fig. 4.17 Surface roughness value (HBsC3C/ 150 km)

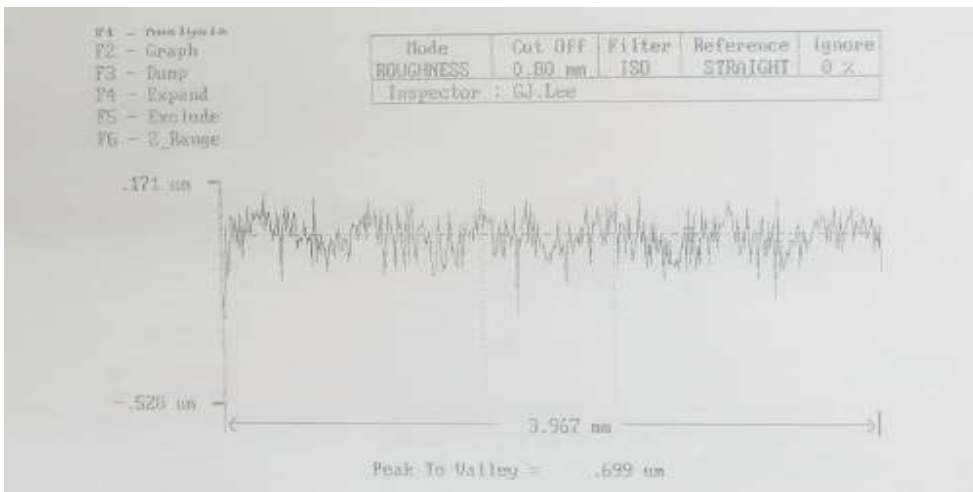


Fig. 4.18 Surface roughness value (HBsC3C/ 200 km)

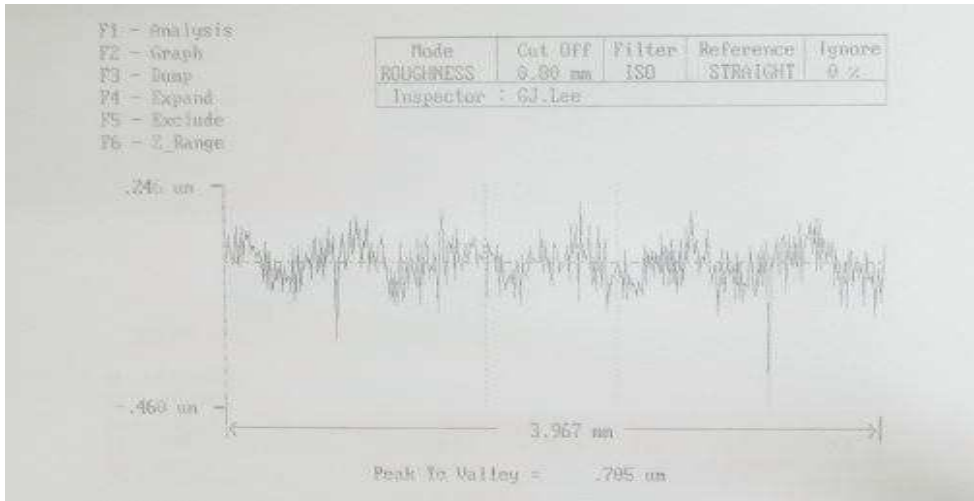


Fig. 4.19 Surface roughness value (HBsC3C/ 250 km)

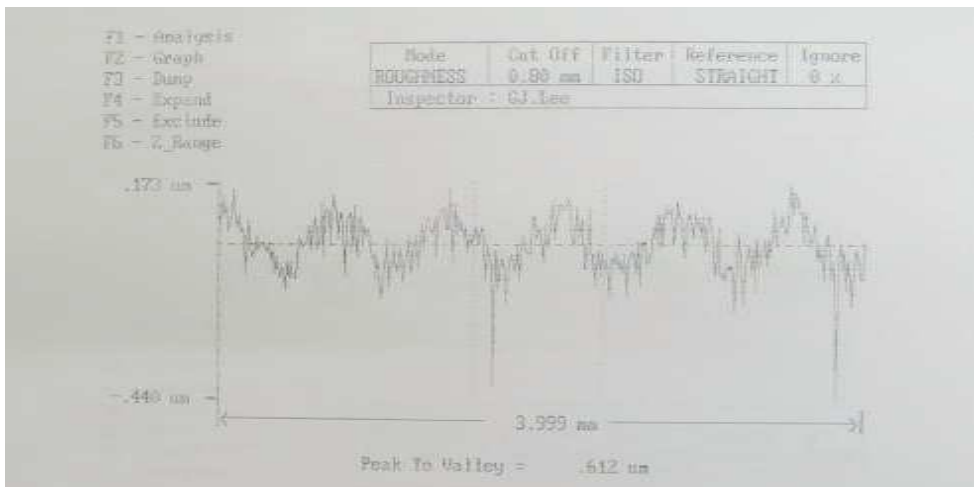


Fig. 4.20 Surface roughness value (HBsC3C/ 300 km)

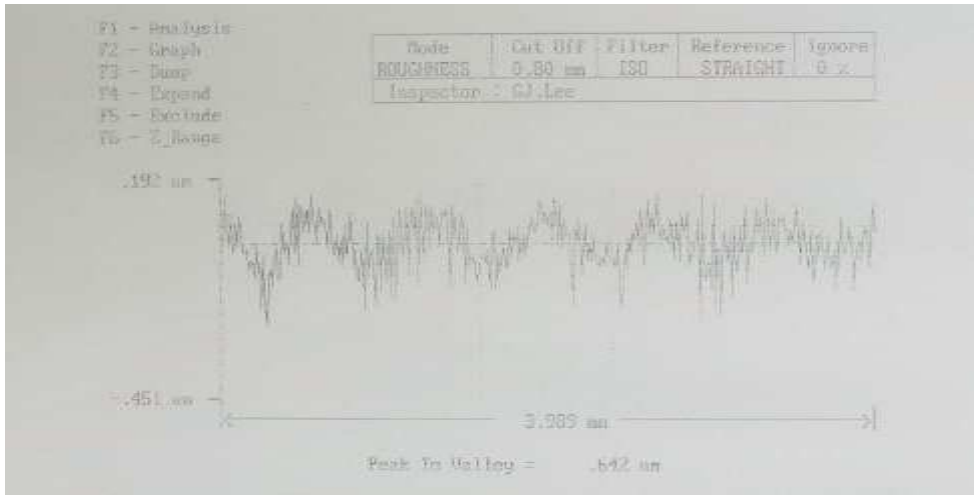


Fig. 4.21 Surface roughness value (HBsC3C/ 350 km)

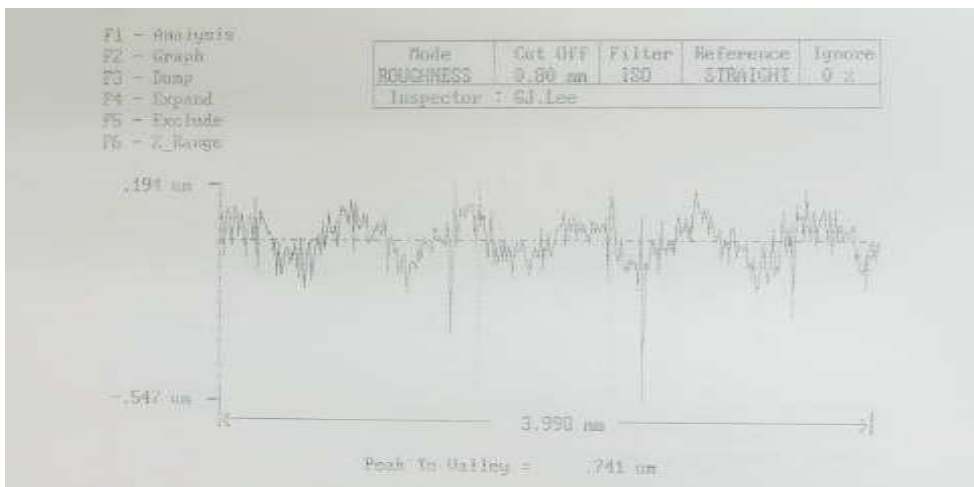


Fig. 4.22 Surface roughness value (HBsC3C/ 400 km)

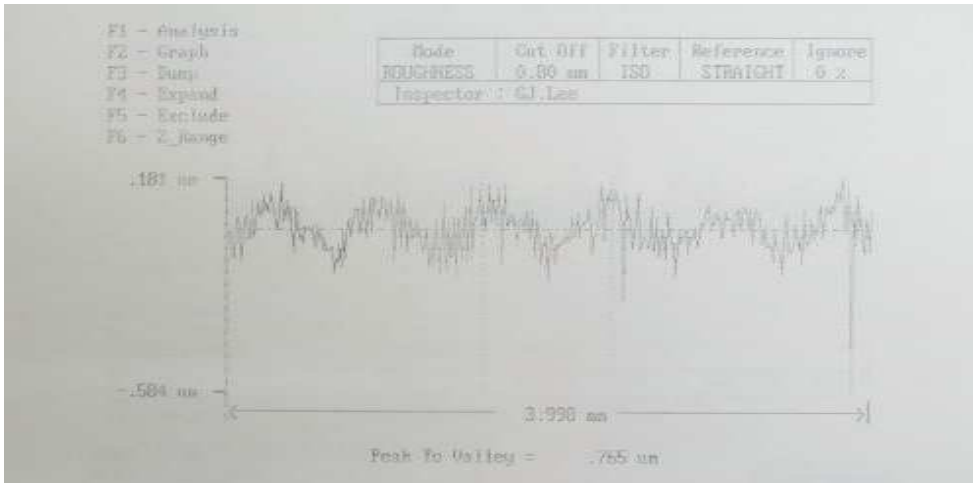


Fig. 4.23 Surface roughness value (HBsC3C/ 450 km)

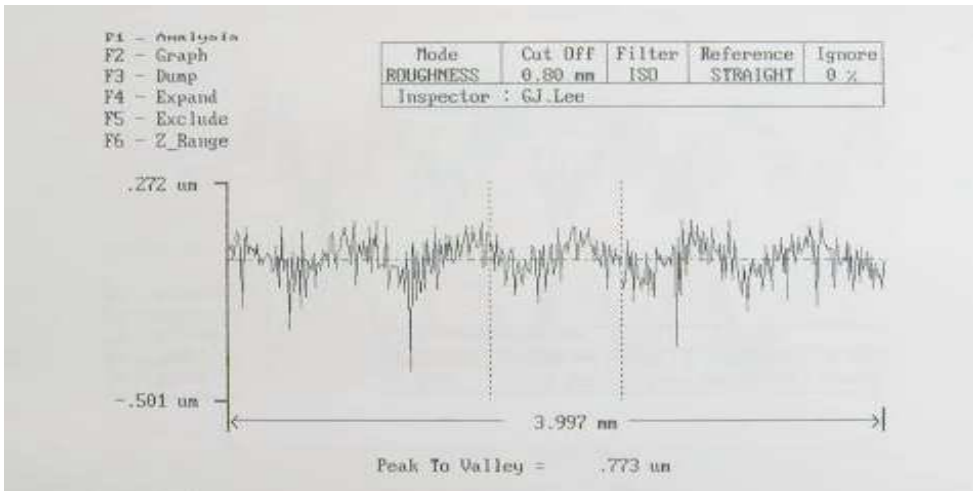


Fig. 4.24 Surface roughness value (HBsC3C/ 500 km)

4.3.3 가공재료에 따른 표면거칠기 특성 비교

Table 4.5와 Fig. 4.25는 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 알루미늄 합금과 황동 재료에 대하여 절삭길이 500 μm 까지 50 μm 단위로 동일한 절삭조건에서 절삭가공 후 표면거칠기 값의 특성을 비교한 종합적인 결과이다.

두 재료의 측정 평균값을 비교해 보면, 알루미늄 합금 재료는 0.447 μm 이고 황동 재료는 0.716 μm 로 알루미늄 합금 재료가 황동 재료 보다 0.269 μm 더 우수한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있었으며, 최대와 최소 편차 값을 상호 비교했을 때도 알루미늄 합금 재료는 최대 0.498 μm , 최소 0.390 μm 로 편차 값이 0.108 μm 를 나타내고 있으나 황동 재료는 최대 0.773 μm , 최소 0.612 μm 로 편차 값이 0.161 μm 를 나타내고 있어 역시 알루미늄 합금 재료가 황동 재료 보다 0.053 μm 더 안정적인 결과를 얻고 있음을 확인할 수 있었다.

이는 공구의 수명과 절삭가공 후 표면의 특성을 평가할 수 있는 중요한 자료가 된다고 판단된다. 즉 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭길이 500 μm 이내에서 알루미늄 합금 재료와 황동 재료를 절삭가공 할 경우 황동 재료 보다는 알루미늄 합금 재료가 표면거칠기 값이 더 우수하고 안정적인 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Fig. 4.25는 알루미늄 합금 재료와 황동 재료의 절삭길이 증가에 따라 표면거칠기 값의 변화 그래프를, Table 4.5에는 그에 대한 표면거칠기 값의 측정결과를 각각 비교하여 나타내었다.

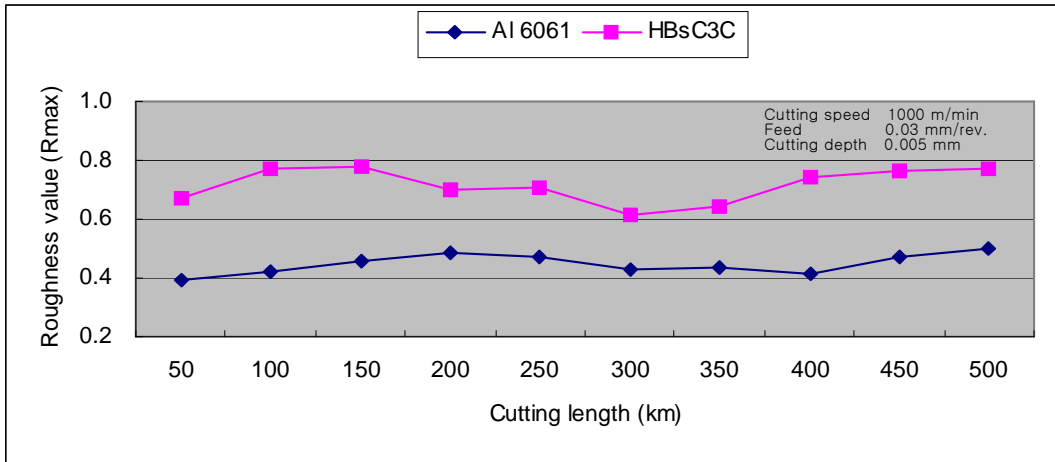


Fig. 4.25 Relation between surface roughness and cutting length

Table 4.5 Measurement results of surface roughness

Cutting length (km)		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Roughness value (R _{max})	Al ₆₀₆₁	0.390	0.421	0.456	0.489	0.469	0.431	0.433	0.412	0.472	0.498
	HBsC3C	0.672	0.769	0.781	0.699	0.705	0.612	0.642	0.741	0.765	0.773

4.4 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰

본 절에서는 AFM 사진을 통하여 절삭조건에 따라 가공된 표면의 특성이 어떻게 변하여 나타나는지 그 현상을 고찰해 보았다. Fig. 4.26~4.35는 알루미늄 합금 재료의 표면특성 사진을, Fig. 4.36~4.45는 황동 재료의 표면특성 사진을 각각 배율 100 μm 에서 촬영하여 이송속도에 따른 이송량과 한 피치의 이송량 내에서 변화되는 표면의 다양한 현상들을 볼 수 있도록 하였다.

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 μm 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

4.4.1 알루미늄 합금 재료의 표면특성

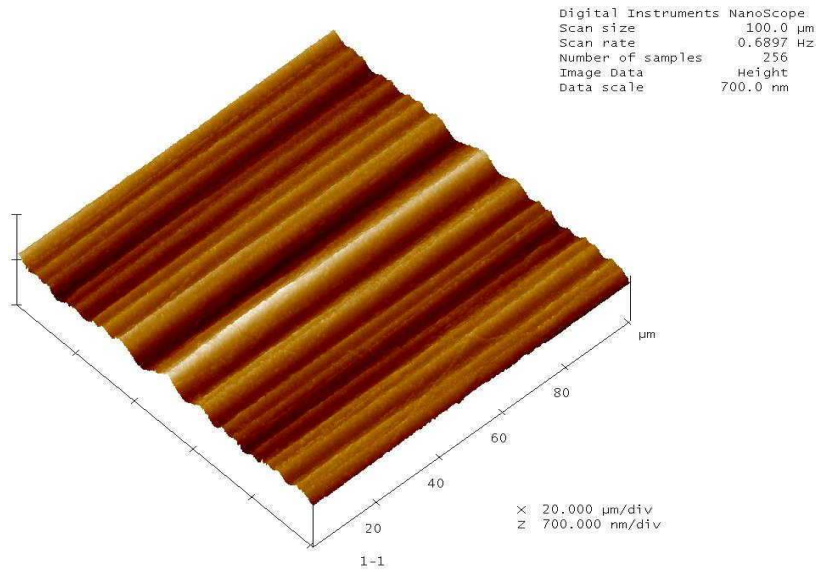
수행된 실험조건에서 절삭 가공된 알루미늄 합금 재료의 표면특성에 대한 현상을 Fig. 4.26~4.35에 나타난 AFM 사진을 통하여 관찰해 보면 전체적으로 이송속도에 따른 이송량은 비교적 뚜렷하고 일정하나 한 피치의 이송량 내에서 크고 작은 다양한 산과 골들이 또 다른 굴곡형태로 생성되어 표면의 형상이 다

소 다르게 나타나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.

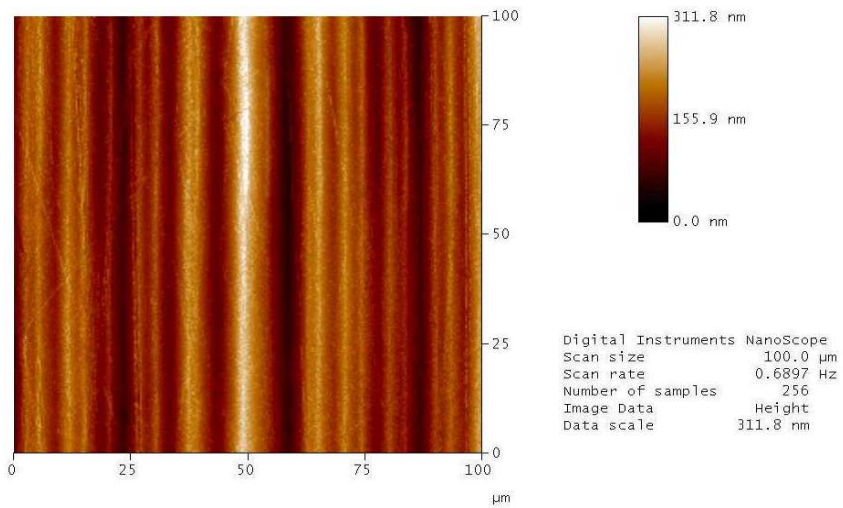
초기 50 km에서는 이송량 형태로 생성된 표면의 형상이 선명하고 일정하여 표면거칠기가 $0.390 \mu\text{m}$ 로 비교적 좋게 나타났으나 절삭길이 100 km에서는 일정하던 표면형상이 더 작게 나누어져 불균일하게 되고 200 km에서는 다시 통합되어 큰 이송량 형태의 표면을 만들며, 표면거칠기가 $0.489 \mu\text{m}$ 로 약 25% 정도 더 나쁘게 나타났다. 이는 미세하지만 절삭공구의 구성인선이 탈락되거나 마모된 상태로 시편의 절삭면에 전사되어 표면거칠기의 변화에 $0.099 \mu\text{m}$ 의 범위에서 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 400 km에서는 선명하고 매끄럽게 일정한 표면형상을 만들며, $0.412 \mu\text{m}$ 로 약 20% 가까이 좋아지나 절삭길이 500 km에서는 굴곡형태가 무더지고 표면형상이 불균일해지며, 표면거칠기는 $0.498 \mu\text{m}$ 로 다시 20% 정도 나쁘게 나타났고 있음을 확인하였다.

이는 새로운 공구에 의한 초기 절삭가공에서 미세한 윤곽의 탈락 현상으로 절삭길이 200 km까지 평균 2.5%의 비율로 표면거칠기가 나빠지다가 계속해서 일정량의 절삭길이가 증가되면 인선의 윤곽이 안정되어 절삭길이 400 km까지 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 때문으로 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.

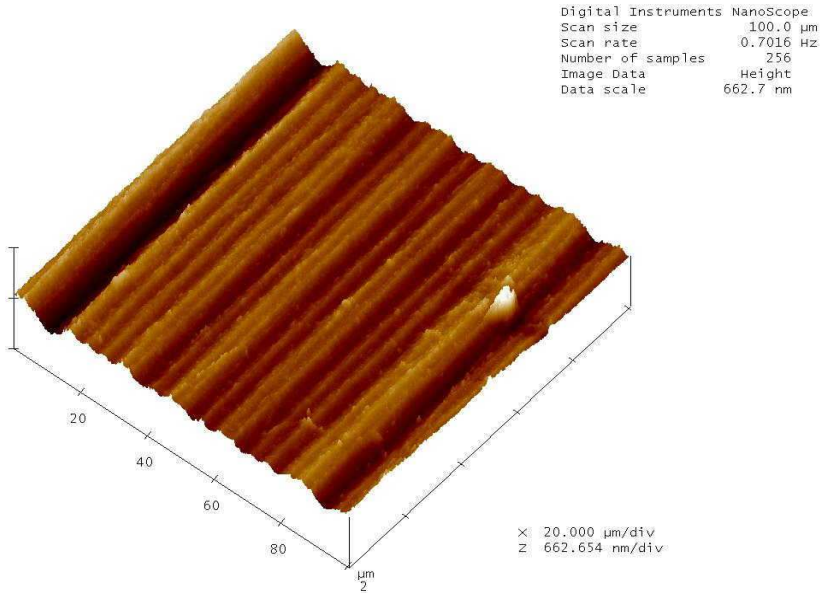


(a) 3 dimensional surface

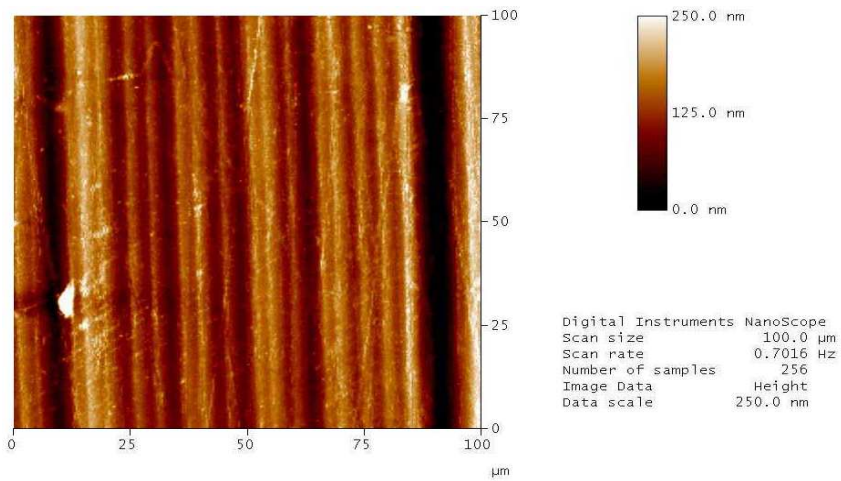


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.26 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 50$ km cutting length)

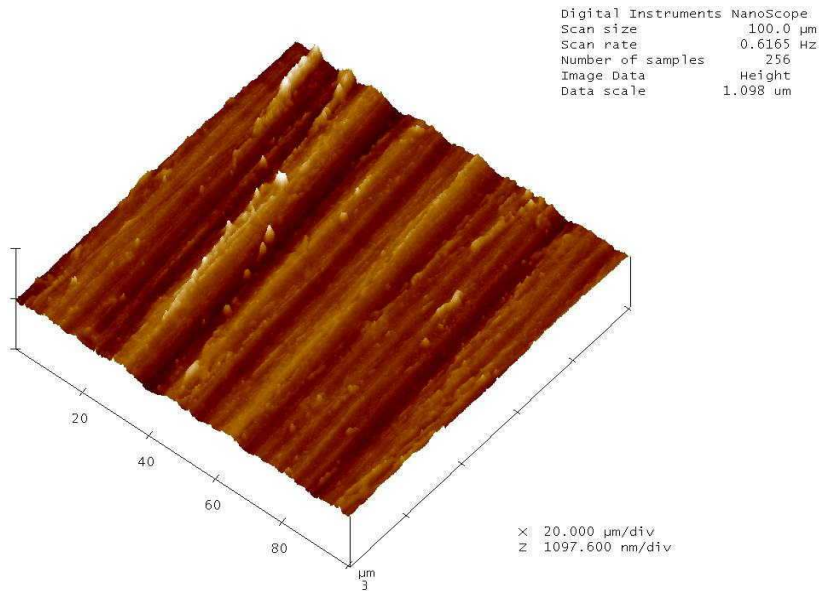


(a) 3 dimensional surface

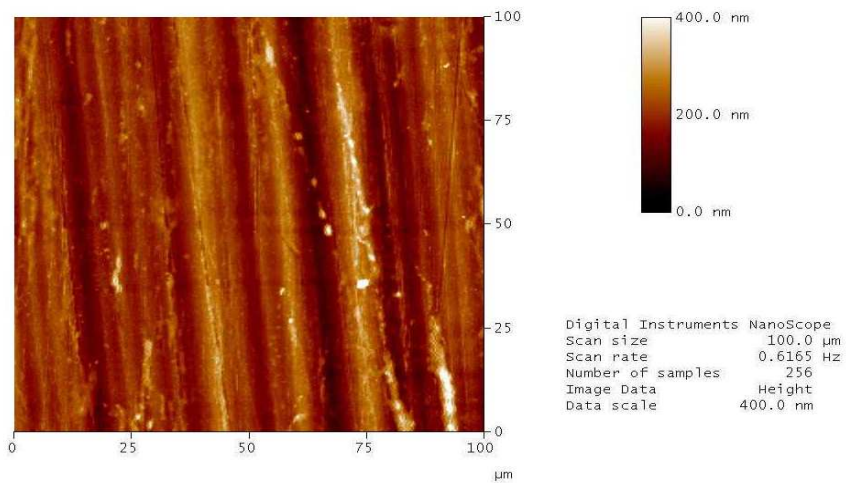


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.27 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 100 \text{ km}$)

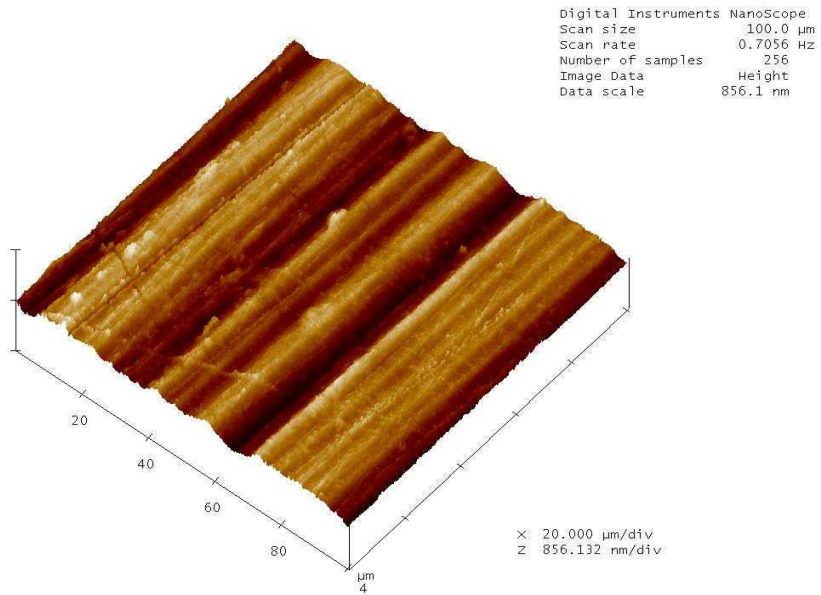


(a) 3 dimensional surface

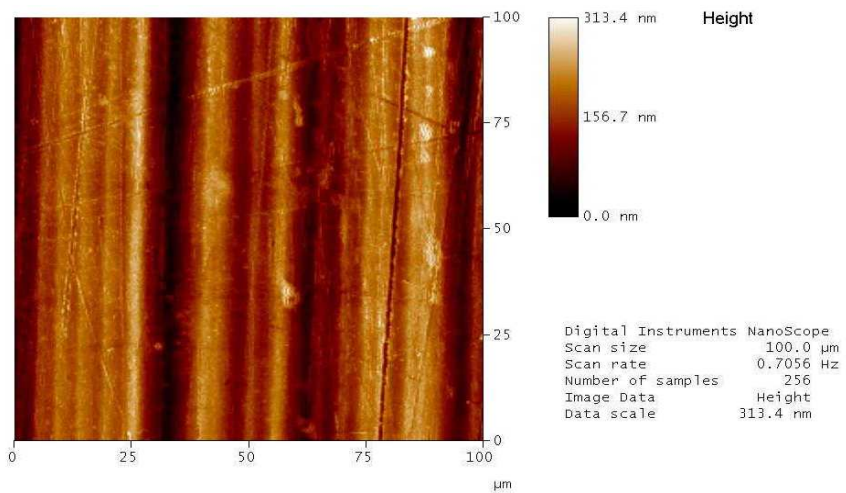


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.28 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 150 \text{ km}$)

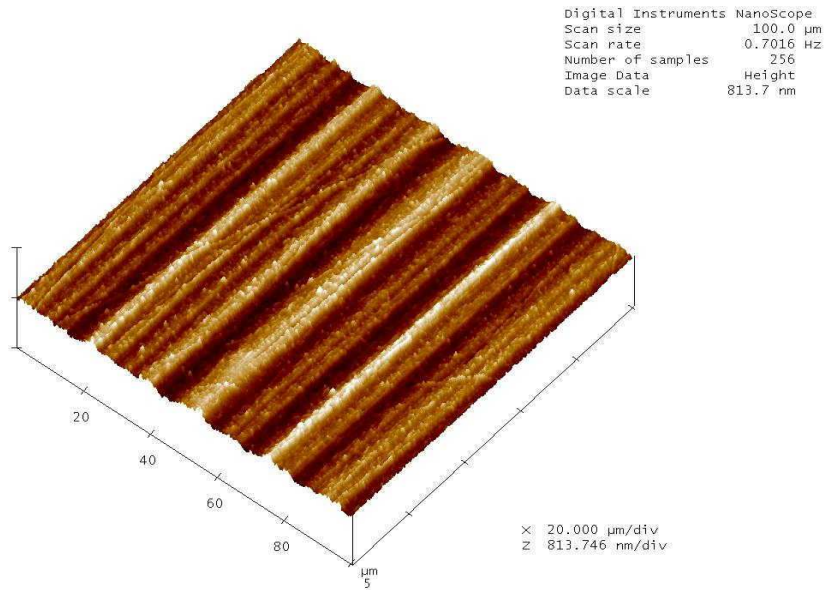


(a) 3 dimensional surface

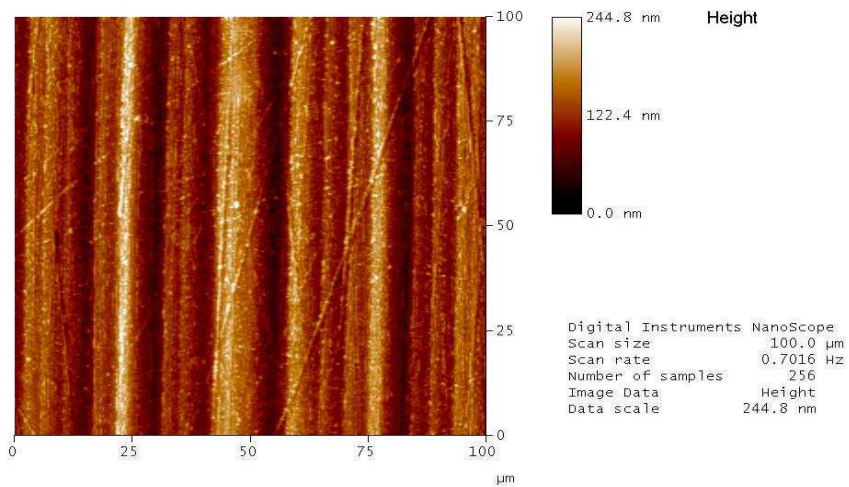


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.29 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 200 \text{ km}$)

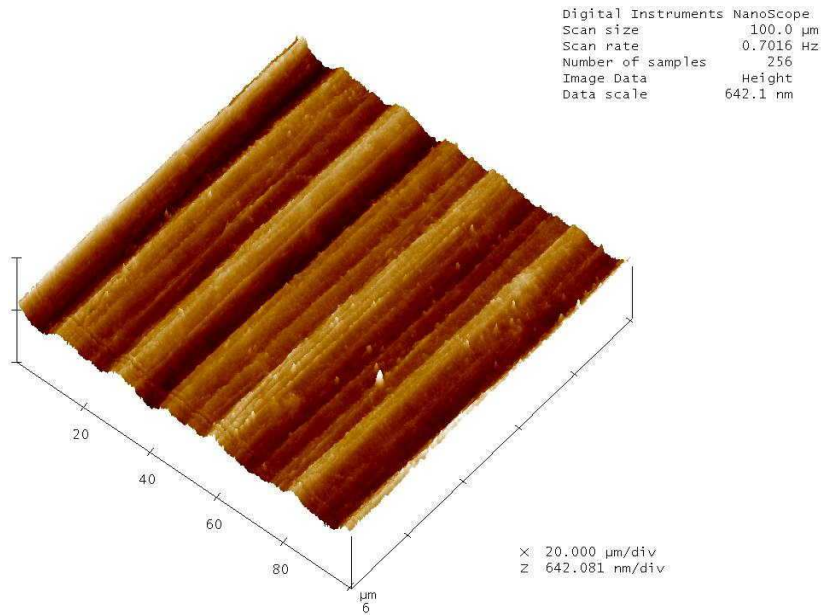


(a) 3 dimensional surface

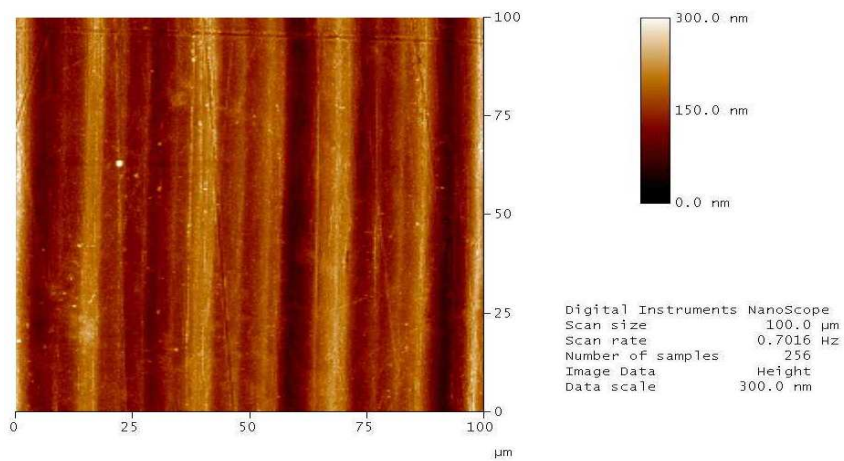


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.30 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 250 \text{ km}$)

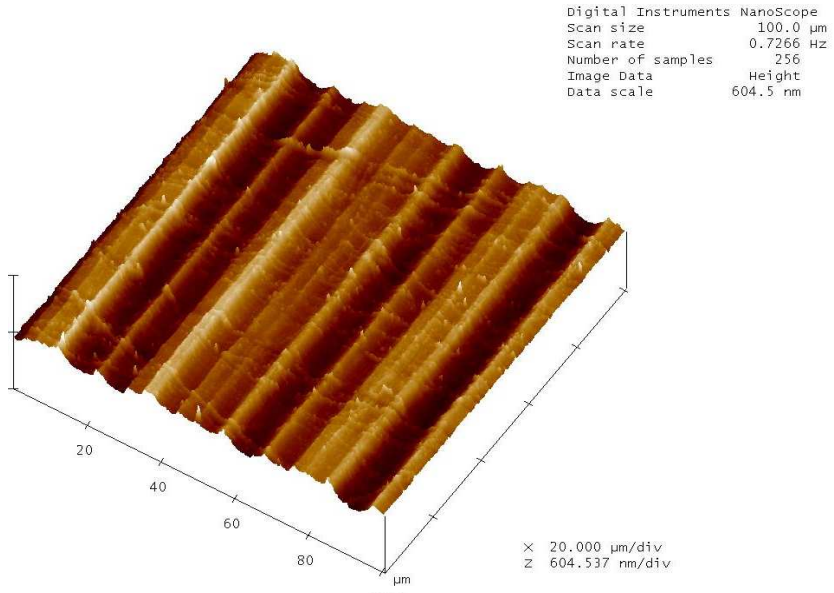


(a) 3 dimensional surface

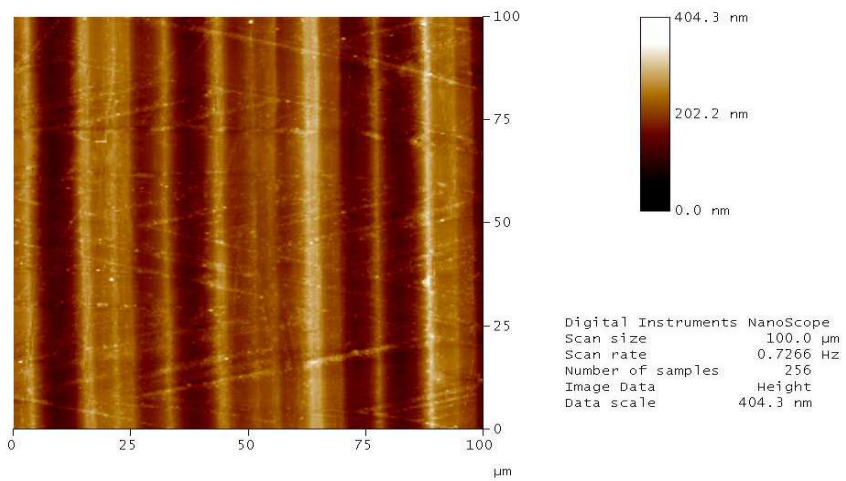


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.31 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 300 \text{ km}$)

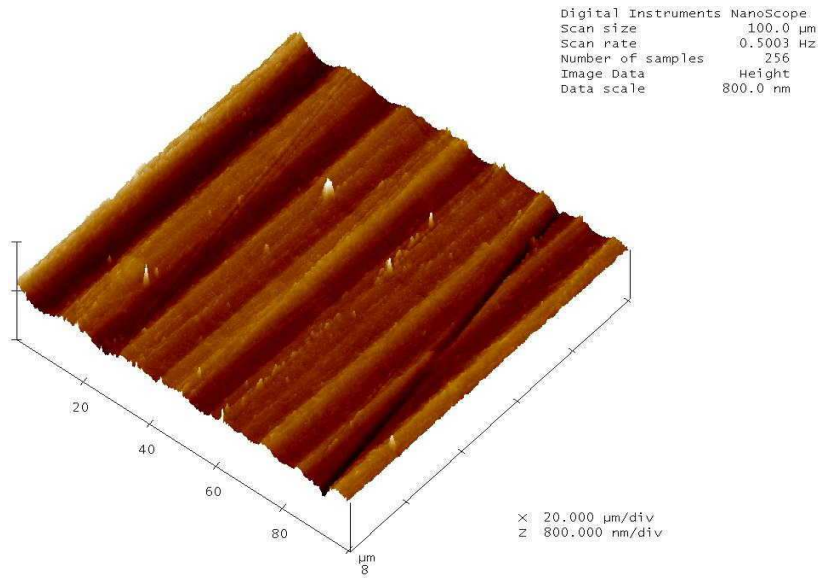


(a) 3 dimensional surface

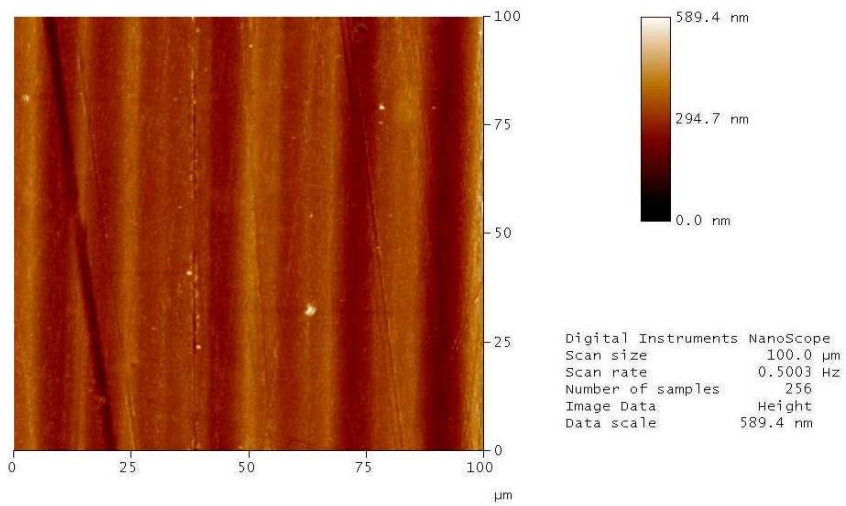


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.32 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061/350}$ km)

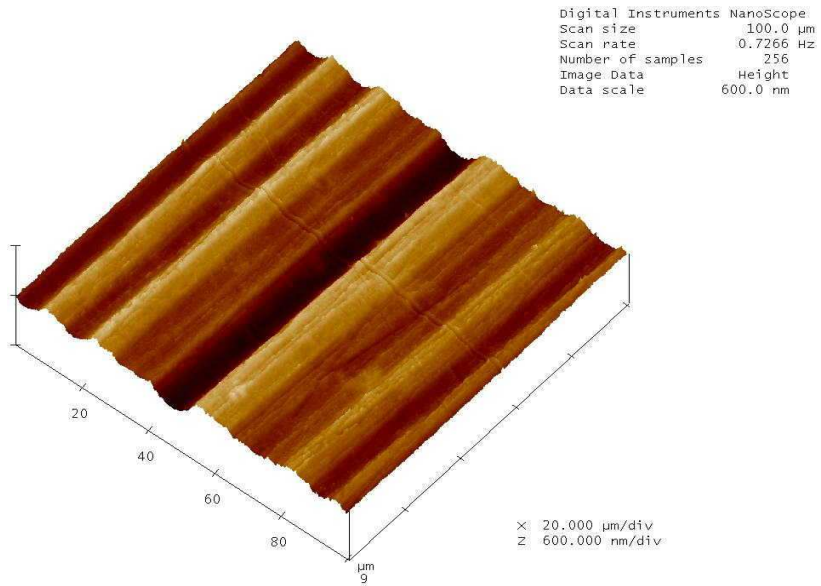


(a) 3 dimensional surface

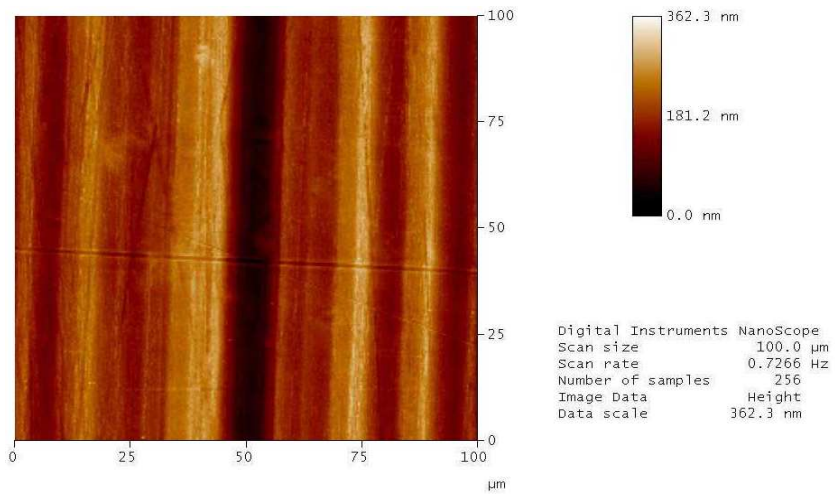


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.33 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 400 \text{ km}$)

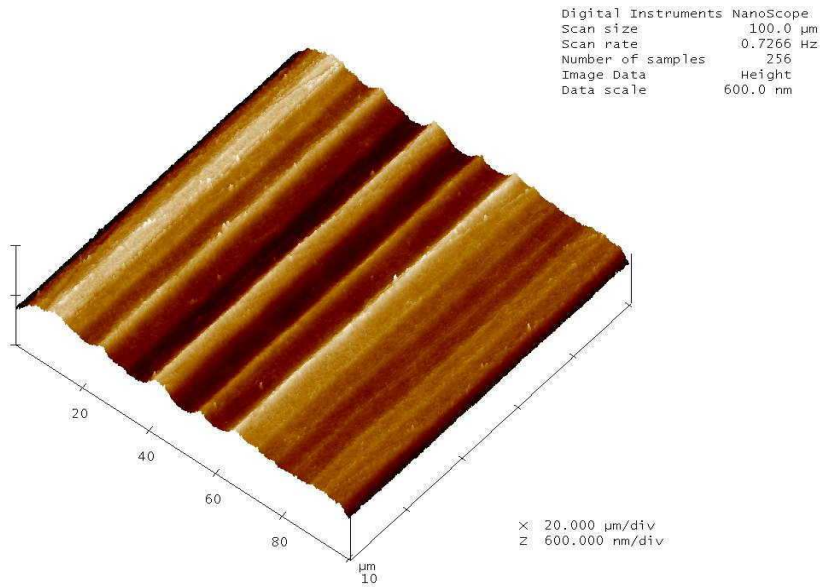


(a) 3 dimensional surface

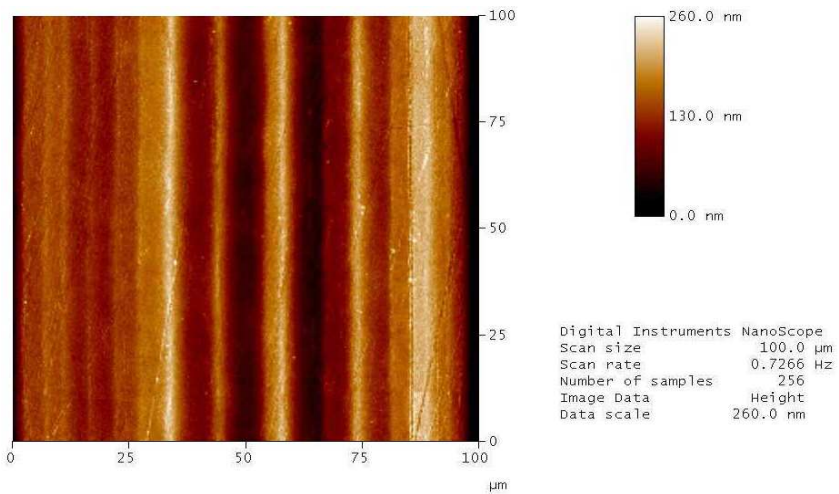


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.34 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 450 \text{ km}$)



(a) 3 dimensional surface



(b) 2 dimensional surface

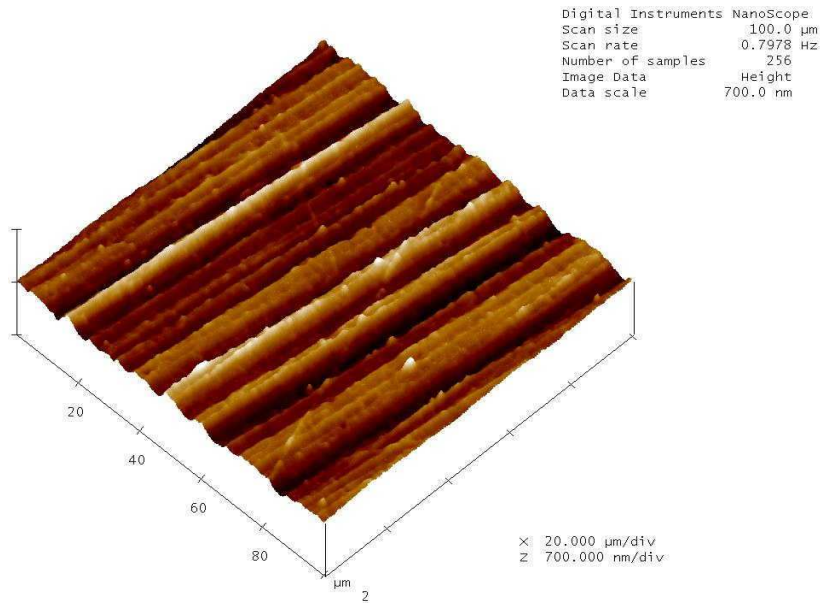
Fig. 4.35 AFM photo. of cutting surface ($A/_{6061}/ 500 \text{ km}$)

4.4.2 황동 재료의 표면특성

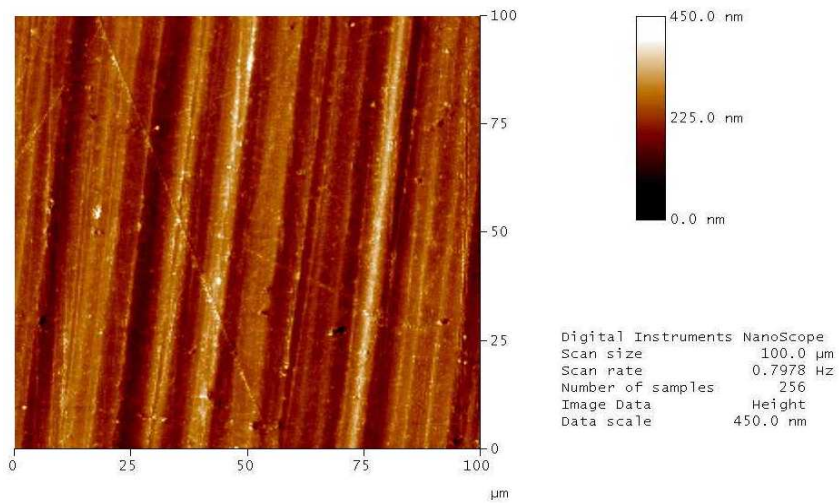
Fig. 4.36~4.45에 나타난 황동 재료의 표면특성을 살펴보면 이송량 형태로 생성된 표면의 형상변화나 표면거칠기 값의 변화는 절삭길이만 다소 차이를 나타낼 뿐 알루미늄 합금 재료와 거의 일치된 유형을 나타내고 있다. 절삭공구의 구성인선 탈락 현상은 알루미늄 합금 재료에서는 200 km까지 진행되었으나 황동 재료에서는 150 km까지만 진행되었고, 이후 절삭길이가 증가되면서 400 km에서 최대로 좋아졌던 표면거칠기 값이 황동 재료에서는 알루미늄 합금 재료보다 100 km짧은 300 km에서 나타났다. 또한 이송량 형태로 생성된 표면의 형상이 알루미늄 합금 재료 보다 황동 재료에서 더욱 선명하고 규칙적으로 나타났으며, 표면거칠기 값은 평균 $0.269 \mu\text{m}$ 로 약 37.5% 정도 알루미늄 합금 재료보다 더 크게 나타나고 있었다.

이것은 두 가지 현상으로 구분하여 평가할 수 있는데 전자는 절삭가공 중 칩에 의한 간섭이나 소성변형이 적은 결과로 황동 재료가 알루미늄 합금 재료보다 절삭성이 뛰어나기 때문이라 판단되며, 후자는 절삭공구의 이송이나 칩의 탈락 중 발생된 버(burr)의 영향으로 국부적으로 예리하고 거친 표면의 형상이 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 알루미늄 합금 재료에서와 같이 황동 재료에서도 값으로 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.

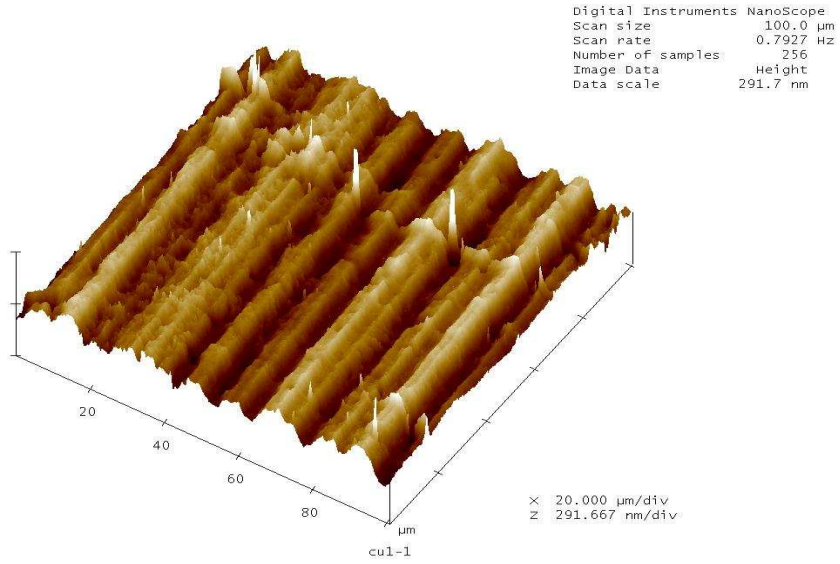


(a) 3 dimensional surface

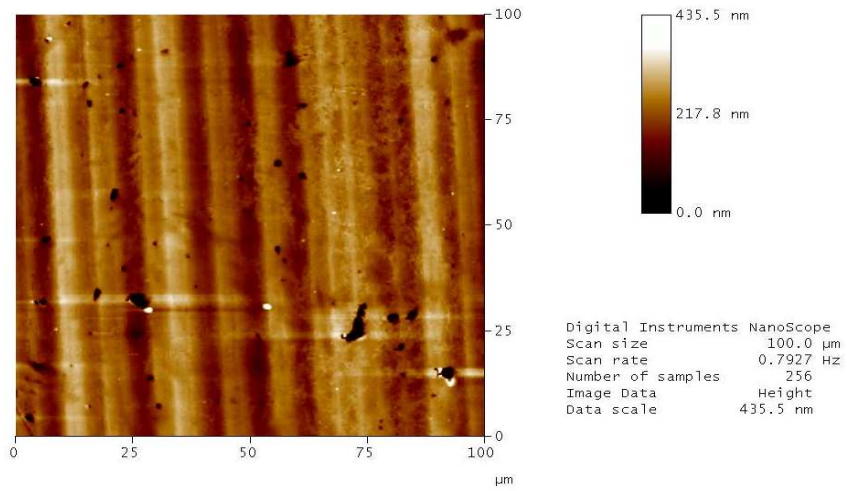


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.36 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 50 km cutting length)

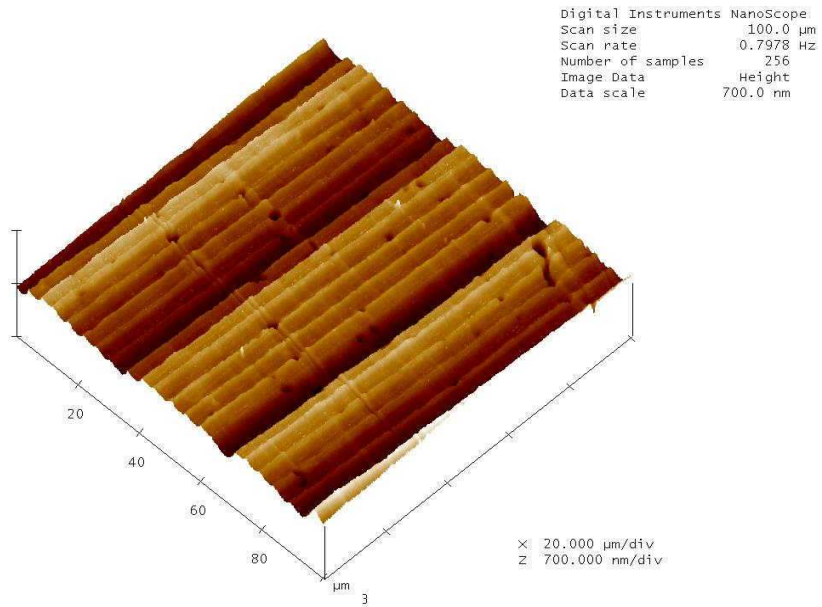


(a) 3 dimensional surface

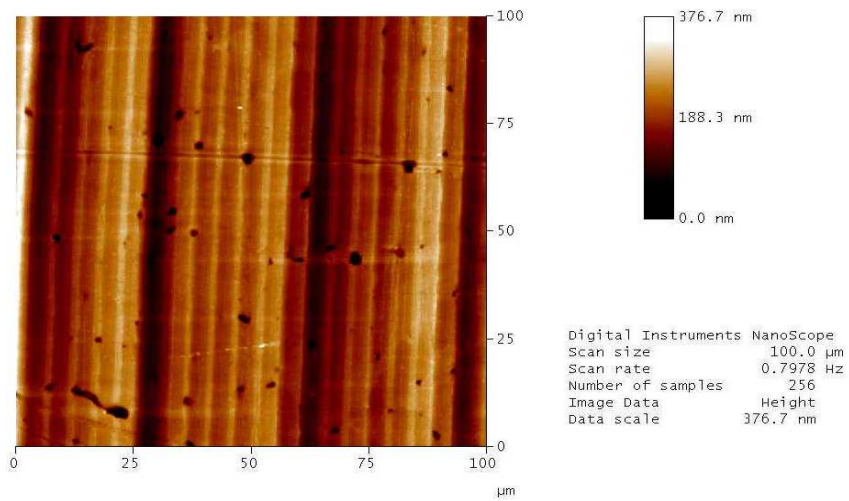


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.37 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 100 km)

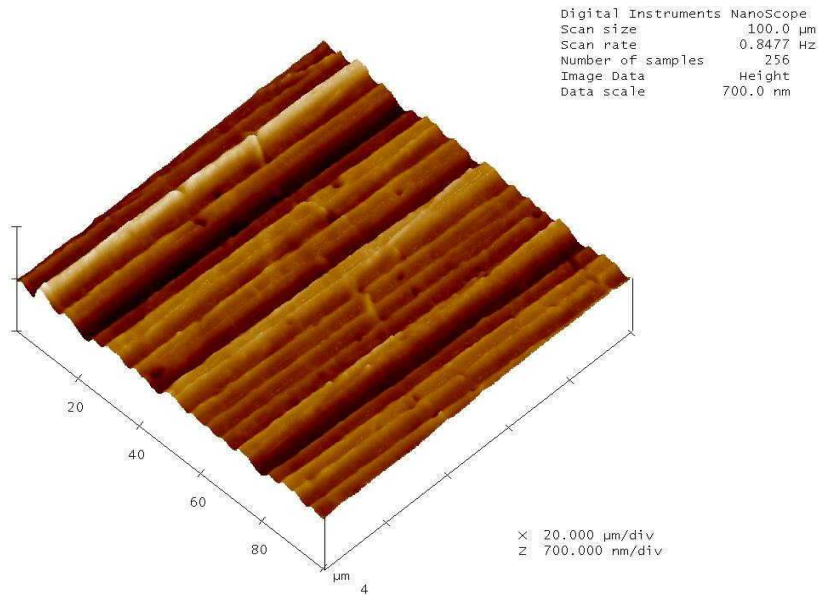


(a) 3 dimensional surface

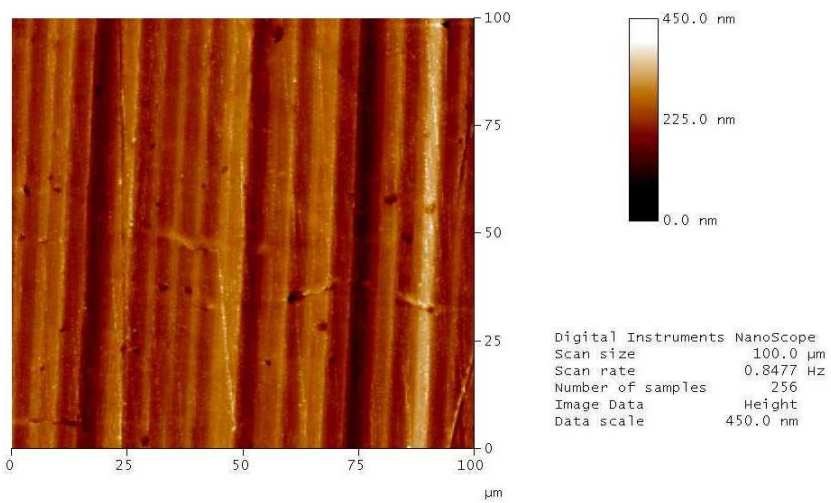


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.38 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 150 km)

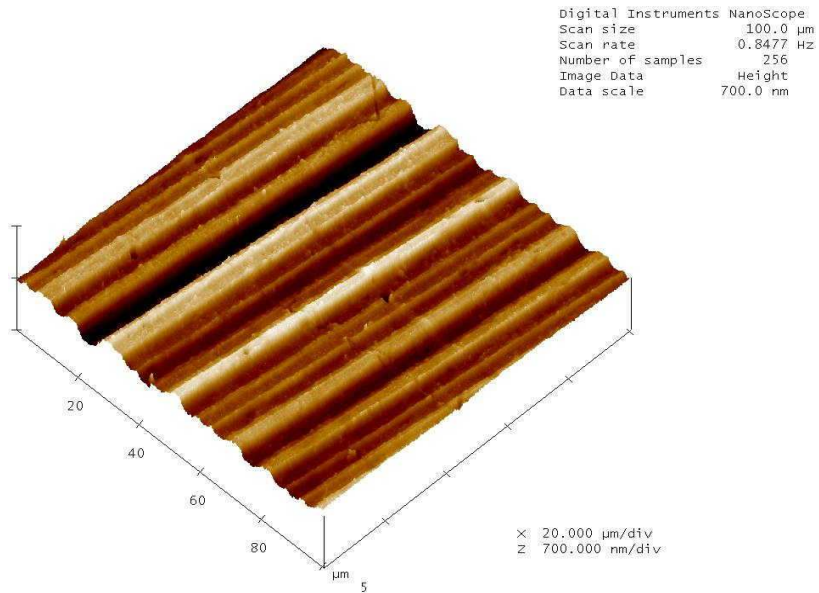


(a) 3 dimensional surface

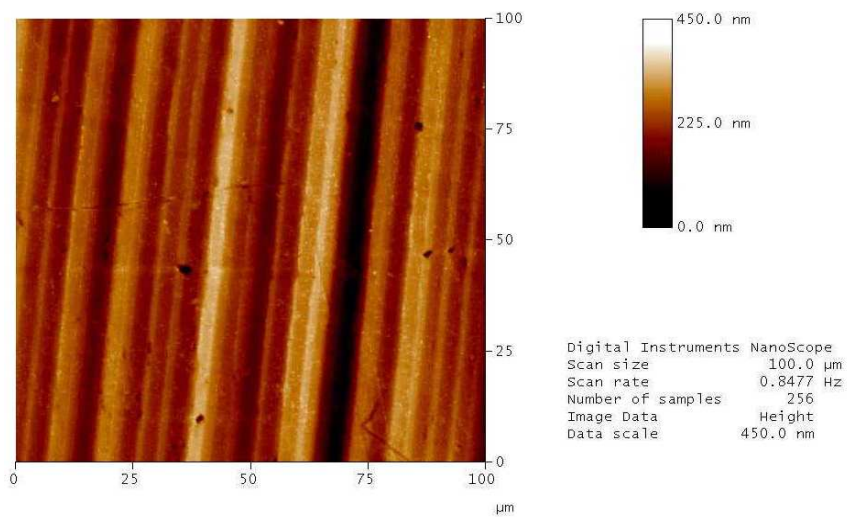


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.39 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 200 km)

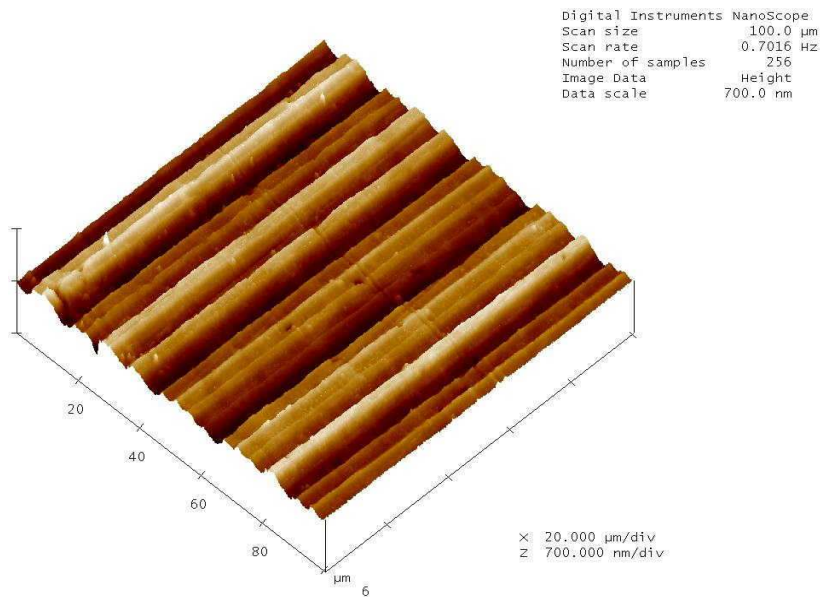


(a) 3 dimensional surface

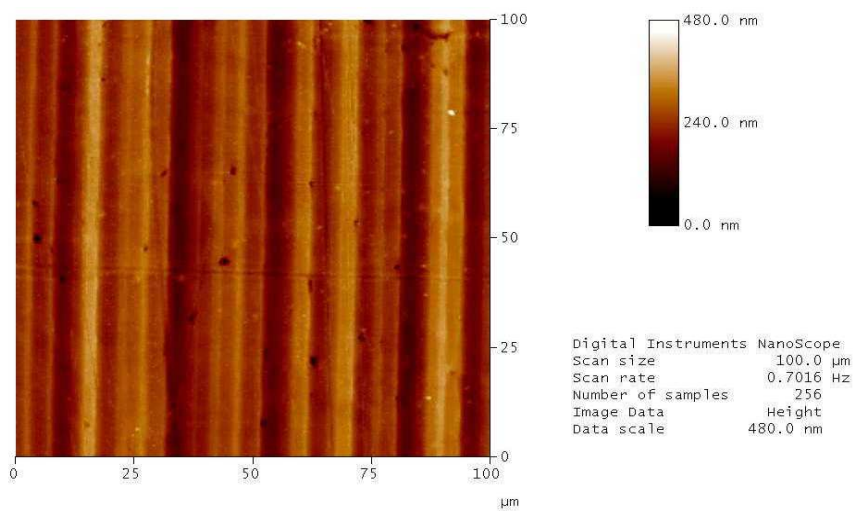


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.40 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 250 km)

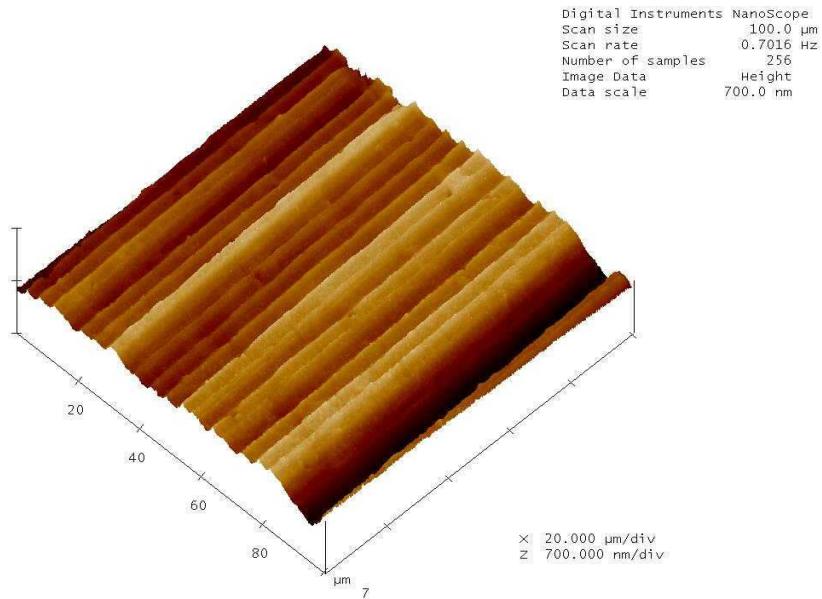


(a) 3 dimensional surface

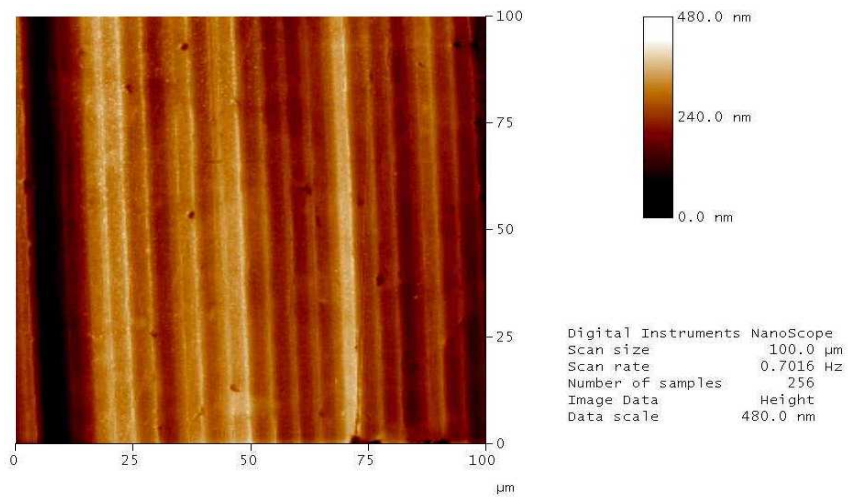


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.41 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 300 km)

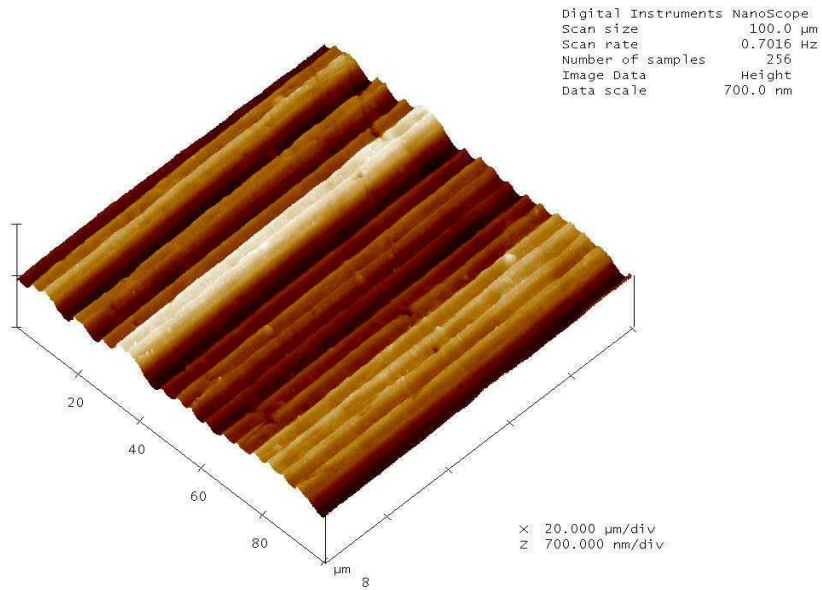


(a) 3 dimensional surface

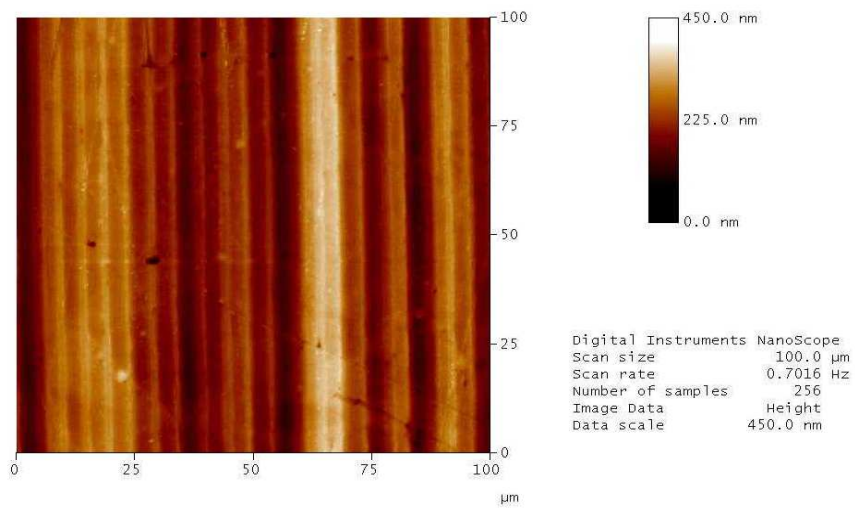


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.42 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 350 km)

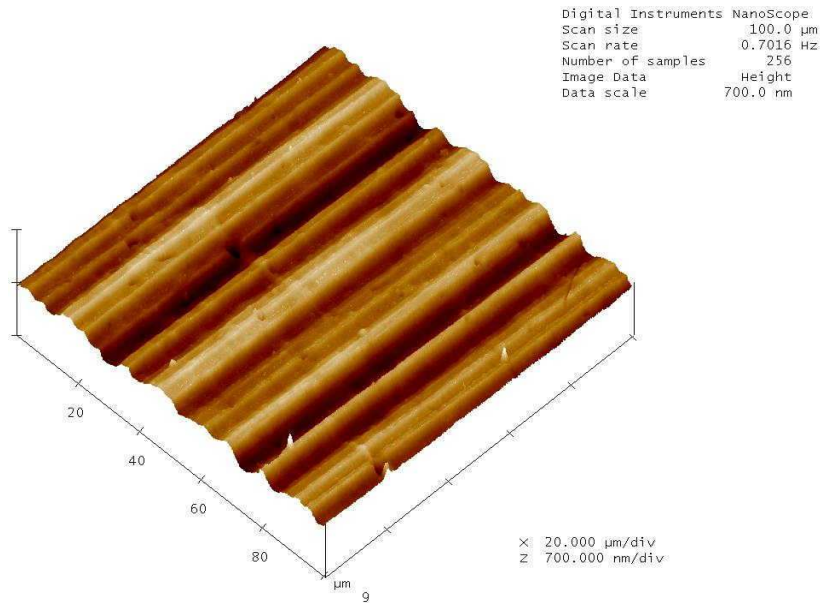


(a) 3 dimensional surface

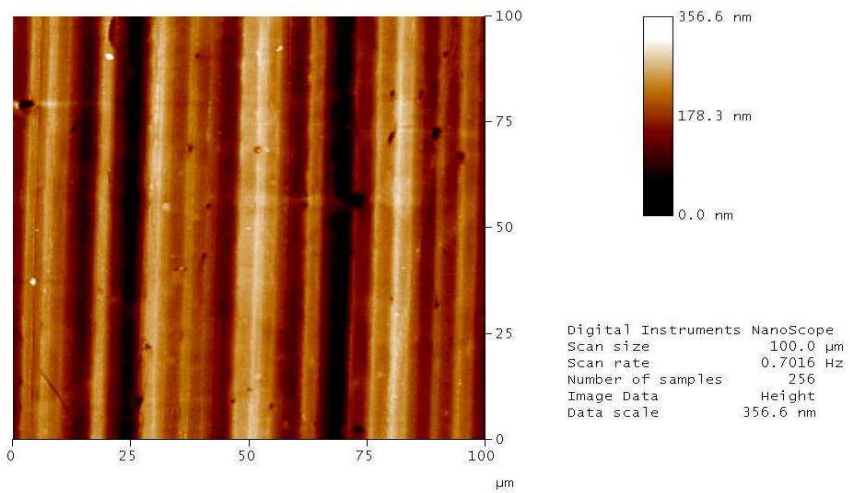


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.43 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 400 km)

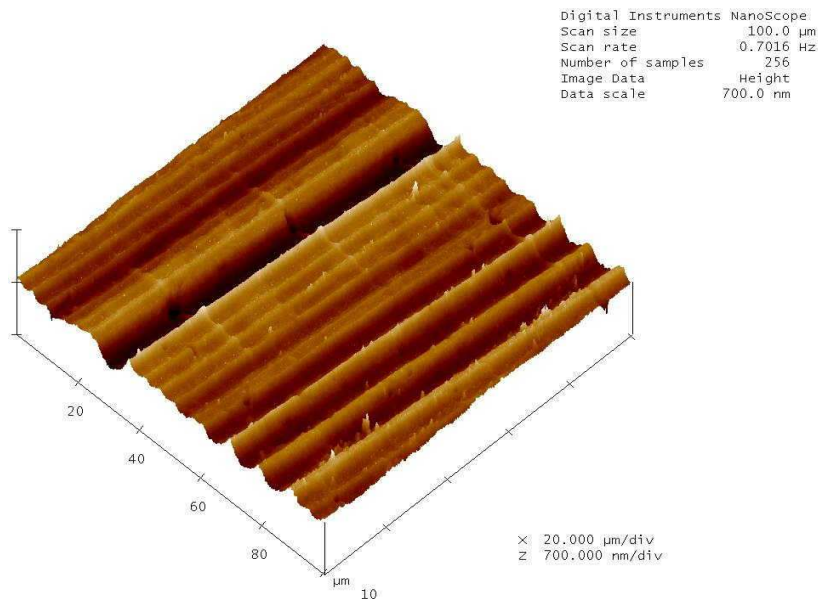


(a) 3 dimensional surface

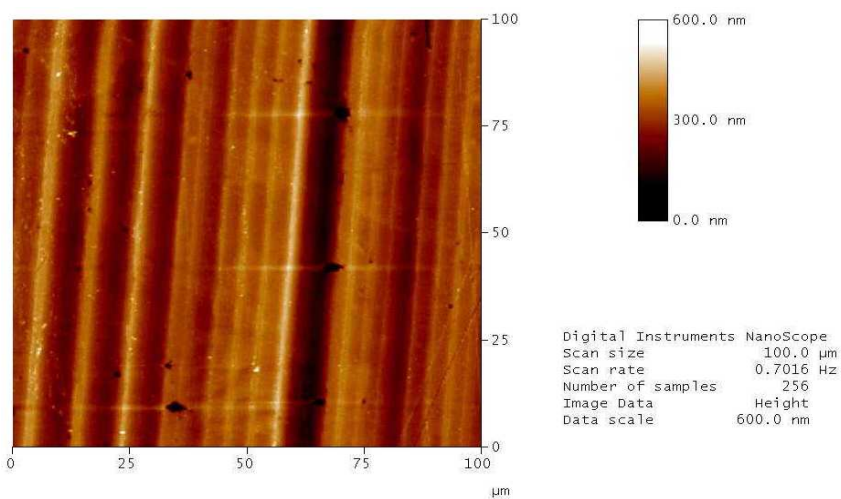


(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.44 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 450 km)



(a) 3 dimensional surface



(b) 2 dimensional surface

Fig. 4.45 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 500 km)

제 5 장 결 론

초정밀 가공면을 얻기 위해 국내 개발된 초정밀 선반에서 천연 다이아몬드 공구로 알루미늄 합금(Al_{6061}) 재료와 황동(HBsC3C) 재료를 주어진 조건하에서 절삭가공한 후 얻어진 가공면 표면특성을 표면거칠기 측정기와 AFM을 사용하여 측정하고, 그 결과를 해석 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭 가공면 표면거칠기는 절삭속도가 높고, 이송속도가 낮을수록 양호함을 본 연구에서도 증명할 수 있었으며, 절입량 $5\ \mu\text{m}$ 이하의 절삭가공 시험에서는 표면거칠기에 미치는 영향은 없음을 확인하였다.
2. 천연 다이아몬드 공구 절삭인선은 본 실험의 두 가지 재료 가공에서 절삭길이 $500\ \text{km}$ 까지는 인선반경 변화는 $1\ \mu\text{m}$ 이하로 경미하고, 절삭인선 마모나 변형은 거의 발생하지 않음을 확인하였다.
3. 표면거칠기는 가공 초기 새 공구의 사용으로 오히려 불량한 측정결과를 확인하였고, 절삭길이 $500\ \text{km}$ 이내에서는 알루미늄 합금은 $0.108\ \mu\text{m}$, 황동은 $0.161\ \mu\text{m}$ 의 편차를 나타내고 있어, 알루미늄이 황동보다 절삭특성이 양호함을 확인하였다.
4. 원자현미경(AFM)을 통해 가공면 표면특성을 고찰한 결과 이송량이 일정한 조건에서 가공 중 새 공구의 돌출인선의 탈락이나 경미한 마모현상이 절삭면에 전사되어 한 피치의 이송량 범위에서 수 개의 다양한 굴곡이 형성됨을 확인하였고, 이 굴곡의 크기가 곧 표면거칠기에 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.
5. 원자현미경에 의한 가공면 표면특성의 평가는 기존의 표면거칠기 측정기에 의한 평가에 부가된 새로운 기법의 정보를 제공하고 있으나 다양한 굴곡 형성 등 가공표면 평가에서 보다 정밀한 판단과 결과를 얻기 위해서는 향후

공작기계의 진동이나 강성문제 등 절삭작용에 미치는 재 영향들의 연구가
수행되어야 할 것으로 생각된다.

References

1. Taniguchi N., "Current Status in, and Future Trends of, Ultra-precision Machining and Ultra-fine Materials Processing", *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 2, pp. 573-582, 1983.
2. Loewn E. G., "Perceived Limitations on Future Advances in Ultra-precision Machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 2, pp. 413-415, 1984.
3. McKeown P., "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future", *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 2, pp. 495-501, 1987.
4. Lee J. K., Kang J. H., "Study on the Ultra-precision Machining Technology with Nano-meter Order", *KIMM*, 1992.
5. Ansi S., Taguchi Y., Horio K., Kasai T., Kobayashi A., "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, No. 1, pp. 85-88, 1990.
6. Ueda K., Manabe K., "Chip Formation Mechanism in Micro-cutting of on Amorphous Metal", *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 129-132, 1992.
7. Horio K., Kasai T., Ogata Y., Kobayashi A., "A Study on Damaged layer remaining in Diamond Mirror Cut Surface", *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 137-140, 1992.
8. Kraukopf B., "Diamond Turning: Reflecting Demands for Precision", *Manufacturing Engineering*, Vol. 92, pp. 90-100, 1984.
9. IKawa N., Donaldson R. R., Komanduri R., Konig W., McKeown P. A., Moriwaki T., "Ultra-precision Metal Cutting- The Past, the Present and the Future", *Annals of the CIRP* Vol. 40, No. 2, pp. 587-594, 1991.
10. Moronuki N., Furukawa Y., "摩擦轉動による精密送り機械に関する研究", *JSPÉ*, Vol. 54, No. 11, pp. 2113-2130, 1988.
11. Shimokobe A., "超精密工作機械の驅動系と機構", 東京工業大學 精密工學研究所, 超精密加工 Seies-27.

12. Kakino Y., Ihara Y., Nakatsu Y., Shinohara A., "NC 工作機械の運動程度に関する研究", JSPE, Vol. 55, No. 3, pp. 587-600, 1989.
13. Kim H. C., Hahm S. D., Park Y. W., "The Comparison of Cutting Characteristics of PCD and MCD Tools in the Ultra-precision Turning of Aluminum alloy", Journal of KSMTE, Vol. 17, No. 12, pp. 68-75, 2000.
14. Lee G. J., "A Study on the Precision Machining Surface by SEM Measuring Method", Master Dissertation, Chosun university, 2004.
15. Oh S. R., "A Study on characteristics of Ultra-precision Cutting Surface by AFM Measurement", Master Dissertation, Chosun university, 2006.
16. Brookes C. A., James R. D. and Nabhani F., "Turning Aerospace Titanium alloys", Metalworking, IDR 290, pp. 89-93, 1989.
17. Sugano T., Takeuchi K., Goto T., Yoshida Y., "Diamond Turning of an Aluminum alloy for mirror", Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 17-20, 1987.
18. Kang S. J., Kim J. K., "Characteristics Evaluation of Surface Roughness with Ultra-precision Machining", Transactions of KSMTE, Vol. 13, No. 1, pp. 9-15, 2004.
19. Keen D., Grogan A. F., "Wear of Single Point Diamond Tools in the Machining of Aluminum/Silicon alloy Position a Final Report", Industrial Diamond review, June 1971.
20. Nishiguchi T., Meada Y., Masuda M., Sawa M., "Mechanism of Micro Chip formation in Diamond Turning of Al-Mg alloy", Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 117-120, 1988.
21. Ko J. B., Kim G. H., Won J. H., "Cutting Characteristics of Oxygen Free using the Ultra-precision Machining", Journal of KSPE, Vol. 19, No. 17, pp. 120-126, 2002.
22. Kim W. S., Kim D. H., Namba Y., "A Study on the Characteristics of Ultra-precision Cutting for Al-alloy", Transactions of KSMTE, Vol. 12, No. 6, pp. 44-49, 2003.

23. Lee G. J., Oh S. L., Kim J. K., "A Study on Measurement Uncertainty of 3-Dimensional Coordinate Measuring Machine used for Inspection of Precision Machined parts", Transaction of KSMTE, Vol. 14, No. 2, pp. 55-61, 2005.
24. Oh S. L., Lee G. J., Kim J. K., "A Study on Evaluation of Roundness Characteristics about Precise Machined Parts", Preceding of the KSMTE, Spring Conference, pp. 209-215, 2005.
25. Lee G. J., Oh S. L., Kim J. K., "A Study on Revision value of Precision Gauge used for Inspection of Precision Machined Parts", Preceding of the KSMPE, Autumn Conference, pp. 50-54, 2004.
26. Lee G. J., Kim J. K., "A Study on Machined Surfaces Characteristics of Aluminum alloy by AFM Measurement", Transaction of KSMTE, Vol. 15, No. 2, pp. 81-86, 2006.
27. Holmes R., "Factors Affecting the Selection of Cutting Fluids", Industry, Lubrication and Tribology, Vol. 23, pp 47~55, 1971.
28. Shaw M. C., Cook N. H., Finnie I., "The Shear-Angle Relationship in Metal Cutting", Trans. of the ASME, Vol. 75, pp. 273-288, 1953.
29. Takasu S., Masuda M., Nishiguchi T., "Influence of Study Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining", Annals of the CIRP, vol. 34, part 1, pp. 463-467, 1985.
30. Abler J.A., "Process Modeling and Correction of Dynamic Errors in Diamond Turning", Ph.D. dissertation, North Carolina State University, 1994.
31. Ernst H., Merchant M. E., "Chip Formation, Friction, and High Quality Machined Surfaces", Treatment of Metals, pp. 299-335, 1941.
32. Drescher J. D., "Tool Force, Tool Edge and Surface Finishing Relationships in Diamond Turning", Ph.D. dissertation, North Carolina State University, 1992.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 물심양면으로 아낌없는 지도와 큰 사랑을 베풀어 주신 김종관 지도교수님, 논문의 심사를 맡아 조언과 격려를 주신 조규재 교수님, 한길영 교수님, 건양대학교 정철섭 교수님, 남부대학교 김상복 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한 학위 과정에서 끊임없는 격려와 배려로 이끌어 주신 이행남 교수님과 최병기 교수님께 지면을 통해 깊은 감사를 드리며, 본 과정의 근본이 되는 정밀 측정기술의 광범위한 공유와 연구 활동의 모태가 되어 준 캐리어(주), 산업자원부 기술표준원, 한국계량측정협회 그리고 국가교정기관 관계자 및 동료 여러분들께도 감사를 드립니다.

특히 바쁜 업무 중에도 저의 실험과 자료 등 논문이 완성되기까지 적극적으로 도와주신 한국기초과학연구원의 김종배 연구원, 실험실 오상록군, 정종수군, 늘 길잡이가 되어주신 김배석 박사님과 화천기공 강순준 박사님께 감사를 드립니다.

끝으로 오늘이 있기까지 한결같은 사랑과 성원을 베풀어 주신 어머니님, 숙부모님, 고모님들 그리고 장모님과 가족친지 모든 분들께 감사와 더불어 결실의 영광을 돌리며, 학업에 정진하도록 도와준 아내 정현희를 비롯해 자기들의 땀을 다하는 사랑스런 딸 은영, 혜영이와 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다. 그리고 먼저 작고하셨지만 오늘의 저로 성장시켜주신 조부모님과 아버님 영전에 이 논문을 바칩니다.

2006 년 12 월

이 감 조 올림

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20047364	과 정	박사
성 명	한글 : 이 갑 조 한문 : 李 鉉 兆 영문 : LEE GAB JO				
주 소	광주광역시 광산구 월계동 첨단금호 @ 104-304				
연락처	E-MAIL : GJ.Lee@Carrier.co.kr, Peter-jo@hanmail.net				
논문제목	한글 : AFM 측정법에 의한 초정밀 가공면의 특성 연구 영문 : A study on characteristics of ultra-precision machined surfaces by AFM measurement				

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

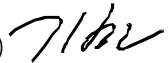
- 다 음 -

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(○) 조건부 동의() 반대()

2006 년 12 월 일

저작자: 이 갑 조 (서명 또는 인)



조선대학교 총장 귀하