2007년 8月 碩士學位論文

AFM 測定法에 의한 黃銅의 超精密加工面 特性 研究

朝鮮大學校大學院

機械工學科

鄭鍾洙

AFM 測定法에 의한 黃銅의 超精密加工面 特性 研究

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

2007年6月日

朝鮮大學校大學院

機械工學科

鄭鍾洙

AFM 測定法에 의한 黃銅의 超精密加工面 特性 研究

指導教授 金 鍾 寬

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함.

2007年6月日

朝鮮大學校大學院

機械工學科

鄭鍾珠

鄭鍾洙의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 曺圭宰 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

2007년 6월 일

朝鮮大學校大學院

목 차

제 1 장 서론

1.1	연구배경	및	동향	 1
1.2	연구목적	및	내용	 2

제 2 장 이론적 배경

• 3	2.1 가공면의 표면거칠기
	2.1.1 이론 표면거칠기
• 4	1) 인선 반지름 R=0인 경우
• 5	2) 인선 반지름 R≠0인 경우
• 7	2.1.2 실제 표면거칠기
• 9	2.2 AFM에 의한 초정밀 가공면 측정
11	2.3 절삭공구 마모이론
14	2.4 초정밀 가공이론

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1	실험장치 및 측정기		17
3.2	실험방법		24
3.3	AFM 측정에 의한 기	·공면 특성 평가 ·····	26

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1	공구인선 마모현상	고찰		29
4.2	가공면 표면거칠기	특성	고찰	31
4.3	AFM 측정에 의현	표면특	특성 고찰	38

제 5	장	결	론		49	9
-----	---	---	---	--	----	---

List of Tables

Table	2.1	Comparison accuracy of test turning center
Table	2.2	Comparison components of test turning center
Table	3.1	Specifications of test machines
Table	3.2	Specifications of roughness tester
Table	3.3	Specification of experimental equipments
Table	3.4	Specifications of abrasive cutting machine
Table	3.5	Specifications of atomic force microscope 23
Table	3.6	Cutting conditions 24
Table	3.7	Chemical compositions of brass(HBsC3C)
Table	4.1	Measured nose radius values
Table	4.2	Measured surface roughness values

List of Figures

Fig. 2.1 Average arithmetic roughness	3
Fig. 2.2 Maximum height roughness	4
Fig. 2.3 Surface roughness of vertical radius R=0	5
Fig. 2.4 Surface roughness of vertical radius $R \neq 0$	6
Fig. 2.5 Surface generation of ideal conditions	8
Fig. 2.6 Effect of minimum chip thickness on surface roughness	8
Fig. 2.7 Principle of AFM equipment	9
Fig. 2.8 Atomic force and distance	.0
Fig. 2.9 Contact area analysis	.2
Fig. 2.10 Flank and crater wear	.3
Fig. 3.1 AFM photograph for select magnification (Scan size 20 μ m) 2	27
Fig. 3.2 AFM photograph for select magnification (Scan size 60 μ m) 2	27
Fig. 3.3 AFM photograph for select magnification (Scan size 100 $\mu m)$ \cdots 2	28
Fig. 4.1 Measured nose radius values	30
Fig. 4.2 Measured surface roughness values	32
Fig. 4.3 Measured surface roughness (50km)	33
Fig. 4.4 Measured surface roughness (100km)	33
Fig. 4.5 Measured surface roughness (150km)	34
Fig. 4.6 Measured surface roughness (200km)	34
Fig. 4.7 Measured surface roughness (250km)	35
Fig. 4.8 Measured surface roughness (300km)	35
Fig. 4.9 Measured surface roughness (350km)	36

Fig.	4.10	Measured surface roughness	(400km)	
Fig.	4.11	Measured surface roughness	(450km)	
Fig.	4.12	Measured surface roughness	(500km)	
Fig.	4.13	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 50km)	
Fig.	4.14	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 100km)	
Fig.	4.15	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 150km)	
Fig.	4.16	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 200km)	
Fig.	4.17	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 250km)	
Fig.	4.18	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 300km)	
Fig.	4.19	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 350km)	
Fig.	4.20	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 400km)	
Fig.	4.21	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 450km)	
Fig.	4.22	AFM photo. of cutting surface	(HBsC3C/ 500km)	

List of Photograph

Photo.	3.1	Ultra-precision turning center(H-M64LCNC)	18
Photo.	3.2	Surface roughness tester(Talysufr-253)	19
Photo.	3.3	Metallurgical microscope	20
Photo.	3.4	Tool maker's microscope	21
Photo.	3.5	Abrasive cutting machine	22
Photo.	3.6	Atomic force microscope	23
Photo.	3.7	Diamond tools	25
Photo.	3.8	Measured AFM specimens	26
Photo.	4.1.	Diamond new tool & used tool	30

Nomenclatures

а	Distance of single atom
A	Uncut-chip section area(μ m²)
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)
Н	Hardness of soft metal among contact metals
L	Cutting length(mm)
N	Spindle speed(r.p.m)
R	Tool nose radius(mm)
Ra	Average arithmetic roughness(µm)
R_{\max}	Maximum height roughness(µm)
S	Cutting distance(mm)
Т	Time of cutting(min.)
V	Cutting speed(m/min.)
Ζ	Worn number of atoms

ABSTRACT

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

Jung Jong-su

Advisor : Prof. Kim Jong-Kwan Ph.D. Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University

This study aims at presenting basic data on ultra-precision processing technology in respect to wear of tools or changes in forms of cutting edge. For the purpose, this study examined characteristics of surface precision shown on the surface during machining brass(HBsC3C) till 500km of cutting distance with artificial diamond ultra-precision lathe manufactured by H company in Korea. A measuring instrument of the existing surface roughness, and AFM measuring technique were used for the study.

The specimen used in this study was brass(HBsC3C) having strong corrosion resistance and superior cutting ability. This study prepared ten specimens of three layered steel round bars with ø60mm × L31mm in external diameter, and ø40mm × L30 mm of bit a part in the chuck of the lathe.

For ultra-precision processing experiment, it used 10 brass specimens with processing conditions as follows: F = 0.005mm/rev, transfer speed, in 50km a specimen; V = 1000m/min, cutting speed, and $d_p = 0.005$ mm, cutting depth. The length of processing was a maximum of 500km. Then, the results of the experiment were compared.

This study measured characteristics of the obtained surface after cutting of

brass(HBsC3C) under the given conditions in ultra-precision lathe using a measuring instrument, AFM(3D measurement) and a metal microscope. The results were speculated and the final results were obtained as follows:

- In case edge of cutting tool processes cutting length to 500km, change of radius value is slight by 1µm low, and transformation by wear could confirm that do not happen.
- 2. When do tool grinding by use of tool which surface roughness is new at early when do cutting processing, it is as poor result preferably by effect of super hard particle. But, confirmed that stabilize if some measure cutting is gone.
- 3. Valuation of surface characteristics by AFM 3D supplies visual information of third dimension solid surface developed more in valuation by existent Surface roughness tester. 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: 원자현미 경), Ultra-precision machining(초정밀 가공), Tool wear(공구마모)

제1장서론

1.1 연구배경 및 연구동향

산업의 발달에 따라 기계요소들은 강도, 경량화, 정밀도와 같은 측면에서 엄격한 설계 기 준이 요구되고 있으며, 초정밀 가공을 필요로 하는 경우가 급격히 증가하고 있으며 기계 가공 제품들의 품질 향상을 위해서는 초정밀 가공 표면에 관한 연구가 뒷받침 되어야 한 다. 또한 부품의 절삭가공에서도 사용되는 초정밀 공작기계는 고속화, 고정밀화를 바탕으로 급속발전하고 있으며, 고속화 분야에서는 직선구동 모터를 적용한 장비나 병렬형 구조의 공작기계 등이 실질적인 상품화 단계에 도달하였고 고정밀화 부분은 각종 오차를 최소화 할 수 있는 설계기술 및 부가 장치, 고속절삭 메커니즘 등의 기초기술을 바탕으로 하는 고 품위화에 대한 연구 추세를 보이고 있다.

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

기계 부품의 고급화 핵심 기술인 초정밀 가공 기술은 1950년대에 다이아몬드공구의 개발 과 사용으로 표면 거칠기를 50㎜이하로 가공을 할 수 있는 기술이 보고 되었으며, 1960년 대에 원자로와 같은 고성능 광학기기나 특수 기계 부품에서 다이아몬드공구 가공에 관한 연구가 시작되어 최근에는 광학, 전자, 컴퓨터 메모리 디스크, 베어링, 정밀측정 장치 등에 서 정밀도나 표면 거칠기의 공차를 맞추는 가공에 이용되는 활발한 연구가 Ansi S.⁽¹⁾나 Ikawa N.⁽²⁾ 등에 의해 이루어졌다.

초정밀 가공 공작기계는 높은 강성의 구조와 정밀도가 요구되며, 주축과 이송계는 공작물 의 치수 및 형상, 표면거칠기에 직접적인 영향을 주게 되므로 이 부문의 정밀도와 수명에 대한 많은 연구가 필요하게 된다. Moronuki⁽³⁾ 등은 공작기계 이송계의 정확성을 위해 마 찰 전동기구에 대해 설명하였으며, Shimokobe⁽⁴⁾ 는 정밀 절삭가공을 위한 공작기계의 구 동과 기구에 대한 중요성을 보고 하였고, Kakino⁽⁵⁾등은 정밀 절삭가공을 위한 공작기계의 운동정도에 대하여 연구하였다. 또한 Kang^(6~7), Jung^{(8),} Lee^(9~10), Oh⁽¹¹⁾ 등은 초정밀 절삭 가공 조건 및 표면특성 등의 기초 이론을 제시 하였다. 그러나 기계 가공된 부품이 의도된 성능과 기능을 발휘하기 위해서는 정밀한 가공도 중요하지만 그 부품이 설계자의 의도대 로 정확하게 가공되었는지를 판단하기 위한 가공면의 측정기술이 필요하다. 따라서 초정밀 가공면 측정기술의 향상은 곧 제품정밀도 향상으로 이어질 수 있을 것이다.

1.2 연구목적 및 내용

과학기술의 급속한 발달로 인하여 미세한 영역의 절삭기술이 요구되면서 광학, 전기, 전 자, 및 기계부품의 생산에 있어서 핵심기술인 초정밀 가공기술은 컴퓨터 하드디스크의 알 루미늄 기판의 가공, 레이저 프린터의 폴리건 미러, 레이저 가공용 반사 미러 등의 가공, X-선용 천체 망원경이나 현미경 등의 광 응용부품의 가공까지 점차 확대되어가고 있어 그 에 수반되는 초정밀 미세측정기술 또한 더 많은 진보를 요구받고 있으나 이런 정밀도 영 역을 평가할 수 있는 측정기술은 기존의 틀을 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 또한 최근 산업이 선진화, 고도화되고 경제의 세계화가 진행되어 생산 제품의 품질이 기 업이나 국가의 기술 경쟁력을 결정짓는 중요한 요인이 되기 때문에 부품의 품질검사에 사

용된 측정기술이 생산 제품의 품질향상을 위하여 더욱더 중요시 되어가고 있다 그러나 정밀 가공된 부품이 의도된 성능과 기능을 발휘하기 위해서는 가공정밀도도 필요 하겠지만 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지 또는 어느 부분이 잘못 제 작되었는지를 판단하기 위해서는 용도에 적합한 정밀측정기에 의한 측정기술이 필요하다. 따라서 측정기술의 향상은 곧 제품정밀도 향상으로 이어질 수 있으며, 아무리 좋은 품질의 부품을 만들어도 측정에 의한 객관적 수치나 방법으로 부품정밀도의 가치를 표현될 수 없 다면 그 부품의 좋고 나쁨의 판정도 불가능할 것이다.

본 연구에서는 국내 H사에서 시험 개발한 Nano급 가공 시작용 초정밀선반을 사용하여 황동(HBsC3C) 소재를 선정하고 절삭거리 500 ㎞까지 천연 다이아몬드 공구로 선삭가공하 면서 가공면의 표면정밀도 특성을 기존의 표면 거칠기 측정기와 본 실험에서 처음 시도하 는 원자현미경(AFM) 3차원 형상측정기법을 활용하여 평가, 고찰하고, 절삭길이에 따른 공 구 마모현상이나 절삭인선의 형태변화 등에 대한 기초자료를 제시하여 초정밀 가공기술의 기초자료를 제시하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 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 사 용되는 표면거칠기의 표시 방법으로 거칠기 곡선의 요철과 그 중심선에 포함된 면적의 합 을 측정 길이로 나눈 것, 즉 중심선에 대한 산술평균 편차에 해당하는 것으로써 Fig. 2.1에 나타내었다. 최대 높이 거칠기는 기준길이 내에서 중심선에 평행한 최고점과 최저점을 지 나는 두 직선사이의 상하 거리로 표시되며, 최근 국제 규격의 변경으로 R_y 로 표기되고 있 다. Fig. 2.2은 최대 높이 거칠기를 나타낸 것이다.



Fig. 2.1 Average arithmetic roughness



Fig. 2.2 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.

2.1.1 이론 표면거칠기

1) 인선 반지름 R=0인 경우

Fig. 2.3에서 중심선 평균 거칠기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{a} = \frac{|\bigtriangleup abc| + |\bigtriangleup cde|}{f} \tag{1}$$

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

$$\frac{f}{2} = \frac{R_{\text{max}}}{2} \cdot \cot K + \frac{R_{\text{max}}}{2} \cdot \cot K$$

(3)

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K}$$

식 (2)와 (4)에서

(4)

$$R_{a} = \frac{f}{4(\cot K + \cot K')}$$
(5)

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. 2.3 Surface roughness of vertical radius R=0

2) 인선 반지름 R≠0인 경우

Fig. 2.4의 (a)에서 이송이 극히 적고, 표면거칠기의 산이 원호인 경우, 즉 *f* ≤ 2*R*sin *K*′ 인 경우에는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R - \frac{1}{2}\sqrt{4 R^2 - f^2} \approx R - \frac{1}{2}(2R - \frac{f^2}{4R}) = \frac{f^2}{8R}$$
(6)

Fig. 2.4의 (b)에서 이송량이 약간 큰 경우, 즉 *f* > 2*R*sin *K*인 경우에는 다음과 같이 나 타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R \left[1 - \cos K' (1 - \frac{f}{R} \sin K') - \sin K' \sqrt{2 - \frac{f}{R}} \sin K' - (-\frac{f}{R} \sin K')^2 \right]$$
$$= R [1 - \cos K' + T \cos K' - \sin K' \sqrt{T(2 - T)}]$$
(7)

Fig. 2.4의 (c)에서 주절인과 부절인의 무늬가 양측에서 나타나는 경우에는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R + \frac{f}{\cot K + \cot K} - \frac{R \cdot \cos(\frac{K - K}{2})}{\cos(\frac{K + K}{2})}$$
(8)



Fig. 2.4 Surface roughness of vertical radius $R \neq 0$

식 (8)에서 f> R 라 하고 1항과 3항을 무시하면 다음식과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (4)와 같게 됨을 알 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K}$$
(9)

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' 이다.

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

2.1.2 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 등 이 있다. 실제로 스핀들의 진동이나 절삭공구를 지지하고 있는 슬라이드의 진동은 가공된 표면에 영향^(12,13)을 미친다.

절삭공구의 예리함도 최소 칩 두께를 발생시킴으로서 재료 제거와 표면거칠기에 영향을 미친다. 절삭공구의 예리함과 관련된 가공응력은 제품의 변형⁽¹⁴⁾을 야기 시킨다. 이 현상은 예리한 공구로 절삭가공을 하여 매우 작은 절삭 깊이를 가지고 있을 때 전체 절삭 에너지 의 중요한 부분이 된다. 이러한 변형의 결과로 가공된 표면은 절삭 진행과 탄성응력을 제 거하기 위해 다시 복원한다. 최소 칩 두께는 절삭공구의 완벽한 실행 조건에서 제품이 제 거되어질 수 있을 때 가장 작은 재료 두께로 명시할 수 있다. 최초의 표면 파고와 절삭공 구 인선형상은 Diamond turning 절삭가공의 표면특성⁽¹⁵⁾과 연관이 있다. Fig. 2.5은 고속 으로 칩이 제거되면서 공구의 인선반경이 재현되는 현상을 가공된 표면에 묘사했으며, Fig. 2.6은 최소 칩 두께의 개념을 묘사했다.



Fig. 2.5 Surface generation of ideal conditions



Fig. 2.6 Effect of minimum chip thickness on surface roughness

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

2.2 AFM에 의한 초정밀 가공표면의 측정

AFM(Atomic Force Microscope)은 물질의 표면특성을 원자단위까지 측정할 수 있는 새 로운 개념의 현미경을 총칭한다. 원자는 너무 작아서(0.1-0.5nm) 현미경으로는 볼 수 없다 는 기존의 통념을 깨뜨린 현미경으로써 제1세대인 광학현미경과 제2세대인 전자현미경 다 음으로 제3세대 현미경으로 자리 잡아가고 있다. 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자 주사현미경(SEM)의 배율이 최고 수십 만 배인데 비해 원자현미경의 배율은 최고 수천만 배로서, 개개의 원자를 관찰할 수 있다.



Fig. 2.7 Principle of AFM equipment

원리는 캔틸레버(Cantilever)라고 불리는 작은 막대 끝부분에 달려있는 탐침과 시료표면 의 원자 사이의 힘에 의해 캔틸레버가 아래위로 휘게 되는데, 이때 레이저 광선이 캔틸레

버 윗면에서 반사되는 각도를 포토다이오드로 측정함으로써 표면의 굴곡을 표시하게 되는 장비로 구조를 Fig. 2.7에 도시하였다.

가장 보편적인 원자현미경은 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 마이크로머시닝으로 제조된 캔틸레버라고 불리는 작은 막대를 쓴다. 캔틸레버는 길이가 100µm, 폭 10µm, 두께 1µm로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 또한 캔틸레버 끝 부분에는 뾰족한 바늘이 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 STM의 탐침처럼 원자 몇 개 정도 의 크기로 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면 의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나(인력) 밀치는 힘(척력)이 작용한다. 특히 이번실험에서 사용된 AFM의 Contact는 탐침과 표면원자의 이온코어들 사이에 작용 하는 정전기적 척력(Repulsive Coulomb Interaction)에 매우 민감하게 반응하는 성질을 이용해서 표면의 형상을 측정한다.

하지만, Fig 2.8에서 보듯이 탐침과 시료 원자들 사이의 거리가 어느 정도이상 멀어지면, 서로 잡아당기는 인력이 주된 힘으로 작용하게 된다. 이온 코어들은 다른 원자의 원자가 전자들에 의해서 전기적 쌍극자(Electric dipole)가 된다.



Fig. 2.8 Atomic force and distance

비접촉식 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1- 0.01 nN 정도 로 시료에 인가하는 힘이 접촉식에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정 하는데 적합하다. 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 비접촉식에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동 시킨다. 시 료표면에 다가가면 원자간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화 가 생기고 그 변화를 Lock-in amp로 측정한다. 원자간에 상호 작용하는 힘은 시료의 전 기적 성질에 관계없이 항상 존재하므로 도체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 관찰 할 수 있다.

2.3 절삭공구 마모이론

접촉면의 미끄럼 운동에 의하여 표면이 미소량씩 떨어져 나가는 것을 마모라 한다. 절삭 공구의 마모는 다음의 가혹한 조건에 있으므로 통상 기계부품의 마모와는 다르다.

- 경사면의 마찰응력은 칩의 전단강도에 가까운 값을 가지며, 여유면의 마모부에서도 같은 상태라고 생각되고 있다.
- 2) 접촉면을 스치고 지나가는 칩 표면은 활성이 높은 새로운 면이며, 산화막 등에 의한 오염이나 마모분의 퇴적은 없다.
- 3) 접촉면의 온도는 800~1,000℃ 정도의 고온이다.

R. Holm⁽¹⁶⁾은 Fig. 2.9와 같이 실 접촉면적(A_r)에서 단일 원자 간격을 *a* 로 표시하였다. 위측의 재료가 아래측에 대해 어떤 거리 d 만큼 움직인 경우를 생각하면 위측의 원자는 d/a 만큼 아래측의 원자와 접촉할 것이다. 따라서 실면적(A_r) 내에서 접촉한 원자의 수는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_r}{a^2} \cdot \frac{d}{a} = \frac{A_r \cdot d}{a^3} \tag{10}$$

단위체적 당 마모된 원자의 수 Z는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{V}{a^3} / \frac{A_r \cdot d}{a^3} = \frac{V}{A_r \cdot d}$$
(11)

이를 Holm의 마모 확률이라 한다.

Z는 접촉 금속의 종류, 분위기, 마모속도, 온도에 의해 크게 변화한다. M.C. Show⁽¹⁷⁾는 접촉면의 작용하중 N을 다음과 같이 나타내었다.

$$N = A_r \cdot H \tag{12}$$

식(11)을 식(12)에 대입하면 마모원자 Z와 마모체적 V는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{V \cdot H}{N \cdot d} \tag{13}$$

$$V = \frac{Z \cdot N \cdot d}{H} \tag{14}$$

d의 거리에 대한 마찰이 직선적일 때 겉보기 면적으로부터 이동층의 두께 t는 다음과 같 은 식이 된다.

$$t = \frac{V}{A_a} = \frac{Z \cdot N \cdot d}{H \cdot A_a} = \frac{Z \cdot d \cdot \sigma}{H}$$
(15)

식 (15)의 해석을 절삭공구에 적용시키면 공구의 경사면 또는 여유면 마모는 그 면의 수 직응력에 관계하고 칩과 공구의 상대적 경도에 관계하며 경도는 절삭온도와 함수 관계에 있다.



Fig. 2.9 Contact area analysis

절삭공구 마모 형태에는 여유각과 경사면의 마모로 크게 분류한다. 여유면 마모는 공구의 측면에 생기는 마모로 다듬질 면이 거칠어지고 제작 치수에 영향을 주며 공구의 수명 판 정에 사용되는 마모의 형태이고 경사면 마모는 칩이 공구에 경사각 상면과 연속 마찰을 일 으켜 상면부가 오목하게 패이는 마모의 형태이다. Crater 마모의 크기 h_c는 다음과 같이 나 타낼 수 있다.

$$h_c = \frac{-e}{c} \tag{16}$$



Fig. 2.10 Flank and crater wear

절삭과정에서 공구의 손상이 어느 이상에 달하면 소정의 가공정밀도를 얻을 수 없거나 공구의 손상이 진행되어 절삭을 수행할 수 없는 경우가 있다. 이 때까지의 정상적인 절삭 시간을 공구수명이라 한다. 공구손상은 절삭시간의 경과에 따라 절인의 일부가 기계적, 화 학적, 열적 요인 등에 의하여 점진적으로 마모되어 손실되어 가는 정상손상과 예기치 못한 시기에 예기치 못한 크기의 균열, 깨짐, 파손, 소성변형 등의 이상손상으로 대변할 수 있 다. 공구수명의 판정은 가공 정밀도, 경제절삭을 동시에 만족하도록 가공면의 광택, 가공물 의 치수변화, 절삭저항의 증대, 공구의 경사면 및 여유면의 마모 등을 통해서 정한다.

2.4 초정밀가공 이론

초정밀이란 그 시대의 가공 및 측정기술의 일반적 수준에 관계가 있고, 기술의 진보에 따 라 정밀도는 높아진다. 일반적으로 범용의 기계로 도달 가능한 범위를 벗어난 의미의 고정 밀 가공기술과 미세치수의 한계에 도전하는 초미세 가공기술로 구별이 가능하다.

최초의 공작기계인 Wilkinson의 보링머신은 실현 가능한 치수 정밀도가 1mm이었으나 1900년대에는 1000배의 정밀도인 1µm에 도달할 수 있었고, 200년이 지난 최근에는 0.1µm 까지 발전하고 있다. 가공표면 정밀도는 치수 정밀도의 10배 내지 100배인 nm 단위가 된 것이다.

그로 인해 최근의 초정밀 가공기술은 광학, 기계 그리고 전자 부품에서 Micrometer 또는 Submicrometer 단위의 형상정밀도를 얻고 가공표면은 수 Nanometer이내의 초정밀도 를 얻는 기술을 말한다.

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

초정밀 가공은 주로 단결정 다이아몬드 공구를 사용하는 초정밀 절삭(UPMC), 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, 초미 세 Grit diamond wheel을 연속 전해 Dressing 시키는 방법 등이 개발되어 사용되고 있 다.

1970년대부터 복잡한 형상의 광학렌즈를 제작하기 위해 Diamond turning 연구가 시작되 었고, 이에 따른 측정기술의 발전과 함께 초정밀 가공을 가능하게 하기 위한 고정도, 고 강성의 절삭 가공 기계를 개발하여 구성인선(Build-up edge)이 발생하지 않은 예리한 다 이아몬드 공구를 사용한 절삭가공에 의해서 고도의 형상 정밀도와 매우 정밀한 표면거칠 기를 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 0.2µmPV, 표면은 0.2nm 단위에 도달하고 있다.

일반적으로 기계정밀도는 실제 가공된 결과에 의해 평가하게 되지만, 기본적으로 기계의 구조가 정밀도를 낼 수 있도록 설계 및 적정한 부품의 채용 즉 볼스크루, 리니어 가이드, 리니어 스케일, 고정밀 주축베어링 및 쿨링 장치 등이 정상적으로 제작 및 조립되어 효율 적으로 기능이 발휘되어야 한다. 특히 초정밀기계에서의 정적, 동적, 열적정밀도는 정밀기 계와 반드시 차별화된 성능을 낼 수 있어야 한다.

공작기계에서 등급을 결정하는 기본적인 요소로는 주축의 진동, 각축의 진직도, 각축의 위치결정도이며, 이에대한 초정밀급 기계와 정밀급기계에 대하여 Table 2.1과 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.

Description		Precision cutting grade	Ultraprecision cutting grade
Vibration value	Radial	0.8 <i>µ</i> m	0.3 <i>µ</i> m
of main spindle	Axial	0.8µm	0.3µm
Vartical straightness	Х	2.0µm/ 100mm	0.5µm/ 100mm
Vertical Straightness	Ζ	2.0µm/ 100mm	0.5µm/ 100mm
Harizantal straightness	Х	2.0µm/ 100mm	0.5µm/ 100mm
norizontai straigntiess	Ζ	2.0µm/ 100mm	0.5µm/ 100mm
	Х	20 <i>µ</i> m/ 250mm	10µm/ 250mm
Ассигасу	Ζ	20 <i>µ</i> m/ 220mm	10µm/ 220mm
Papartability	Х	$\pm 0.5 \mu$ m/ 7 times	$\pm 0.2 \mu m/7$ times
Repeatability	Z	$\pm 0.5 \mu$ m/ 7 times	$\pm 0.2 \mu m/7$ times

Table 2.1 Comparison accuracy of test turning center

Description	Precision cutting grade	Ultraprecision cutting grade		
Spindle bearing	P1~3±1.0µm	P0±0.3µm		
Ball agrow	C3.	C1.		
Dall Screw	Pitch error 23 μ m	Pitch error 8μ 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		

Table 2.2 Comparison components of test turning center

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

AFM을 사용한 초정밀절삭 가공면의 평가를 위하여 황동 시험편을 이용하였다. 실험에서 사용된 가공기계는 국내 H사에서 시작품으로 최근 개발한 Nano급 초정밀선반을 사용하였 다. 실험기계는 내장형 주축모터을 채용하여 10,000 rpm 회전이 가능하고, M64L CNC시 스템에 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 측정 으로 다양한 파라메타를 제공할 수 있는 Photo. 3.2와 같은 Rank Tayor Hobson사의 촉 침식 표면 거칠기 측정기(Taylsurf)를 사용하였다. 이 측정기는 다이아몬드 촉침에 의한 표 면 거칠기의 수직방향 측정범위는 4㎜이며, 분해능은 10㎜, 정확도는 1.0μm/120㎜이고, 측 정 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 0.004μm 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)

Description	Specifications
Model name	UPLI
Max. spindle speed	10,000r.p.m
N.C system	Mitsubishi
Min. movement unit	0.05 <i>µ</i> m
Head cooling system	Oil Jet
Size of tool	$\Box 16 x ø 16$
Size of spindle bearing	ø70
Spindle motor	3.7/5.5Kw

Table 3.1 Specifications of test machines



Photo. 3.2 Surface roughness tester (Taylsurf-253)

Table 3.2 Specifications of roughness tester

Description	Specifications
Manufacture	Rank talyor Hobson U.K
Model name	Form Taylsurf-253
Accuracy	100 mm/ 0.1 µm

인조다이아몬드 공구의 인선마모를 평가할 때 인선 형태와 인선의 반경을 구분하여 평가 하였다. 형태측정에는 금속현미경을 반경측정에는 공구현미경을 사용하여 공구마모현상을 측정하였다. Photo. 3.3은 인선형태 측정에 사용된 금속현미경, Photo. 3.4는 절삭인선 반 경측정에 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 세 로축으로 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	equipments
--------	-----	---------------	----	--------------	------------

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

절삭 가공한 시편을 AFM에서 측정하기 용이하도록 적정한 크기로 제작하기 위한 장치로 는 Photo. 3.5와 같은 Abrasive cutting machine을 사용하였으며, 철, 비철금속, 비금속 등 모든 부품의 절삭이 가능한 장치로 Table 3.4과 같이 스핀들의 회전수가 3440rpm, 절삭 속도는 45m/s, 절삭 깊이가 75mm까지의 사양을 가지고 있다.



Photo. 3.5 Abrasive cutting machine

Fable 3.4 Specification	ns of abra	asive cutting	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	Specifications	of	atomic	force	microscope
-------	-----	----------------	----	--------	-------	------------

Descr	Specification		
V. V. Saannar	Scan size	$100 \times 100 \ \mu m$	
X-1 Scamer	Resolution	0.15nm	
Z Scanner	Scan size	12 µm	
	Resolution	0.05nm	
	Travel length	30mm	
Z Stage	Resolution	0.08 µm	
	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 진동 이 없고, 항온항습 시설이 갖추어진 장소에 기계를 설치하였다.

실험에 사용한 시험편은 Photo. 3.7의 천연 다이아몬드공구로 내식성이 강하고, 절삭성이 우수한 황동(HBsC3C)소재를 채용하여 외경치수가 ø60mm × L31mm, 선반의 척에 물림부위 치수가 ø40mm × L30mm로 되도록 3단의 환봉 상태로 10개를 제작하였으며, Table 3.7은 황 동 시험편의 화학적성분이다.

초정밀 가공 실험방법은 미리 준비된 외경이 ø60mm인 황동 가공소재 10개를 절삭길이 50km씩, 이송속도 = 0.005mm/rev, 절삭속도 = 1000m/min, 절입길이 = 0.005mm 등의 절삭조 건에서 건식가공 하였으며 절삭 길이는 최대 500km까지 실험하여 결과를 비교하였다.

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 (ø 0.05mm)			
Cutting length	/ _{chip} = 500km (per 50 km)			
Material	Brass(HBsC3C)			
Material size	ø 60 mm			
Cutting method	Dry cutting			

Table. 3.6 Cutting conditions

Table 3.7 Chemical compositions of brass(HBsC3C)

Elements	Pb	Si	Sn	Zn	Mn	Fe	Al	Cu
wt.(%)	0.2↓	0.01↓	0.5↓	25	2.5~5.0	2.0~4.0	5.0~7.5	rest

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

측정값은 ISO 필터의 직선면 상태에서 파상도 곡선인 저역 필터를 제거하고 거칠기 곡선 인 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 배 율 100배에서 공구의 절삭인선을 예리하게 세운 후 경사면과 여유면의 교차부분인 절삭인 선의 형태를 100㎞의 절삭주기에 따라 측정하여 공구의 마모상태를 평가 하였다. 공작기계 가 이상적으로 운동하고 절삭인선의 윤곽이 가공면에 완전히 전사된다면 인선의 거칠기가 가공면의 거칠기를 결정하는 하나의 중요한 인자가 되기 때문이다. 두 번째는 Photo. 3.4 의 공구현미경을 이용하여 공구의 절삭인선 반경을 50㎞의 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 Diamond tools

3.3 AFM 측정에 의한 가공면 특성 평가

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

AFM에 의한 가공면 표면정밀도 측정은 Scan size를 100µm로 선정 촬영한 AFM 3D 사진을 얻고 표면 거칠기 값의 변화에 따라 가공면의 상태를 육안으로 관찰 평가하였 다.

100, m의 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 AFM에서 Fig. 3.1~3.3와 같이 20, m, 60, m, 100, m로 스캔배율 치수를 변화시키면서, 이송량 내에서 발생된 변화를 관찰하였다. 금속현 미경에서는 가공속도에 따른 이송량은 명확하게 나타나지만, 저 배율인 관계로 이송량 내 에서의 변화를 관찰할 수 없었고, AFM에서는 이송량 내에서의 다양한 변화는 관찰이 가 능하나 고배율인 관계로 이송량을 구별하기가 어려웠다. 그래서 다시 AFM을 이용하여 저 배율로 이송량을 찾고 이송량 내에서 발생된 가공면의 변화와 가공속도에 의해 발생된 이 송량이 사진에서 가장 잘 관찰될 수 있는 100, m를 AFM 측정배율로 결정하였다.



Photo. 3.8 Measured AFM specimens



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



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



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

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 마 찰, 절삭 날 선단에서의 분리작용으로 구분된다. 초정밀 절삭가공에서는 절삭날의 인선형상 이 가공면의 형성에 영향을 주며, 절삭 깊이가 인선 반경보다 같거나 작을 경우, 절삭 날 은 국부적으로 인단에서 음의 경사각으로 절삭되며, 공작물의 일부가 공구의 여유면 쪽으 로 밀려들어가 버니싱 작용과 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하게 된다. 이러한 절삭 공구의 인선상태와 절삭조건의 상관관계를 알아보기 위하여 금속현미경과 공구현미경으로 절삭인선 상태를 측정 고찰하였다.

먼저 절삭인선의 형태를 측정하기 위하여 500km까지 절삭가공을 하면서 매 100km의 주기 마다 금속현미경의 배율을 x100으로 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 변 화된 현상을 관찰할 수 있었다.

성형 연삭된 새 공구임에도 불구하고 절삭인선의 윤곽이 매우 불균일함을 관찰할 수 있 었고, 점점 절삭이 진행되어 감에 따라 절삭인선의 윤곽이 다소 변해가며, 특히 상면 경사 면은 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 200 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.

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

Table 4.1 Measured nose radius values of cutting tool



Fig. 4.1 Measured nose radius values of cutting tool



Photo. 4.1. Diamond new tool & used tool

4.2 가공면 표면 거칠기 특성 고찰

천연 다이아몬드공구에 의한 초정밀 가공에서는 구성인선에 의해 야기되는 절삭저항의 변 화가 적기 때문에 본 실험에서는 공작기계가 이상적으로 운동하고 공구의 절삭인선 윤곽 이 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, 이 론값에 미치지 못함은 절삭도중 공구와 공작물의 상대진동, 기계본체의 불안정 및 주위환 경, 공구 설치각의 영향이 작용되기 때문이다.

황동 재료의 촉침식 측정기에 의한 표면 거칠기 값의 측정결과를 고찰해 보면, Fig. 4.2와 같이 절삭 길이가 50km 0.596µm에서 150km 0.625µm까지 0.029µm 증가되다가 이후 300km에 서 0.507µm으로 감소되었으며, 이후 급속 증가되어 500km에서 0.730µm까지 급격히 나빠짐 을 확인할 수 있다. 이는 새 공구의 성형과정에서 생성된 불균일한 절삭인선 윤곽이 가공 중 가공표면에 전사되어 150km까지 초기 절삭에서는 불량하게 나타나던 것이 가공이 진 행되면 거친 인선의 탈락으로 이후 안정된 표면 거칠기로 되돌아오다가 계속 가공 길이가 증가되면 절삭 길이 350km 이후에는 절삭인선 윤곽의 마모가 진행되면서 다시 증가되는 결과로 판단된다.

Fig 4.3~12는 절삭길이 50km에서 50km까지 일반적으로 이용되는 촉침식 표면거칠기 측 정기를 이용한 측정한 결과로 가시적 상태만으로는 표면상태의 순간적 판단이 난해한 결 과로 생각이 되므로 보다 발전된 초정밀 가공면 측정법으로 3D AFM 측정결과를 관찰하 였다.

Cutting length (km)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Roughness value (R _{max})	0.569	0.625	0.625	0.577	0.540	0.507	0.526	0.583	0.659	0.730

Table 4.2 Surface roughness values of brass metal



Fig. 4.2 Measured surface roughness values



Fig. 4.3 Measured surface roughness (50km)



Fig. 4.4 Measured surface roughness (100km)



Fig. 4.5 Measured surface roughness (150km)



Fig. 4.6 Measured surface roughness (200km)



Fig. 4.7 Measured surface roughness (250km)



Fig. 4.8 Measured surface roughness (300km)



Fig. 4.9 Measured surface roughness (350km)



Fig. 4.10 Measured surface roughness (400km)



Fig. 4.11 Measured surface roughness (450km)



Fig. 4.12 Measured surface roughness (500km)

4.3 AFM 측정에 의한 표면특성 고찰

본 실험에서는 AFM 사진을 통하여 절삭조건에 따라 가공된 표면의 표면거칠기와 공구의 절삭인선 형태와 절삭인선 반경 값에 따라 가공면의 이송량 내의 다양한 변화를 고찰하였 다.

Fig. 4.13~22는 원자현미경 배율치수 100, m의 2D 및 3D로 측정된 가공면 표면특성을 나 타낸 것이다. 여기서 이송속도에 따른 이송량은 일정하게 나타나고 있으나, 한 개의 이송 량 범위에서 또 다른 크고 작은 굴곡이 형성되고 있음이 확인되고 있는데 이들 특성은 절 삭시 전단과정에서 발생된 초경입자의 영향과 경미하지만 인선마모 등이 절삭면에 전사되 어 표면 거칠기에 영향을미치고 있기 때문으로 생각된다.

초기 절삭 길이 50km에서는 이송량 형태로 생성된 표면의 형상이 선명하고 비교적 일정 하여 표면 거칠기도 비교적 좋게 나타났으나 절삭 길이 150km에서는 표면형상이 더 작게 나누어져 불균일하게 되고 표면 거칠기가 0.652µm로 더 나쁘게 나타났다. 따라서 절삭인 선의 탈락이나 마모에 따른 불균일한 형태변화는 표면 거칠기에 큰 영향을 미치고 있는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.

이후 가공이 진행되어 절삭 길이가 계속 증가되면 표면형상은 다시 작게 나누어지고 300 km에서는 선명하고 매끄럽게 일정한 표면형상을 만들며, 0.507µm로 초기상태로 좋아지나 절삭 길이 500km에서는 굴곡형태가 무뎌지고 표면형상이 불균일해지며, 측정된 표면 거칠 기 0.730µm으로 초기보다 증가되었고, 계속적인 절삭에서도 표면 거칠기는 급속 악화될 것으로 생각된다.

그러나 측정값으로 나타난 모든 변화량은 절삭공구에 의한 것으로 볼 수는 없을 것이며, 본 연구에서 생략된 공작기계의 진동이나 주위환경 등 절삭작용에 미치는 여러 가지 영향 이 고려되어 평가되어야 할 것이다.



(b) 2 Dimensional surface





(a) 3 Dimensional surface



(b) 2 Dimensional surface





(b) 2 Dimensional surface





(b) 2 Dimensional surface





(b) 2 Dimensional surface





(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.18 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 300km)



(b) 2 Dimensional surface





(b) 2 Dimensional surface





(b) 2 Dimensional surface

Fig. 4.21 AFM photo. of cutting surface (HBsC3C/ 450km)



(b) 2 Dimensional surface



제 5 장 결 론

Nano급 초정밀 가공용으로 국내에서 제작된 시작용 공작기계에서 천연 다이아몬드공구로 황동(HBsC3C) 재료를 설정된 절삭 조건하에서 가공한 후 얻어진 초정밀가공면의 표면특성 과 공구 인선마모 현상을 기존의 표면 거칠기 측정기와 3D AFM을 이용하여 측정하고, 그 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 절삭공구의 절삭 인선은 절삭 길이를 500 km까지 가공할 경우 반경 값의 변화는 1 µm
 이하로 경미하며, 마모에 의한 변형은 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.
- 표면거칠기는 절삭가공 초기에는 새로운 공구의 사용으로 공구연삭시 형성도니 초경 입
 자 영향으로 오히려 불량한 결과이나 어느 정도 절삭이 진행되면 안정됨을 확인하였다.
- AFM 3D 표면특성의 평가는 기존의 표면 거칠기 측정기에 의한 평가에 보다 발전된 3 차원 입체 표면의 가시적인 정보를 제공하고 있어 초정밀 가공면 평가의 새로운 방법으 로 제안한다.

References

- (1). Ansi S., Taguchi Y., Horio K., Kasai T. and Kobayashi A., 1990, "Measuring the Very Small Cutting- Edge Radius for a Diamond Tool Using a New Kind of SEM Having Two Detectors" *Annals of the CIPR*, vol.39, part1, pp. 85~88
- (2). IKawa N., 1991, "Ultra-precision Metal Cutting- The Past, the Present and the Future", Annals of the CIRP, vol.40, No.2, pp. 587~594
- (3). Moronuki N., Furukawa Y., 1988, "摩擦轉動に よ る精密送り機械に關する研究", JSPE, vol.54, No.11, pp. 2113~2130
- (4). Shimokobe, A., "超精密工作機械の驅動系構造と機構", 東京工業大學精密工學研究所, 超精密加工 series-27.
- (5). Kakino Y., Ihara Y., Nakatsu Y., and Shinohara A., 1989, "NC 工作機械の運動 程度に關する研究", JSPE, vol.55, No.3, pp. 587~600
- (6) Kang S. J., Kim J. K., 2004, "Characteris -tics Evaluation of Surface Roughness with Ultra-precision Machining", *Trans. of KSMTE*, vol.13, No.1, pp. 9~15.
- (7) 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.
- (8). 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.
- (9) 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
- (10) 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.

- (11) Oh S. R., "A Study on Characteristics of Ultra-precision Cutting Surface by AFM Measurement Method", *Master Disserta -tion, Chosun university*, 2005.
- (12) Takasu S., Masuda M., Nishiguchi T., 1985, "Influence of Study Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining", *Annals of the CIRP*, vol. 34, part 1, pp. 463~467.
- (13) Abler J.A., 1994, "Process Modeling and Correction of Dynamic Errors in Diamond Turning", Ph.D. dissertation, North Carolina State University.
- (14) Ernst H., Merchant M. E., 1941, "Chip Formation, Friction, and High Quality Machined Surfaces", *Treatment of Metals*, pp. 299~335.
- (15) Drescher J. D., 1992, "Tool Force, Tool Edge and Surface Finishing Relation- ships in Diamond Turning", *Ph.D. dissertation, North Carolina State University.*
- (16) Holmes, R., 1971, "Fastors affecting the selection of cutting fluids", *Industry lubrication and tribology*, Vol. 23, pp. 47~55.
- (17) Shaw, M. 1990, "Tool face temperatures in high speed milling", Vol. 112, pp. 132~135.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 물심양면으로 학문적 지도와 격려는 물론 인격적인 면까지 가르침을 주신 김종관 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 본 논문의 심사를 맡아 조언과 격려를 주신 조규재 교수님, 한길영 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 학위기간동안 격려와 도움을 주신 기계공학과 교수님들께도 깊은 감사 를 드리며, 논문을 완성하는데 제게 가장 큰 힘을 주신 이갑조 박사님께도 지 면을 통해 깊은 감사를 드립니다.

실험실에서 미우나 고우나 옆에서 도움을 준 오상록군과 00학번 후배, 그리고 언제나 함께 했던 99학번 후배 및 학생회 후배들에게도 깊은 감사를 드립니다. 늘 자상한 모습으로 한결같이 사랑을 주시는 부모님, 건강이 좋지 않으시면 서도 항상 염려해주시고 걱정해 주시는 할머님, 나이는 어리지만 어른 같은 동 생, 그리고 항상 걱정해주며 격려해 주는 유정이에게 이 작은 결실의 영광을 돌립니다.

그리고 학위기간 동안 옆에서 많은 조언을 주신 병희형, 승철이형 및 대학원 원우들에게도 깊은 감사를 드립니다.

마지막으로 다 표현하지 못했지만 저를 이렇게 이끌어 주신 모든 선·후배 및 동기들에게 다시 한 번 머리 숙여 깊은 감사의 인사를 올립니다.

2007년 6월 4일

정종수 올림

저작물 이용 허락서									
학 과	기계공학과	학 번	20057707	과 정	석사				
성 명	성 명 한글:정종수 한문:鄭鍾洙 영문:JUNG JONG-SU								
주 소 광주광역시 동구 운림동 무등파크 3차 104호									
연락처 E-MAIL : toy002@hanmail.net									
한글 : AFM 측정법에 의한 황동의 초정밀 가공면 특성 연구									
논문제목 영문 : A Study on Characteristics of Ultra-precision Machined Surfaces of Brass 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(〇) 반대()									
2007년 6월 저작자: 정 종 수 (인)									
조선대학교 총장 귀하									