

2010年 8月

博士學位論文

AlTiN코팅공구를 이용한 플라스틱  
금형강의 절삭특성에 관한 연구

朝鮮大學校大學院

機械工學科

李 承 哲

AlTiN코팅공구를 이용한 플라스틱  
금형강의 절삭특성에 관한 연구

A Study on the Machinability of Plastic Mould Steel  
using AlTiN Coated Tool

2010 년 8 월 25 일

朝鮮大學校大學院

機械工學科

李 承 哲

AlTiN코팅공구를 이용한 플라스틱  
금형강의 절삭특성에 관한 연구

指導教授 曹 圭 宰

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2010 年 4 月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

李 承 哲

李承哲의 博士學位論文을 認准함.

委員長	東亞大學校	教授	全 彦 燦	印
委 員	朝鮮大學校	教授	金 鍾 寬	印
委 員	朝鮮大學校	教授	尹 聖 雲	印
委 員	朝鮮大學校	教授	韓 吉 永	印
委 員	朝鮮大學校	教授	曹 圭 宰	印

2010 年 6 月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	IV
LIST OF TABLES .....	VII
LIST OF PHOTOGRAPHS .....	VIII
NOMENCLATURES .....	IX
ABSTRACT .....	XII

## 제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 연구동향 .....	1
1.2 연구 목적 .....	5

## 제 2 장 이론적 배경

2.1 고속가공의 개요 .....	7
2.2 볼 엔드밀의 가공 .....	11
2.2.1 가공방법의 분류 .....	11
2.2.2 상 방향 절삭과 하 방향 절삭 .....	13
2.2.3 커슌 .....	14
2.2.4 볼 엔드밀 형상과 절삭분력의 관계 .....	20
2.2.5 볼 엔드밀의 표면거칠기 .....	33
2.2.6 볼 엔드밀 공구의 마모 .....	40
2.3 물리증착법 .....	42
2.3.1 PVD법의 종류 .....	45
2.3.2 AlTiN코팅의 특징 .....	50

2.4 원자현미경 .....	52
<b>제 3 장 실험장치 및 실험방법</b>	
3.1 실험장치 .....	56
3.2 시험편 및 절삭공구 .....	63
3.2.1 시험편 .....	63
3.2.2 절삭공구 .....	66
3.3 실험방법 .....	67
<b>제 4 장 AlTiN코팅 공구의 분석</b>	
4.1 AlTiN코팅 공구의 표면조도 분석 .....	70
4.2 AlTiN코팅 공구의 경도시험 .....	74
4.3 AlTiN코팅 공구의 표면분석 .....	77
<b>제 5 장 실험결과 및 고찰</b>	
5.1 재료형상에 따른 상·하 방향의 절삭력 고찰 .....	82
5.1.1 15°경사 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석 .....	82
5.1.2 30°경사 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석 .....	85
5.1.3 45°경사 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석 .....	88
5.1.4 곡면 내·외면 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석 .....	91
5.2 AlTiN코팅공구 층수에 따른 절삭력 분석 .....	94
5.3 표면거칠기에 대한 분석 .....	101
5.3.1 재료형상에 따른 표면거칠기 고찰 .....	102
5.3.2 AlTiN코팅공구 층수에 따른 표면거칠기 고찰 .....	107
5.4 AlTiN코팅 공구의 마모특성 .....	111
5.4.1 재료형상에 따른 AlTiN공구의 마모특성 .....	114

5.4.2 AlTiN코팅 층수에 따른 공구의 마모특성 .....	119
<b>제 6 장 결 론</b> .....	126
<b>참고문헌</b> .....	127
<b>부 록</b> .....	134
1. 절삭가공실험 모델링 .....	134
2. AlTiN코팅 볼 엔드밀 표면분석 .....	137
3. 재료형상별 절삭분력 및 표면거칠기 결과 .....	140
4. 절삭가공 프로그램 .....	160

## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Idealized cutting speed–cutting temperature .....	8
Fig. 2.2 Rough cutting characteristic .....	10
Fig. 2.3 Cutting modes of surface machining .....	12
Fig. 2.4 Upward cutting and downward cutting .....	13
Fig. 2.5 Flat surface machined by a ball end mill cutter .....	14
Fig. 2.6 Cusp height on convex surface(External cutting) .....	15
Fig. 2.7 Cusp height on concave surface(Internal cutting) .....	15
Fig. 2.8 Domain of application for proposed cusp height equation in step down cutting convex surface .....	19
Fig. 2.9 Domain of application for proposed cusp height equation in step over cutting convex surface .....	19
Fig. 2.10 Shape of the ball end mill .....	21
Fig. 2.11 Cutting forces in $V-V_c$ plane .....	22
Fig. 2.12 $x-y-z$ and $X-Y-Z$ coordinate systems .....	23
Fig. 2.13 Effective diameter for ball-end mill .....	25
Fig. 2.14 Contact area of tool according to the inclined material .....	29
Fig. 2.15 Contact area of tool according to the semicircular processing .....	30
Fig. 2.16 2D chip thickness .....	32
Fig. 2.17 Cusp height in ball end milling .....	35
Fig. 2.18 Relation of ball end mill and max roughness on inclined plane .....	37
Fig. 2.19 Microscopic view of milled surface .....	39
Fig. 2.20 Pattern of tool wear for ball-end mill .....	41



Fig. 2.21 PVD coating process .....	44
Fig. 2.22 Evaporation process .....	46
Fig. 2.23 Sputtering process .....	47
Fig. 2.24 Ion plating process .....	49
Fig. 2.25 Structure according to the Al content .....	51
Fig. 2.26 The cantilever used in AFM and needle is image .....	53
Fig. 2.27 The measurement principle of AFM .....	54
Fig. 2.28 Contact mode and Non-contact mode .....	55
Fig. 3.1 Schematic diagram of measuring equipment .....	59
Fig. 3.2 Modelling of inclined plane material(15°, 30°, 45°) .....	65
Fig. 3.3 Modelling of the circular material (half circle of $\Phi 60\text{mm}$ ) ·	65
Fig. 3.4 Geometry of ball end mill .....	66
Fig. 4.1 Surface roughness of AlTiN coating layer measured by AFM .....	73
Fig. 4.2 Hardness Values of AlTiN layer .....	76
Fig. 4.3 Quantitative values of the composition of AlTiN coating layer using SEM-EDX .....	79
Fig. 4.4 Composition ratio of Al and Ti of the coating tool .....	80
Fig. 4.5 The thickness of AlTiN coating layer using SEM .....	81
Fig. 5.1 Cutting forces according to depth of cut(Inclined plane 15°) .....	84
Fig. 5.2 Cutting forces according to depth of cut(Inclined plane 30°) .....	87
Fig. 5.3 Cutting forces according to depth of cut(Inclined plane 45°) .....	90
Fig. 5.4 Cutting forces according to depth of cut ( $\Phi 60\text{mm}$ circular material) .....	93

Fig. 5.5 Cutting forces according to AlTiN coating layer (Inclined material) .....	97
Fig. 5.6 Cutting forces according to AlTiN coating layer ( $\varnothing$ 60mm circular material)l .....	100
Fig. 5.7 Results of surface roughness according to depth of cut (Inclined material) .....	103
Fig. 5.8 Results of surface roughness according to depth of cut ( $\varnothing$ 60mm circular material) .....	106
Fig. 5.9 Results of surface roughness according to AlTiN coating layer (Inclined material) .....	108
Fig. 5.10 Results of surface roughness according to AlTiN coating layer ( $\varnothing$ 60mm circular material) .....	110
Fig. 5.11 Results of wear test according to material conditions ...	116
Fig. 5.12 Results of tool wear test of tool chisel edge .....	118
Fig. 5.13 Results of wear test according to AlTiN coated layers ·	120

## LIST OF TABLES

Table 2.1 Classification of dry process .....	43
Table 3.1 Machine specifications .....	57
Table 3.2 Specifications of experimental apparatus .....	57
Table 3.3 Mechanical properties of KP-4 .....	64
Table 3.4 Chemical compositions of KP-4 .....	64
Table 3.5 Specification of ball end mill .....	66
Table 3.6 Cutting conditions of Inclined material .....	69
Table 3.7 Cutting conditions of $\Phi$ 60mm circular material .....	69
Table 4.1 Surface roughness of AlTiN coating layer .....	73
Table 4.2 Hardness values of AlTiN coating layer .....	96
Table 5.1 Experimental conditions of wear test .....	113

## LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 3.1 Experimental setup for measurements of machining characteristics .....	58
Photo. 3.2 Installation of tool dynamometer and material processing .....	58
Photo. 3.3 Photograph of experimental apparatus .....	60
Photo. 3.4 Tool Microscope System .....	60
Photo. 3.5 AFM equipment .....	61
Photo. 3.6 Auto vickers hardness testing system .....	64
Photo. 3.7 SEM-EDX equipment .....	64
Photo. 4.1 Results of AFM to AlTiN coated layers .....	72
Photo. 4.2 Images of AlTiN coating layer measured by Auto vickers hardness testing system .....	75
Photo. 4.3 Mounting of AlTiN layer .....	78
Photo. 5.1 Auxiliary instruments for the measurement of surface roughness (Angle Plate, -X, -Y Stage, Rotary Stage) .....	101
Photo. 5.2 Auxiliary instruments for the measurement of tool wear .....	113
Photo. 5.3 Wear progression of AlTiN coated carbide tool (Inclined plane 15°, Upward cutting, AlTiN layer 3 ) .....	121
Photo. 5.4 Wear progression of AlTiN coated carbide tool (Inclined plane 30°, Upward cutting, AlTiN layer 3 ) .....	122
Photo. 5.5 Wear progression of AlTiN coated carbide tool (Inclined plane 45°, Upward cutting, AlTiN layer 3 ). .....	123
Photo. 5.6 Wear progression of AlTiN coated carbide tool ( Internal cutting, Upward cutting, AlTiN layer 3 ) .....	124
Photo. 5.7 Wear progression of AlTiN coated carbide tool ( Externall cutting, Upward cutting, AlTiN layer 3 ) .....	125

## NOMENCLATURES

$\Delta a$	:	Length of the projected infinitesimal edge on the a-axis
$d_a$	:	Axial depth of cut
$d_e$	:	Equivalent depth of cut
$e^y$	:	Y position of an infinitesimal cutting edge
$e_z$	:	Z position of an infinitesimal cutting edge
$f_x$	:	Feed rate in the x direction
$f_c$	:	Feed rate in the c direction
$f_e$		Equivalent feed
$f_m$		Feed rate[mm/rev]
$dF_a, dF_b, dF_c$		Infinitesimal force components in the a-b-c coordinate system
$dF_x, dF_y, dF_z$	:	Infinitesimal force components in the x-y-z coordinate system
$dF_X, dF_Y, dF_Z$	:	Infinitesimal force components in the X-Y-Z coordinate system
$dF_r$	:	Radial force acting on an infinitesimal cutting edge
$dF_t$	:	Tangential force acting on an infinitesimal cutting edge
$i$	:	Cutting edge inclination angle
$L_d$	:	Length from the end of the collet to the surface creating point by a flute
$L_e$	:	Effective tool length not to be held
$L_f$	:	Length from the end of the collet to the force acting point

$N_b$	: Number of infinitesimal cutting edges in the ball part
$N_e$	: Number of infinitesimal cutting edges in the end mill part
$N_f$	: Number of flutes
$N_i$	: Number of infinitesimal cutting edges to the concerning infinitesimal cutting edge
$N_t$	: Number of total infinitesimal cutting edges
$R$	: Tool radius
$R_d$	: Tool rotating radius for an infinitesimal cutting edge
$V$	: Tool radius in x-y plane at the axial location $e_z$
$V_c$	: Cutting velocity
$W_b$	: Chip flow velocity
$w_p, w_q$	: Y direction work boundary measured from the current toolaxis
$\Delta z$	: Axial step of divided edge at the end mill part
$\alpha$	: Angle from -Y axis to the reference flute bottom
$\alpha_0$	: Initial Angle from -Y axis to the reference flute bottom
$\alpha_e$	: Effective rake angle
$\alpha_h$	: Helix angle of the end mill part
$\alpha_n$	: Normal rake angle
$\Delta\alpha$	: Tool rotational angular step
$\beta$	: Angle from -Y axis to the concerning cutting edge
$\gamma$	: Angle between V-Vc plane and a-b plane
$\delta_x$	: Tool deflection in X-axis
$\delta_y$	: Tool deflection in Y-axis
$\eta_c$	: Chip flow angle

$\theta$	:	Angle from the base point to the concerning infinitesimal cutting edge
$\Delta\theta$	:	Angle appropriate to single infinitesimal cutting edge in the end mill
$\xi$	:	Angle between x-y plane and a-b plane
$\rho$	:	Amount of eccentricity
$\varnothing$	:	Angle from the center of ball part to the concerning infinitesimal cutting edge
$\varnothing_a$	:	Angle of chip load extended by feed
$\Delta\varnothing$	:	Angular step of divided edges at the ball part
$\varnothing_0$	:	Angular position of initial run out of the tool

## ABSTRACT

### A Study on the Machinability of Plastic Mould Steel using AlTiN Coated Tool

Lee, Seung-Chul

Advisor : Prof. Cho, Gyu-Jae, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

In this research, KP-4, one of the plastic mold steels, was coated with the AlTiN from one layer to four layers by the PVD method in the  $\Phi$  8mm cemented carbide ball end mill. Coated KP-4 was processed with various conditions.

For example, in  $\Phi$  60 circular material of inner and outer surface and material's slope of  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  and  $45^\circ$  the spindle rotation speed was changed from 10,000rpm to 16,000rpm, the tool feeding speed was changed from 1,300mm/min to 1,700mm/min, the depth of cut was also changed from 0.3mm to 0.9mm, and etc. Cutting component force according to the coating layer number, surface roughness, and the wear of tool were studied. According to the results, some important conclusions were found as follows:



1. When slope angle condition(15°, 30°, 45°) was chosen as 15°, the largest cutting component force by material shape is showed. In case of the curved surface processing, the cutting component force in inner surface, smearins appeared in, is higher than outer surface. the cutting component force according to the processing direction is higher in the down ward direction because of the over cut.
2. The larger slope angle, the lower surface roughness by material shape showed and surface roughness of inner surface is higher than outer surface. The difference of the surface roughness according to the processing direction is  $0.1\mu\text{m}$  between up and down ward. The difference of  $R_a$  by a number of the AlTiN coating layers is  $0.08\mu\text{m}$ .
3. According to the coating results, AlTiN was coated from one layer to four layers in cemented carbide ball end mill, 3rd coating layer of AlTiN coating layers has the best mechanical properties. The quantity of the flank wear according to the shape of the material was the fastest in case of the material's slope of 15°, and then, the wear of tool was proceeded as a sequence of the material's slope of 30° and 45°. In the curved surface, rate of wear in inner surface is more faster than outer surface.
4. The wear by AlTiN coating tool layers showed a good result in 1st, 4th, 2nd, 3rd layer order. Especially, the wear condition is stable state in 3rd coating layer in spite of the processing time for more than 90 minutes.

## 제 1 장 서론

### 1.1 연구배경 및 연구동향

최근 금형산업 및 첨단산업 분야에서 부품의 고강도화 및 경량화 목적으로 내구성과 내열성이 뛰어난 재료가 많이 쓰이고 있어 재료의 고속가공 필요성이 증가되고 있다. 특히 우리나라의 금형산업은 다른 나라에 비하여 늦은 1940년경 수작업 위주로 금형을 제작하기 시작하여 50년대 이후에 와서야 범용 공작기계를 이용한 간단한 금형을 제작, 1970년경부터 정밀 가공용 기계의 도입으로 프레스금형, 사출금형 등 기술 집약적 금형생산이 가능해졌다. 그 후 정밀도가 높은 금형의 필요성으로 인하여 컴퓨터를 장치한 공작기계를 이용함으로써 제작 범위가 넓어지고 있으며,<sup>1~7)</sup> 최근 들어 고속가공기계(High speed machining) 개발 및 공구재료 품질향상으로 고정도의 가공표면이 실현되고, 이와 관련 많은 연구가 진행되고 있다.

금형가공에서 고속절삭과 볼 엔드밀 사용이 많은 이유는 주축회전수를 증가시킴으로써 높은 절삭속도(Cutting speed)를 얻을 수 있어 난삭재를 가공하는데 있어 기존의 이송속도(feed rate)보다 빠른 이송속도로 절삭이 가능하기 때문이며,<sup>8)</sup> 절삭시 생성된 절삭열이 고속으로 칩과 같이 방출되어 냉각효과와 가공물 변형방지 이점을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 볼 엔드밀은 고속가공에서 낮은 전단력에 의한 빠른 이송속도 구현이 가능하고 이에 따른 절삭 능력을 활용, 높은 표면 정밀도에 의한 부수적인 공정 감축이 가능하기 때문에 금형가공 산업에서 많이 사용하고 있다. 이와 같이 금형가공기술의 성장측면에서 공작기계와 더불어 절삭공구의 발전도 상호 보완적인 관계를 갖고 끊임없는 발전을 거듭해오고 있다. 특히 공작기계 측면에서는 강성증가, 열 변형 억제, 동적 안정성 및 응답성 개선을 통한 가공속도 증가로 인한 생산성 및 가공정밀도를 증대시키려는 방안이 강구되고 있으며, 공구 측면에서

는 공구형상 최적화를 통해 동적안정성을 확보하고 새로운 재료 및 코팅 기법 개발에 의한 고속화와 함께 공구수명 향상을 목표로 다양한 시도가 이루어지고 있다.

3차원 형상의 자유곡면을 많이 갖는 사출금형의 경우 절삭가공에서 볼 엔드밀 가공의 필요성이 점점 증가하고 있으나, 볼 엔드밀은 공구형상이 복잡하고, 구면의 인선과 측면인선이 스피들로부터 상당부분 돌출되어 절삭작업을 수행하기 때문에 다른 회전 절삭공구보다 공구 마모량이 크며, 공구의 정점부에서 비정상 절삭이 일어나기 때문에 공구 크랙이나 칩핑 등의 파손이 쉽게 발생되고, 여러 가공인자와 절삭변수에 따라 절삭현상도 다양하게 나타나고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>9~10)</sup> 이에 대한 연구동향은 Adrian Sharman은 볼 엔드밀을 사용하여 난삭재인 Inconel 718<sup>TM</sup> 재료를 고속가공기에서 CrN, TiAlN을 각각 코팅하여 절삭각도 45°조건에서 공구의 마모형태를 분석하였고,<sup>11)</sup> E. G. Ng등은 볼 엔드밀에 CrN을 코팅하여 초경공구와 코팅공구의 절삭특성을 비교 분석하였으며,<sup>12)</sup> Muammer Nalbant등은 초경공구에 CVD와 PVD코팅을 하여 고속가공에서 코팅방식에 따른 절삭특성을 연구·수행하였다.<sup>13)</sup> P. Koshy등은 주축회전수 10,000rpm의 조건에서 금형소재를 가공함에 있어 인서트 타입 공구를 이용하여 공구날수에 따른 절삭특성 및 공구날수가 표면조도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.<sup>14)</sup> Lincoln Crdoso Brandao등은 볼 엔드밀을 이용한 형상가공에 있어 절삭력 발생에 따른 가공물의 온도분포를 분석하여 재료형상에 따른 절삭력과 표면온도변화를 분석하고 역학적 관계를 연구하였다.<sup>15)</sup> C. S. Anderson등은 공구 채터(chatter)에 관한 연구를 하여 고속가공시 절삭력 크기와 진동의 크기를 비교 분석하여 최적의 절삭조건을 찾고자 하였다.<sup>16)</sup> Yuan Ning은 H<sub>R</sub>C 55인 AISI H 13(Mold steel) 재료를 볼 엔드밀 고속가공에 있어 발생하는 절삭력을 공구동력계로 측정하고 가공 후 발생된 칩의 형태를 SEM(scanning electron microscope) 및 EDX(energy dispersive X-ray) 분석를 통해 칩의 형태를 4가지 Type으로 분석, 칩의 형태 및 표면검사를 하여 절삭력에 따른 배출 칩의

조직변화를 분석하였다.<sup>17)</sup> M. A. Salgado등은 불 엔드밀 고속가공시 공구몸체, 생크, 공구홀더 등에 미치는 힘을 역학적으로 해석하고 변위량을 연구하였다.<sup>18)</sup>

Masahiko Jin은 모델링 및 해석프로그램을 통하여 노즈 반경 크기에 따른 절삭력의 크기, 반경  $R$ 에 따른 절삭력 차이를 연구 분석하였으며,<sup>19)</sup> M Shatla, M. Wan, Abdullahil Azeem등은 절삭해석 프로그램을 이용하여 불 엔드밀 공구로 난삭재인 Ti6Al4V 재료를 선정하여 절삭력, 절삭온도 등을 해석 연구·평가하였다.<sup>20)</sup> Ching-Chih Tai등은 Surface design을 통하여 다양한 공구형상을 통해 불 엔드밀의 형상 최적화에 관해 연구하였으며,<sup>21~24)</sup> M. Fontaine등은 다양한 절삭력 모델을 통하여 실험적 검증을 통한 결과와 실제 가공과의 비교 분석을 하였다.<sup>25)</sup> M. Arizmendi등은 불 엔드밀의 절삭가공에서 가공과 실험적 해석을 통하여 가공조건에 따른 Cusps와 Scallop의 크기변화를 예측하고, 절삭실험을 통하여 실험적 해석과 비교 분석하였다.<sup>26)</sup>

국내연구를 보면 E. D. Kim은  $\Phi 10$ , 4날 초경엔드밀 공구로 고속가공에서 STD11가공시 공구마멸 진행에 따른 변화와 가공변질층을 알아보기 위해 X선 회절법으로 가공변질층의 잔류응력을 가시적으로 관찰하였고, 절삭온도와 절삭력을 측정하여 고속가공시 가공변질층의 특성을 실험적으로 검토하여 가공변질층 깊이를 최소화 할 수 있는 절삭조건을 연구하였다.<sup>27)</sup> G. M. Kim등은 가공조건을 Z-map 형태로 설정하고 불 엔드밀 절삭가공에서 불 엔드밀 평면상태에서 공구 마모형태를 분석·연구 하였다.<sup>28)</sup> N. D. Baek은  $\Phi 8$ , 4날 엔드밀에 TiAlN코팅을 코팅하여 SKD11재료를 절삭깊이, 공구이송속도 등 절삭조건을 변화시켜 엔드밀의 마멸특성과 피삭재의 표면정밀도 특성을 파악하여 효율적인 절삭조건을 제시하고자 하였다.<sup>29)</sup> S. J. Kim은 수직형 머시닝 센터에 주축 증속기를 장착하여 절삭공구  $\Phi 6$ , 2날 초경 불 엔드밀과 초경 펠렛엔드밀을 사용하여 절삭조건에 따른 상·하 방향에 있어 절삭특성을 비교 분석 하였다.<sup>8)</sup> Y. C. Kim은  $\Phi 10\text{mm}$  불 엔드밀 공구를 사용하여 주축회전수 1,000rpm 절삭조건에서 SM20C재료를 곡면가공, 음향방출신호(Acoustic

Emission : AE)을 이용하여 가공조건에 따른 절삭특성 연구 등이 있다.<sup>30)</sup> 그러나 금형가공 특히, 사출금형가공에 있어 공구수명이 중요시되고 있으나, 고속가공 조건에서 코팅층수에 따른 절삭특성 및 가공자료는 거의 발표되지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 주축회전속도 10,000~16,000rpm, 공구이송속도 1,300mm/min~1,700mm/min, 절삭깊이 0.3mm~0.9mm 조건을 선정, 상·하 방향으로 절삭실험을 수행하여, AlTiN코팅 층수에 따른 코팅공구 가공상 문제점 및 코팅공구의 수명에 대한 연구·분석이 절실히 필요하다.

## 1.2 연구목적

현재의 금형공업은 대량 생산용 정밀금형과 다중 소량 생산용 금형이 많이 요구되고, 수요도 급증하고 있으며 최근 소비자 요구가 아름답고 부드러운 외형을 선호하는 경향에 따라 고속가공을 통한 Ball End-Mill가공이 중요시되고 있다.

고속가공은 소재제거율(MRR : Material Removal Rate)을 크게 향상시킴으로써 생산비용 및 생산시간을 단축시킬 수 있다. 프레스금형과 다르게 플라스틱금형 마무리는 보통 Ball Nose Cutter를 사용하여 많은 공구 궤적의 가공으로 이루어지므로 고속가공 조건에서 보다 빠른 절삭이송을 통한 정확하고 효율적인 가공처리로 절삭시간과의 절충을 없애면서 수작업을 최소화할 수 있기 때문에 사용된다. 또한 첨단 IT 부품 및 중량을 중요시 하는 우주·항공 산업에서 고속가공(HSM : High Speed Machining)공정은 얇은 벽을 갖는 제품을 가공할 수 있으므로 가벼운 부품을 만들기 위한 중요한 공정이다.

다른 한편으로 금형산업의 특이점은 제품의 대량 생산을 배경으로 하고 있음에도 불구하고 제작자임으로 생산을 결정하지 않고 발주자 요구에 따라 제작하기 때문에 유통 경로가 단순하고, 동일한 모양의 금형을 반복해서 제작하는 예가 드물며, 현재 요구 납기일이 줄어들고 있는 추세이다. 이러한 상황에서 국내 제조업체들의 동향을 보면 서서히 고속가공기술 쪽으로 관심을 가지고 도입, 제품 개발부터 납기까지 사이클 주기를 줄이고자 꾀하는 업체들이 많아지고 있으나, 새로운 신기술인 고속가공기술 도입에 있어, 이전에 접하지 못한 고속가공에 대한 생소함, 시스템 도입에 따른 기대효과, 신기술에 대한 적응능력 등으로 도입하지 못하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 TiAlN 코팅층보다 내마모성 향상 목적으로 Al(%)을 증가시킨 AlTiN을 물리증착법(Physical Vapor Deposition : PVD)증착 및 코팅치밀성 등의 피복층을 얻을 수 있는 이온 플레이팅법(Ion

plating)으로 초경 볼 엔드밀에 멀티코팅(1~4층), 10,000rpm이상 고속가공용 머시닝센터를 사용하여 재료 형상별 절삭조건 변화에 따른 AlTiN코팅 공구의 절삭특성 및 표면거칠기를 알아보고, 재료 형상별 AlTiN코팅 층수에 따른 마모실험을 통해 공구수명 및 AlTiN코팅공구 층수에 따른 플라스틱 금형강의 절삭가공 특성을 분석·고찰하여 기초 데이터를 제시하고자 한다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 고속가공의 개요

고속가공(HSM : High Speed Machining),(HSC : High Speed Cutting)이란 금형에서 기존의 가공방법에 비해 높은 주축회전과 빠른 이송속도로 가공하는 방식을 지칭한다. 최근 고속가공 방법이 빠른 속도로 실현되고 있는 것은 CNC에서 높은 주축회전수와 이송속도가 가능, 비교적 저가의 내마모성이 높은 공구가 판매되고 있기 때문이다.<sup>31)</sup>

고속가공에 대한 개념은 가공품의 정밀도 향상과 가공시간 단축으로 생산원가를 절감하고자 하는 목적 아래 1924년 독일의 Carl J. Salomon박사에 의해 착안되었으며, Salomon은 절삭속도가 증가함에 따라 절삭온도가 증가하지 않는 임계의 절삭속도가 있음을 알게 되었고, 이러한 절삭속도에 대한 온도분포 곡선을 제시, 주장함으로써 고속가공이 도입되기 시작하였다. 그 당시 고속가공이라 함은 Taylor공식에서 고려된 것보다 좀 더 높은 속도의 가공을 의미하였으며, Salomon이 제시한 곡선 Fig. 2.1은 Taylor의 공구수명 방정식에서 말하는 절삭속도가 증가하면 공구수명이 단축된다는 사실을 바꿔 놓았다. 그러나 Salomon은 비철금속에만 적용하였을 뿐 비철금속 이외의 재료는 예측만 할 정도였다. 그 후 1960년대에 많은 학자들은 Salomon의 연구를 토대로 하여 고속가공이 실제로 실현 가능성이 있음을 제시하였다. 그러나 이들은 고속가공에 적합한 고속가공기계나 공구가 개발되지 않았던 관계로 실현 가능성에만 그쳤고 실제 가공현장에 적용할 만큼 연구되지는 못하였다. 이러한 Salomon의 절삭열 감소에 대한 주장에 대해 많은 연구자들은 고속가공의 장점을 인정하면서도 고속가공시 이와 상응하는 온도의 감소는 관찰할 수 없었다고 보고하고 있다.<sup>11,26)</sup>

최근 많은 연구에서 보고된 것에 의하면 고속가공에서 Salomon의 주장대로



절삭속도가 고속화됨에 따라 절삭온도가 감소하는 효과를 보는 것은 아니며, 절삭온도 증가에 따른 생산성 향상, 가공정밀도 향상, 표면거칠기 향상 등의 효과를 얻어내는 것이다. 절삭온도가 피삭재의 용융온도에 접근하면 국부적으로 유동성을 갖게 되는 이른바 연화(Softening)가 발생하게 되어 절삭력이 감소한다. 고속가공에서는 절삭력 감소로 공구의 휨(Deflecting)이 작아져 정밀가공이 가능하게 되며, 박형(薄型) 부품의 가공이 가능하고, 가공 변질층 두께가 얇아지게 되어 표면품질이 향상된다. 이러한 장점들이 있는 고속가공을 생산에 적용함으로써 공작기계의 사용효율 증가, 생산시간 단축, 공구 사용량 감소, 생산비용 절감, 공작물 표면품질 향상 등의 효과를 기대 할 수 있다.

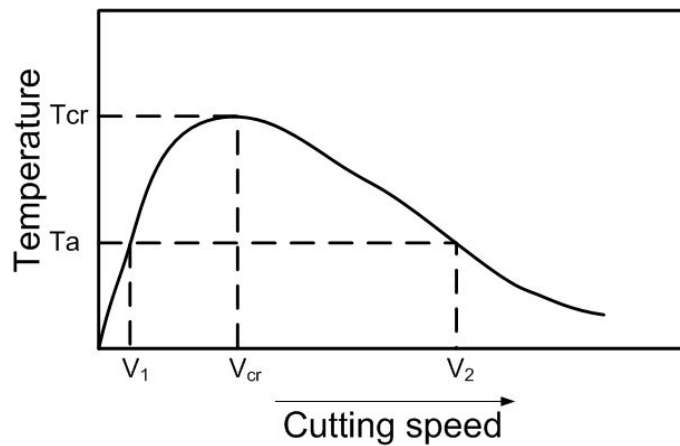


Fig. 2.1 Idealized cutting speed-cutting temperature

고속가공은 가공 효율성을 추구하는 고능률 가공과 가공표면의 정밀성을 추구하는 고품위 가공으로 구분된다. 고능률 가공은 구간이송을 증가시켜 소재 제거율(MRR : Material Removal Rate)을 극대화함으로써 가공시간을 단축시키는 방법이며, 고품위 가공은 공구경로간의 간격(Pick Feed)을 감소시킴으로

써 최종 표면에 남는 커슥(Cusp)을 최소화하는 가공법이다.<sup>32~33)</sup>

황삭 가공에서는 Fig. 2.2와 같이 기존의 방법에 비해 황삭을 정삭처럼 가공하는 방법으로, 기존 방법은 공구가 건디는 한계까지 절삭깊이를 깊게 주고 이송속도를 느리게 하였지만, 고속 황삭에서는 절삭깊이를 적게 주고 빠른 이송속도로 가공을 한다. 가공시간으로 보면 큰 차이가 발생하지 않을 수 있으나 절삭량이 적기 때문에 가공여유를 적게 줄 수 있고, 계단식으로 남아 있는 양이 적기 때문에 중삭 및 정삭에서 빠르게 가공할 수 있다. 따라서 황삭에서 정삭까지의 공정을 줄일 수도 있다. 다른 한 가지는 고속 정삭에서 가공방법으로, 이는 이송속도 제어(코너, 경사에서 feed 감속)가 필수적으로 필요하며 공구경로 형태는 간격이 일정한 것이 적합하다. 금형재질의 경도가 높거나, 공구의 길이가 길면 측벽에서도 이송속도의 감소가 필요하다. 높은 이송속도, 회전수, 내마모성(공구), 이송속도 제어와 적합한 공구경로가 갖추어지면 기존의 가공보다 고품질의 금형과 가공시간 단축을 할 수 있다.<sup>31)</sup>

최근 고속가공에 대한 많은 연구가 이루어지고 있지만, 문제점으로 나타나는 것은 고정밀 고속가공을 가능하게 하는 공작기계와 공구재료의 개발이라 할 수 있다. 주축을 고속으로 회전시켜 이송속도를 증가시키면 형상 오차는 커지게 되고 공구수명이 짧아지게 되며 절삭온도에 의해 정밀도가 저하된다. 고속가공을 하는 데에는 고속에 적합한 가공법, 고속의 주축, 고속이송, 고속이송에서 정밀도 저하되지 않는 제어방법, 고속을 제어할 수 있는 기계강성 및 열 변형이 작은 기계구조가 요구되어 진다. 이와 더불어 고속가공에서 충분한 성능을 발휘하기 위해서는 고속가공에서 장시간 견딜 수 있는 신소재 공구재료의 개발도 필연적이라 할 수 있다.<sup>31~32)</sup>

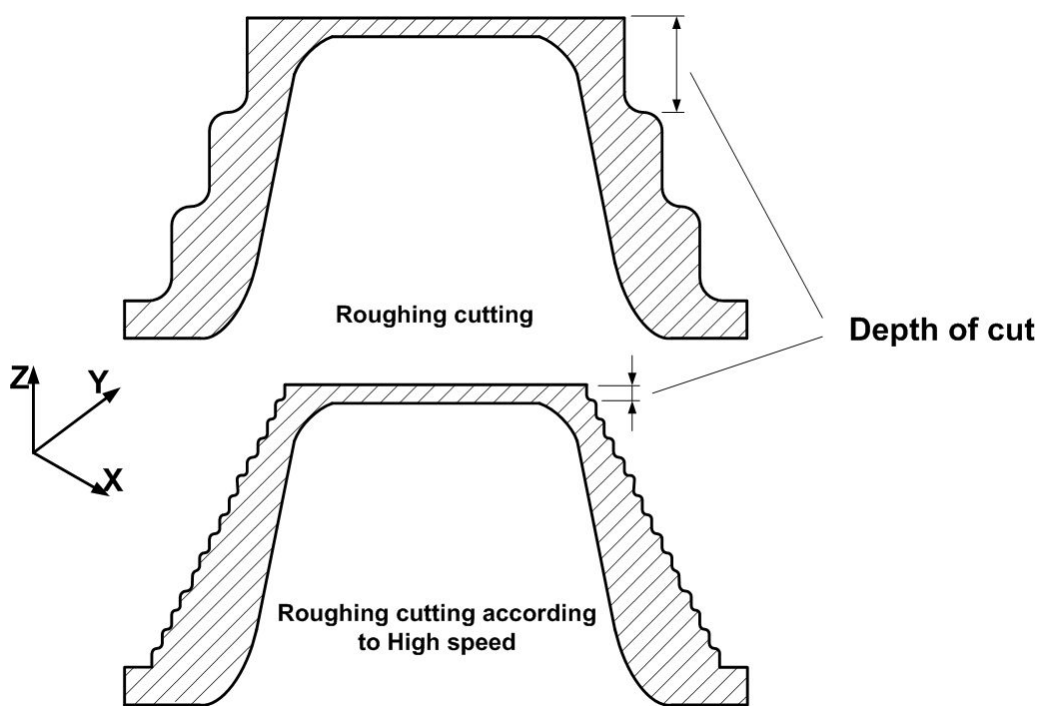


Fig. 2.2 Rough cutting characteristic

## 2.2 볼 엔드밀 가공

### 2.2.1 가공방법의 분류

2차원 형상을 지닌 부품 제작에서는 윤곽가공, 슬롯가공, 포켓가공 등 평 엔드밀을 사용한 가공이 주로 사용된다. 평엔드밀은 공구형상이 원통형이어서 모든 절삭날이 동일한 절삭속도를 가지므로 가공성이 좋고 기울기가 없는 평면가공에 유리한 특성을 지니고 있다. 가공시 축방향 절삭깊이(Axial Depth of Cut)와 반경방향 절삭깊이(Radial Depth of Cut)에 따라 가공기법을 정의할 수 있으며 이들 조건에 따라서 절삭력을 결정할 수 있다.

3차원 자유 곡면은 기울기가 있고 급격하게 변하는 곡률이 있는 경우가 많기 때문에 공구 끝이 반구형인 볼 엔드밀이 주로 사용되고 있다. 자유곡면 가공은 기울기 각도 유무에 따라 수평가공(Plain Cutting)과 경사면 가공(Slanted Surface Cutting)으로 분류할 수 있다. 수평가공은 기울기가 없는 평면을 가공하는 형태로, 공구의 상·하 방향 이동이 없으므로 평엔드밀 가공과 동일한 미변형 칩 기하(Geometry)를 가지고 절삭영역도 축방향 절삭깊이와 반경방향 절삭깊이로 표현이 가능하므로 비교적 간단한 절삭해석이 가능하다. 경사면 가공은 기울기가 있는 면을 가공하는 형태이며 공구이송방향에 따라 공구 상·하 방향 이동이 있는 경사가공과 경사면을 따라서 공구가 수평하게 이동하는 윤곽가공(Contouring)으로 분류할 수 있다. 자유 곡면가공은 위에서 설명한 가공의 조합이므로 이들 가공에 대한 절삭특성 해석이 이루어져야 하며, Fig. 2.3에 볼 엔드밀의 가공방법의 분류를 정리하여 나타내었다.

34~35)

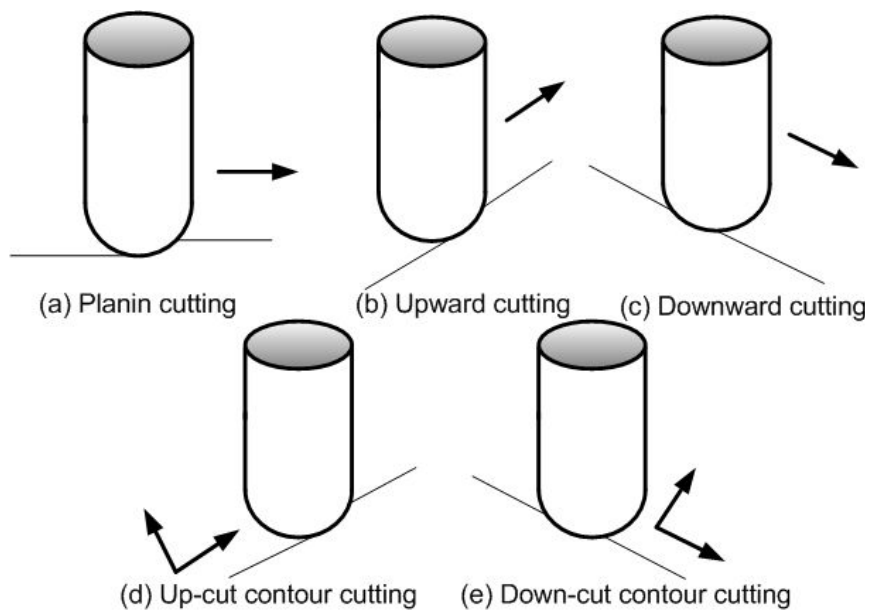


Fig. 2.3 Cutting modes of surface machining

## 2.2.2 상 방향 절삭과 하 방향 절삭

상 방향 절삭(Upward Cutting)은 볼 엔드밀로 곡면 가공시 곡면 아랫부분에서 윗방향으로, 이동하면서 가공하는 것으로 실제 절삭이 일어나는 부분은 볼 엔드밀의 중심에서 벗어나 공구의 가장자리 부부에서 절삭이 일어난다. 반면에 하 방향 절삭(Downward Cutting)은 공구의 중심부에서 절삭이 이루어지게 되어 실제 절삭이 일어나는 것이 아니라 문드러짐 현상이 뚜렷하여 공구의 마모가 과도하게 된다. 또한, 공구의 변형으로 인하여 상 방향 절삭에서는 Under cut으로 남지만 하 방향에서는 Over cut이 일어난다. 이러한 현상은 Fig. 2.4로부터 설명될 수 있다.<sup>8,36)</sup>

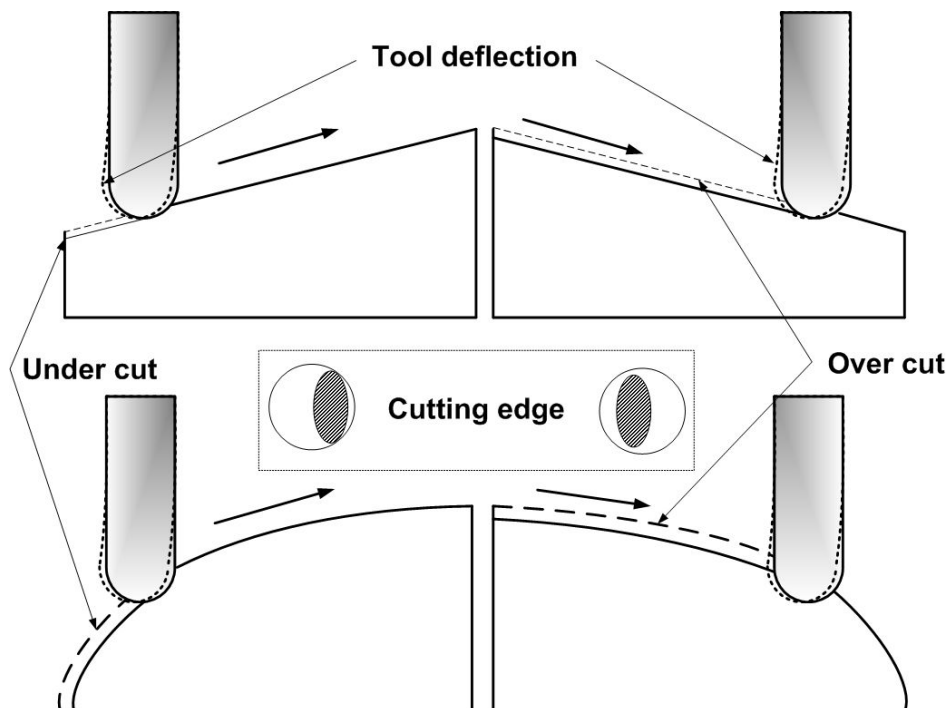


Fig. 2.4 Upward cutting and downward cutting

### 2.2.3. 커슌

볼 엔드밀 가공시 공구경로간 거리에 따라 Fig. 2.5와 같이 미절삭 부분이 남게 되는데 이를 커슌(Cusp) 또는 스칼롭(Scallop) 이라하며, 일반적으로 곡면 가공시 가장 문제시 되며 이를 자동적으로 제거하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있지만 아직 수작업에 의존하고 있다.<sup>14)</sup>

공구의 직경과 피치에 따른 Cusp와의 관계를 살펴보면 볼 엔드밀에 의한 평면 절삭작업에 대한 공구경로간격(Tool Path Interval)의 계산은 비교적 간단하다. 밀링작업이 끝났을 때, Fig. 2.5에서와 같이 다듬질 면 위에 부채꼴 무늬(Cusp)가 있다. 여기서 주어진 허용 가능한 Cusp높이를 구하려면 피타고라스 정리를 사용하여 공구경로간격 P 값을 식(1)과 같이 구할 수 있다.<sup>8)</sup>

$$P = 2\sqrt{r^2 - (r-h)^2} \cong 2\sqrt{2rh} \quad (1)$$

여기서 P는 공구경로간격,  $r$  은 커터 반경,  $h$  는 Cusp의 높이를 나타낸다.

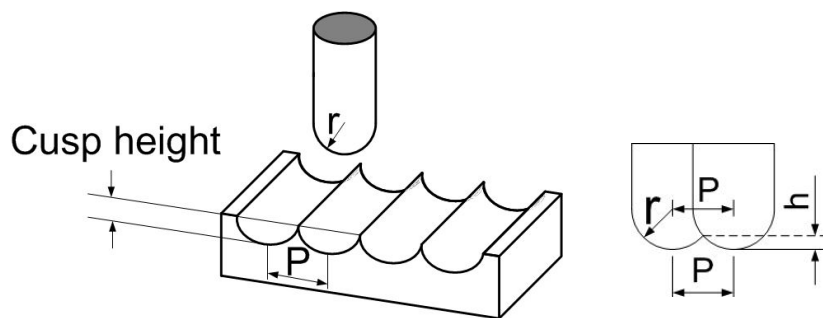


Fig. 2.5 Flat surface machined by a ball end mill cutter

곡면 가공시 Cusp의 높이는 Fig. 2.6 및 Fig. 2.7과 같이 기구학적 관계로부터 구할 수 있다. 곡면 가공시 X 축 방향 혹은 Y 축 방향으로 공구경로사이의 거리를 Step over, Z 축 방향으로 증감(增感)을 Step down 이라하고 이는 Cusp의 크기에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 임의의 곡면 가공시 Step over와 Step down은 동시에 존재하며 곡면의 형상, 공구의 종류에 따라 일정한 상관관계를 가진다.

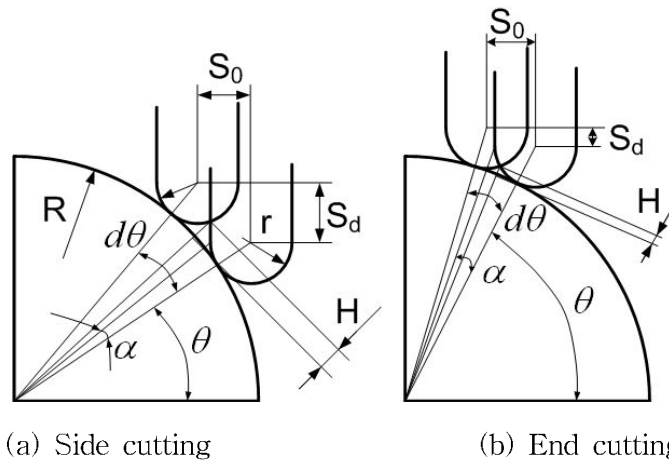


Fig. 2.6 Cusp height on convex surface(External cutting)

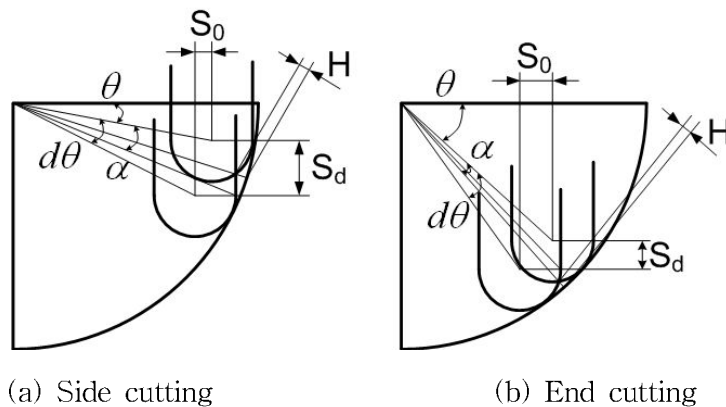


Fig. 2.7 Cusp height on concave surface(Internal cutting)



여기서,

$R$  : 공작물 반경

$r$  : 공구 반경

$S_d$  : Step down

$S_o$  : Step over

$H$  : Cusp height or Scallop height

$\theta$  : XY 평면과 공구 구면 중심이 이루는 각

$d\theta$  : 인접 공구경로의 두 공구중심이 이루는 각

$\alpha$  : 공구구면과 측면 절삭날의 경계점이 공구의 구면중심과 이루는 각

곡면 가공시 곡면을 Convex(External cutting) 영역과 Concave(Internal cutting) 영역으로 나눌 수 있으며 각각 영역에 대하여 Step down 또는 Step over로 공구 경로를 생성될 때 XY 평면과 이루는 각에 따라 볼 엔드밀 측면날의 절삭 참여 여부가 결정된다. Cusp 높이에 대한 모델식은 측면날의 절삭참여 여부에 따라 다르게 나타난다. Convex 영역에서는  $\alpha$ 와  $\theta/2$ 보다 작을 때, Convex 영역에서는  $\alpha$ 가  $\theta/2$  보다 클 때 측면날이 절삭을 수행하므로 이를 고려, Cusp 높이에 관한 모델 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

#### 1) Convex 영역

곡면의 외면가공(Convex)을 나타내고, 이 영역에서 Cusp의 높이는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{S_o}{S_d} = \tan\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$d\theta = \cos^{-1}\left(\cos\theta - \frac{S_o}{R+r}\right) - \theta \quad \text{or} \quad \sin^{-1}\left(\sin\theta + \frac{S_d}{R+r}\right) - \theta \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{(R+r)\sin\theta}{os(\theta+d\theta) + S_o - r} \right] - \theta \quad (4)$$

$\alpha \geq \frac{d\theta}{2}$  일 때 Cusp 높이는 다음 식(5)와 같이 표현된다.

$$H = -R + (R+r)\cos\frac{d\theta}{2} - \sqrt{r^2 - ((R+r)\sin\frac{d\theta}{2})^2} \quad (5)$$

또한  $\alpha \leq \frac{d\theta}{2}$  인 경우 Cusp 높이는 다음 식(6)과 같이 유도 할 수 있다.

$$H = \sqrt{[(R+r)\cos(\theta+d\theta) + (S_o - r)]^2 + [(R+r)\sin(\theta+d\theta) - \sqrt{r^2 - (S_o - r)^2}]^2} - R \quad (6)$$

Concave 영역에서는  $\alpha$ 와  $\theta/2$ 보다 작을 때, Concave 영역에서는  $\alpha$ 가  $\theta/2$  보다 클 때 측면날이 절삭을 수행하므로 이를 고려, Cusp 높이에 관한 모델 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

## 2) Concave 영역

곡면의 내면가공(Concave)를 나타내고, 이 영역에서 Cusp의 높이는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{S_o}{S_d} = \tan\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right) \quad (7)$$

$$d\theta = \cos^{-1}\left(\cos\theta - \frac{S_o}{R-r}\right) - \theta \quad \text{or} \quad \sin^{-1}\left(\sin\theta - \frac{S_d}{R-r}\right) - \theta \quad (8)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{(R-r)\sin(\theta + d\theta)}{(R-r)\cos(\theta + d\theta) + r}\right] - \theta \quad (9)$$

$\alpha \leq \frac{d\theta}{2}$ 일 때 Cusp 높이는 다음 식(10)과 같이 나타낸다.

$$H = R - (R-r)\cos\frac{d\theta}{2} - \sqrt{r^2 - \left((R-r)\sin\frac{d\theta}{2}\right)^2} \quad (10)$$

또한  $\alpha \leq \frac{d\theta}{2}$ 인 경우 Cusp 높이는 다음 식(11)과 같이 유도 할 수 있다.

$$H = -\sqrt{\left((R-r)\sin\theta + \sqrt{2rS_0 - S_0^2}\right)^2 + \left((R-r)\cos(\theta + d\theta) + r\right)^2} + R \quad (11)$$

Fig. 2.8은 공작물의 Convex 영역에서 Step down 가공시 이론식의 적용 범위를 나타내고 있다. A는  $\theta/2$ 가  $\alpha$ 보다 클 때, B는  $\alpha$ 가 작을 때이며 C

는 Step over 량이 공주직경보다 큰 경우일 때이다. 따라서 A 영역에서는 식 (5), B영역에서는 식 (6)을 이용하여 Cusp 의 높이 h 값을 계산 하여야 한다. Fig. 2.9는 공작물의 Convex 영역에서 Step over 가공시 이론식의 적용 범위를 나타내고 있다. A 는  $\theta/2$  가  $\alpha$ 보다 클 때, B는  $\alpha$  가 작을 때이다. A 영역에서는 식(5), B 영역에서는 식(6)을 이용하여 Cusp 의 높이 h 값을 계산 하여야 한다.<sup>37)</sup>

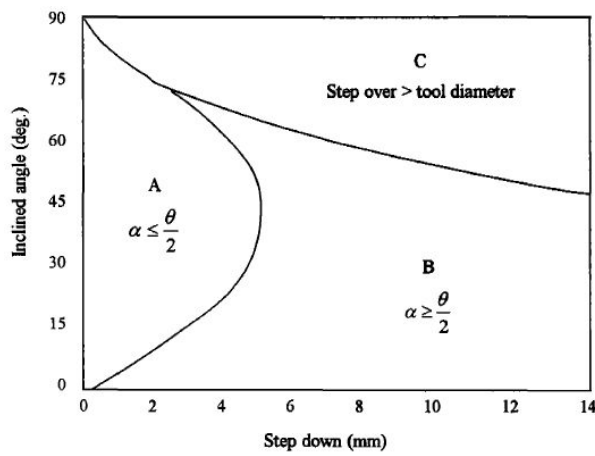


Fig. 2.8 Domain of application for proposed cusp height equation in step down cutting convex surface

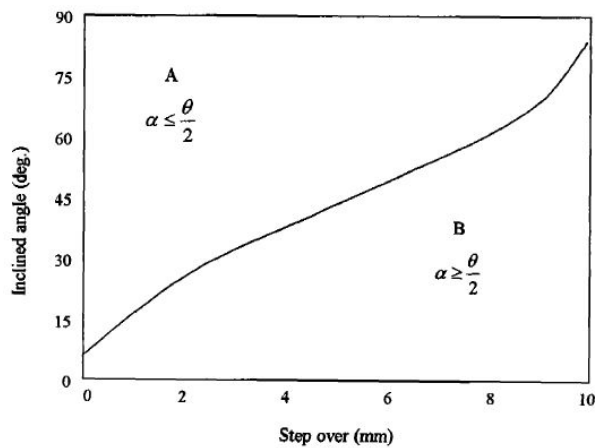


Fig. 2.9 Domain of application for proposed cusp height equation in step over cutting convex surface

#### 2.2.4 볼 엔드밀 형상과 절삭분력의 관계

볼 엔드밀 가공은 대표적인 자유 곡면 가공으로 최근 공작기계 기술의 발달로 그 활용 영역이 점차 확대되고 있다. 볼 엔드밀 가공은 단속절삭(Interrupt cutting) 및 볼 균일 절입 두께로 인하여 절삭력 변동이 심하고 외팔보 형태의 공구로 공구 처짐과 이에 따른 가공오차가 크게 발생하는 특징을 갖는다. 자유곡면 가공시 공구의 재질, 가공형상 그리고 절삭성능 등을 고려하여 여러 가지 다양한 볼 엔드밀이 사용되고 있다.

볼 엔드밀은 구(Ball) 부분과 엔드밀(Flat) 부분으로 구분할 수 있으며, 엔드밀 부분은 일반 엔드밀과 같은 직선 형상이고, 구 부분은 실제 자유곡면 가공시 사용되는 부분으로 설계 및 가공방법에 따라 많은 차이가 있다.<sup>38)</sup>

Fig. 2.10과 같이 볼 엔드밀 공구형상은 반구형상 막대에 절삭날이 형성되어 있으며 평 엔드밀이나 기타 공구와의 차이점은 각 절삭날 위치에 따라 옆날 경사각과 절삭날 기울임 각이 계속 변화한다. 따라서 볼 엔드밀 가공시에는 절삭날 위치에 따라 이송량이 다르며 회전반지름 차이에 의해 절삭속도도 달라진다. 따라서 모든 위치에 있는 절삭날에 대해 임의의 순간에 이루어지고 있는 절삭과정을 일괄적으로 표현하기는 어렵기 때문에 절삭날을 각 위치에 따라 미소 요소로 나누어 각각에 대하여 3차원 절삭모델을 적용한 후 각각의 결과를 통합하여 적용하고 있다.<sup>39)</sup>

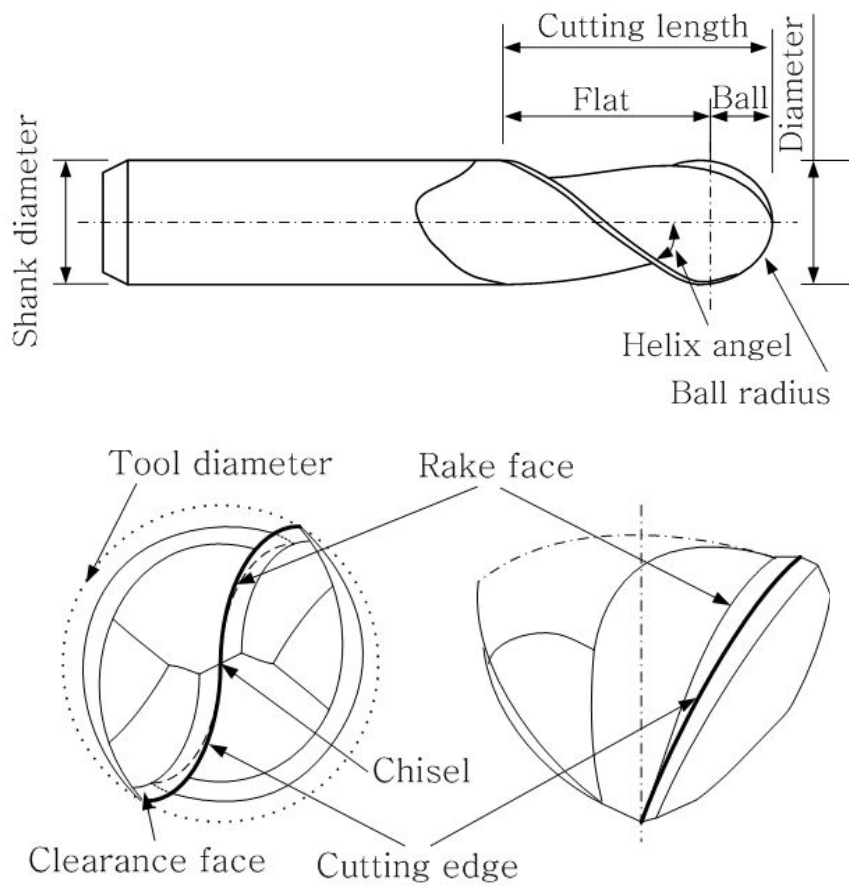


Fig. 2.10 Shape of the ball end mill

## 1. 절삭력 계산<sup>38)</sup>

2차원 절삭모델에 의해  $V-V_c$  평면에서 구한 미소절삭력  $dF_t, dF_r$  은 미소 절삭날 위치에 따라 방향이 다르다. 따라서 이들 결과를 일관된 방향에 따른 성분으로 분리한 후 이를 통합함으로써 볼 엔드밀에 작용하는 절삭력을 구할 수 있다.

Fig. 2.11과 같이 2차원 절삭 모델에 의해  $V-V_c$  평면에서 구한 미소절삭력  $dF_t, dF_r$  로부터  $a-b-c$  좌표에 대한 분력  $dF_a, dF_b, dF_c$  로의 좌표변환은 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

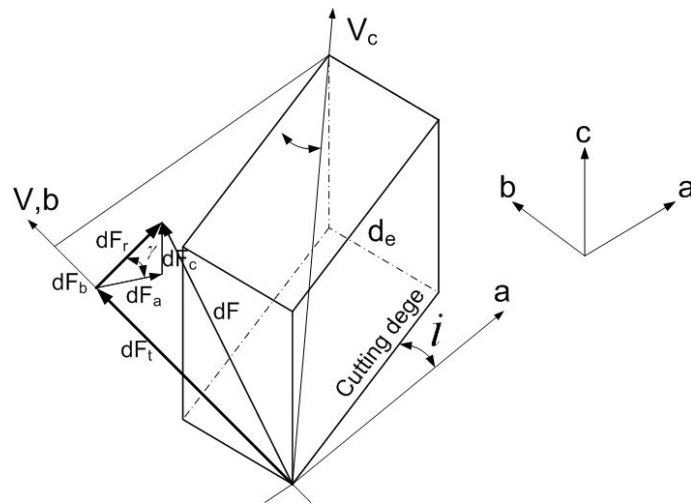


Fig. 2.11 Cutting forces in  $V-V_c$  plane

$$dF_a = dF_r \cdot \cos\gamma \quad (12)$$

$$dF_b = dF_t$$

$$dF_c = dF_r \cdot \sin\gamma$$

$a-b-c$  좌표계로 변환한 미소절삭력을 공작물 좌표계(Work coordinate)인

$x-y-z$  좌표계로 변환, Fig. 2.12와 같이  $a-b-c$  좌표계에서  $y(b)$ 축을 기준으로  $\xi$  만큼 회전된 상태이므로 다음 식(13)으로 변환 할 수 있다.

$$\begin{aligned} dF_x &= dF_a \cdot \cos\zeta - dF_c \cdot \sin\zeta \\ dF_y &= dF_b \\ dF_z &= dF_a \cdot \sin\zeta + dF_c \cdot \cos\zeta \end{aligned} \quad (13)$$

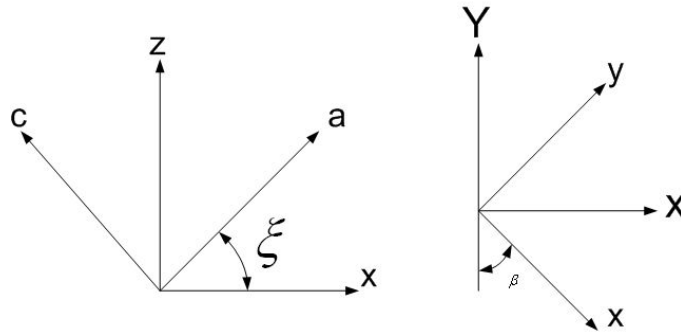


Fig. 2.12  $x-y-z$  and  $X-Y-Z$  coordinate systems

또한  $X-Y-Z$  절대 좌표계는 Fig. 2.12와 같이  $x-y-z$  상대 좌표계에 대하여 축을 중심으로  $\beta$  만큼 회전된 상태이므로  $X-Y-Z$  방향의 분력으로 전환하면 다음 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} dF_X &= dF_x \cdot \sin\beta + dF_y \cdot \cos\beta \\ dF_Y &= dF_x \cdot \cos\beta + dF_y \cdot \sin\beta \\ dF_Z &= dF_z \end{aligned} \quad (14)$$

공구의  $i$  차 회전 각 위치에서 전체 볼 엔드밀에 작용하는 절삭력은 각각의



미소 절삭날에 작용하는 미소절삭력을 중첩하여 다음 식(15)와 같이 구할 수 있다.

$$F_X = \sum^i \sum^k dF_X \quad (15)$$

$$F_Y = \sum^i \sum^k dF_Y$$

$$F_Z = \sum^i \sum^k dF_Z$$

## 2. 유효공구직경

볼 엔드밀 가공시 공구수명을 길게 하려면 적절한 주축회전수와 이송속도의 선택이 필요하다. 적절한 표면 절삭속도  $v_c$  와 최대 칩 두께  $h_{max}$  내에서 가공을 하기 위해서는 유효공구직경과 칩 두께의 고려가 필요하다. 그러나, 일반적으로 공구회사에서 공구를 출시할 때 유효공구직경을 고려한 유효절삭속도를 제시하기 때문에 사용자는 이에 맞는 적절한 주축회전수와 이송속도를 선택하여 사용하면 된다.

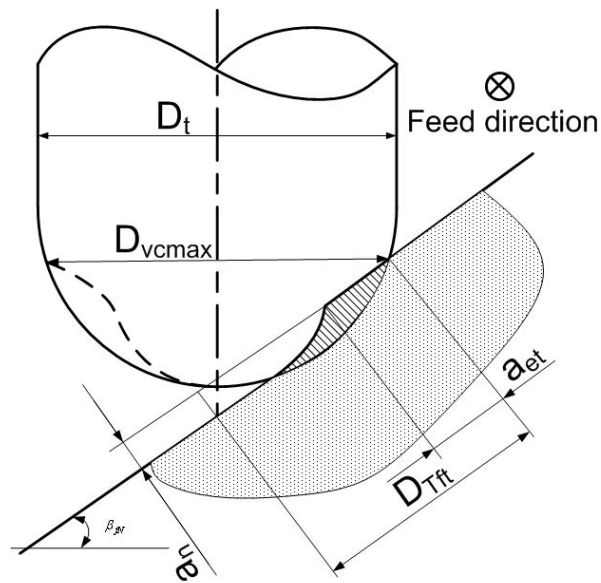
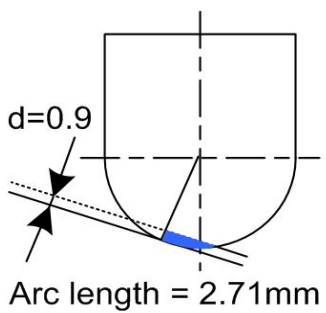
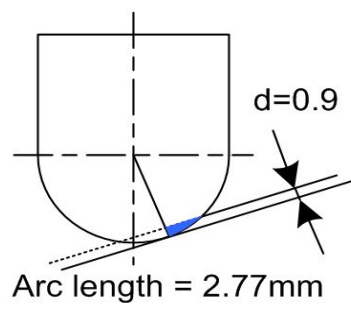
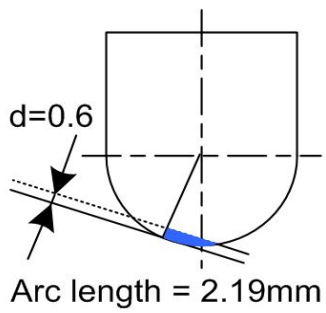
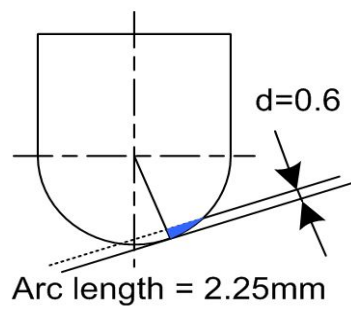
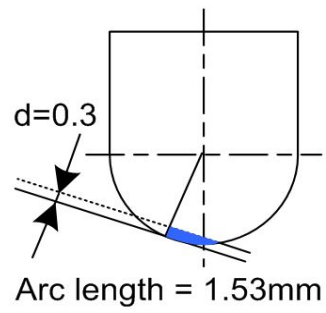
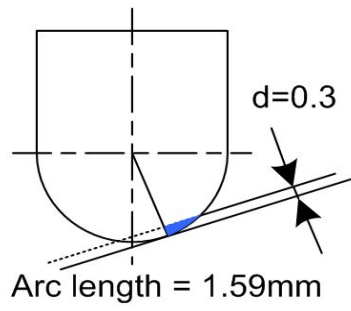


Fig. 2.13 Effective diameter for ball-end mill

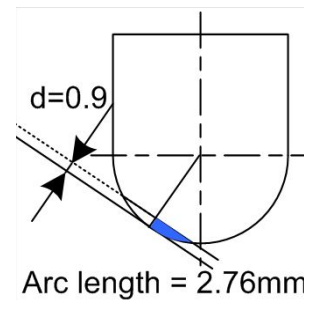
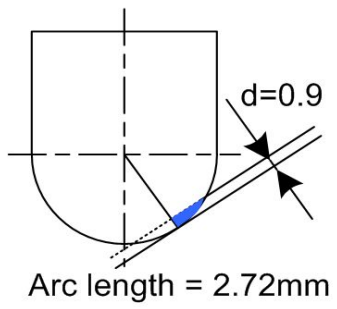
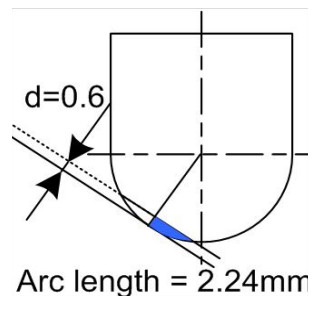
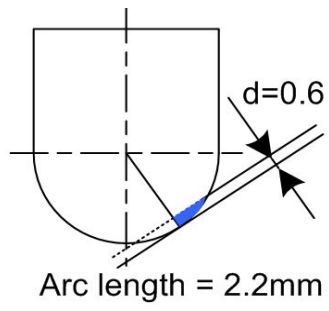
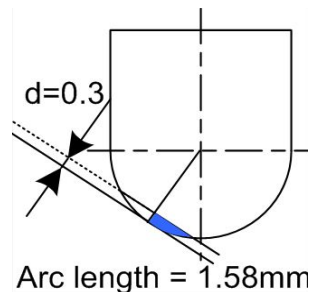
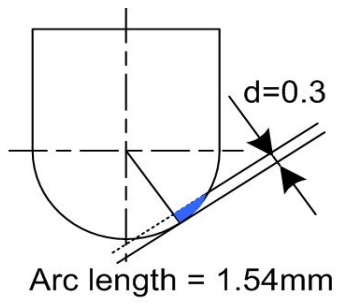
Fig. 2.13은 임의의 경사각  $\beta_{fN}$  에서 미소구간의 가공을 보요주고 있다. 축방향 유효공구직경  $D_{v,max}$  는 식(16)에서와 같이 절삭공구직경  $D_t$  과 절입  $a_n$ , 그리고 경사각  $\beta_{fN}$  의 함수이다.<sup>35,41)</sup>

$$D_{v_{\max}} = \left( \frac{D_t - 2a_n}{2} \sin\beta_{fN} + \sqrt{D_t - a_n \cos\beta_{fN}} \right) \quad (16)$$

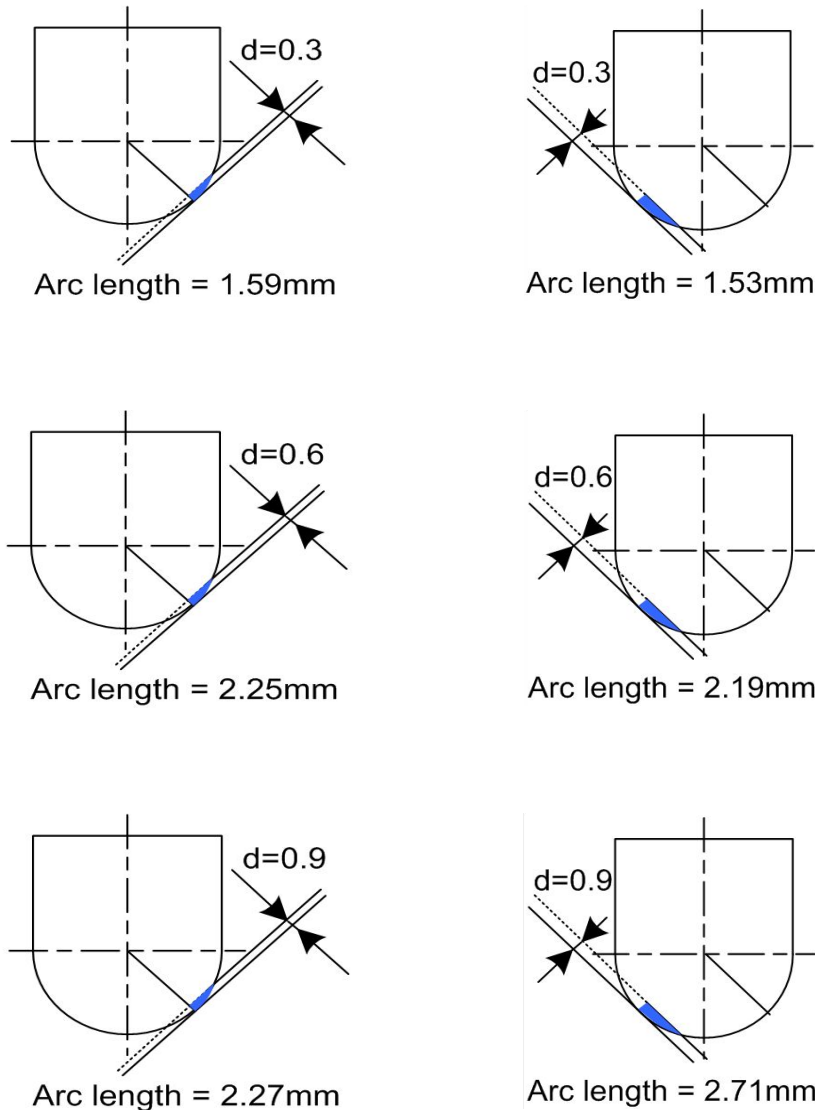
Fig. 2.14는 절삭깊이 0.3, 0.6, 0.9mm일 때 경사각 15°, 30°, 45°경사면 상·하 방향의 볼 엔드밀 가공시 볼 구면과 접촉하는 길이를 나타낸 것이다. 상 방향에서는 공구 구면의 앞쪽에서 가공이 진행 되고 하 방향 가공에서는 공구의 하 방향에서 가공이 진행 되며, CAD/CAM 프로그램에서 실제 가공 접촉 부를 알아볼 수 있다. Fig. 2.15는 곡면 내·외면 가공에서 볼 엔드밀 공구진행 나타낸 것으로 공구중심에서 측면까지 볼 엔드밀 전 부분이 재료와 접촉하며 가공이 진행된다.



(a) 15° Inclined plane

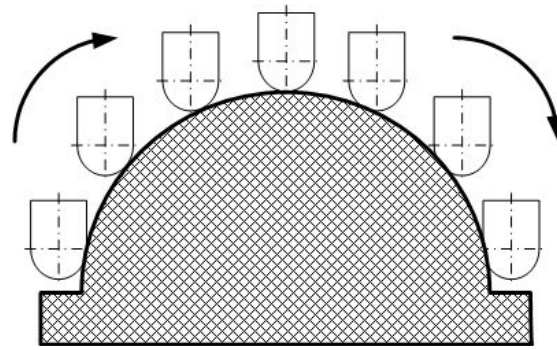


(b) 30° Inclined plane

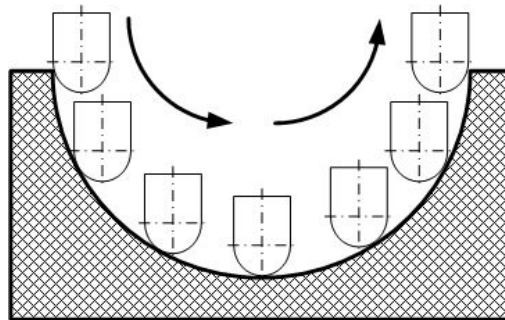


(c) 45° Inclined plane

Fig. 2.14 Contact area of tool according to the inclined material



a) Convex surface(External cutting)



b) Concave surface(internal cutting)

Fig. 2.15 Contact area of tool according to the semicircular processing

### 3. 불 엔드밀의 최대 칩 두께 계산

최대 칩 두께 계산은 가공시 공구파손, 칩핑방지 및 긴 공구수명을 위해 적절한 최대 칩 두께 이하에서 가공되어야 한다. 표면과 접하는 유효공구 직경  $D_{TF_t}$  는 경사각과는 독립적이다. 이것은 식(17)과 같이 절삭공구직경과 법선방향 절입에 영향을 받는다.

$$D_{TF_t} = 2\sqrt{a_n(D_t - a_n)} \quad (17)$$

Fig. 2.16과 같이 엔드밀 가공에 있어서 칩이 얇아지는 효과는 적절한 최대 칩 두께 유지를 위해 중요하다. 만약 절삭 폭  $a_c$  가 공구반경  $R_t$ 보다 작다면 최대 칩 두께는 날당이송  $f_t$ 보다 작을 것이다. 두 개의 원에 의해 칩의 형상을 근사시켜 본다면 최대 칩 두께  $h_{\max}$ 는 식 (18)과 같이 주어진다.

$$h_{\max} = 2f_t \sqrt{\frac{a_c}{D_t} - \left(\frac{a_c}{D_t}\right)^2} \quad (18)$$

불 엔드밀 가공에 있어서 칩의 형상은 두 개의 원에 의해 근사될 수 있다. 이러한 모델에 있어서 최대 칩 두께는 법선방향의 절입과 공구직경의 비, 그리고 피크피드  $a_{ct}$ 와 표면에 접하는 유효공구직경의 비에 의존한다. 그러므로 식 (19)과 같이 최대 칩 두께와 날당이송의 비는 두 개의 인자  $TF_n$ 과  $TF_t$ 에 의해 나타내어질 수 있다.

$$h_{\max} = TF_n \cdot TF_t \cdot f_t \quad (19)$$



$$TF_n = 2\sqrt{\frac{a_n}{D_t} - \left(\frac{a_n}{D_t}\right)^2}, TF_t = 2\sqrt{\frac{a_{et}}{D_{TF_t}} - \left(\frac{a_{et}}{D_{TF_t}}\right)^2} \quad (20)$$

$$F = f_t \times N \times T_{edge} \quad (21)$$

이송속도  $F$ 는 식(19)에 의해 계산된 적절한 날당이송  $f_t$ 과 주축회전수  $N$ , 공구날 수  $T_{edge}$ 를 기초로 식 (21)에 의해 계산되어진다.<sup>35)</sup>

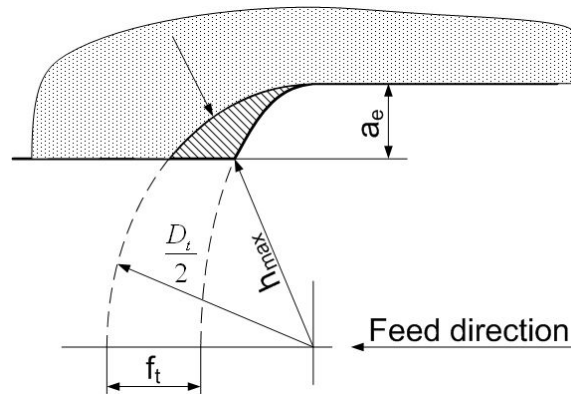


Fig. 2.16 2D chip thickness

### 2.2.5 볼 앤드밀의 표면거칠기

절삭 가공면의 품질을 결정하는 요소로는 형상정밀도, 표면거칠기, 표면광택, 가공변질층 등이다. 형상정밀도는 기하학적으로 정의된 형상에 대한 가공물의 기하학적 공차를 의미한다. 즉 실제로 가공한 평면과 곡면이 기하학적으로 정의된 곡면과 평면에서 어느 정도 어긋나 있는가를 말한다. 형상정밀도는 공작기계, 공구의 정밀도, 강성에 의한 변위, 마모에 의해 크게 영향을 받는다. 혹은 형상에 의해서는 가공순서 등에도 크게 좌우된다. 예를 들어 얇은 리브형상에서는 한쪽만 절삭된 후 다른 한쪽은 가공하려해도 리브형상에서는 리브가 쓰러져 정밀하게 가공할 수 없다. 광택은 마무리한 거울면 상태를 말하며, 가시광의 정반사조건에서는 입사 광량과 반사 광량이 비율이고, 표준 경면의 반사율에 대한 시료면의 반사율의 비를 광택도로 평가한다. 특히 진동에 의한 위축 등에 의해서 표면거칠기의 경향과 반드시 일치하지 않지만, 고속으로 절삭한 쪽이 표면거칠기도 좋게 되고 광택도 좋게 되는 경우가 많다.

주철의 고속 면 가공에서는 고속으로 하면 할수록 광택이 나와 표면거칠기도 좋아진다. 또 다른 조건에는 문지름 효과에 의해 이론거칠기 보다도 좋아지는 경우도 있다. 단 거칠기에는 상한이 있어서 더욱 고속이되면 진동의 영향이 나와 악화되는 경향이 많다.

가공변질층은 절삭 시 피삭재 표면이 받는 가공 뒤틀림에 의해서 생기는 것으로, 가공경화 및 잔류응력이 생긴다. 이들은 재료의 표면 특성을 변화 시키거나 경도 변화에 의한 형상치수의 악화를 초래하는 경우가 있다. 다만 고속 밀링에서는 절삭량이 작게 되는 조건에서 극소경 공구의 경우 마이크론 단위의 절삭의 경우도 있고, 가공 변질층의 영향은 그다지 크지 않다.

고속밀링에서 표면거칠기에 대해서 금형의 곡면 등의 형상가공에는 볼 앤드밀이 일반적으로 사용되며, Fig. 2.17에 나타낸 것과 같이 절삭된다. 즉, 공구

진행방향과 직각방향으로 각각 이송시켜 절삭한다. 전자는 1날당 이송( $f_z$ )이고, 후자는 피크피드(Pick feed,  $P_f$ )라 불린다. 날당 이송은 공작기계, 공구의 강성으로  $P_f$ 가 결정되고 또한 칩 포켓보다 크게 할 수 없다. 이것이 절삭하고 남은 형상에 미치는 영향은  $P_f$  만큼 크지 않다. 따라서 절삭면의 표면거칠기는  $P_f$  방향의 값으로 표현할 수 있다.  $P_f$  방향의 표면거칠기는 근사적으로 다음 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{공구반경 } R \gg P_f \text{ 일 때, 경사면 가공시 } P'_f = \frac{P_f}{\cos\theta}$$

$$R^2 = \left(\frac{P'_f}{2}\right)^2 + (R - R_z)^2$$

$$R_z = R \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{P'_f}{2R}\right)^2} \right]$$

따라서, 표면거칠기  $R_z$  는 식(22)로 근사화 된다.

$$R_z = \frac{P_f'^2}{8R} \tag{22}$$

공구반경을 크게 하든지  $P_f$  를 작게 하면 반드시 최종마무리  $R$  공구로 가공하는 것이 유리하며,  $P_f$ 를 작게 하는 것이 표면거칠기를 낮게 할 수 있는 수단이라는 것을 알 수 있다.

절삭후의 표면거칠기 값이 되도록 작게 해야 연마 및 마무리 공정을 줄일 수 있고 때로는 이러한 공정을 삭제 할 수도 있으며 이는 리드타임을 줄일 수 있다. 하지만  $P_f$  를 작게 하면 가공시간이 길어지고, 그것을 단축하기 위해서는 공구 이송속도를 빠르게 하지 않으면 안 된다. 그러나 회전수를 바꾸지 않고 이송을 빠르게 하면, 날당 이송량이 커져 공구의 부하가 증가한다.

이것을 감소시키는 것으로는 회전수를 증가시켜 날당 이송량을 작게 하면 좋아진다.<sup>42)</sup>

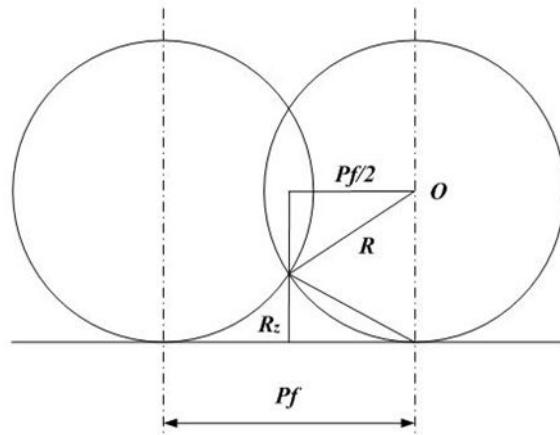


Fig.2.17 Cusp height in ball end milling

## 1. 경사면의 표면거칠기

Fig. 2.18과 같이 경사면에서 볼 엔드밀을 이용하여 가공할 경우에는  $h$  부의 미가공 부위를 남기게 되며, 이 높이는 이론가공면 거칠기가 된다.

가공면 거칠기를 기준으로 가공에 필요한 수평방향의 공구경로 이송량인  $S_V$  와 수직방향의 공구 이송량인  $S_H$  를 공작물의 경사각인  $\beta$  를 고려하여 다음과 같이 할 수 있을 것이다.

이론 가공면의 최대거칠기  $h$ 는 식(23)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h = R[1 - \cos\left\{\sin^{-1}\left(\frac{P}{2R}\right)\right\}] \quad (23)$$

여기서, 피크피드 피치(P)식으로 식(23)을 변환하면 식(24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = 2R \cdot \sin\left\{\cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)\right\} \quad (24)$$

수직 스텝  $S_V$  와 수평 스텝  $S_H$  는 각각 식(25), (26)으로 나타낼 수 있다.

$$S_V = \sin\beta[2R \cdot \sin\left\{\cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)\right\}] \quad (25)$$

$$S_H = \cos\beta[2R \cdot \sin\left\{\cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)\right\}] \quad (26)$$

위 식 이용하여 경사진면의 피크 피드 피치(P)는 다음과 같이 식(27)과 같이 얻을 수 있다.

$$P = \frac{S_V}{\sin\beta} = \frac{S_H}{\cos\beta} \quad (27)$$

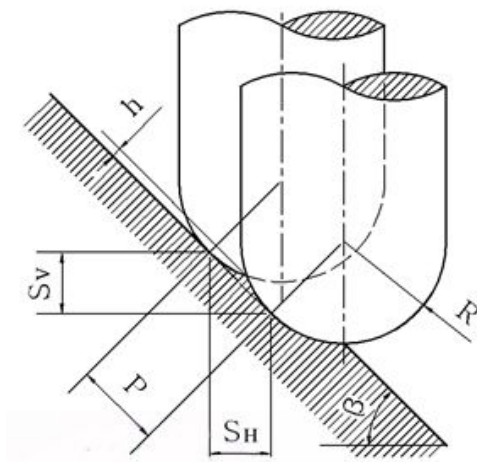


Fig. 2.18 Relation of ball end mill and max. roughness on inclined plane

## 2. 곡면의 표면거칠기

밀링 가공시 가공표면은 Fig. 2.19와 같이 날 당 이송과 경로간 간격의 크기에 따라 공구마크와 스켈럽이 중첩된 형태로 나타나게 된다. 형상 중첩이론에 의하여 공구마크  $H_c$ 의 크기는 다음 식(28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_c = r - \sqrt{r^2 - \frac{f_t^2}{4}} \quad (28)$$

결국, 공구마크를 중첩한 스켈럽의 크기  $H_s$ 는 다음 식(29)와 같이 구할 수 있다.

$$H_s = r - \frac{\sqrt{\left(r^2 - \frac{f_t^2}{4}\right)\left(\frac{r^2 - L^2}{4}\right)}}{r} \quad (29)$$

여기서,  $L$ 은 경로간 간격이다.

일반적으로 볼 엔드밀 가공 시에는 공구반경에 비하여 날 당 이송이 매우 작으므로 공구마크를 무시하는 경향이 있으나, 최근 정밀가공을 목적으로 경로간 간격이 점차 작아지면서 공작물의 표면선상에 공구마크가 미치는 영향이 커져가고 있다. 따라서 정밀가공 시에는 공구마크를 고려한 표면거칠기 해석법을 사용하는 것이 바람직하다.<sup>43~46)</sup>

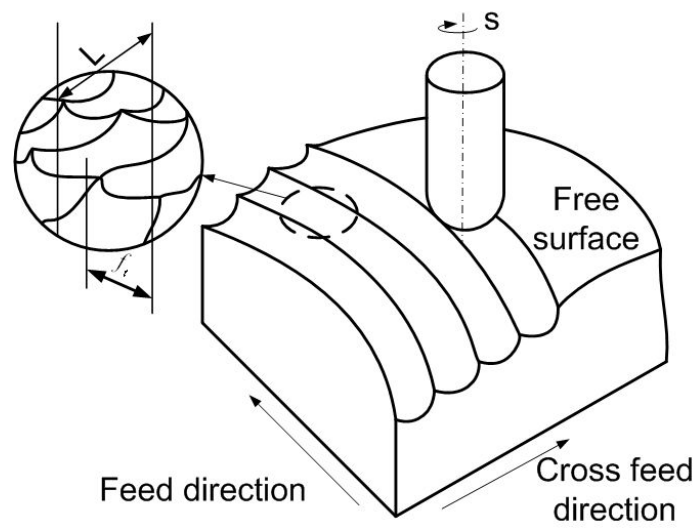


Fig. 2.19 Microscopic view of milled surface



### 2.2.6 불 엔드밀 공구의 마모

불 엔드밀 가공에 있어서 절삭력 해석은 절삭조건, 공구형상과 재질, 공구의 마모, 피삭재의 재질과 형태 등이 연관되어 복잡하지만 공작기계의 부품, 공구의 마모 및 파손의 검출을 위해서 가장 기본적으로 사용되는 것이 절삭력이다.

불 엔드밀의 절삭은 공구의 회전운동과 이송운동에 의해 두 개의 절삭날에서 이뤄지는데 가공물과의 접촉형태에 따라 절삭에 참여하는 절인의 길이가 달라지고, 접촉형태에 따라 절삭에 참여하는 절인의 길이가 달라지며, 접촉 위치에 따라 정점에서는 절삭속도가 0 에 가까워지고 외경에 가까울수록 절삭속도가 최대가 된다. 이러한 기구학적 특성 때문에 절삭형태가 복잡해지고 동일한 금속 제거율로 절삭이 이뤄지더라도 절삭력과 공구마모의 특성은 달라진다.

3차원 형상을 불 엔드밀로 가공할 때 주로 발생하는 마모는 여유면에 나타나고, 마모가 커지면 절삭력이 증가하고, 공구의 변형과 런아웃에 영향을 미치게 되므로 이는 치수 정밀도에 영향을 주게 된다. Fig 2.20은 불 엔드밀에서 공구마모의 형태를 나타낸 것으로서 마모형태는 발생하는 위치에 따라 플랭크 마모(Flank wear), 크레이터 마모(Crater wear), 랜드마모(Land wear)로 나누어지며, 일반적으로 플랭크 마모가 불 엔드밀의 수명을 나타내는 기준으로 널리 사용되고 있다.

플랭크 마모는 불 엔드밀의 여유면과 가공될 공작물 사이의 고온, 고압으로 인해 주절삭날에 생기는 점진적 변화로, 연삭마모(Abrasive wear), 미소 칩핑(Micro chipping), 응착마모(Adhesive wear), 확산마모(Diffusion)등이 있다. 어느 순간에서 전체 플랭크마모는 각 원인들에 의해 야기된 마모의 합이 된다. 공구마모가 증가함에 따라 마모된 곳과 공작물 사이의 마찰력이 커지게 되어 절삭력이 증가한다. 마모의 정도는 보통 여유면의 마모폭( $V_B$ )이 0.3mm

까지를 마모기준으로 하나, 정삭에서 표면에 미치는 영향을 최소화하기 위해 절삭력증가로 인한 공구변형과 런아웃(Runout) 때문에 발생하는 치수정밀도의 영향을 고려하여 결정한다.<sup>47)</sup>

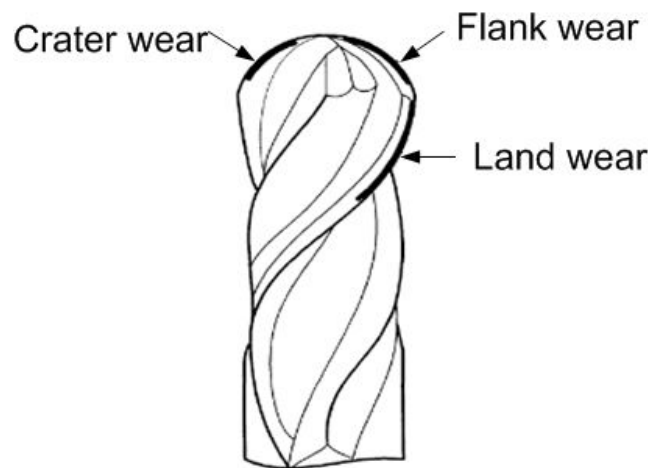


Fig. 2.20 Pattern of tool wear for ball-end mill

## 2.3 물리증착법

과거에서 현재까지 코팅기술 발전은 산업에서 아주 중요한 역할을 한다. 1960년대에 Sandvic사로부터 코팅(TiC)된 선반의 팁이 소개된 이래로 많은 종류의 코팅기술이 개발되고 적용되어지고 있고 현재는 고속절삭 또는 난삭재 가공과 같은 새로운 가공방법이 요구되고 있어 공구표면이 우수한 코팅이 필요로 하게 되었다.<sup>48)</sup>

코팅의 종류는 크게 제품의 표면을 도금하는 습식법(Wet process)과 용액을 사용하지 않고 코팅막을 형성하는 건식법(Dry process)으로 크게 분류할 수 있다. 이중에서도 특히 증착(Evaporation) 기술이 오늘날의 건식법으로 된다.

증착 기술은 크게 3가지로 CVD(Chemical Vapor Deposition)와 PVD(Physical Vapor Deposition) 및 용사(Thermal spray)로 나누고 CVD코팅에는 TiC, TiN, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이 사용되고 있고, PVD코팅에는 TiN, TiCN, WC/C, CrN, TiAlN, Diamond 등의 재료들이 사용 되고 있으며, 현재 CVD 코팅보다 PVD 코팅방법을 많이 사용하는데 그것은 PVD 코팅이 CVD 코팅에 비해 경도가 높고 입자가 조밀하고, 표면조도가 양호하여 코팅의 크랙이 없으며, 잔류 압축응력을 가지고 있고 또한 500°C이하의 온도에서 코팅이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문이다.<sup>48)</sup> Table 2.1에 증착 방법의 분류를 나타내었다.

물리증착법(PVD : Physical Vapour Deposition)은 Fig. 2.21과 같이 섭씨 250-500°C 사이 고 진공 상태에서 진행된다. 고 순도 금속 코팅재료(티타늄, 크롬, 알루미늄)는 열에 의한 기화 또는 이온 충격으로 기화(스퍼터링)되어 모재에 코팅된다. 동시에 유입된 반응 가스(질소 또는 탄소를 함유한 가스)는 기상 상태의 금속과 반응하여 화합물을 형성하여 공구 또는 부품의 표면에 강한 밀착력을 가진 박막을 형성한다. 균일한 코팅 두께를 형성하기 위하여 코팅공정 시 여러 축에 치구된 제품들은 일정한 속도로 회전하며, 코팅 특성

(경도, 성장구조, 내부식성, 열 저항성, 밀착력)을 정확하게 제어할 수 있다.

물리적 기상 증착법의 장점은 친환경적인 공정, 여러 종류의 코팅 가능, 대부분의 금속 열처리 온도보다 낮은 코팅공정 온도, 코팅 두께의 정밀성 및 재연성, 우수한 내마모성, 낮은 마찰 계수 등의 장점이 있다.

Table 2.1 Classification of dry process

Dry process	Physical vapour deposition(PVD)	vacuum evaporation
		Sputtering
		Ion plating
		Ion beam implantation
	Chemical vapour deposition (CVD)	Thermal CVD
		Plasma CVD
		Photo CVD
	Thermal spray	Atmosphere
		Vacuum

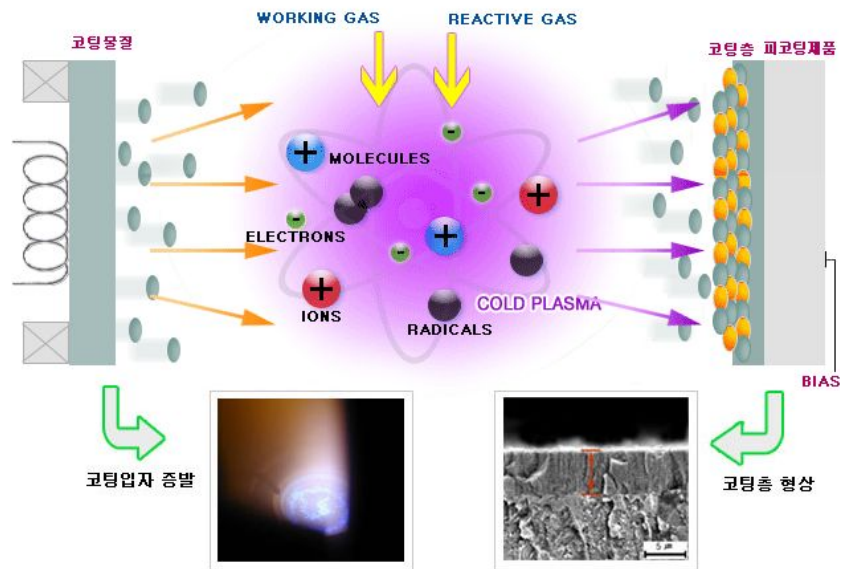


Fig. 2.21 PVD coating process

### 2.3.1. PVD법의 종류

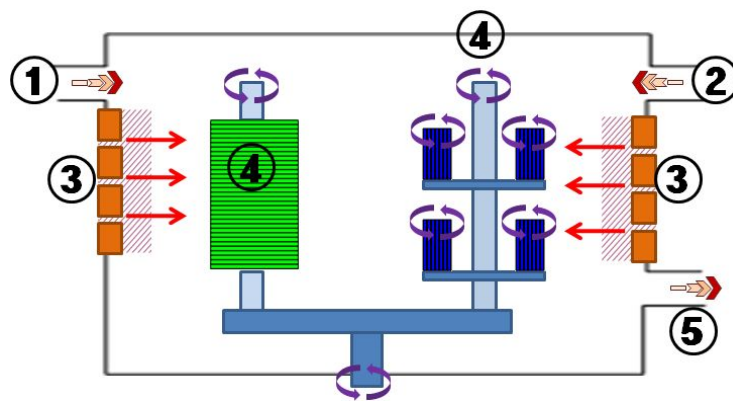
PVD법(Physical Vapour Deposition, 물리 증착법)의 특징은 코팅막의 두께가 수  $\mu\text{m}$  정도 일지라도 금속에서 합금, 화합물, 세라믹 및 유기고분자 등의 다양한 종류의 피막을 용이하게 생성시킬 수 있으며, 습식도금 방식에 비해 환경문제가 발생하지 않는다는 장점이 있다.

일반적으로 PVD법은 진공증착법(Vacuum evaporation), 스퍼터링법(Sputtering), 이온 플레이팅법(Ion plating)의 세 종류의 코팅 법으로 분류된다. 이 세 가지 코팅법은 목적에 맞는 막 조건을 얻기 위해 각각의 특징을 개선하거나, 보충하는 방법을 사용한다. 간단한 진공증착에서 특정의 가스(반응성 가스와 금속성가스)를 반응시켜 합금과 화합물을 증착시키는 반응성 PVD 프로세스 등 여러 가지 프로세스가 개발되어 있으며, 진공증착법 이외의 PVD법에서는 모재와의 밀착력 향상 등 코팅 막의 성능 향상을 위해 플라즈마를 적극적으로 이용한다.

PVD법의 기초 프로세스는 증발과 증착에 있고, 이 프로세스의 공정 등에 대하여 각종 연구가 진행되고 있다. 예를 들면, 스퍼터 증발법이나 이온화(플라즈마화), 바이어스 전압 인가 등을 통해 박막의 성질을 개선하는 것이다.<sup>49)</sup>

## 1. 진공 증착법

진공 증착법(Vacuum evaporation)은 Fig. 2.22와 같이 수 마이크로미터 직경으로 형성된 아크에 의하여 금속 코팅재료가 증발하는 것이 기본 원리이다. 증발된 재료는 높은 전류 밀도 및 전력 밀도에 의하여 대부분이 이온화된 상태이므로 높은 에너지를 가진 플라즈마를 형성한다. 금속 이온은 진공조에 유입된 가스와 반응하여 코팅하고자 하는 공구 또는 부품 표면에 높은 에너지를 충돌하여 높은 밀착력의 박막을 형성한다. 증발되는 가스가 많으므로 도금속도는 빠르나, 증발입자가 가지고 있는 에너지가 열에너지뿐이어서 적으므로 밀착강도가 적고, 대부분의 금속피막은 인장응력 상태이고, C, B, Ga, ZnS, SiO<sub>2</sub> 등의 피막은 압축응력 상태이다.

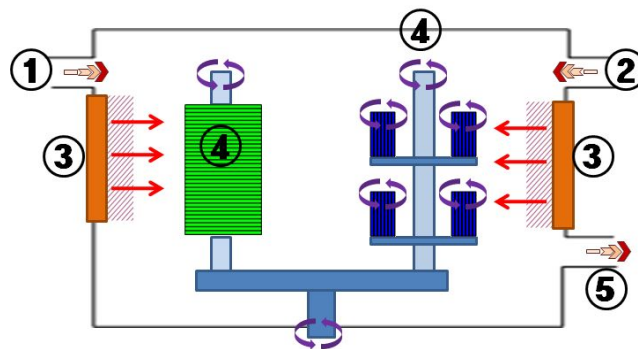


1. Argon
2. Reactive gas
3. Arc Sources(coating material and backing plate)
4. Components
5. Vacuum pump

Fig. 2.22 Evaporation process

## 2. 스퍼터링법

스퍼터링법(Sputtering)은 Fig. 2.23에 나타난 바와 같이 일반적으로 Ar가 스 분위기의  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  torr의 진공도에서 글로우방전이 발생되도록 타겟 재료가 있는 음극에 수천볼트의 고전압을 인가한다. 스퍼터링 공정 중 첫 번째 단계는 진공조안에 코팅할 제품을 가열하는 것이다. 가열된 제품은 이온화된 알곤 가스에 의하여 표면이 에칭(표면층 제거)된다. 표면 에칭공정으로 금속 표면은 오염되지 않은 순수한 금속 상태를 유지함과 동시에 미세한 원자단위의 표면 오염도 정제된다. 에칭 공정이 끝나면 코팅재료에 높은 음 전압이 가해지고 아르곤 가스의 이온화가 시작된다. 알곤 양이온이 코팅재료 표면에 빠른 속도로 충돌하여 원자 상태의 코팅 원료를 표면으로부터 발생시킨다. 기화된 금속 원자 입자들은 유입된 가스와 반응하여 경질의 비금속 화합물의 코팅 층을 형성하여 제품이 증착된다. 그 결과 원하는 구조와 조성을 가진 박막이 제품의 표면에 형성된다.



1. Argon
2. Reactive gas
3. Planar magnetron evaporation source(coating material)
4. Components
5. Vacuum pump

Fig. 2.23 Sputtering process



### 3. 이온 플레이팅법

이온 플레이팅법(Ion plating)은 진공증착법과 스퍼터링이 복합된 경우를 나타내는 일반적인 명칭으로 Fig. 2.24과 같이 압력이  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  torr인 진공 용기내를 아르곤 가스 분위기로 유지하고, 기판(음극)에는 증발이나 진공용기의 벽에 대하여  $-50 \sim -5000V$  정도의 주전압을 인가해 주면 기판과 주위 사이에 글로우방전이 발생한다. 이 상태에서 증발원으로부터 금속을 증발시키면 증발원자는 가스이온과 함께 다크 스페이스에서 가속되어 기판에 충격적으로 조사하여 피막을 형성한다. 전처리 과정에서 기판표면에 대한 불활성 가스이온충격과 증착 중에도 끊임없이 기판 표면이 이온충격을 받아서 항상 청정을 유지하고 이온 충격시 발생하는 열에 의해 기판 표면이 국부적으로 가열되어 피복과 기판의 확산 또는 화학반응이 촉진되어 합금 층을 형성하며 이온충격이 높은 밀도의 결합을 표면이나 계면에 만들어줌으로써 원래의 구조를 변화시켜 피막과 기판 물질을 물리적으로 증가시켜 피막과 기판의 치밀성을 좋게 한다. 또한 코팅제품에 (-)전위가 걸리기 때문에 전계에서 이온을 끌어들이는 뿐 아니라 기체 분산율이 좋아 표면 균질성이 뛰어나다. 증발물질과 반응성가스를 조합시켜 화합물 피복을 임의적으로 만드는 것이 가능하므로 특이한 화합물의 피복을 용이하게 얻는다.<sup>50)</sup> 이온 플레이팅법의 장점을 살펴보면 다음과 같다.

첫째로, 염욕법이나 화학 증착법(CVD)보다 처리 온도가 비교적 적은( $500^{\circ}C$  이하) 온도 이므로 고온피복의 증착시 발생할 수 있는 모재의 변형, 피막층과 모재의 열탄성 계수 차이로 인한 피막층의 자연박리현상 등을 예방할 수 있어 금형, 공구, 기계 부품 등에 많이 적용되고 있다.

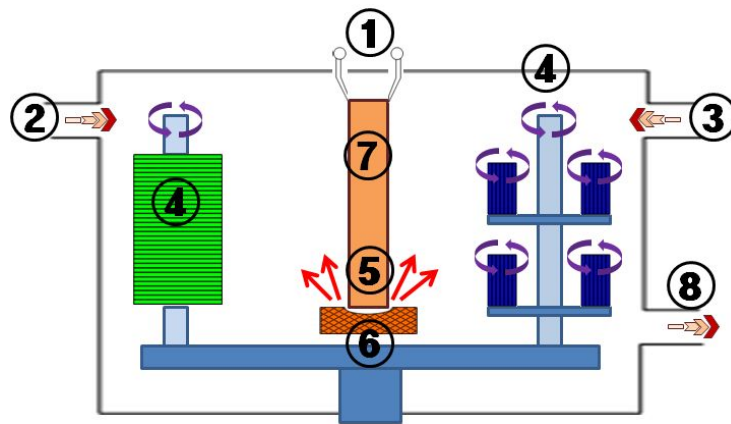
둘째로, 다른 건식방법에 비하여 Target 화합물 형성의 경우 가스와 반응이 잘된다.

셋째로, 플라즈마를 구성하는 평균에너지가 가장 높으며 기판에 입사되는 금속이온의 충돌 효과가 크고 높은 에너지를 갖는 이온과 중성원자에 의해

막과 기판계면을 충격하는 물리적 효과에 의해 다양한 막과 기판의 조합에 대한 탁월한 밀착성과 우수한 피복력을 얻을 수 있으며, 부식방지용 보호막 코팅에 필수적 성질인 기공이 거의 없는 코팅을 할 수 있다.

넷째로, 복잡한 형태의 기판에 증착을 할 경우에도 사각지대(non-line-of-sight)쪽으로 운동력이 우수하여 균일한 도금을 할 수 있다.

다섯 번째로, 습식 코팅법의 가장 큰 문제인 폐수처리에 대한 염려가 없다.



1. Electron beam source
2. Argon
3. Reactive gas
4. Components
5. Coating material
6. Crucible(anode)
7. Low-voltage arc discharge
8. Vacuum pump

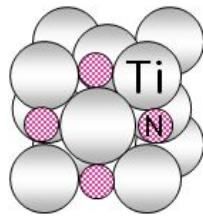
Fig. 2.24 Ion plating process

### 2.3.2 AlTiN코팅의 특징

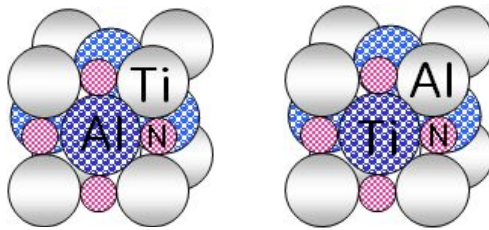
산업체에서 가장 주목을 받고 있는 코팅소재는 Ti를 based로 하는 재료들을 많이 사용하고 있으며 많은 국가에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 실제로 산업현장에서 사용하고 있는 소재로는 아직까지는 TiN, CrN이 가장 많이 사용되고 있으며, 고온에서의 내산화성을 더욱 개선, 수명을 연장하기 위한 목적으로 TiAlN코팅이 적용되고 있다. 또한 근래에 들어 단독코팅에서 복식층 코팅(duplex layer coating) 혹은 복합층 코팅(complex coating)으로 변화하고 많은 연구가 진행되고 있다.

TiAlN은 높은 경도와 화학적 안정성, 낮은 마찰계수를 갖고 있으며, TiN을 대체하기 위해 많은 관심을 받고 있는 재료로  $Ti_{1-x}Al_xN$ 의 함량에 따라 구조와 특성이 달라진다.  $x \leq 0.6$  일 경우 Fig. 2.25의 (a),(b)와 같은 NaCl의 결정구조를 가지고 있으며, TiN의 Ti자리를 대신한다.  $x \leq 0.7$ 이면 Fig. 5.25의 (c)와 같이 NaCl 결정구조가 우루짜이트(Wurtzite) 구조로 변화하고, 미세구조의 경우 원자경계(Grain boundary)가 불분명하여 마치 비정질처럼 보이며, 경도가 급격히 감소한다고 알려져 있다. 또한 Al 함유량에 따라 명칭이 달라진다. Al 50% 이하일 경우에는 TiAlN 코팅, 50%이상이면 AlTiN 코팅으로 불린다.<sup>57)</sup>

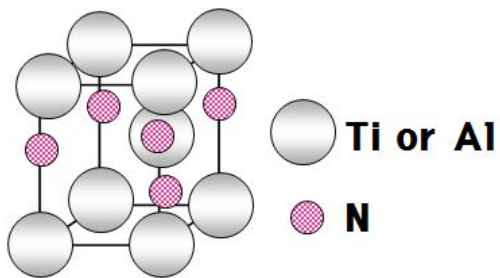
실험에 사용한 AlTiN코팅은 TiAlN코팅보다 경도·내열성·내마성, 밀착성을 향상시키시기 위해 알루미늄(Al) 함유량을 증가시킨 코팅으로 최대 65%까지는 위에 언급한 특성을 유지 할 수 있으나 그 이상 함유시 결정구조가 우루짜이트 구조화되어 코팅시 특성이 모두 악화된다. 이에 본 실험에서는 Al-58%, Ti-33%, Si+N-9%의 비율로 코팅 다층 코팅하여 AlTiN 코팅 및 코팅층수에 따른 특성을 알아보려고 하며, 실험에서는 PVD법중 이온 플레이팅 방법을 사용하여 초경공구에 AlTiN코팅을 1층~4층까지 실시하여 실험을 하였다.



(a) TiN



(b) AlTiN and TiAlN



(c) Wurtzite

Fig. 2.25 Structure according to the Al content

## 2.4 원자현미경

SPM은 Scanning Probe Microscope의 약자로 물질의 표면특성을 원자단위까지 측정할 수 있는 새로운 개념의 현미경을 총칭하는 말로 우리나라에서는 원자현미경이라고 불린다. 원자는 너무 작아서(0.1~0.5nm) 대단히 좋은 현미경으로도 볼 수 없다는 기존의 통념을 깨뜨린 원자현미경은 제 1세대인 광학현미경과 제 2세대인 전자현미경 다음 제3세대 현미경으로 자리 잡아가고 있다. 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자현미경 SEM(Scanning electron microscope)의 배율이 최고 수십 만 배인데 비해 원자현미경의 배율은 최고 수천만 배로서, 개개의 원자를 관찰할 수 있다. 투과식 전자 현미경인 TEM(Transmission electron Microscope)도 수평방향의 분해능은 원자단위지만, 수직 방향의 분해능은 훨씬 떨어져 개개의 원자를 관찰할 수는 없다. 원자현미경의 수직방향 분해능은 수평 방향보다 더욱 좋아서 원자지름의 수십 분의 일(0.01nm)까지도 측정해낼 수 있다.

SPM에는 원자현미경 계열 중 처음으로 등장한 STM(scanning tunneling microscopy), 부도체 시료의 측정을 가능하게 한 AFM(Atomic Force Microscopy), 물질의 형상 이외에 다른 특성들을 측정할 수 있는 MFM(magnetic force microscopy), LFM(lateral force microscope), FMM(force modulation microscope), EFM(electrostatic force microscope), SCM(scanning capacitance microscopy) 및 EC-SPM(electrochemistry SPM) 등이 있다. 이러한 원자현미경 외에도 물질의 광학적 특성을 빛의 파장 보다 훨씬 작은 분해능(~50nm)으로 알아내는 NSOM(near field scanning optical microscope), 시료표면의 온도분포를 재는 SHM(scanning thermal microscope) 등의 원자현미경이 있는데, 아직은 널리 사용되고 있지 않으므로 발전, 응용 가능성이 많다.

AFM장비는 Fig. 2.26과 같이 SEM으로는 측정할 수 없었던 수십 nm의 편차를 가지는 Roughness를 손쉽게 측정할 수 있어 많이 응용되고 있는 장비로 원자스케일 크기의 탐침을 이용, 시편 표면을 주사시킨다. 이때 시편과 탐침사이의 상호작용을 이용하여 정보를 이미지로 나타낸다. 시편과 탐침의 상호작용 방법에 따라 STM, AFM, SCM, MFM 등으로 나누어진다.

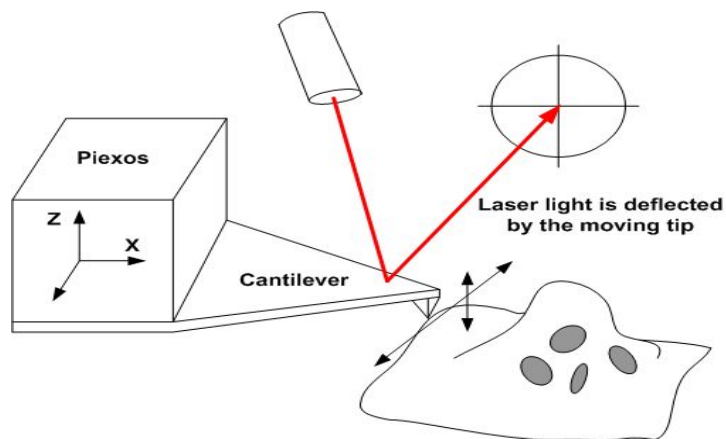
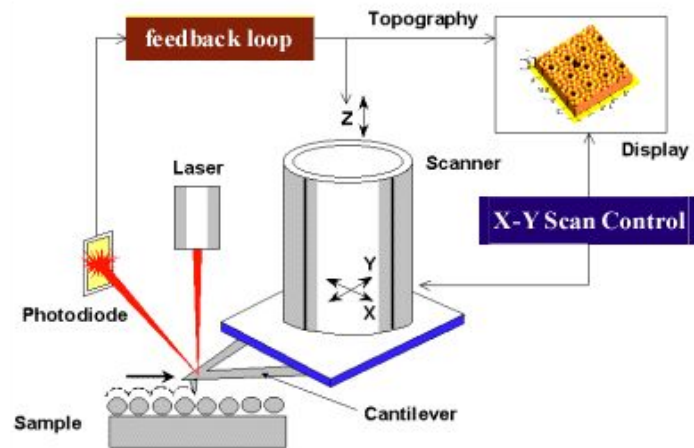


Fig. 2.26 The cantilever used in AFM and needle is image.

본 논문에서 실험에 사용한 AFM은 Fig. 2.27에서처럼 스프링 캔틸레버(Spring Cantilever) 끝에 길이가  $100\sim 200\mu\text{m}$ ,  $100\text{\AA}$  이하의 직경을 가진 팁(SiN)이 부착되어 있는 스프링 휨 시스템(Spring deflection system)이고 이 팁이 시편을 주사할 때 팁과 표면 사이에 반데르발스(Vander Wasals)힘이 작용하여 캔틸레버를 굴곡 시킨다. 이것은 캔틸레버 뒷면에서 입사되는 레이저의 굴곡으로 광검출기(Photodetector)에서 감지되어 원자단위 수준으로 물질의 표면구조를 3차원으로 형상화 할 수 있고 표면의 변화 양상을 실시간으로 관찰할 수 있다.

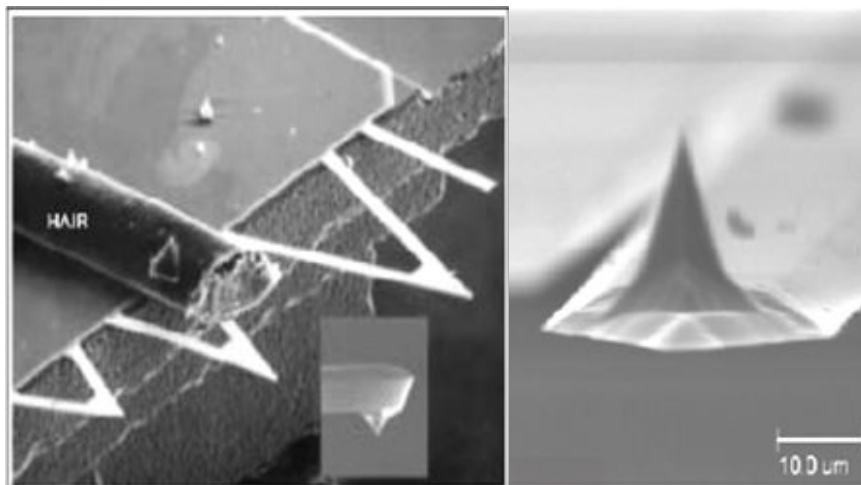


Fig. 2.27 The measurement principle of AFM

원자현미경(AFM)은 크게 접촉식 모드(Contact mode)와 비접촉식 모드(Non contact mode)로 구분된다. 표면과 팁 사이에 척력(Repulsive force)이 작용하는 영역에서 작동되는 모드가 접촉식 모드이며, 표면과 팁 사이에 인력(Attractive force)이 작용하는 영역에서 작동되는 모드가 비접촉식 모드이다. 접촉식 모드의 경우는 원자현미경 팁과 시편이 부드러운 물리적 접촉을 이루는 반면, 비접촉식 모드의 경우는 부드럽고 유연한 표면을 가진 시료 측정에 유리하며 팁의 표면에 직접 닿지 않기 때문에 오염이 적다. 접촉식 모드와 비접촉식 모드의 예를 Fig. 2.28에 나타내었다.<sup>51-54)</sup>

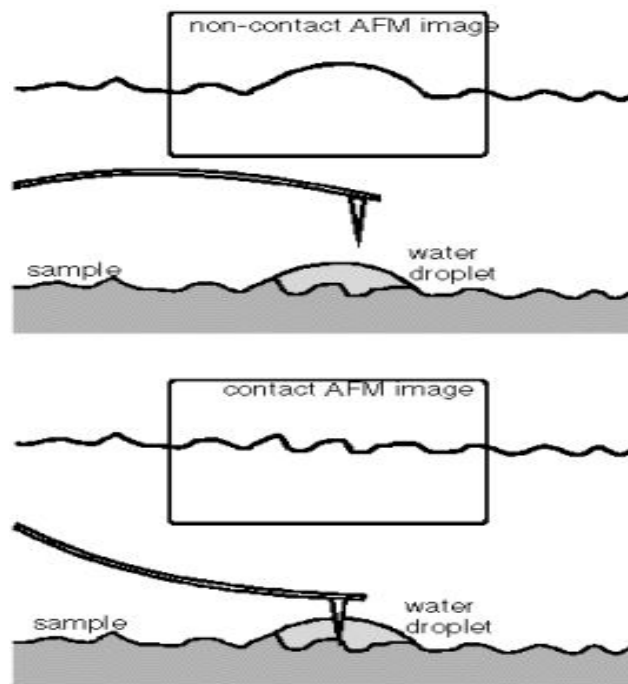


Fig. 2.28 Contact mode and Non-contact mode



## 제 3 장 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

본 연구에서 절삭실험은 최고 주축회전속도가 20,000rpm까지 가능한 수직형 머시닝센터(Hwa Cheon Sirius-UL(S), 2008년 8월)를 이용하여 실시하였다. 공작기계의 사양은 Table 3.1에 나타내었고 실험에 사용된 실험장치 요소들에 대한 제원은 Table 3.2에 나타내었으며, 실험장치의 사진과 개요도를 각각 Photo. 3.1과 Fig 3.1에 나타내었다.

절삭력측정은 압전형 공구동력계(Swiss Kistler, 9257b)로부터 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위하여 멀티채널 앰프리파이어(Multichannel Charge Amplifier, 5019b)를 사용하였으며, 경사재료 및 곡면재료를 공구동력계에 고정할 수 있도록 Photo. 3.2와 같이 실험에 앞서, 선(先) 가공하여 실험을 실시하였다.

가공 후 표면 거칠기는 촉침식 조도측정기(Mitutoyo사, BRT-S916)를 이용하여 경사 재료와, 곡면재료 중간 부분에서 2회 측정하여 평균값으로 정하였고 공구마모량은 공구현미경(Nicon사, MM-60/L3FA)을 사용하여 측정하였으며, 표면거칠기 측정과 공구 마모측정에 사용된 시스템을 각각 Photo. 3.3과 Photo. 3.4에 나타내었다.

실험에 사용한 볼 엔드밀의 코팅표면을 알아보기 위해 AFM(atomic force microscopy, PSIA, XE-200)장비를 이용하여 코팅된 공구 표면거칠기 값을 측정하였으며, 자동미소경도시험기(Mitutoyo사, AAV-502)를 이용하여 코팅층의 경도 값을 측정하였다. 코팅층의 단면조직은 전자주사 현미경(SEM, Scanning Electronics Microscope, Jelo, JSM840-A)을 이용하여 코팅 층수 따른 단면의 조직을 검사하였고 Photo. 3.5~Photo. 3.7 에 각각의 측정 장비들을 나타내었다.

Table 3.1 Machine specifications

<b>Specification</b>	<b>Unit</b>	<b>Standard</b>
Table Size	mm	1,100×600
Max. weight on Table	Kg	700
X/Y/Z Axis	mm	1,020/600/550
Rapid Traverse(x/y/z)	m/min	30/30/30
Spindle Motor	Kw	11/7.5
Spindle Speed	rpm	12,000(20,000)
Spindle taper hole	NT	40
Machine weight	Kg	8,500
Floor space(L*W*H)	mm	2,702×3,500×3,040
Electric Power	KVA	30

Table 3.2 Specifications of experimental apparatus

<b>Apparatus Name</b>	<b>Manufacturer</b>	<b>Model</b>
M/Center	Hwa Cheon	Sirius-UL(G)
Multichannel Charge Amplifier	Kistler	5019b
Tool Dynamometer	Piezoelectric Transducer Kistler	9257b
A/D Converter	National Instrument	DAQ-6024Q
AFM	PSIA corp.	XE-200
Tool Microscope System	NIKON	MM-60/L3FA
Auto vickers hardness testing system	Mitutoyo	AAV-502
SEM-EDX	Jeol	JSM840-A



Photo. 3.1 Experimental setup



Photo. 3.2 Installation of tool dynamometer and material processing

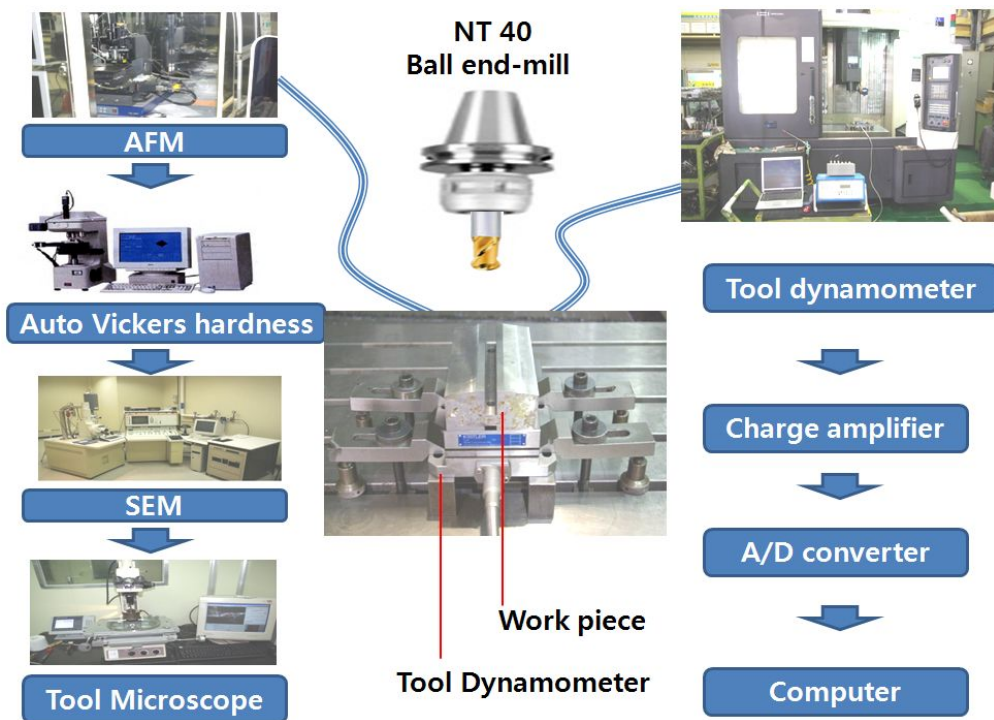


Fig. 3.1 Schematic diagram of measuring equipment



Photo. 3.3 Photograph of experimental apparatus

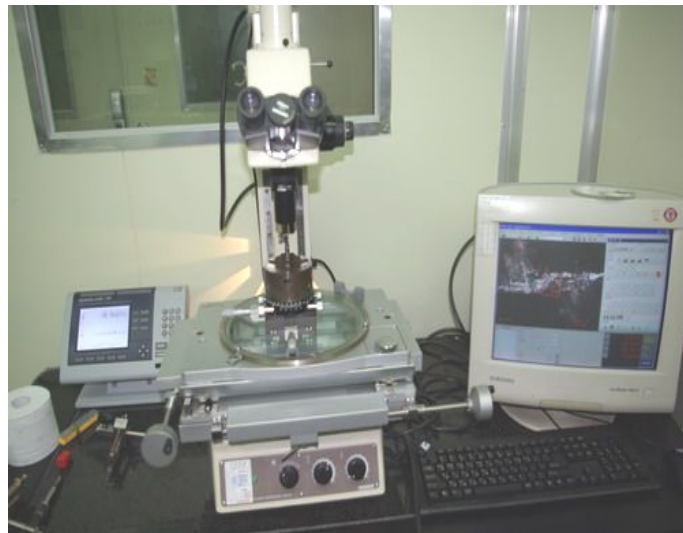


Photo. 3.4 Tool Microscope System



Photo. 3.5 AFM equipment



Photo. 3.6 Auto vickers hardness testing system



Photo. 3.7 SEM-EDX equipment

## 3.2 시험편 및 절삭공구

### 3.2.1 시험편

실험에 사용된 KP-4 재료는 프리하든강(Pre-harden steel) 종류로 생산시 단조공정을 거친 합금강의 명칭이며 첨가 원소 및 금속의 종류와 양에 따라 명칭은 부여되지만 단조공정을 거친 강재들의 총칭이다. 프리하든강은 단조공정을 거치기 때문에 조직이 조밀하여 가공면의 조도가 좋으며(금형에서 보편적으로 경면용에 사용), 금형강으로서 출고 될 때 강재가 갖추어야 할 경도를 갖는 의미로 프리하든강 이라는 용어로 사용하고 있다. 특히 실험에 사용한 KP-4재료는 프리하든강 종류중 조직의 치밀성, 가공면의 조도, 내부식성이 좋아 사출금형이 받는 압축응력, 캐비티 내부에 발생하는 반복 인장응력에 견디는 성질이 좋아 자동차범퍼, OA기기, 라지에터 그릴 등의 핵심코어 및 캐비트에 주로 사용되고 있다.

Fig. 3.2와 같이 경사 각도를 15°, 30°, 45°로 1차 머시닝센터에서 가공하여 준비하였고, 곡면 가공특성을 알아보기 위해 Fig. 3.3과 같이  $\Phi$  60 곡면(반원)의 내·외경 재료를 와이어 커팅기를 이용, 선(先) 가공하여 재료를 준비하였다.

Table 3.3에 시험편의 기계적 성질을 나타내었으며, 화학성분은 Table 3.4에 나타내었다.



Table 3.3 Mechanical properties of KP-4

Workpiece material	Tensile strength (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	Yielding strength (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (H <sub>R</sub> C)
KP-4	104	86	23.13	32

Table 3.4 Chemical compositions of KP-4

Workpiece material	Chemical compositions(%)				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
KP-4	0.41	0.3	1.0	1.1	0.27

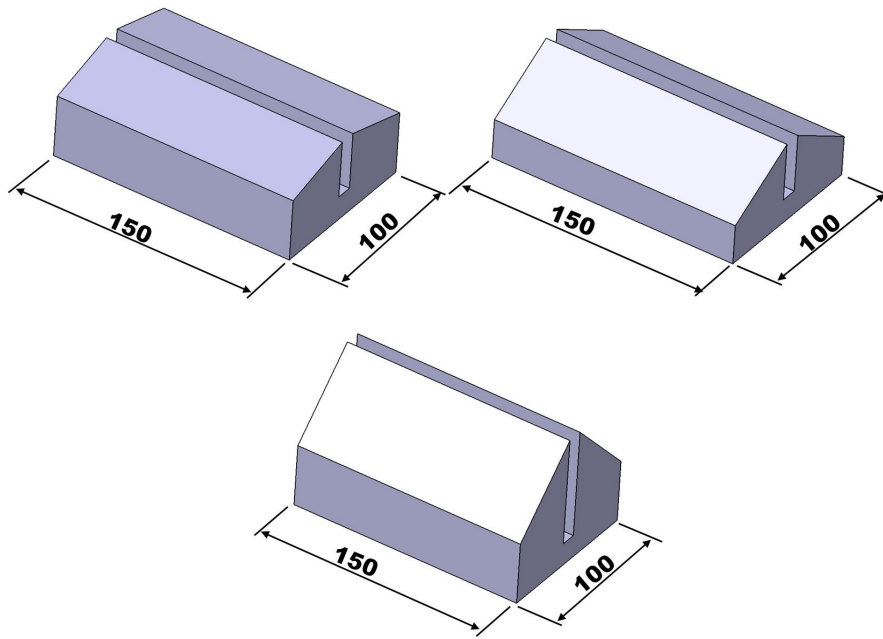


Fig. 3.2 Modelling of inclined plane material(15°, 30°, 45°)

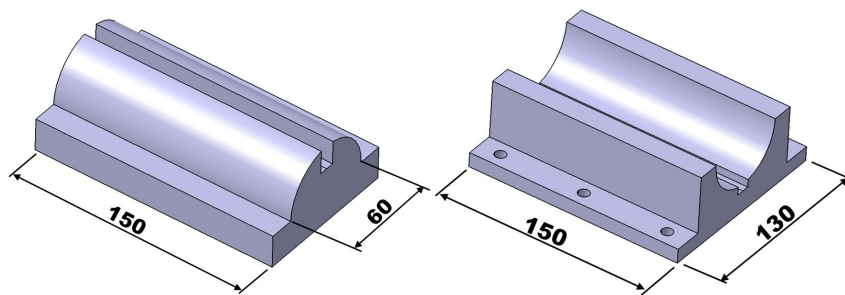


Fig. 3.3 Modelling of the circular material (half circle of  $\Phi 60\text{mm}$ )

### 3.2.2 절삭공구

실험에 사용한 절삭공구는 Fig. 3.4와 같은 형상의 국내 K 회사에서 제조한 초경(Co 12%, WC+Cr<sub>3</sub>+C<sub>2</sub>+VC 88%)  $\phi$  8mm 볼 엔드밀이며, 본 실험에서는 초경공구에 물리증착법(PVD)중 이온 플레이팅법으로 AlTiN 1~4층까지 코팅하여 준비하였다. Table 3.5에 절삭가공 실험에 사용한 초경 볼 엔드밀의 제원을 나타내었다.

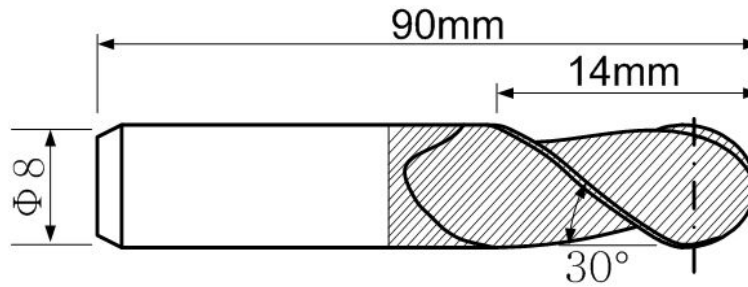


Fig. 3.4 Geometry of ball end mill

Table 3.5 Specification of ball end mill

Tool	Specification	Ball end mill
Tool diameter		$\phi$ 8mm
Tool radius		4mm
Helix angle		30°
Length of Cut		14mm
Overall Length		90mm

### 3.3 실험방법

본 실험은 머시닝센터를 이용하여  $\phi$  8mm 초경 불 엔드밀에 AlTiN을 1층, 2층, 3층, 4층 코팅하여 플라스틱 금형강의 경사면과 곡면에 대한 상·하 방향의 가공특성을 알아보려고 한다.

경사각도 15°, 30°, 45°와  $\phi$  60mm 곡면의 내·외면 재료를 준비하였으며, 본 실험에 들어가기 전에 공구동력계에 재료를 고정하기 위해 와이어커팅기와 머시닝센터에서 1차 가공하여 실험준비를 하였다.

플라스틱 금형재료인 KP-4재료는 프리하든강 종류중 조직의 치밀성, 가공면의 조도, 내부식성이 좋아 사출금형이 받는 압축응력, 케비티 내부에 발생하는 반복 인장응력 에 견디는 성질이 좋아 자동차범퍼, OA기기, 라지에터그릴 등의 핵심코어 및 케비트에 주로 사용하고 있다.

실험에 사용한 CAD/CAM 프로그램은 UG(Uni Graphics)와 더불어 우리나라 금형산업에서 가장 많이 사용하고 있는 “Cimatron” 프로그램으로 CLAL Computers & Technologies사에서 개발하였으며, CAD/CAM가공을 위한 3D 모델링 및 공구의 절삭에 필요한 기타 사항을 설정하였고, Surfare회사에서 만든 가공프로그램인 “SurfCam” 프로그램을 이용하여 절삭실험에 필요한 가공조건 등을 설정하여 “dat network” 통해 머시닝센터에 직접 전송 방식으로 절삭가공실험을 하였다.

가공실험의 절삭조건은 경사각도 15°, 30°, 45°와  $\phi$  60mm 곡면의 내·외면 재료를 주축회전수 10,000~16,000rpm, 공구이송속도 1,300~1,700mm/min, 절삭깊이 0.3~0.9mm씩 각각 3가지 변수를 설정하고, 절삭 파라메타 등의 조건들을 동일하게 하고 결국 변화하는 부분은 경사각도와 절삭 방향만의 파라메타를 가지도록 설정 하였으며, 실험에 적용한 절삭조건을 Table 3.6과 3.7에 나타내었다. 또한 절삭실험가공시 재료크기를 고려, 절삭분력 측정 및 표면거칠기 측정이 끝난 후 공구동력계에 부착시 기존의 작업조건과 맞추기 위해  $\phi$

12mm 볼 엔드밀을 이용 황삭 및 정삭작업을 실시하여 동일조건에서 실험이 이루어지도록 하였다.

각 실험조건에 대한 절삭력 변동성분은 압전형 공구동력계를 사용하여 측정하였으며, 이때 공구동력계로부터 측정된 절삭력 성분은 증폭기를 사용하여 아날로그 신호를 A/D 변환기를 통해 디지털화 하여 노트북 컴퓨터에서 데이터를 받아 들였으며, 컴퓨터에 전송된 신호는 절삭력 소프트웨어(Dynoware)를 이용하여 분석하였다. 실험에 사용된 공구동력계는 스케일을 1V ekd 200N으로 하였고, 표준 저대역 필터(Standard low pass filter)를 사용하여 트랜스듀서에 의하여 생성된 전하 신호에 있어 케이블 잡음이 겹쳐서 나타나는 것을 해소하였다. 증폭된 전하는 A/D 변환기를 통하여 아날로그 신호에서 디지털 신호로 바꿔주고 컴퓨터에서 디지털 신호를 받아들이는 방식으로 하였다.

가공면의 거칠기는 촉침식 표면조도기를 사용하였으며, Cut-off 0.8mm, 이송속도는 0.5mm/s, 측정범위는 20 $\mu$ m로 설정하여 측정을 하였고, 측정거리는 경사면의 중앙 부분과 곡면의 중앙 부분을 대상으로 측정하였다. 표면거칠기 값( $Ra$ )은 정확성을 위해 2번 측정하여 평균값으로 정리하였다.

마모시험은 경사 재료와 곡면 내·외면 재료에서 절삭 3분력과 표면거칠기 결과를 분석하여 마모시험 조건을 선정하여 실험을 하였으며, AlTiN코팅 층수에 따른 마모시험은 경사재료 및 곡면재료의 절삭분력 및 표면거칠기 측정 후 결과를 분석, 조건을 선정하여 마모시험을 수행하였다.

Table 3.6 Cutting conditions of Inclined material

Spindle speed N rpm	Plane angle	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)					
			1,300(mm/min) (a)		1,500(mm/min) (b)		1,700(mm/min) (c)	
			Up(u)	Down(d)	Up(u)	Down(d)	Up(u)	Down(d)
10,000rpm 13,000rpm 16,000rpm	15°	0.3(I)	I-a-u	I-a-d	I-b-u	I-b-d	I-c-u	I-c-d
	30°	0.6(II)	II-a-u	II-a-d	II-b-u	II-b-d	II-c-u	II-c-d
	45°	0.9(III)	III-a-u	III-a-d	III-b-u	III-b-d	III-c-u	III-c-d

Table 3.7 Cutting conditions of  $\Phi$  60mm circular material

Spindle revolution	halfcure	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)					
			1,300(mm/min) (e)		1,500(mm/min) (f)		1,700(mm/min) (g)	
			Up(u)	Down(d)	Up(u)	Down(d)	Up(u)	Down(d)
10,000rpm 13,000rpm 16,000rpm	internal	0.3(I)	I-a-u	I-a-d	I-b-u	I-b-d	I-c-u	I-c-d
		0.6(II)	II-a-u	II-a-d	II-b-u	II-b-d	II-c-u	II-c-d
	external	0.9(III)	III-a-u	III-a-d	III-b-u	III-b-d	III-c-u	III-c-d

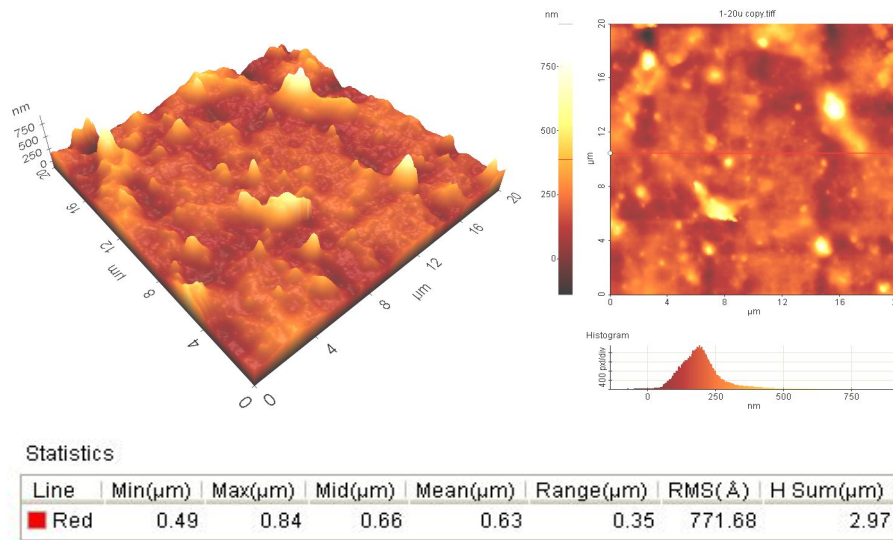
## 제 4 장 AlTiN코팅 공구의 분석

### 4.1 AlTiN코팅 공구의 표면조도 분석

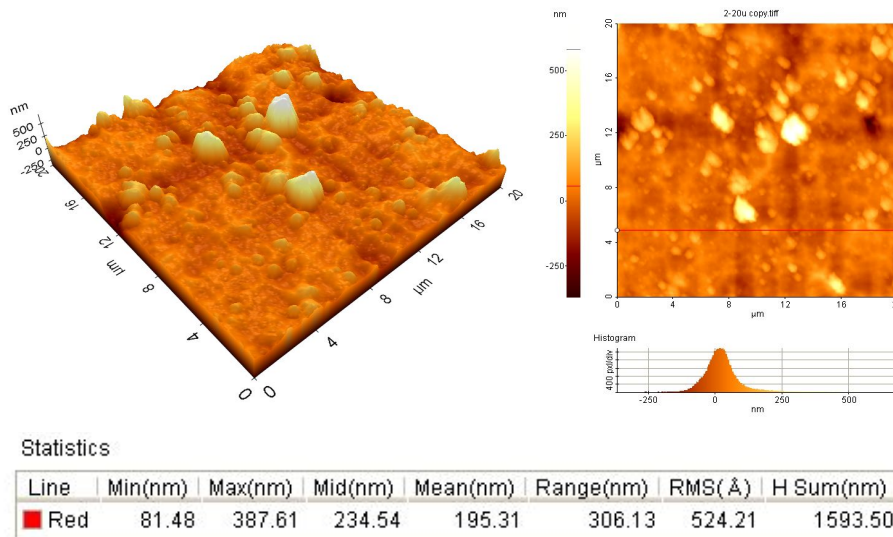
본 실험에서 코팅공구 표면의 거칠기 측정은 PSIA사에서 제작한 원자현미경(AFM)으로, 시료표면을 nm범위로 측정할 수 있는 실험 장비이다. 실험에 사용된 PVD 이온 플레이팅 방법으로 코팅된 공구시료 표면을  $20 \times 20 \mu\text{m}$  스캐닝 하여 코팅층에 따른 공구표면 상태를 관찰·측정하였다.

Photo. 4.1의 (a)~(d)는 초경공구에 AlTiN를 1층부터 4층까지 코팅 하였을 때 코팅표면의 형상이다. Photo. 4.1의 (a)를 보면 불규칙한 형상으로 오목하게 들어가 있는 부분이 관찰된다. 이는 초경공구의 표면요철(凹凸)이 완전히 1층 코팅에서 평탄하게 증착시키지 못했기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. AlTiN 1층 코팅 후 2층 코팅전 예칭 실시, 1층 코팅된 면을 거칠게 하여 2층 코팅을 원활하게하기 위해서 실시한다. 이와 같은 작업은 3층 코팅과 4층 코팅에서도 반복적으로 이루어진다. Photo. 4.1의 (b)와 같이 2층 코팅에서도 요철(凹凸) 부분이 부분적으로 미세하게 관찰 되어지는 것을 확인 할 수 있다.

Photo. 4.1의 (c)는 AlTiN을 3층으로 코팅한 것으로 1층, 2층 코팅과는 달리 코팅 표면이 평탄한 것을 확인할 수 있었다. Photo. 4.1의 (d)는 AlTiN을 4층으로 코팅한 것으로 표면을 보면 3층으로 코팅한 것 보다 표면 상태가 평탄하지 못한 것을 확인 할 수 있으며, 오목한 형상이 Photo. 4.1의 (a)와 같이 불규칙한 형상이 아닌 원형에 가까운 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 4층으로 코팅하는 동안 반복적인 코팅으로 인하여 AlTiN코팅 물질의 평탄화가 되지 못하고, 코팅 물질의 균질성이 깨진 것으로 판단된다. 초경 블엔드밀의 AlTiN코팅 표면거칠기 값은 Table 4.1과 Fig. 4.1에 나타내었다.

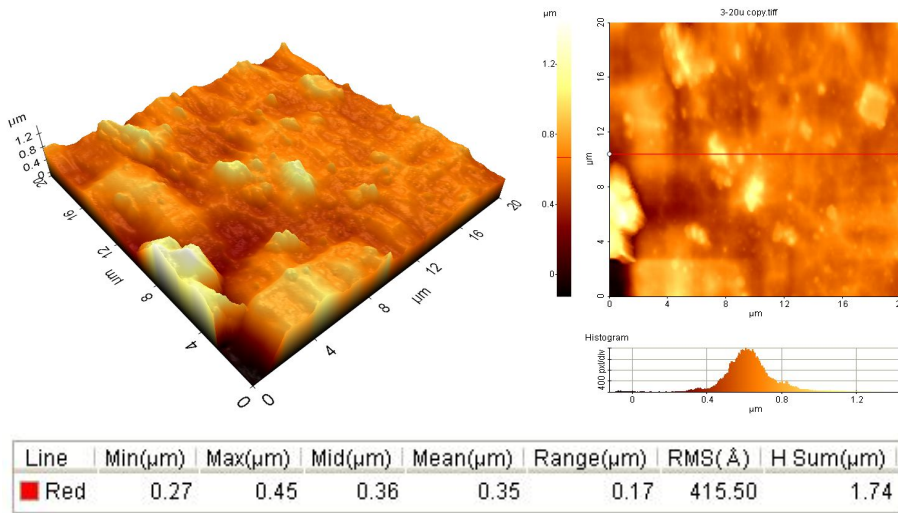


(a) First coating layer of AlTiN

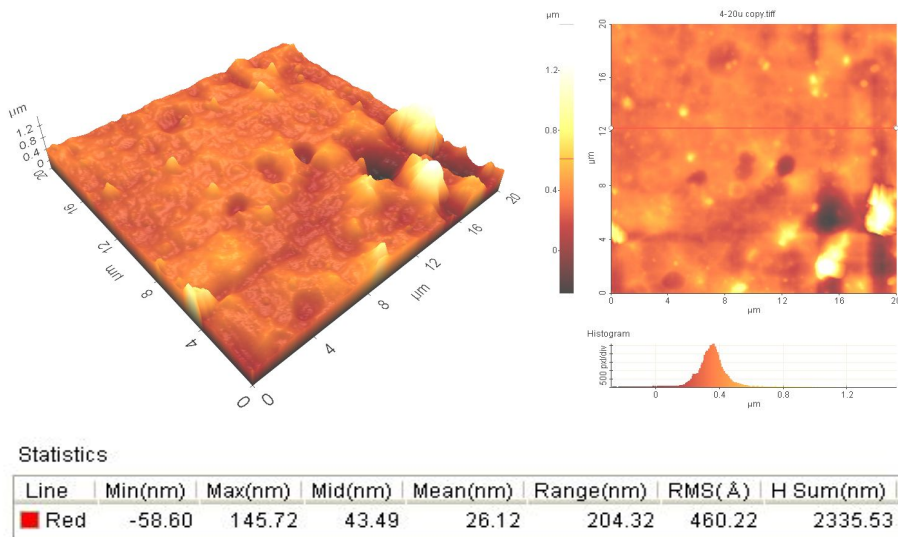


(b) Second coating layer of AlTiN





(c) Third coating layer of AlTiN



(d) Fourth coating layer of AlTiN

Photo. 4.1 Results of AFM to AlTiN coated layers

Table 4.1 Surface roughness of AlTiN coating layer

Coating layer	Surface roughness ( $\mu\text{m}$ )
1	0.077
2	0.052
3	0.042
4	0.046

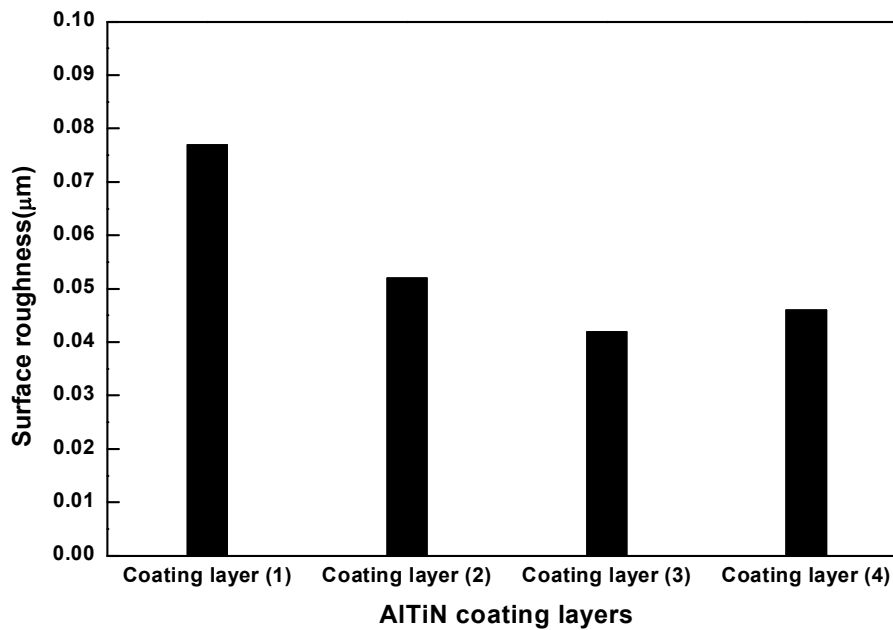


Fig. 4.1 Surface roughness of AlTiN coating layer measured by AFM

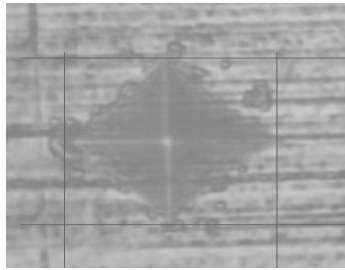
## 4.2 AlTiN코팅 공구의 경도시험

AlTiN코팅 공구의 코팅 층에 따른 경도 값을 알아보기 위해 부하, 자동터렛, 포커스, 압흔치수 판독 및 측정위치 이동 등과 같은 일련의 시험프로세스를 전자동으로 실행할 수 있고,  $\mu\text{m}$ 단위의 코팅 층도 측정이 가능한 Mitutoyo사의 자동 미소경도 시험기를 이용하여 AlTiN코팅 층의 경도 값을 알아보았다. 코팅 층의 깊이를 고려하여 압흔계측범위를  $4\sim 40\mu\text{m}$  범위에서 대물렌즈 50x 조건으로 시험력을 최소 조건인 4.904N으로 설정하여 Photo. 4.2의 (a)~(e)와 같이 경도시험을 하였다.

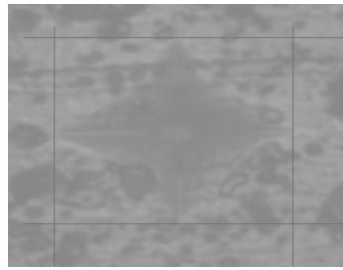
AlTiN층의 경도시험 결과, 초경공구 경도 값은 Hv 1872.7, AlTiN 1층 코팅에서는 Hv 2329.4로 약 Hv 450정도의 경도 값의 차이를 보였다. 또한 1층과 2층 코팅의 차이는 Hv 480정도의 차이를 보였으며 2층과 3층의 경도의 차는 Hv 213, 3층과 4층은 Hv 149.9의 경도차 값을 보였다. 코팅층이 올라가면서 경도차가 적어지는 것을 확인 할 수 있었으며, AlTiN코팅 3층에서 가장 높은 경도 값을 보여 주었고, Table 4.2와 Fig. 4.2에 나타내었다.

Table 4.2 Hardness values of AlTiN coating layer

Coating layer	Vickers hardness(Hv)
Carbide Tool	1872.7
AlTiN 1	2329.4
AlTiN 2	2814.3
AlTiN 3	3027.3
AlTiN 4	2877.4



(a) Carbide tool



(b) AlTiN Coating layer (1)



(c) AlTiN Coating layer (2)



(d) AlTiN Coating layer (3)



(e) AlTiN Coating layer (4)

Photo. 4.2 Images of AlTiN coating layer measured by Auto vickers hardness testing system

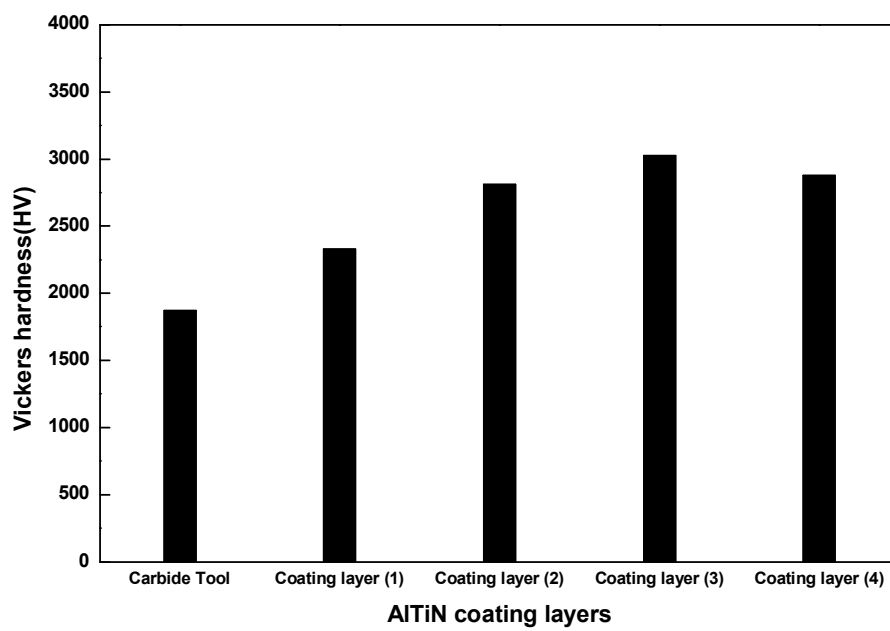


Fig. 4.2 Hardness Values of AlTiN layer

### 4.3 AlTiN코팅 공구의 표면분석

본 실험에서는 AlTiN을 멀티 코팅하여 실험한관계로 SEM-DEX를 통하여 중요 원소인 Al과 Ti원소의 함유량을 알아보기 위해 Photo. 4.3과 같이 AlTiN코팅(1~4층) 공구를 다이아몬드 커팅 휠로 절단, 마운팅(Mounting) 및 연마작업 후 성분 분석하였다. 코팅의 시작단계는 타이타늄(Ti)이 소재에 증착시키고 다음에 알루미늄(Al)이 증착되며, 중간 공정에서 알루미늄(Al) 비율이 지속적으로 증가 하여 경도, 내열성, 내산화성이 향상된다. 최종 공정에서는 알루미늄(Al)의 비율이 감소하고 타이타늄(Ti)이 증가, 타이타늄과 알루미늄 비율을 맞추고 마지막 공정에서 타이타늄 증착으로 매끈한 표면을 얻는다. 초경공구는 Fig. 4.3과 같이 초경의 주재료인 텅스텐(W)과 코팅재료의 성분인 알루미늄(Al), 타이타늄(Ti), 규소(Si), 질소(N)의 성분만을 성분 분석하였다. 초경공구의 재료인 텅스텐(W) 성분은 코팅이 시작하는 부분을 기점으로 적어지는 것을 확인 할 수 있으며, AlTiN코팅의 주성분인 알루미늄(Al)과 타이타늄(Ti)는 초경에는 존재하지 않으나 코팅층을 기점으로 함유량이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 규소(Si)의 경우는 초경공구에도 많은 양이 포함되어 있으나, 코팅층으로 들어서면서 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 AlTiN코팅시 성분 함유량이 Al-58%, Ti-33%, Si+N-9%의 비율로 코팅을 실시하여 규소(Si)의 양이 코팅 층에서 낮게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 4.4에 AlTiN코팅 층수에 따른 알루미늄(Al)과 타이타늄(Ti)의 SEX-DEX 성분 분석 결과를 나타내었다.

Fig. 4.5는 AlTiN코팅(1~4층)의 두께를 측정한 결과로 초기 코팅 1층의 두께는 5 $\mu$ m가 측정 되었으나 코팅 2층과 3층은 두께가 4 $\mu$ m증가하고, 마지막 층인 4층은 5 $\mu$ m의 두께로 코팅된 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 코팅 층의 두께가 1층, 2층의 두께차가 나타나는 이유는 1층 코팅후 에칭공정을 통하여 표면거칠기를 높여 2층으로 코팅 작업시 코팅의 접합성을 극대화시키기 위한

에칭공정에 의한 것이며, 이와 같은 에칭공정은 2층과 3층의 코팅에서도 똑같이 반복된다. 마지막 층인 4층에서는 에칭공정이 없기 때문에 코팅층의 두께가  $5\mu\text{m}$ 로 나타난 것이다.



Photo. 4.3 Mounting of AlTiN layer

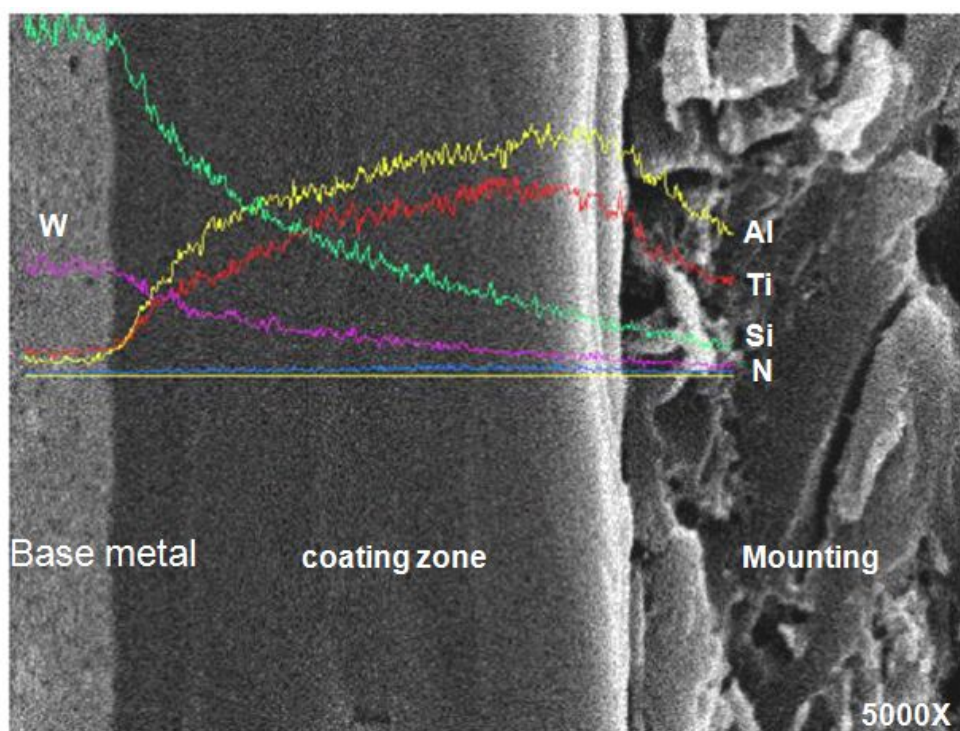


Fig. 4.3 Quantitative values of the composition of AlTiN coating layer using SEM-EDX



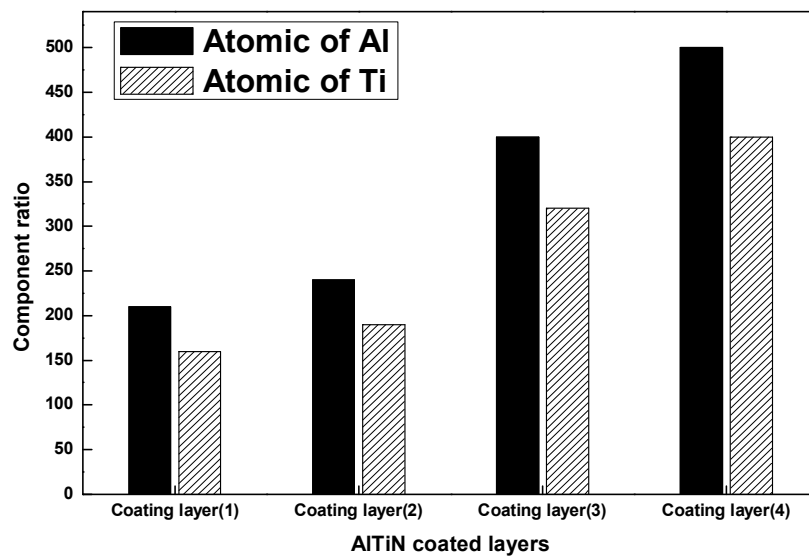


Fig. 4.4 Composition ratio of Al and Ti of the coating tool

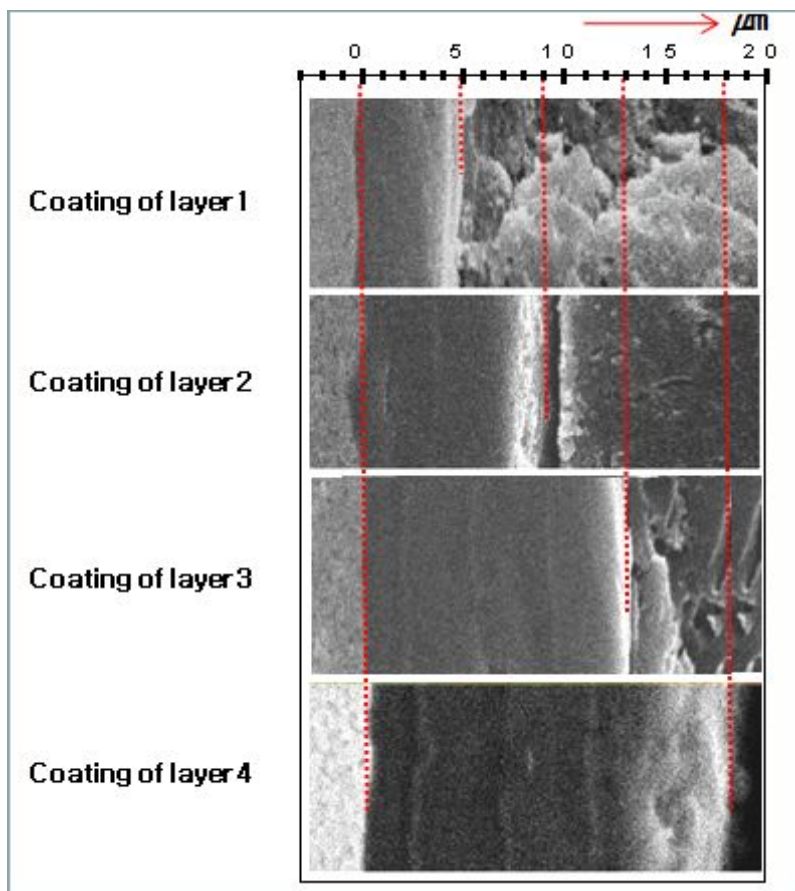


Fig. 4.5 The thickness of AlTiN coating layer using SEM

## 제 5 장 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 10,000rpm이상의 고속가공기를 이용하여  $\phi$  8mm초경 볼 엔드밀에 PVD(Physical vapor deposition) 이온 플레이팅 방식으로 AlTiN을 멀티 코팅하여 플라스틱 금형강인 KP-4소재를 경사면(15°, 30°, 45°) 및  $\phi$  60mm 곡면 내·외면을 절삭속도, 절삭깊이, 공구이송속도 등의 변화를 주어 코팅 층에 따른 절삭분력, 피삭재의 표면거칠기, 코팅공구 마모량 등을 조사하였다.

### 5.1 재료형상에 따른 상·하 방향의 절삭력 고찰

#### 5.1.1 15°경사 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석

Fig. 5.1은 15°경사 재료의 가공특성을 알아보기 위해 주축회전수 10,000 rpm, 공구이송속도 1,300mm/min, 절삭깊이 0.3~0.9mm가공조건에서 AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀을 사용, 절삭깊이 변화에 따른 상·하 방향의 절삭 3분력을 나타낸 결과이다.

절삭깊이 0.3mm에서는 상 방향 조건에서 절삭분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )은 각각 89.87N, 90.22N, 93.51N으로 양호한 절삭분력 값을 보였으며, 하 방향 조건에서 절삭분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )은 각각 100.57N, 97.26N, 104.92N으로 상·하 분력 차이는 약 10N으로 하 방향 조건에서 높게 나타났으며,  $F_z$  분력에서는 약 12N의 차이를 보였다.

절삭깊이 0.6mm, 0.9mm의 조건으로 깊이가 증가하면서 각각 절삭분력은 약 20N, 25N의 차이를 보이면서, 깊이가 증가할수록 절삭분력 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 절삭깊이 0.6mm 조건 이상부터  $F_x$ ,  $F_y$ 분력의 증가보다  $F_z$  분력이 크게 상승한 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 상·하

분력 및  $F_z$  분력의 차가 크게 나타나는 이유는 상 방향 가공에서는 적은 량의 미절삭이 발생하지만, 하 방향에서는 Over cut이 발생한다. 또한 하 방향 조건에서는 볼 엔드밀의 중심부인 “chisel” 접촉으로 중심에서 공구절삭 선속도가 0 이 되기 때문에 공구와의 마찰력이 증가되어 상 방향 보다 하 방향에서 절삭분력이 높게 나타난 것으로 판단된다. 특히 공구 중심에서 정상적인 절삭이 이루어지지 못한 관계로 절삭 깊이가 증가 할수록  $F_z$  분력이 크게 나타나며, 깊이가 깊어질수록 -Z 방향으로 힘을 많이 받는 관계로 절삭깊이 0.3mm, 0.6mm조건에 비해 0.9mm의 조건에서 하 방향의  $F_z$  분력이 높게 나타난 것으로 판단된다. 이와 같은 실험결과로부터 15°경사진 재료의 가공에서는 상 방향 가공을 우선시 하고 부득이한 하 방향 가공에서는 절삭 깊이를 적게 주어 가공이 진행해야할 것으로 판단된다.

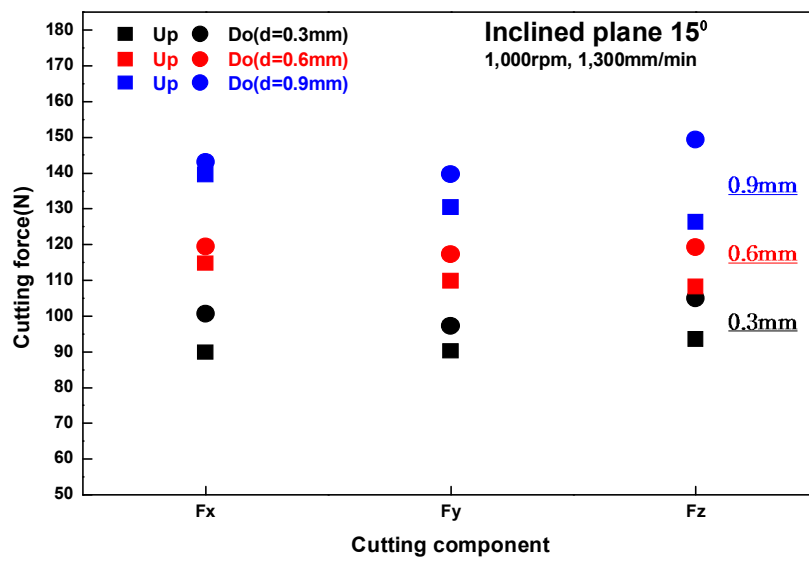


Fig. 5.1 Cutting forces according to depth of cut (Inclined plane 15°)

### 5.1.2 30°경사 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석

Fig. 5.2는 30°경사 재료의 가공특성을 알아보기 위해 주축회전수 10,000 rpm, 공구이송속도 1,300mm/min, 절삭깊이 0.3~0.9mm가공조건에서 AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 불 엔드밀을 사용, 절삭깊이 변화에 따른 상·하 방향의 절삭 3분력을 나타낸 결과이다.

절삭깊이 0.3mm에서는 상·하 방향 조건에서 절삭분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )은 각각 87.37N, 85.85N, 87.59N의 값을 보였으며, 하 방향 조건에서 절삭분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )은 각각 92.21N, 92.23N, 94.94N으로 나타났다. 상·하 방향 분력 차가 15°경사인 재료와 비교해 적어 진 것을 확인 할 수 있다. 그러나  $F_z$  분력차이는 약 10N 의차를 보였다. 이와 같은 원인은 절삭깊이 0.3mm의 조건의 경우 상·하 방향 모든 조건에서 공구의 중심부 “chisel”과 접촉이 없이 가공이 진행 되나 상 방향 가공 조건에서는 공구 측면 인선에서 가공이 시작되어 공구 측면 부분에서 가공이 마무리되고, 하 방향 절삭 경우 반대로 “chisel”부분 쪽에서 가공이 시작되어 측면 부분에서 가공이 마무리되는 관계로 하 방향의 가공에서 -Z 방향으로 힘을 많이 받기 때문이다.

절삭깊이 0.6mm의 조건에서는  $F_z$  분력의 차가 약 12N 정도 차를 보이는데 이와 같은 결과는 하 방향의 경우 공구중심부 “chisel” 접촉 되면서 가공이 진행되기 때문에 -Z방향으로 힘이 크게 받기 때문이다.

절삭깊이 0.9mm의 조건에서는 절삭깊이가 깊어지면서  $F_z$  분력에 있어 상·하 방향 관계없이 절삭력이 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 절삭 깊이에 별 절삭분력 값은 15°경사 재료에 비교해 그 차가 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 실험결과는 30° 경사 재료의 특징과 비교해보면 알 수 있다.

상·하 방향 공구 접촉호 길이 차이가 0.04mm로 15°경사 재료에 비해 0.02mm으로 적어진다. 이와 같은 이유는 재료 경사각이 증가 할수록 공구가공인선이 측면부로 이동하기 때문에 공구의 중심부에서 떨어져서 가공이 진행되기 때문이다. 또한 절삭깊이 0.3mm, 0.6mm, 0.9mm 상 방향가공에서는

공구중심 “chisel” 먼 거리에서 가공이 시작되어 “chisel” 가까운 곳에서 가공이 진행되는 반면, 하 방향 가공에서는 절삭깊이 0.3mm의 경우 공구중심 “chisel”과 접촉은 없지만 가까운 거리에서 가공이 시작되어 먼 쪽에서 가공이 끝나고, 절삭깊이 0.6mm, 0.9mm의 조건에서는 공구중심 “chisel” 과 접촉하면서 가공이 진행되는 결과로 판단된다.

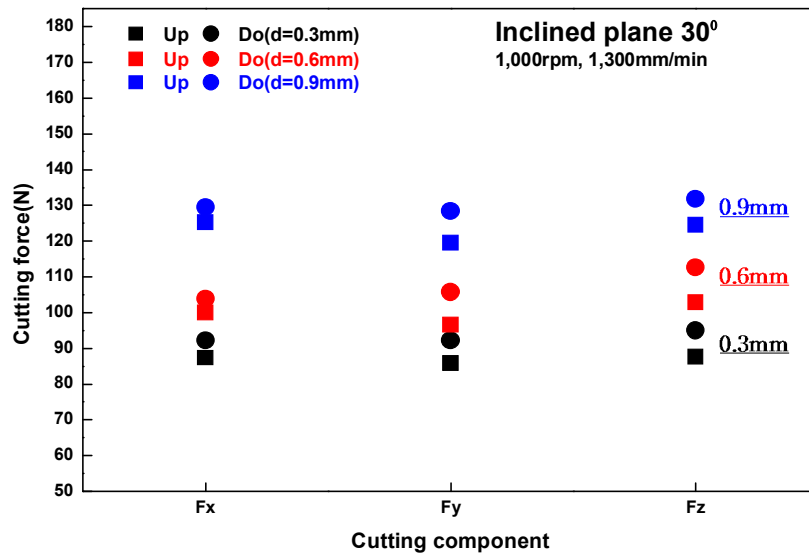


Fig. 5.2 Cutting forces according to depth of cut(Inclined plane 30°)



### 5.1.3 45°경사 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 분석

Fig. 5.3은 45°경사 재료의 가공특성을 알아보기 위해 주축회전수 10,000 rpm, 공구이송속도 1,300mm/min, 절삭깊이 0.3~0.9mm 가공조건에서 AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀을 사용, 절삭깊이 변화에 따른 상·하 방향의 절삭 3분력을 나타낸 결과이다.

절삭깊이 0.3mm조건에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분력은 각각 79.55N, 75.98N, 76.45N의 값을 보였으며, 하 방향 조건에서는 각각 84.27N, 81.97N, 81.86N으로 나타났다. 상·하 방향의 절삭 분력차가 15° 및 30°경사 재료와 비교하여 적게 나타났고, 이와 같은 결과는 45° 경사재료 가공은 접촉호의길이가 15° 경사 재료와 동일한 조건에서 가공이 진행되어도, 상 방향의 경우, 볼 엔드밀 공구측면 인선에서 가공이 시작되어 공구의 구 측면 45°부분에서 가공이 마무리되고, 하 방향 가공조건에는 공구중심 “chisel”부와 가까운 측면부에서 가공이 시작되어 공구의 중심인 45°되는 부분에서 가공이 끝나게 되는 결과이며, 다른 경사진 재료와 비교해 상·하 방향 모두 공구 중심부인 “chisel” 와 먼 위치에서 가공이 이루어지는 결과로 판단된다.

절삭깊이 0.6mm 및 0.9mm의 조건에서는 절삭깊이가 증가할수록  $F_z$  분력이 높게 나타났으며, 절삭깊이 0.6mm이상의 조건에서는 상 방향 보다 하 방향의 조건에서 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 하 방향의 가공에서 절삭깊이가 증가할수록 공구중심 “chisel”부와 가까운 위치로 이동되면서 가공이 진행되기 때문에  $F_z$ 분력이 증가 한 것으로 판단된다.

실험결과 45° 경사재료 가공에서 가장 적은 절삭분력을 보였으며, 다음으로 30°, 15° 경사 재료순서로 나타났고, 모든 가공실험 조건에서 주축회전수 13,000rpm이하의 조건에서 양호한 결과를 보였다.

경사 재료의 절삭가공실험 결과를 보았을 때, 공구중심 “chisel” 접촉여부에 따른 절삭분력 차가 발생하는 것을 알 수 있고, 공구중심 “chisel”부와 접촉이 없이 가공이 진행 되어도 볼 엔드밀 구면 인선의 접촉 위치에 따라 절삭분력

차는 다르게 나타난 것을 알 수 있었다. 재료의 경사도가 적은 조건에서는 상 방향 가공을 지향하고, 공구중심 “chisel”의 접촉의 가공조건에서는 절삭마찰을 줄이기 위한 방법을 채택, 절삭마찰을 최소화 시켜주는 것이 효과적인 절삭가공법이라 판단된다.

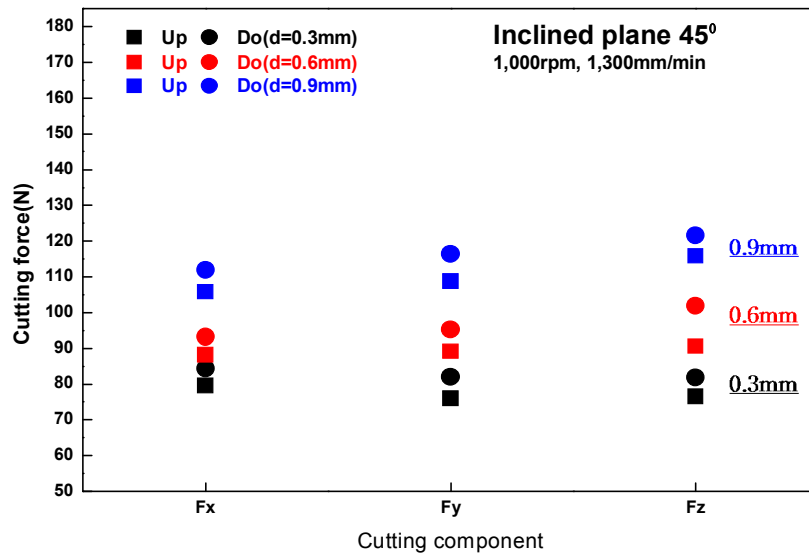


Fig. 5.3 Cutting forces according to depth of cut(Inclined plane 45°)

#### 5.1.4 곡면 내·외면 재료의 절삭 깊이에 따른 절삭력 고찰

Fig. 5.4는  $\Phi 60$ 곡면 내·외면 재료를 AlTiN 3층으로 주축회전수 10,000 rpm, 공구이송속도 1,300mm/min, 절삭깊이 0.3mm~0.9mm 가공조건에서 AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀을 사용, 절삭깊이 변화에 따른 상·하 방향의 절삭 3분력을 나타낸 결과이다. 곡면가공의 특징은 볼 엔드밀의 특정부분에서 가공이 이루어지지 않고 상 방향에서는 공구의 측면에서 가공이 시작되어 "chisel"부분으로 이동하면서 가공이 이루어지고, 하 방향 가공에서는 "chisel"부분에서 가공이 시작되어 측면부분으로 이동하면서 가공이 진행되는 특징을 가지고 있다.

절삭깊이 0.3mm조건의 곡면 내면 재료에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 87.69N, 77.36N, 88.91N이며, 하 방향에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 89.99N, 86.18N, 92.4N으로 나타났다. 곡면 외면 재료에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 71.52N, 71.44N, 74.75N, 하 방향 조건에서는  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 77.46N, 76.7N, 76.19N으로 나타났다. 곡면 내·외면의 절삭분력 차는 약 10N 정도 차를 보였으며, 특히 곡면 내면 가공에서  $F_x$  분력과  $F_z$  분력이 높게 나타났다. 이와 같은 이유는 절삭가공시 발생하는 칩이 곡면 외면가공에 비해 정상적으로 칩을 배출하지 못하여 공구의 진행이 원활하지 못하면서 미끄러지듯 가공이 되는 스미어링(Smearins)현상으로 인한 재료와 공구와 마찰증가로 인해 공구의 진행이 원활하지 못한 결과로 판단된다.

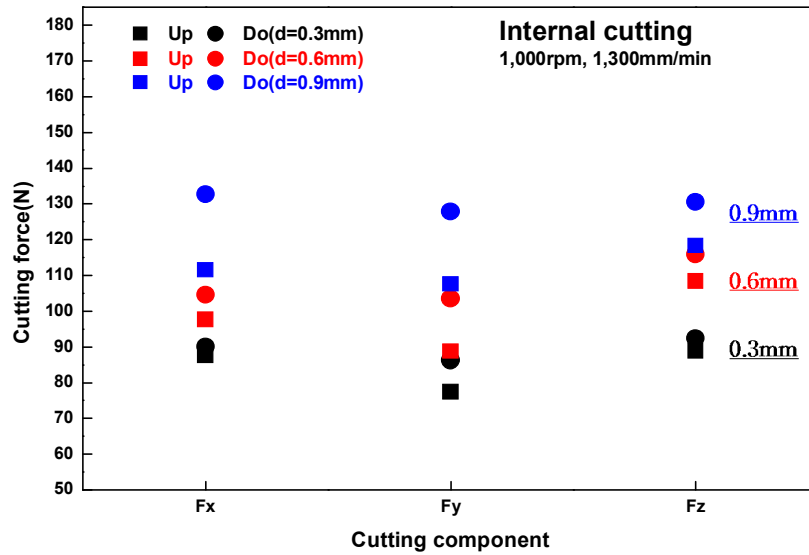
절삭깊이 0.6mm의 곡면 내면재료에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 97.64N, 88.83N, 108.36N이며, 하 방향에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 104.54N, 112.2N, 115.86N으로 나타났다. 곡면 외면 재료에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 76.01N, 74.83N, 77.67N, 하 방향에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 87.52N, 88.62N, 90.38N으로 나타났다. 곡면 내·외면의 절삭분력 차는 약 12N 정도 차를 보였으며, 특히 곡면 내면 가공에서  $F_z$  분력이 높게 나타났다. 절삭깊이가 깊어지면서 -Z 방향으로 힘을 크게 받는 것으로 판단된

다.

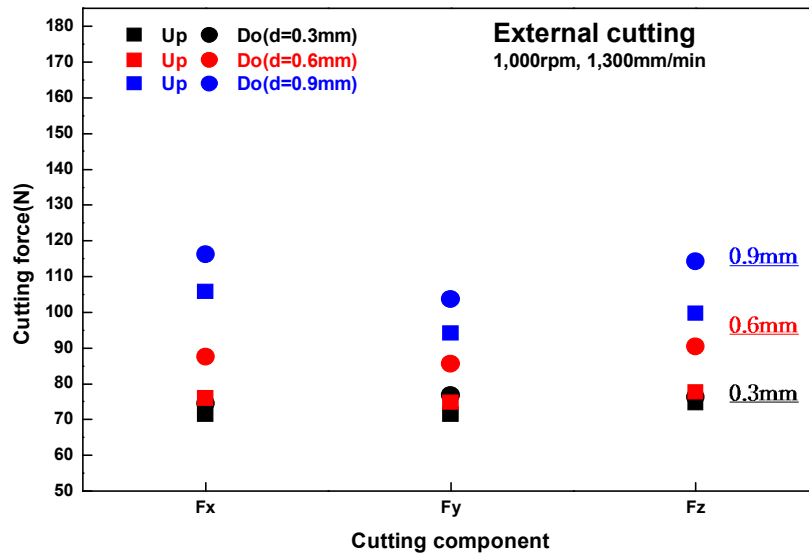
절삭깊이 0.9mm의 조건의 곡면 내면 재료에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 111.51N, 107.64N, 118.33N이며, 하 방향에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 132.6N, 127.78N, 130.57N으로 나타났다. 곡면 외면 재료에서는 상 방향 조건에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 105.82N, 99.68N, 94.19N 하 방향에서  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 분은 각각 116.2N, 103.56N, 114.19N으로 나타났다.

절삭깊이 0.9mm 조건에서는 상·하 방향의 분력차이가 약 15N 이상 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 곡면 내면재료 조건에서는 상·하 방향의 절삭분력이 크게 증가한 이유는 가공시 공구마찰로 인한 공구 진행과 함께 하 방향 가공의 특징인 Over cut이 복합적으로 작용하여 절삭분력이 크게 나타난 것으로 판단되고, 곡면가공의 특성상 -X 방향의 이동과 함께 -Z 방향의 이동 범위가 크기 때문에  $F_x$ 분력 및  $F_z$ 분력이 경사진 재료와 비교해 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 절삭깊이 0.9mm의 곡면 외면 가공에서도  $F_x$  와  $F_z$  분력이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 결과는 절삭깊이가 증가 하면서 곡면가공 내·외면 구분 없이 -X 방향 및 -Z 방향으로 큰 힘을 받는 것을 알 수 있다.

곡면재료의 가공은 내면재료에서 칩 배출이 원활하게 이루어지지 못하는 관계로 미끄러지듯 가공이 되는 스미어링(Smearins)현상이 발생, 외면 재료보다 절삭분력이 높게 나타났으며, 절삭깊이 0.6mm의 이상 조건에서는 내·외면 구분 없이 절삭분력이 높게 나타났다. 이와 같은 결과를 보았을 때 곡면 재료의 가공시 절삭깊이를 0.6mm 이하로 조건을 주고, 외면 가공 보다 내면 절삭가공에서는 공구이송속도를 느리게 조건을 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다.



(a) Internal cutting



(b) External cutting

Fig. 5.4 Cutting forces according to depth of cut  
( $\varnothing$  60mm circular material)

## 5.2 AlTiN코팅공구 층수에 따른 절삭력 분석

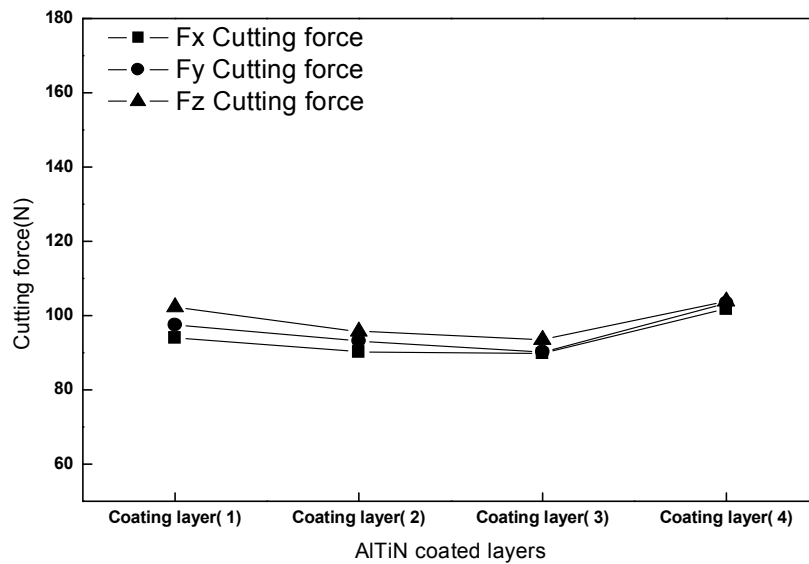
Fig. 5.5의 (a)~(d)는 초경 볼 엔드밀에 AlTiN을 1층, 2층, 3층, 4층 코팅하여 경사 재료의 주축회전수 10,000rpm, 공구이송속도 1,300mm/min 가공조건에서 코팅층수에 따른 절삭 3분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )을 나타낸 것이다.

Fig. 5.5의 (a)와 같이 절삭깊이 0.3mm, 15°경사 재료의 상 방향 가공조건에서는 AlTiN을 1~4층 코팅한 공구 중 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀에서 절삭 3분력이 가장 적은 값을 보였다. 평균 1층, 2층의 절삭분력 차이는 약 4N의 차이를 보였으며, 2층과 3층의 절삭분력 차이는 약 3N, 3층, 4층의 분력 차이는 6N이상 차를 보였다. Fig. 5.5의 (b)는 절삭깊이 0.3mm, 15° 경사 재료 하 방향 가공 조건에서 AlTiN코팅 층수에 따른 절삭분력을 나타낸 것이다. 평균 1층과 2층의 절삭분력차이는 약 8N의 차이를 보였으며, 2층과 3층의 절삭분력 차이는 약 5N, 3층, 4층의 분력차이는 9N이상 차이를 보여, 하 방향 가공에 따른 Over cut 영향으로 상 방향 가공보다 층수에 따른 차이가 크게 나타났다.

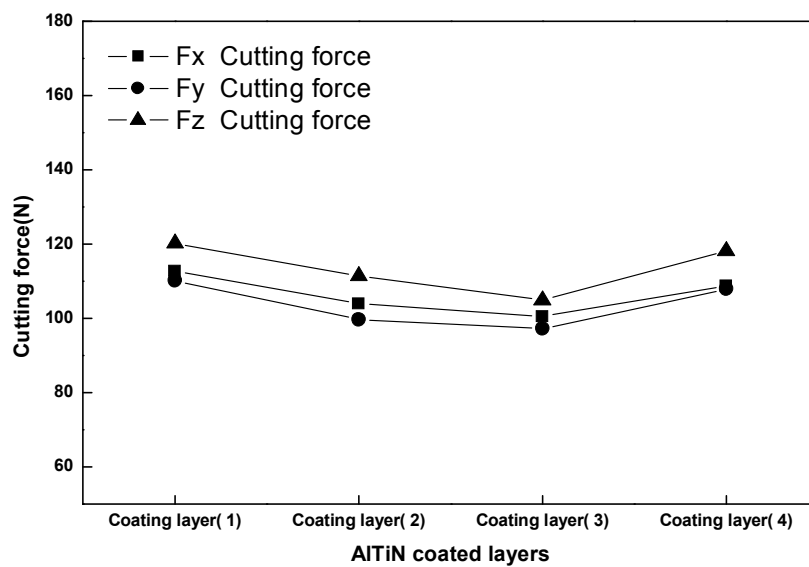
Fig. 5.5의 (c)는 재료의 경사각과 절삭깊이 증가에 따른 AlTiN코팅 층수의 절삭분력 차이를 알아보기 위한 것으로 주축회전수 및 공구이송속도는 Fig. 5.5의 (a)와 동일하고, 재료의 경사각 45°, 절삭깊이 0.9mm로 증가한 조건이다. 평균 1층과 2층의 절삭분력차는 약 4N의 차이를 보였으며, 2층과 3층의 절삭분력 차이는 약 3N, 3층, 4층의 분력차이는 7N이상 차를 보였으며, 경사각과 절삭깊이 증가에 따른 절삭분력 차이는 확인할 수 있으나, AlTiN층수에 따른 절삭분력 차이는 절삭깊이 0.3mm의 조건과 비슷한 결과를 보였다. Fig. 5.5의 (d)의 하 방향 조건에서는 평균 1층과 2층의 절삭분력차는 약 5N의 차이를 보였으며, 2층과 3층의 절삭분력 차이는 약 4N, 3층, 4층의 분력차이는 4N이상 차를 보였으며, 절삭깊이 증가에 따른 마찰증가로 층수에 따른 절삭분력차가 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

경사진 재료의 모든 가공 조건에서 AlTiN코팅 층수에 따른 절삭분력은 3층으로 코팅한 조건에서 가장 안정적인 절삭분력 값을 보여 주었으며, 다른 층수의 코팅조건에 비해 3층, 4층의 조건에서 절삭분력 차가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과는 가공 실험전 실시한 AlTiN코팅 표면의 경도 및 공구 표면거칠기(AFM) 등의 실험에서 나타난 결과가 절삭가공 실험에서 나타난 것임을 알 수 있다. 절삭가공시간이 적기 때문에 공구마모에 의한 결과 보다는 AlTiN코팅에 따른 초경 볼 엔드밀의 표면거칠기에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. AlTiN을 1층, 2층, 3층으로 코팅 층이 올라가면서 공구표면 요철(凹凸)을 점증적으로 평탄화시켜 표면거칠기가 양호해져 가공시 발생하는 마찰저항이 적어져 절삭분력이 낮게 나타났으며, AlTiN 4층 코팅에서는 코팅 균질성이 파괴되어 공구표면 거칠기 저하로 인한 급격한 가공마찰이 증가되어 나타난 결과로 절삭분력이 높게 나타난 것으로 판단된다.

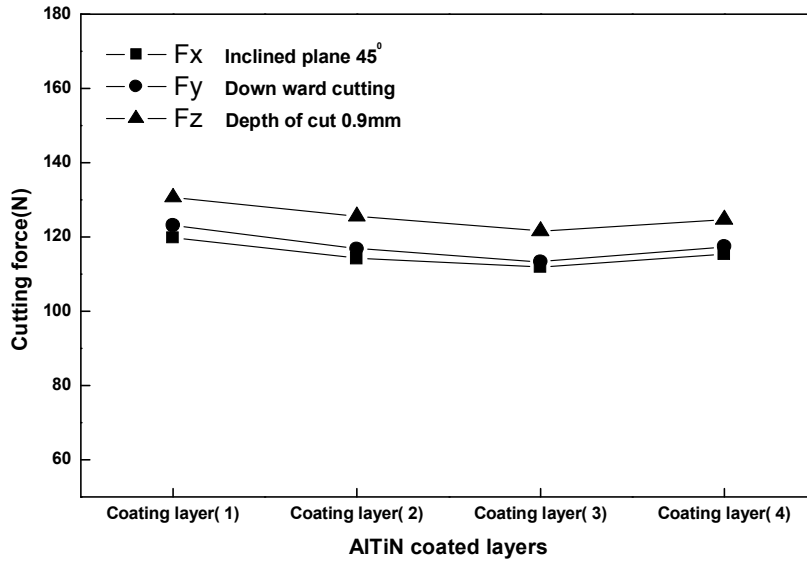




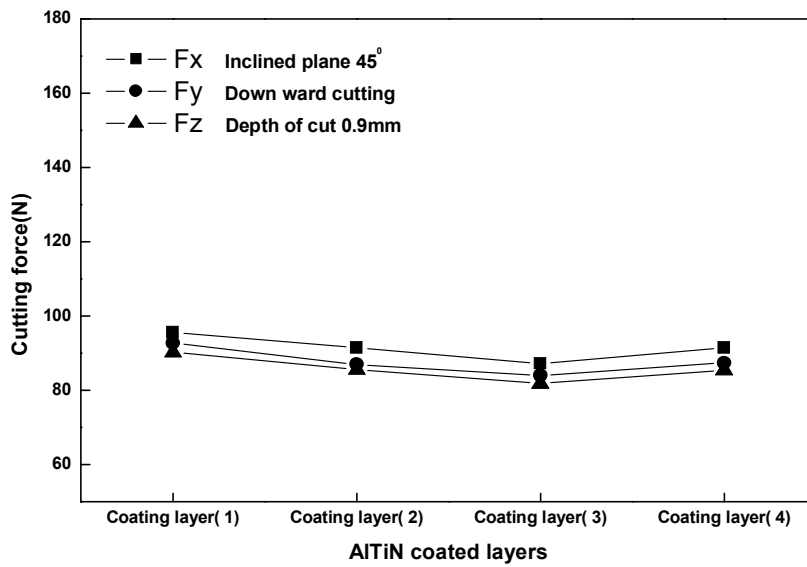
(a) Up ward cutting( $d=0.3\text{mm}$ , Inclined plane  $15^\circ$ )



(b) Down ward cutting( $d=0.3\text{mm}$ , Inclined plane  $15^\circ$ )



(c) Up ward cutting(d=0.9mm, Inclined plane 45°)



(d) Down ward cutting(d=0.9mm, Inclined plane 45°)

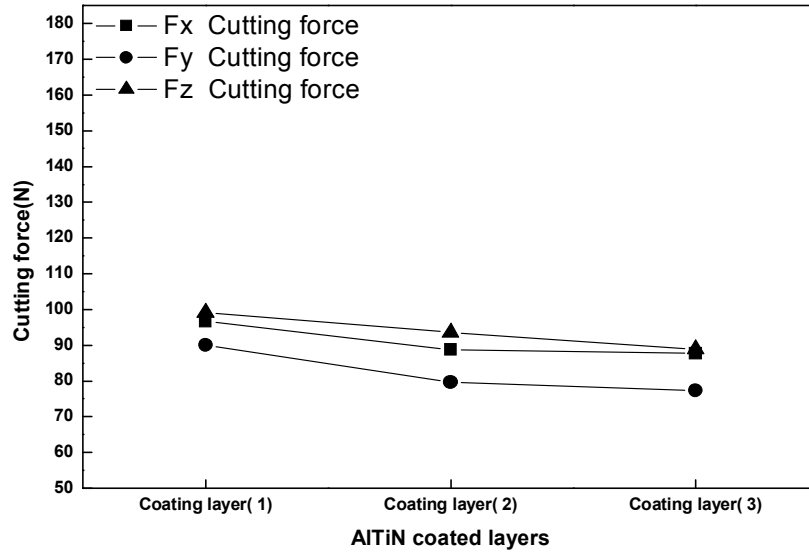
Fig. 5.5 Cutting forces according to AITiN coating layer  
(Inclined material)

곡면 내·외면의 AlTiN코팅 층수에 따른 절삭가공실험(External cutting · Internal cutting)은 경사 재료의 가공에서 높은 절삭력과 비정상적인 값을 보였던 AlTiN코팅 4층을 제외한 1층~3층까지 AlTiN을 코팅하여 실험을 실시하였다.

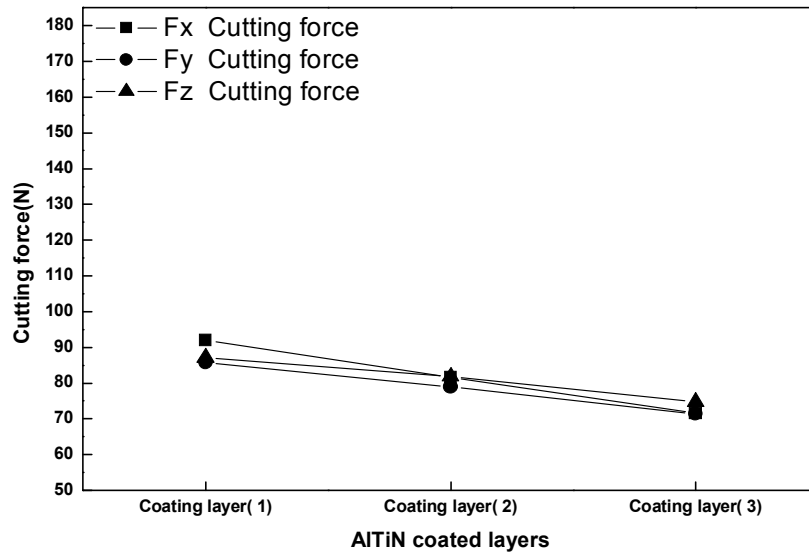
Fig. 5.6의 (a)와 같이 절삭깊이 0.3mm 조건의 곡면의 내면가공에서는 평균 1층과 2층의 절삭분력차는 약 8N의 차이를 보였고, 2층, 3층의 절삭분력 차이는 약3N 차이를 보이며, AlTiN을 3층 코팅한 절삭 3분력이 가장 안정적인 값을 보였다. Fig. 5.6의 (b)와 같이 절삭깊이 0.3mm 조건의 곡면의 외면 가공에서는 내면가공과 비슷한 차이를 보였다.

Fig. 5.6의 (c)와 (d)같이 절삭깊이가 0.9mm로 증가하여도 AlTiN층수에 따른 절삭분력차는 절삭깊이 0.3mm의 조건과 비슷한 수치의 결과 값을 보였으며, AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀에서 절삭분력은 가장 낮게 나타났다. 이와 같은 결과를 보았을 때 재료의 가공형상 조건이 직선의 형태나 곡면 형태 등 재료형상에 따른 절삭분력 차이는 있어도 AlTiN층수에 따른 절삭분력 차이는 나타나지 않는 것을 알 수 있으며, 가공실험 결과 짧은 가공의 조건에서는 코팅공구의 표면 품위가 절삭분력에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

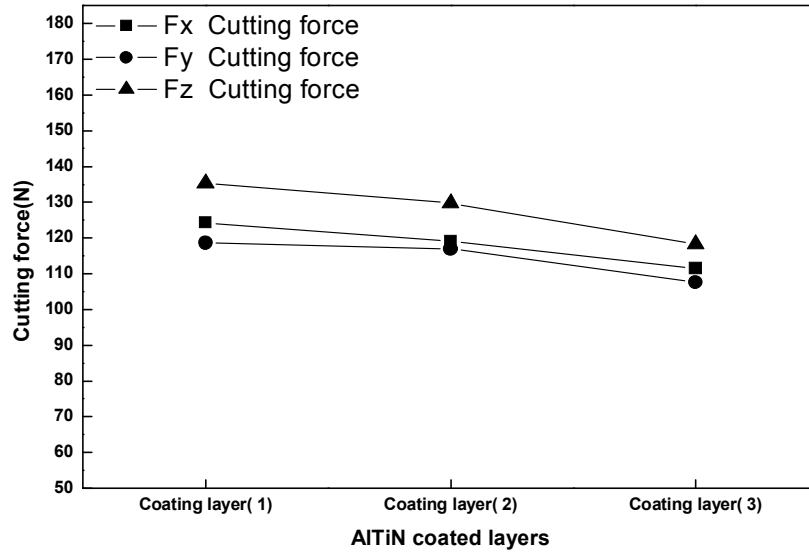
부록 편에 AlTiN코팅 층수에 따른 경사 재료 및 곡면재료의 절삭분력 값을 나타내었다.



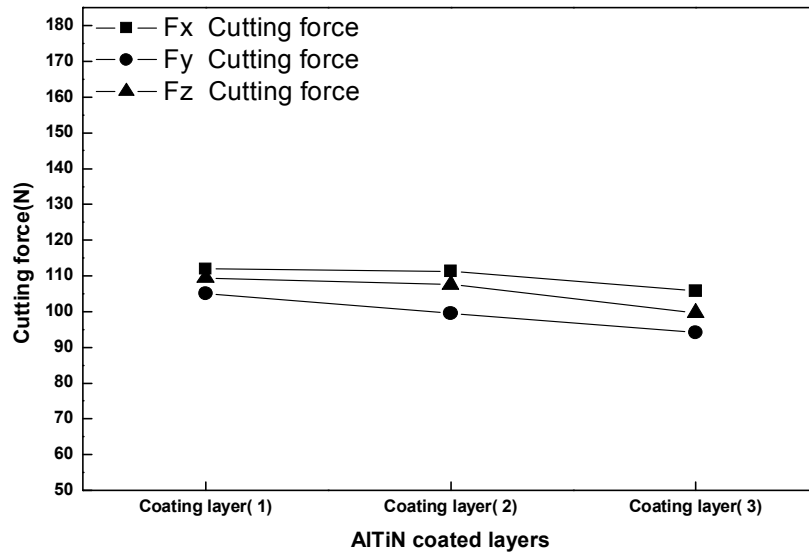
(a) Upward cutting(Internal, d=0.3mm)



(b) Upward cutting(External, d=0.3mm)



(c) Upward cutting(Internal, d=0.9mm)



(d) Upward cutting(External, d=0.9mm)

Fig. 5.6 Cutting forces according to AITiN coating layer  
( $\varnothing$  60mm circular material)

### 5.3 표면거칠기에 대한 분석

금형가공에 있어 가공정밀도나 표면조도는 사용한 공작기계의 종류에 따라 형태가 달라지며, 같은 공작기계를 사용했을 경우에도 기계의 마모, 절삭공구의 조건, 표면성분, 절삭방법, 작업자의 습관, 환경조건 등에 따라 달라지나 최종적으로는 공구와 가공물과의 상대운동을 거쳐 절삭가공이 이루어지고 그 결과로 가공물의 형상과 면이 이루어진다고 볼 수 있다. 본 실험에서 사용한 표면조도 측정기는 축침식 측정기로 Measuring Range는 12mm이고 cut off 0.8mm 이다.

실험에 사용한 가공소재의 형상이 경사면과 곡면의 형태를 가지고 있어 정확한 측정을 위해 Photo. 5.1과 같이 조도측정기 석정반위에 -X, -Y Stage 및 Rotary Stage를 설치하고 Stage위에 각도를 조절할 수 있는 Angle Plate 설치·고정하여 경사진 가공물과 곡면형태 가공물의 표면거칠기를 측정하였다.

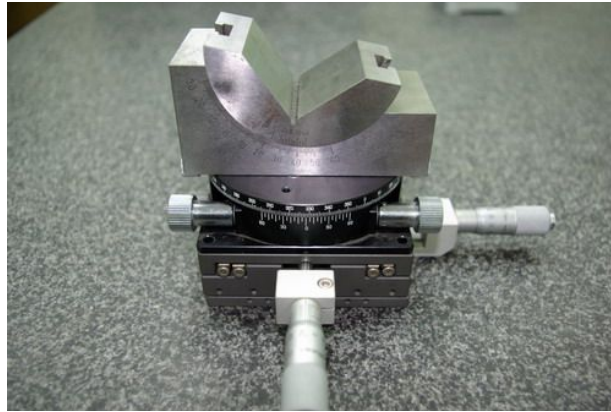


Photo. 5.1 Auxiliary instruments for the measurement of surface roughness (Angle Plate, -X, -Y Stage, Rotary Stage)

### 5.3.1 재료형상에 따른 표면거칠기 고찰

Fig. 5.7은 경사재료(15°, 30°, 45°)조건에서 주축회전수 10,000rpm~16,000 rpm, 공구이송속도 1,300mm/min~1,700mm/min, 절삭깊이 0.3mm~0.9mm조건으로 AlTiN코팅 3층 공구를 사용, 절삭깊이 조건에 따른 상·하 방향의 표면거칠기를 나타낸 것이다. 실험의 모든 조건에서 상 방향 보다 하 방향에서 표면거칠기는 높게 나타났으며, 경사각도가 클수록 표면거칠기는 낮게 나타났다.

15° 경사 재료에서는 Fig. 5.7과 같이 절삭깊이 0.3mm 조건에서는 주축회전수 13,000 rpm 공구이송속도 1,300mm/min 상 방향 가공 조건에서 가장 양호한  $Ra$  0.635 $\mu$ m, 하 방향에서는  $Ra$  0.742 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.1 $\mu$ m 차를 보였다. 절삭깊이별로는 0.3mm, 0.6mm조건에서는 약  $Ra$  0.3 $\mu$ m의 차를 보였으며, 0.6mm, 0.9mm조건은 약  $Ra$  0.1 $\mu$ m 차이로 깊이가 깊어질수록 차이가 줄어들었다. 절삭깊이 0.6mm 조건부터는 공구중심 "chisel" 부를 접촉하면서 가공되는 관계로 표면조도가 극히 저하된 것을 확인 할 수 있다.

30°경사 재료는 절삭깊이 0.3mm 조건에서 주축회전수 13,000rpm, 공구이송속도 1,500mm/min조건에서 상·하 방향 각각  $Ra$  0.41 $\mu$ m, 0.49 $\mu$ m 측정되었으며, 절삭깊이 0.6mm의 조건에서는 상·하 방향 각각 0.52 $\mu$ m, 0.56 $\mu$ m으로 약 0.04 $\mu$ m의 차이를 보였으며, 절삭깊이 0.9mm의 조건에서는 상·하 방향 각각 0.91 $\mu$ m, 1.03 $\mu$ m으로  $Ra$  약 0.12 $\mu$ m의 차이를 보였다.

45°경사 재료에서는 주축회전수 10,000rpm, 공구이송속도 1,500mm/min조건에서 상·하 방향 가장 양호한  $Ra$  0.36 $\mu$ m, 0.403 $\mu$ m를 보여 경사재료 조건 중 가장 좋은 결과를 보였으며, 절삭깊이가 0.9mm로 증가하면서 경사각도 모든 조건에서 표면거칠기 값이 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 깊이가 증가하면서 가공마찰 증가, 피삭재 표면거칠기에 악 영향을 미친 것으로 판단된다.

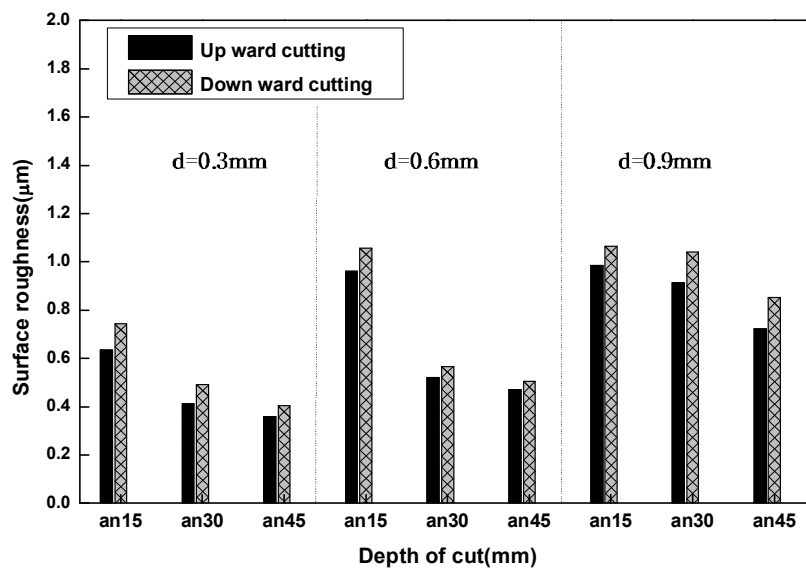


Fig. 5.7 Results of surface roughness according to depth of cut  
(Inclined material)



Fig. 5.8은  $\phi 60$  곡면 내·외면 재료 조건에서 주축회전수 10,000rpm~16,000rpm, 공구이송속도 1,300mm/min~1,700mm/min, 절삭깊이 0.3mm~0.9mm조건으로 AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀 공구를 사용, 절삭깊이 조건에 따른 양호한 상·하 방향의 표면거칠기를 나타낸 것이다. 실험의 모든 조건에서 상 방향 보다 하 방향 조건에서 표면거칠기는 높게 나타났으며, 내면보다 외면에서 낮은 결과를 보였다.

절삭깊이 0.3mm 곡면 내면가공의 조건에서는 주축회전수 10,000rpm 공구이송속도 1,300mm/min 상 방향 가공 조건에서 가장 양호한  $Ra$  0.72 $\mu$ m를 보였으며, 하 방향에서는  $Ra$  0.83 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.1 $\mu$ m 차를 보였고, 절삭깊이 0.6mm 조건에서는 주축회전수 10,000rpm 공구이송속도 1,300mm/min 상 방향에서  $Ra$  0.905 $\mu$ m, 하 방향에서는  $Ra$  1.04 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.1 $\mu$ m 차를 보였다. 절삭깊이 0.9mm 조건에서는 상 방향에서  $Ra$  1.13 $\mu$ m, 하 방향에서는  $Ra$  1.54 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.4 $\mu$ m 차를 보이며 표면거칠기가 급격히 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 결과는 Over cut으로 인한 절삭깊이가 깊은 하 방향 조건에서 공구의 진행이 정상적이지 못한 결과로 판단된다.

절삭 깊이별로는 0.3mm, 0.6mm조건에서는 약  $Ra$  0.2 $\mu$ m의 차를 보였으며, 0.6mm, 0.9mm조건은 약  $Ra$  0.23 $\mu$ m 차이로 깊이가 깊어질수록 차가 늘어났다. 절삭깊이 0.6mm 조건부터는 표면거칠기가 극히 저하된 것을 알 수 있고, 또한 절삭깊이 0.9mm의 조건과 큰 차이를 보이지 않았다.

절삭깊이 0.3mm 곡면 외면가공의 조건에서는 주축회전수 13,000rpm 공구이송속도 1,300mm/min 상 방향 가공 조건에서 가장 낮은  $Ra$  0.58 $\mu$ m, 하 방향에서는  $Ra$  0.65 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.07 $\mu$ m 차를 보였으며, 절삭깊이 0.6mm 조건에서는 주축회전수 10,000 rpm 공구이송속도 1,300mm/min 상 방향에서  $Ra$  0.81 $\mu$ m, 하 방향에서는  $Ra$  0.83 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.02 $\mu$ m 차를 보였고, 절삭깊이 0.9mm 조건에서 상 방향에서  $Ra$  1.037 $\mu$ m, 하 방향에서는  $Ra$  1.215 $\mu$ m로 약  $Ra$  0.17 $\mu$ m 차를 보였으며 곡면 내·외면 가공조건에서는 공구이송속도가 적은 조건에서 낮은 결과를 보였다.

경사재료 및 곡면 재료의 절삭력 결과와 비교했을 때 곡면 가공에서 표면 거칠기가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과는 곡면재료 가공특성과 관계가 있다. 공구 중심 인선부터 측면인선까지 이동하면서 가공이 진행되는 관계로 -Z 방향의 이동 변위가 크기 때문이다. 이와 같은 결과를 보았을 때 곡면가공의 공구이송속도가 빠른 조건에서는 공구의 중심 변위가 움직일 수 있으며, 곡면재료 내·외면 재료의 좋은 표면품위를 위해서는 직선가공과 비교해 공구이송속도를 적게 주어 가공 하는 것이 좋은 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

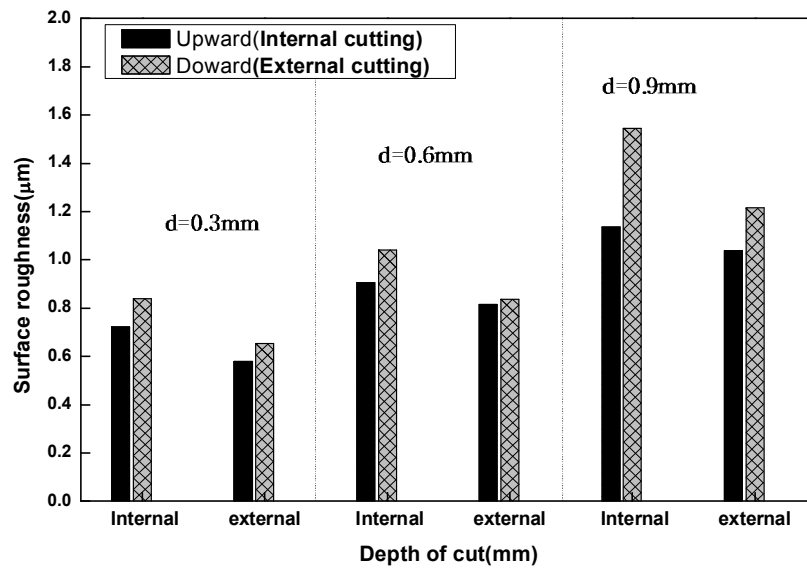


Fig. 5.8 Results of surface roughness according to depth of cut  
( $\Phi$  60mm circular material)

### 5.3.2 AlTiN코팅공구 층수에 따른 표면거칠기 고찰

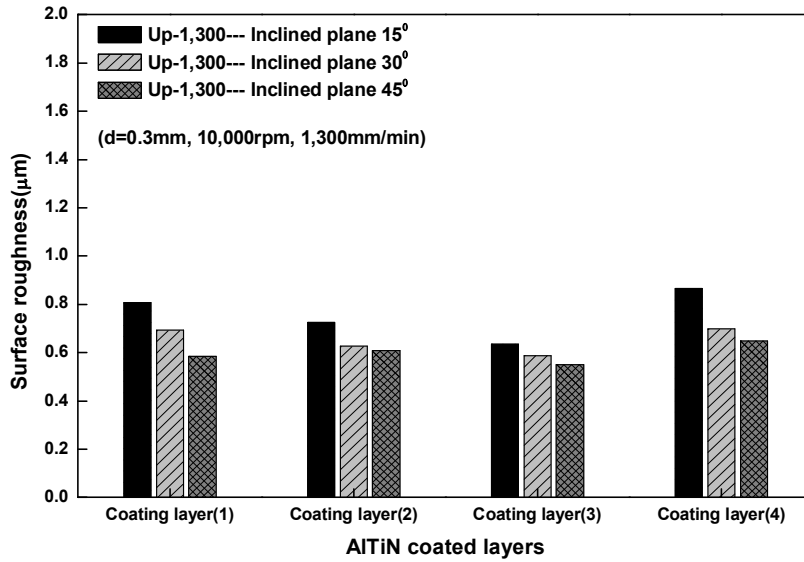
Fig. 5.9는 AlTiN코팅 층수에 따른 표면거칠기를 알아보기 위해 주축회전수 10,000rpm, 공구이송속도 1,300mm/min, 절삭깊이 0.3mm, 0.9mm 가공조건에서 경사진 재료의 상 방향 표면거칠기를 나타낸 것이다.

Fig. 5.9의 (a)와 같이 절삭깊이 0.3mm, 15°경사진 재료의 조건에서는 상 방향 가공조건에서 층별 0.8 $\mu$ m, 0.72 $\mu$ m, 0.63 $\mu$ m, 0.86 $\mu$ m 표면거칠기를 보였다. 코팅 층별 약 0.08 $\mu$ m 차이를 보였으며, 3층과 4층의 조건에서는 약 0.1 $\mu$ m 표면거칠기 차이를 보이고, AlTiN을 3층으로 코팅한 공구에서 가장 낮은 결과를 보였으며, 30°, 45°경사 재료에 비해 표면거칠기 값이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과는 15°경사 재료의 상 방향 가공에서 공구중심부 “chisel”부와 직접 접촉은 없어도 근거리에서 가공이 진행 되면서 -Z 방향으로 큰 힘을 받아 표면에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 AlTiN을 4층으로 코팅한 표면거칠기가 크게 증가 한 것을 확인 할 수 있다. 공구표면이 균질하지 못한 관계로 가공된 피삭재 표면에 영향을 준 것이기 때문이다.

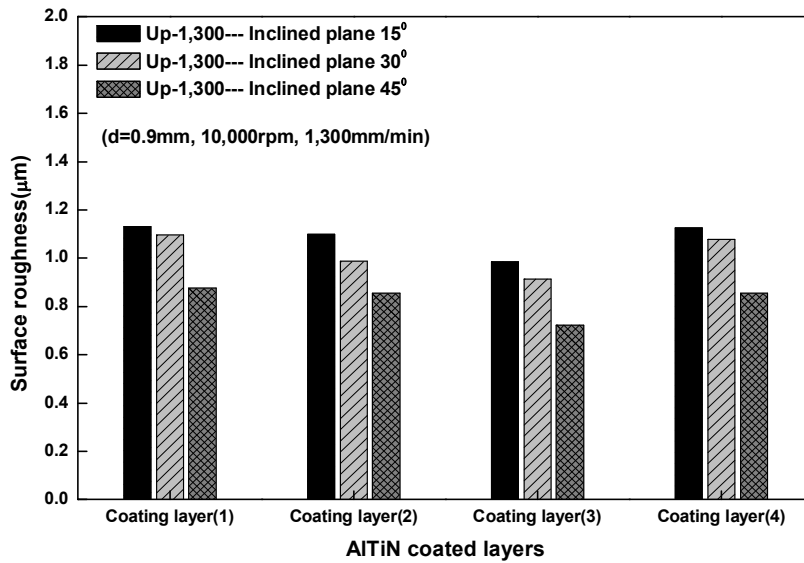
30°경사 재료의 조건에서는 상 방향 가공조건에서 층별 0.69 $\mu$ m, 0.62 $\mu$ m, 0.58 $\mu$ m, 0.69 $\mu$ m 표면거칠기 결과를 보였다. 코팅 층수별 약 0.06 $\mu$ m 차이를 보였으며, 3층과 4층의 조건에서는 약 0.09 $\mu$ m 표면거칠기 차이를 보였다.

45°경사 재료의 조건에서는 상 방향 가공조건에서 층수별 0.58 $\mu$ m, 0.6 $\mu$ m, 0.55 $\mu$ m, 0.64 $\mu$ m 표면거칠기를 보였다. 코팅 층수별 약 0.04 $\mu$ m 차이를 보였으며, 3층과 4층의 조건에서는 이보다 더 큰 차이를 보였다. AlTiN을 4층으로 코팅한 모든 조건에서 표면거칠기가 크게 나타났으며, 3층에서 가장 적은 값을 보여주었다.

Fig. 5.9의 (b)와 같이 절삭깊이 0.9mm의 조건에서는 15°, 30°경사 재료와 45°경사 재료와의 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 절삭깊이 증가로 인한 결과로 깊이가 깊어지면서 불 엔드밀 구 중심부분에서 가공이 진행되는 15°, 30° 조건에서는 Fz 분력이 증가한 결과로 -Z 방향의 힘의 크기가 표면거칠기에 영향을 미친 것으로 판단된다.



(a) Depth of cut 0.3mm



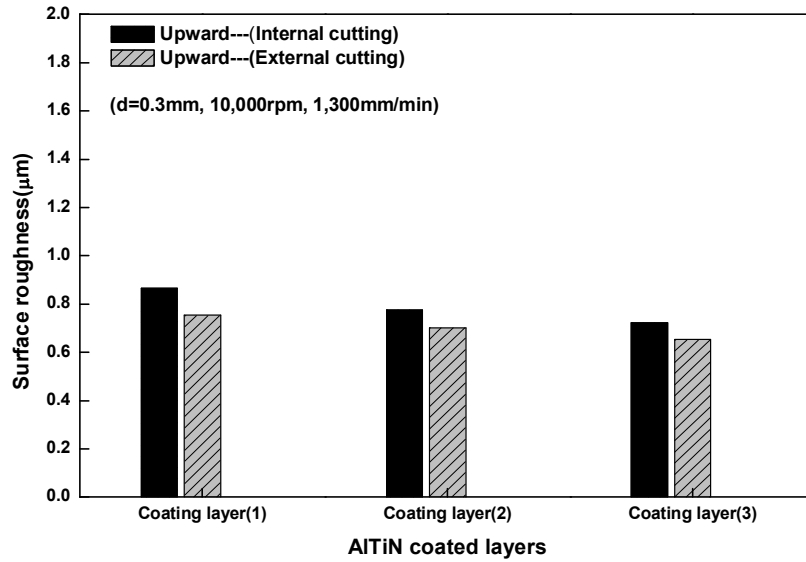
(b) Depth of cut 0.9mm

Fig. 5.9 Results of surface roughness according to AITiN coating layer  
(Inclined material)

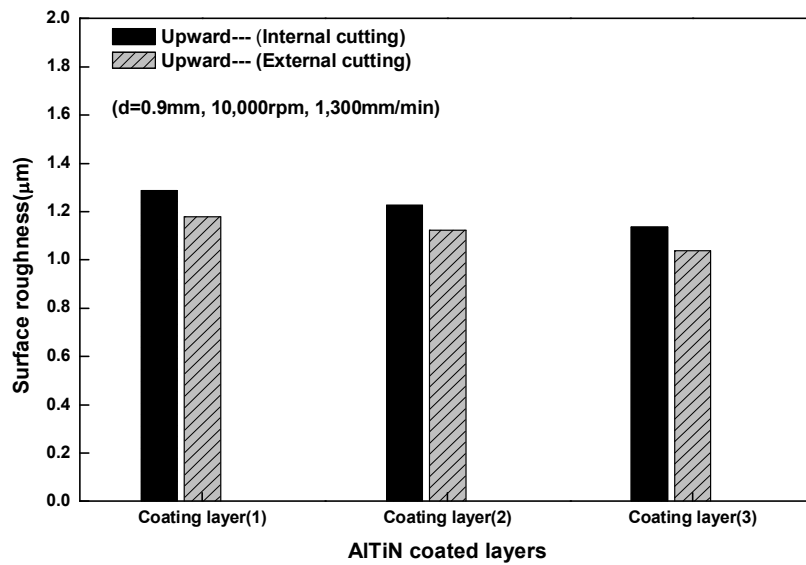
Fig. 5.10은 AlTiN코팅 층수에 따른 주축회전수 10,000rpm, 공구이송속도 1,300mm/min의 상 방향 가공조건에서 곡면재료의 표면거칠기를 나타낸 것이다. Fig. 5.10의 (a)와 같이 절삭깊이 0.3mm 조건에서, 곡면 내면재료는 층별 0.86 $\mu$ m, 0.77 $\mu$ m, 0.72 $\mu$ m, 표면거칠기를 결과를 보였으며, 코팅 층별 약 0.08 $\mu$ m 차이를 보였다. 곡면 외면재료의 조건에서는 층별 0.78 $\mu$ m, 0.7 $\mu$ m, 0.65 $\mu$ m의 표면거칠기를 나타냈고, 코팅층별 약 0.06 $\mu$ m 차이를 보였다. 내·외면의 절삭분력 차가 약 0.1 $\mu$ m 정도 차이를 보였다.

Fig. 5.10의 (b)와 같이 절삭깊이 0.9mm 조건에서는 곡면의 내·외면 층별 각각 1.28 $\mu$ m, 1.22 $\mu$ m, 1.13 $\mu$ m와 외면 1.17 $\mu$ m, 1.12 $\mu$ m, 1.03 $\mu$ m 표면거칠기를 보였으며, 내·외면의 절삭분력 차가 약 0.1 $\mu$ m 차이로 절삭깊이 0.3mm 조건 보다 차이가 적어지는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 결과는 절삭깊이가 증가하면서 Fx 및 Fz 가공마찰 증가에 따른 결과로 판단된다.

부록 편에 AlTiN코팅 층수에 따른 경사재료 및 곡면재료의 표면거칠기 결과를 나타내었다.



(a) Depth of cut 0.3mm



(b) Depth of cut 0.9mm

Fig. 5.10 Results of surface roughness according to AlTiN coating layer  
( $\Phi$  60mm circular material)

## 5.4 AlTiN코팅 공구의 마모특성

금형재료는 내마모성, 내충격성, 내열성이 좋아야 하며 재료 표면경도가 큰 재료가 많기 때문에 공구수명이 금형제작 금액에 경제적으로 큰 영향을 차지한다. 이와 같은 이유로 금형의 고속가공시 공구수명을 연장시킨 것이 무엇보다도 중요하다. 또한 재료의 열처리 전 1차 황삭 가공에서는 공구수명 한계가 와도 교환에 있어 큰 문제가 발생되지 않지만 2차 정삭가공에서는 공구교환을 하면 공구마모로 인한 단차가 발생, 제품표면 정밀도 및 표면손상으로 인한 3차 사상가공인 랩핑(lapping)공정에서 가공시간 지연 또는 치수불량으로 인한 금형 자체를 사용 못하게 되는 경우가 발생 할 수도 있다. 또한 현재 금형가공 산업은 고속가공에서 적은양의 절삭깊이로 빠른 이송속도를 지향하는 관계로 공구수명이 점점 중요해 지고 있다.

일반적으로 코팅공구의 마모과정은 3가지 상태를 가진다. 초기마모는 코팅층에 영향을 미치며, 두 번째는 절삭거리가 증가함 따라 안정적인 마모가 진행되고, 코팅층이 마모된 부분부터는 절삭열로 인한 마모속도가 빨라지며, 피삭재와 화학적 반응으로 낮은 내마모성을 가지기 때문에 이 부분에서 미소한 칩핑이 나타난다. 또한 공구수명은 실제 가공된 제품의 표면 거칠기에 의해서 판단할 수 있지만 공구선단의 마모량 및 상태에 의해 결정하는 것이 일반적이다.<sup>41)</sup>

본 실험에서 공구의 마모시험은 경사 재료와 곡면 내·외 가공에서 절삭분력과 양호한 표면거칠기를 보였던 조건을 선정하여 마모실험을 하였으며, 건식가공하여 플랭크마모량  $V_B$  가 0.3mm될 때 까지 가공, 코팅공구의 마모형태와 공구수명 변화를 알아보았다. 공구의 마모량 측정은 공구현미경을 이용하였고, 측정배율은 대물렌즈 10X, 20X 측정조건시 자기렌즈(Magnetic lens) 배율이 각각 229.8X, 461.3X배 세팅하여 측정 하였다. 플랭크마모량의 측정은 실험조건별로 경사재료(15°, 30°, 45°)조건에서는 측정시 Angle Plate를 이용하여 상 방향 가공시 공구 접촉호 중심각도에서 마모량을 측정하였다. 곡면



가공에서는 Photo. 5.2와 같이 -X, -Y Stage 및 Rotary Stage위에 소형 척을 이용하여 공구를 고정 “Chisel” 부분의 마모량을 측정하였고, 측면 절삭날의 측정은 공구의 45°되는 부분에서 플랭크마모량을 측정하였다. 측정조건은 절삭분력과 재료의 표면거칠기 값이 양호한 조건을 Table 5.1과 같이 선정 상방향(Up ward) 전식 가공했을 때 시간의 경과에 따른 공구의 플랭크마모량을 알아보았다.

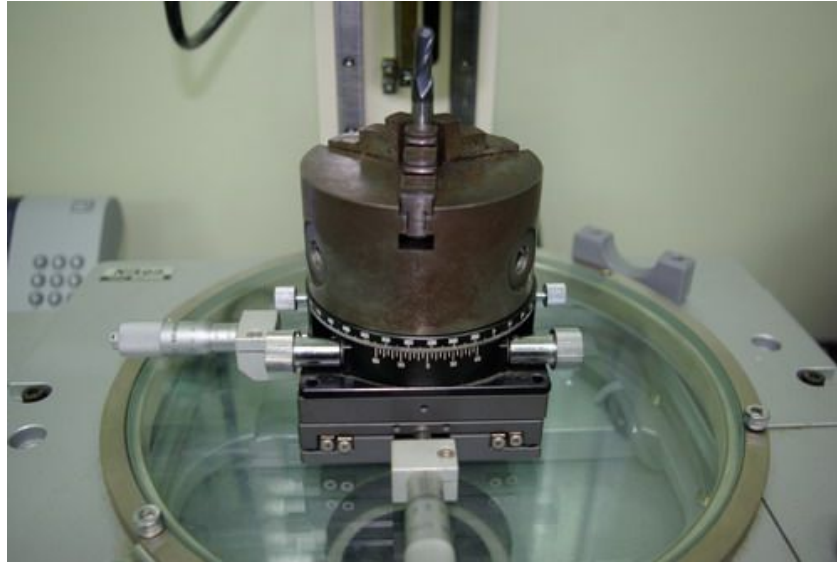


Photo. 5.2 Auxiliary instruments for the measurement of tool wear

Table 5.1 Experimental conditions of wear test

Plane	Spindle speed N rpm	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)	Pick feed (mm)
15°	13,000rpm	0.3mm	1,300mm/min	0.3mm
30°	13,000rpm		1,500mm/min	
45°	10,000rpm		1,500mm/min	
Φ 60mm (internal)	10,000rpm		1,300mm/min	
Φ 60mm (external)	13,000rpm		1,300mm/min	

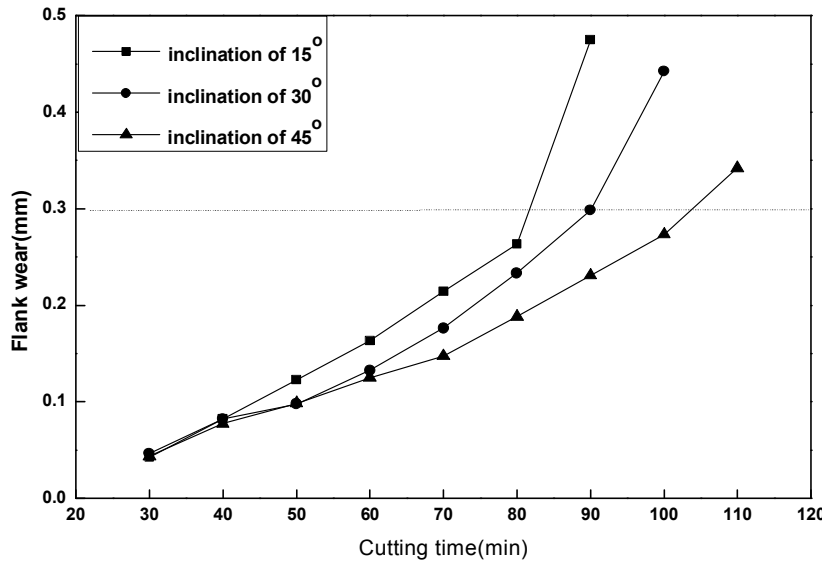
#### 5.4.1 재료형상에 따른 AlTiN공구의 마모특성

Fig. 5.11의 (a)는 AlTiN을 3층으로 코팅한 초경 볼 엔드밀을 이용하여 경사(15°, 30°, 45°)재료에 있어 Table 5.1과 같이 조건을 선별, 상 방향으로 건식 가공했을 때 시간의 경과에 따른 공구의 플랭크마모량을 나타낸 것이다. 모든 조건에서 가공시간 60분 이상씩 가공하여도 공구의 플랭크마모량  $V_B$ 는 0.3mm를 넘지 않았으며, 가공시간 40분까지는 공구의 마모속도가 정상적인 마모량을 보였다. 40분을 경과하면서 재료 형상조건에 따라 마모량의 차이를 보였으며, 15°경사진 재료에서는 가공시간 40분 이후부터 공구의 마모량이 증가 하여 80분을 경과하면서 부터는 마모량이 급격히 올라가는 것을 알 수 있다. 이 구간부터 공구의 미소치핑이 발생한 것으로 판단된다. 경사 재료의 마모조건 중 45°경사진 재료에서 가장 양호한 결과를 보였으며, 100분 이상 가공하여도 정상적인 마모형태를 보였다.

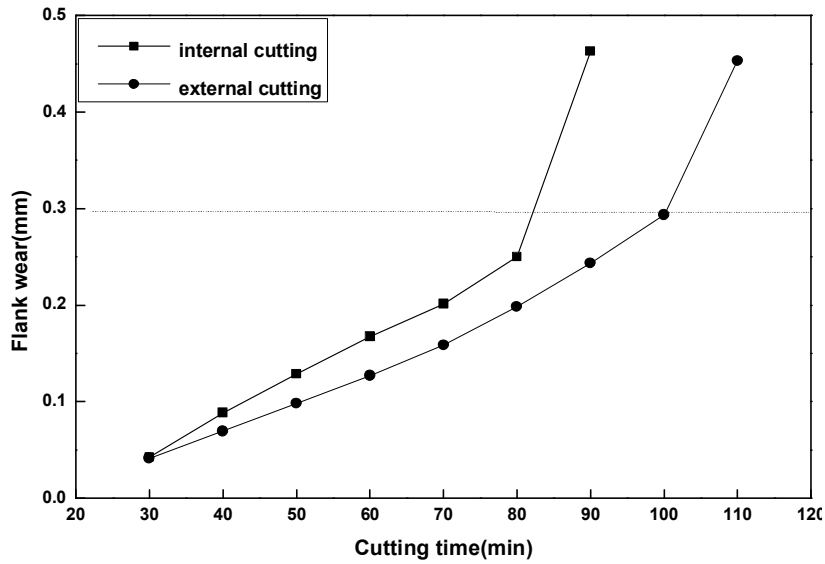
플랭크마모량은 경사진 재료에서 각도가 작을수록 마모량이 크게 나타났다. 이러한 이유는 상 방향 가공을 하더라도 재료의 경사각이 적을수록 볼 엔드밀 공구 중심부 가까운 위치에서 가공 되면서 -Z 방향으로 힘을 많이 받아 가공마찰열이 커지기 때문에 경사각도가 작을수록 플랭크마모량이 커진다.

Fig. 5. 11의 (b)는  $\phi$  60mm 곡면 내·외면의 상 방향 가공에서 Table 5.1과 같은 조건으로 마모실험을 한 결과이다. 곡면 내면의 마모시험에서는 공구의 중심부 및 측면부로 이동하고, -Z 방향으로 이동이 크기 때문에 경사재료 가공에 비해 측면 공구인선의 노출 시간이 적음에도 불구하고 마모량의 크게 나타나 가공시간 80분 이후부터는 마모량이 급격히 상승하였다. 이와 같은 결과는 내면의 가공에서 칩의 배출이 원활하게 이루어지지 못한 관계로 공구의 마찰열이 크게 발생되어 곡면외면 가공시간에 비해 마모량이 큰 것으로 사료된다. 외면의 가공에서는 비교적 안정적인 마모량 형태를 보여 가공시간 100분 까지 정상적인 마모형태를 보였다. 이와 같은 결과들을 봤을 때 플라스틱 급형강의 정삭가공시 경사각이 작고, 곡면의 내부를 가공할 때, 주축회

전수 및 공구이송속도를 적게 설정하여 가공하는 것이 공구의 마모를 최소화할 수 있는 방법이라 판단된다.



(a) inclined material



(b) circular material

Fig. 5.11 Results of wear test according to material conditions

Fig. 5.12는  $\Phi 60\text{mm}$  곡면 내·외면을 Table 5.1과 같은 조건으로 상 방향 (Up ward) 건식가공에서 공구의 중심부(Chisel), 선단의 공구 마모량을 나타낸 것이다.

Fig. 5.11의 곡면(내·외면)의 플랭크마모량 과 Fig. 5.12의 공구중심부의 마모량을 비교하면, 60분의 동일 가공시간 조건에서 플랭크마모량은 곡면 내면에서  $V_B 0.16\text{mm}$ , 외면 가공에서는  $V_B 0.12\text{mm}$ ,의 결과를 보였고, 공구중심부 마모는 내면  $V_B 0.13\text{mm}$  외면  $V_B 0.07\text{mm}$ 으로 공구의 중심부 보다 공구의 플랭크마모가 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 곡면의 가공에서는  $-Z$ 축의 이동범위가 크기 때문에 중심부보다 플랭크 부분에 받는 힘이 크기 때문으로 판단된다.

공구 중심부의 마모량을 보면 Photo. 5.6, Photo. 5.7과 같이 내면가공이 외면가공보다 시간경과에 따라 마모량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 곡면의 내면가공에서 미끄러지듯 가공이 진행되는 스미어링 (Smearins) 현상이 발생되어 마찰열이 급격히 올라가 공구의 마모 진행속도가 빨리 일어난 것으로 판단된다.

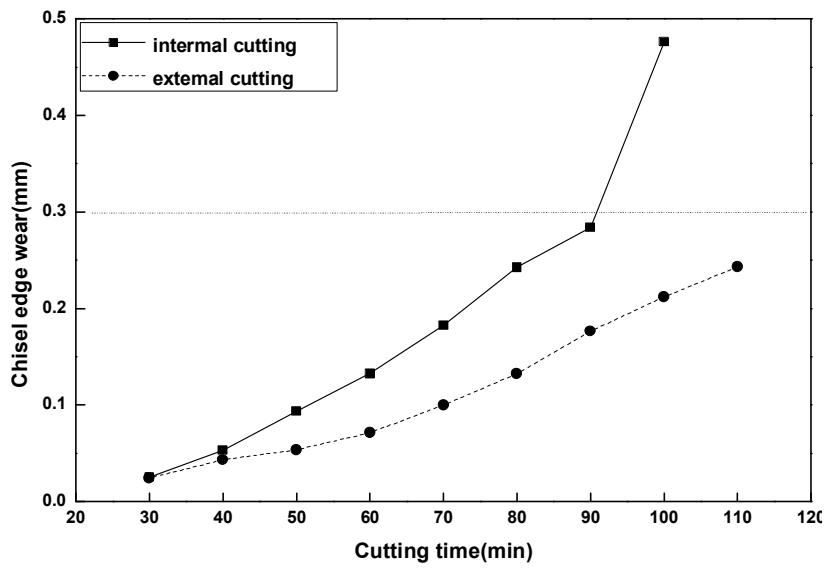


Fig. 5.12 Results of tool wear test of tool chisel edge

#### 5.4.2 AlTiN코팅 층수에 따른 공구의 마모특성

Fig. 5.13은 재료형상별 마모실험중 긴 공구수명을 보인 45°경사 재료를 선정, AlTiN코팅 층수(1~4층)에 따른 플랭크마모량을 나타낸 것이다. 마모시험은 상 방향(Up ward) 한 방향으로 건식 절삭하여 시간경과에 따른 공구마모량을 측정하였으며, 마모실험 절삭조건은 주축회전수 10,000rpm, 공구이속속도 1,500mm/min, 절삭깊이 0.3mm, Pick feed 0.3mm 설정하여 마모실험 하였다.

모든 조건에서 가공시간 40분까지 시간의 경과에 따른 정상적인 마모량을 보였으나 40분을 경과하면서 AlTiN코팅 1층 공구부터 마모진행 속도 빠르게 진행되어 가공시간 60분을 넘어서면서 급격히 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 코팅 2층, 3층은 80분이 경과할 때 까지 양호한 결과를 보였으나, 80분을 경과하면서 AlTiN 코팅을 2층한 공구의 마모량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. AlTiN코팅을 4층으로 한 공구에서는 절삭분력과 재료의 표면거칠기에서 코팅을 2층으로 한 공구와 비슷한 결과를 보였으나, 공구 마모량에서는 1층 다음으로 빠르게 마모가 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 코팅을 4층으로 하면서 코팅의 균질성이 깨져 표면이 거칠고, 코팅성분의 코팅두께가 18 $\mu$ m로 두꺼워 지면서 공구표면의 경도의 감소로 절삭가공시 발생하는 마찰열을 견디지 못한 관계로 공구의 마모량이 크게 증가 한 것으로 판단된다. Photo. 5.3~5.7에 가공실험에 있어 공구 시간경과에 따른 공구의 마모량을 나타낸 사진을 나타내었다.

본 실험에서는 경사 재료와 곡면 재료를 각각 따로 분리하여 절삭실험, 표면거칠기, 마모시험을 실시하였으나, 금형제작 현장에서 사출(플라스틱금형 금)제품은 절삭가공시 일정한 경사면을 가지고 있는 경우가 없고 경사면과 곡면 내·외면을 동시에 가지고 있는 형상이 대부분을 차지한다. 이와 같은 현실을 생각 하였을 때 금형가공에 있어 현재보다 공구수명을 연장할 수 있는 연구가 더 활발하게 진행되어야 할 것이다.



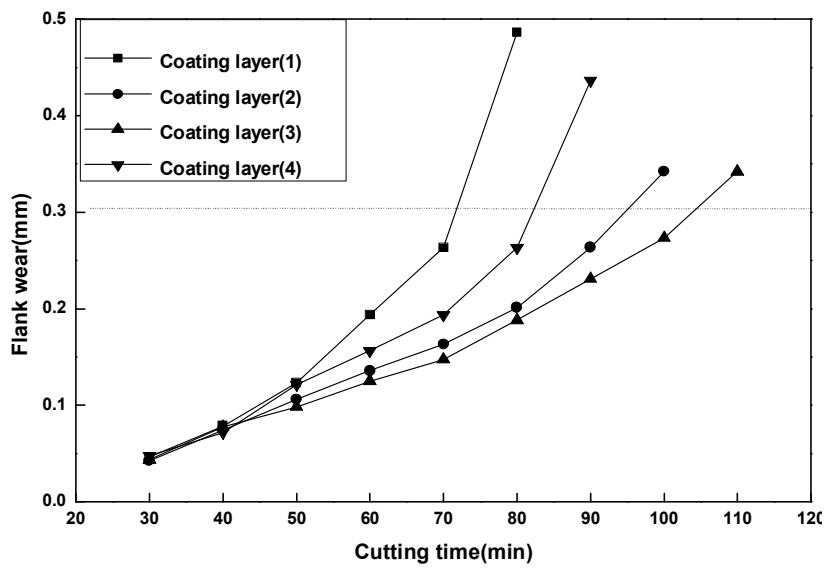
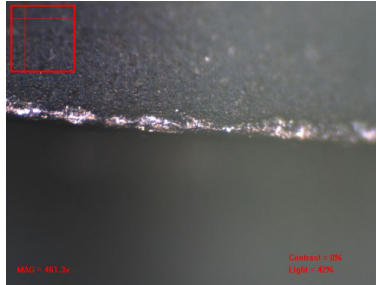
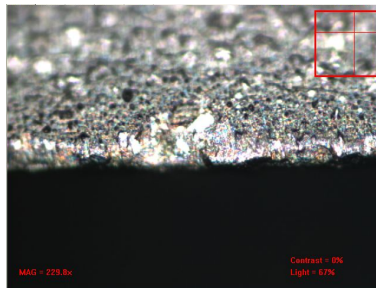


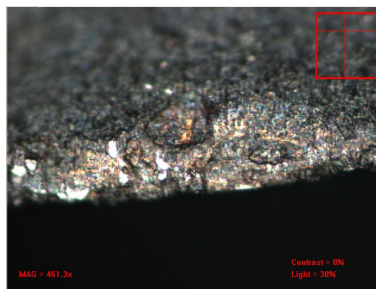
Fig. 5.13 Results of wear test according to AlTiN coated layers



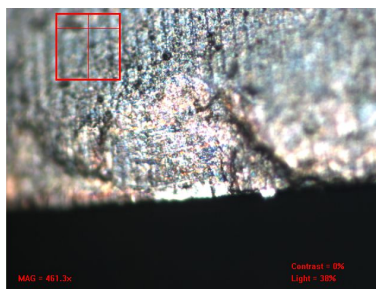
(a) Cutting time (30min)



(b) Cutting time (50min)

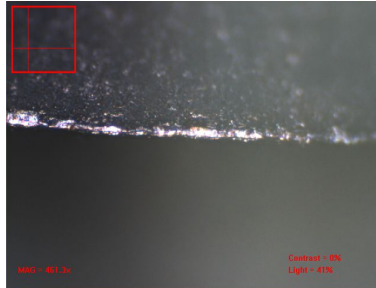


(c) Cutting time (70min)

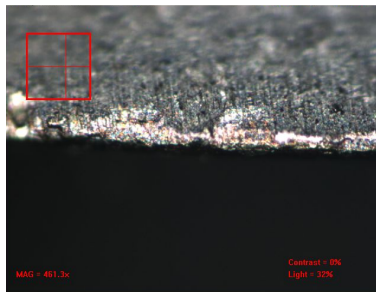


(d) Cutting time (90min)

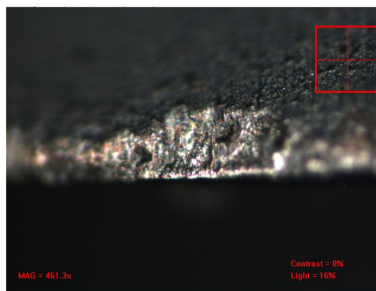
Photo. 5.3 Wear progression of AlTiN coated carbide tool  
(Inclined plane 15°, Upward cutting, AlTiN layer 3 )



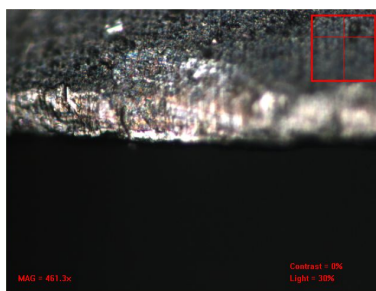
(a) Cutting time (30min)



(b) Cutting time (50min)

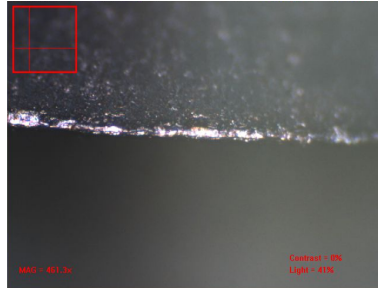


(c) Cutting time (70min)

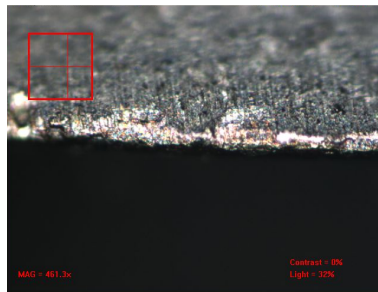


(d) Cutting time (90min)

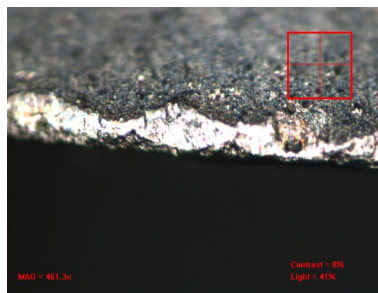
Photo. 5.4 Wear progression of AlTiN coated carbide tool  
(Inclined plane 30°, Upward cutting, AlTiN layer 3 )



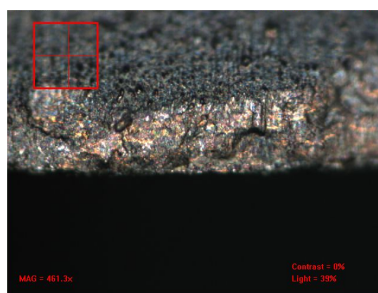
(a) Cutting time (30min)



(b) Cutting time (50min)

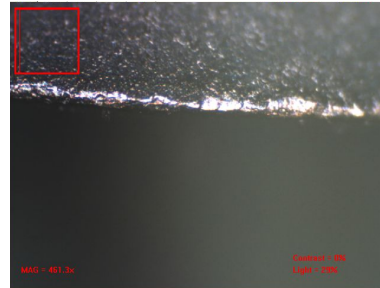
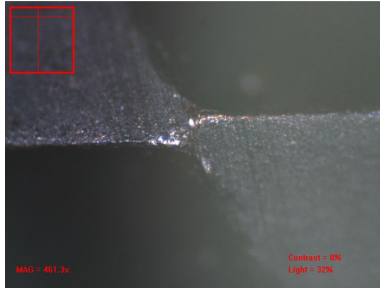


(c) Cutting time (70min)

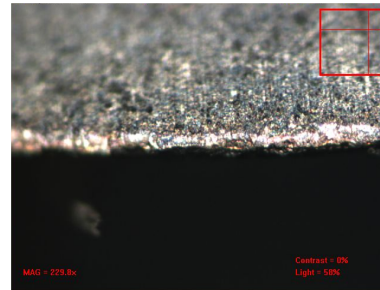
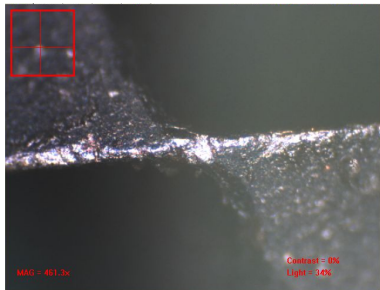


(d) Cutting time (90min)

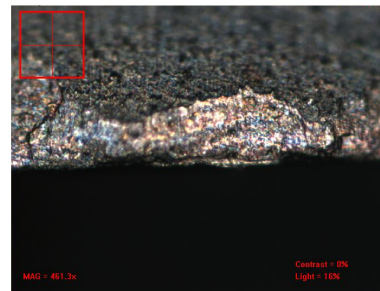
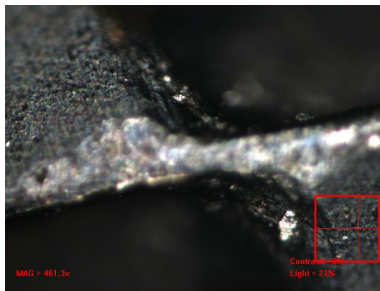
Photo. 5.5 Wear progression of AlTiN coated carbide tool  
(Inclined plane 45°, Upward cutting, AlTiN layer 3 )



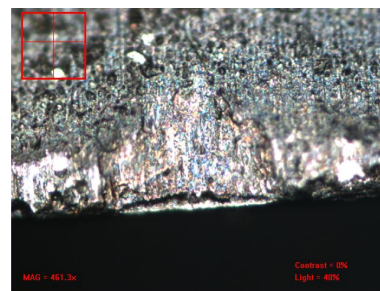
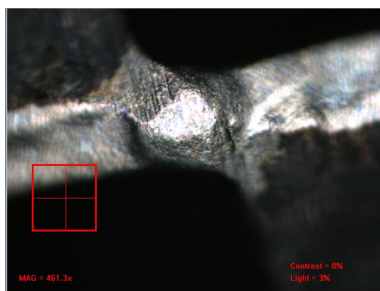
(a) Cutting time (30min)



(b) Cutting time (50min)

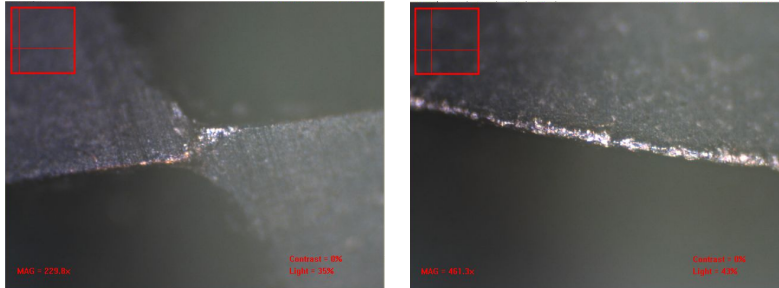


(c) Cutting time (70min)

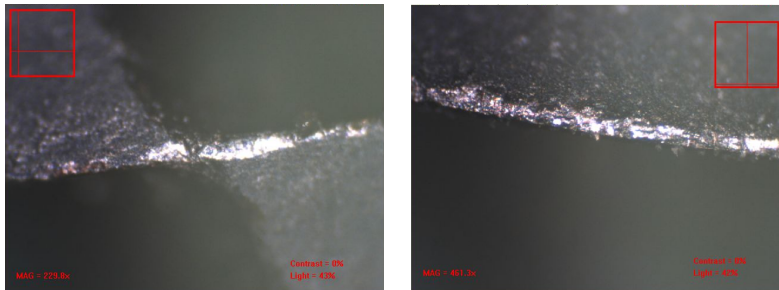


(d) Cutting time (90min)

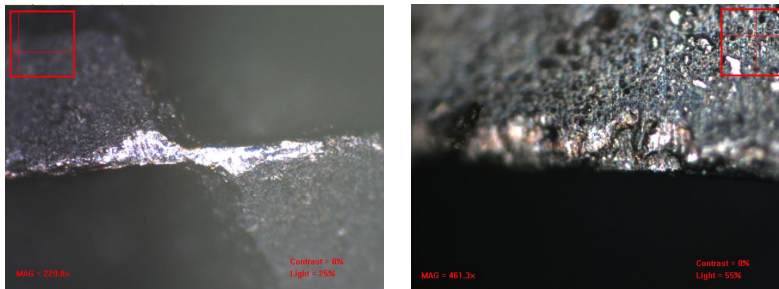
Photo. 5.6 Wear progression of AlTiN coated carbide tool  
( Internal cutting, Upward cutting, AlTiN layer 3 )



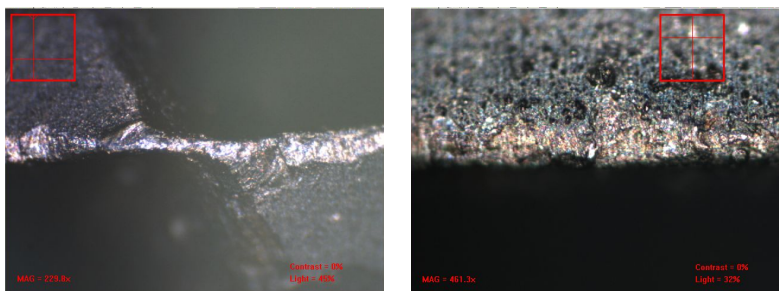
(a) Cutting time (30min)



(b) Cutting time (50min)



(c) Cutting time (70min)



(d) Cutting time (90min)

Photo. 5.7 Wear progression of AlTiN coated carbide tool  
 ( External cutting, Upward cutting, AlTiN layer 3 )

## 제 6 장 결론

본 연구에서는  $\Phi$  8mm 초경 불 엔드밀에 AlTiN을 1~4층까지 PVD 방식으로 코팅하여 플라스틱금형강중 비열처리 재종(KP-4)을 경사면(15°, 30°, 45°) 및  $\Phi$  60mm 곡면 내·외면에 있어 주축회전수 10,000~16,000rpm, 공구이송 속도 1,300~1,700mm/min, 절삭깊이 0.3~0.9mm 등으로 변화를 주어 코팅층수에 따른 절삭분력, 표면거칠기 및 공구마모량 등을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재료 형상별 절삭분력은 경사면 각 15°, 30°, 45° 조건 중 경사면 각이 작은 15° 조건에서 크게 나타났으며, 곡면(내·외) 가공에서는 외면 보다 스미어링(Smearins)이 발생한 내면가공에서 높게 나타났고, 가공방향에 따른 절삭분력은 Over cut의 영향으로 상 방향 보다 하 방향에서 높게 나타났다.

2. 재료 형상별 표면거칠기는 경사면 각이 클수록 낮게 나타났으며, 곡면(내·외) 가공에서는 외면 보다 내면에서 높게 나타났다. 가공방향에 따른 표면거칠기는 상·하 방향 차이가  $R_a$  0.1 $\mu$ m 낮으며, AlTiN코팅 각 층수에 따른  $R_a$ 는 0.08 $\mu$ m 차이를 보였다.

3. 초경 불 엔드밀에 AlTiN을 1층, 2층, 3층, 4층으로 코팅 결과, 기계적 성질은 3층의 조건에서 좋은 결과를 보였고, 재료 형상별 공구 마모량은 15°, 30°, 45°경사재료 순으로 빠르게 마모가 진행 되었으며, 곡면 재료에서는 외면가공 보다 내면가공에서 마모가 빠르게 진행되었다.

4. AlTiN코팅공구 층수에 따른 마모는 1층, 4층, 2층, 3층 순서로 양호하게 나타났고, 3층으로 코팅한 공구에서는 90분 이상 가공하여도 정상적인 마모상태를 보였다.

## 참 고 문 헌

1. N. D. Baek, "Tool Wear and Surface Precision When Up and Down Milling by TiAlN Coated Endmill", M.S. Thesis, Kyungnam University, pp. 1~15, 2000
2. H. Schuiz, "High speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology", CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 35~38, 1995
3. J. D. Song, "Machinability Evaluation According to Variation of Endmill Shape for high Speed Machining", M.S. Thesis, pp. 1~2, 2001
4. T. Moriwaki, High Speed Machining, CIRP, Vol. 41, 1992
5. K. Okuni, "超高速切削加を可能にする工具材種", 形技術セミナー, 1992.
6. 有本, "工具から見た高速切削の現状と課題", JSPE, 第210回講習會, 1994.
7. 이운학, "금형공작 이론", 한국산업인력공단, pp. 1~6, 1993.
8. S. J. Kim, "A Study on the Cutting Characteristics of Fillet-End Mill in High Speed Machining of the Surface", M.S. Thesis, Chonbuk National University, pp.8~14, 2004
9. D. S. Park, "A Study on the Effect of TiAlN coated Ball End Mill and Cutting environments on Cutting characteristic of High Hardness Steels", M.S. Thesis, Seoul National University of Technology, pp. 1~6, 2002
10. M. Fontaing, A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, "Modelling of cutting forces in ball milling with tool-surface inclination Part I : Predictive force model and experimental validation", Journal of Materials Processing Technology 189, pp. 73~84, 2007
11. Adrian Sharman, Richard C. Dewes, David K. Aspinwall, "Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718<sup>TM</sup>", Journal of Materials Processing Technology 118, pp. 29~35, 2001



12. E. G Ng, D. W. Lee, A. R. C. Sharman, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, "High Speed ball Nose End Milling of Inconel 718", *Annals of the CIRP*, Vol 49, No 1, pp. 41~46, 2000
13. Muammer Nabant, Hasan Gokkaya, Ihsan Toktas, Gokhan Sur, "The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD-and CVD-coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008
14. P. Koshy, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, "High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~58 HRC)", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 127, pp. 266~273, 2002
15. Lincoln Cardoso Brandao, Reginaldo Teixeira Coelho, Alessandro Roger Rodrigues, "Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 26, July, 2007
16. C. S. Anderson, S. E. Semercigil, O. F. Turan, "A passive adaptor to enhance chatter stability for end mills", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1777~1785, 2007
17. Yuan Ning, M. Rahman, Y. S. Wong, "Investigation of chip formation in high speed end milling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 360~367, 2001
18. M. A. Salgado, L. N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz, J. Munoa, J. A. Sanchez, "Evaluation of the stiffness change on the deflection of end-mills under cutting forces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 727~739, 2005
19. Masahiko Jin, Isamu Goto, Takeshi Watanabe, Jun-ichi Kurosawa, Masao Murakawa, "Development of cBN ball-nosed end mill with

- newly designed cutting edge", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 48~54, 2007
20. M. Shatla, T. Altan, "Analytical modeling of drilling and ball end milling", *Vol. 98*, pp. 125~133, 2000
  21. Wan, M., Zhang, W. H., Qin, G. H., Tan, G, "Efficient calibration of instantaneous cutting force coefficients and runout parameters for general end mills", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 11, pp. 1767~1776, 2007
  22. M. Fontaing, A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, "Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination Part I : Predictive force model and experimental validation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, pp. 73~84, 2007
  23. Abdullahil Azeem, Hsi-Yung Feng, Lihui Wang, "Simplified and efficient calibration of a mechanistic cutting force model for ball-end milling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 191~298, 2004
  24. Ching-Chih Tai, Kuang-Hua Fuh, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 54, pp. 286~301, 1995
  25. M. Fontaine, A. Devillez, A. Moufki, D. Dudzinski, "Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 367~380, 2006
  26. M. Arizmen<sup>o</sup>ġ, J. Fernandez, L. N. Lopez de Kacalle, A. Lamikiz, A. Gil, J. A. Sanchez, F. J. Campa, F. Veiga, "Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation",

- CIRP Annals–Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 101~104, 2008
27. E. D. Kim, "Evaluation microscopic precision according to cutting conditions in high-speed machining", M.S. Thesis, Pusan National University, pp. 1~16, 2000
  28. G. M. Kim, P. J. Cho, C. N. Chu, "Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, pp. 277~291, 2000
  29. N. D. Baek, "Tool Wear and Surface precision When Up and Down Milling by TiAlN Coated Endmill", M.S. Thesis, Kyungnam University, pp. 1~3, 2000
  30. Y. C. Kim, "Characteristics of Machined Profile and Tool Wear for Machining Free Formed Surface by Ball Endmill Cutter", M.S. Thesis, Kyungnam University, pp. 1~16, 2001
  31. J. S. Kim, "A Study on the Cutting Characteristics of Fillet-End Mill in High Speed Machining of the Surface" M.S. Thesis, Chonbuk National University, pp. 8~10, 2004
  32. Y. P. Kim, "A Study on the Characteristics of Curved Surface using High Speed Machining", M.S. Thesis, Kyungnam University, pp. 1~12, 2006
  33. G. J. Kim, "performance Evaluation of Endmill for High Speed Machining", M.S. Thesis, Changwon National University, pp. 1~18, 2002
  34. C. Y. Lim, "Machining Accuracy for Semisphere Machining Using Ball End Mill according to the Change of Feed Rate", M.S. Thesis, Kyungnam University, pp. 1~3, 2001
  35. S. P. Ryu, "A study on the Analisis and Evaluation of Cutting force for High Speed Machining by Ball-end mill", M.S. Thesis, Changwon National University, pp. 7~20, 2003

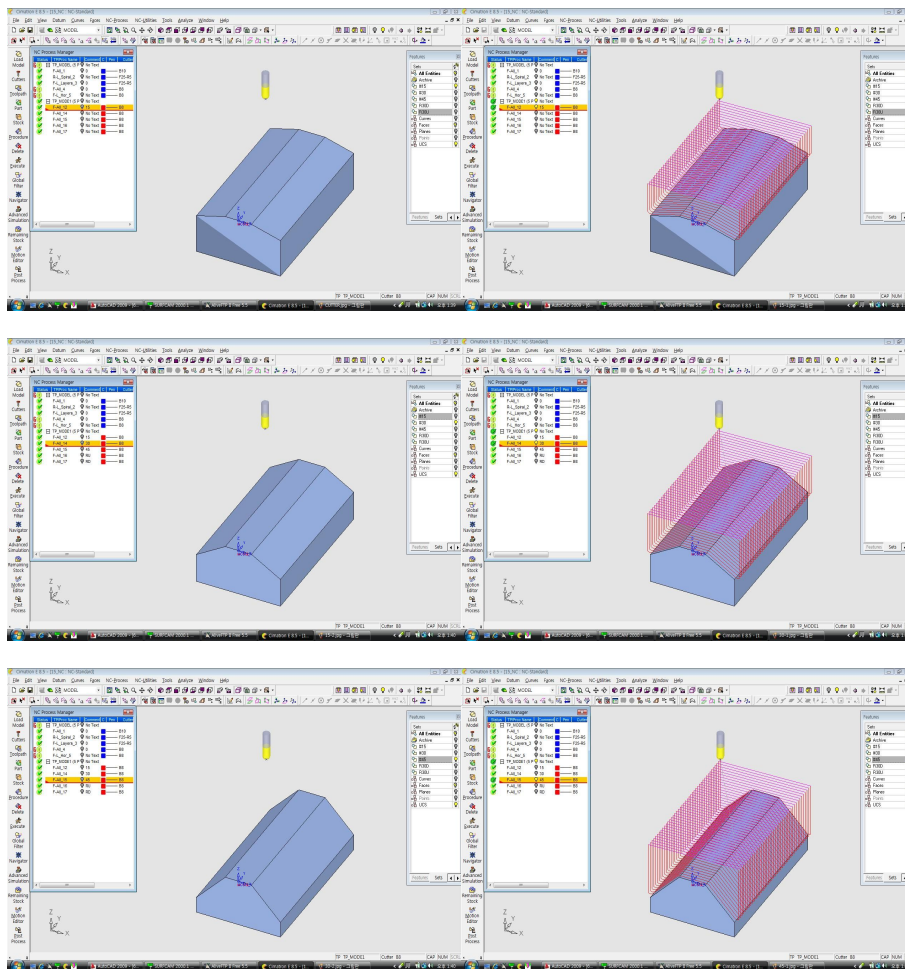
36. J. N. Park, "Analysis on Machining Characterization in High Speed Endmill Operation considering End mill Geometry", M.S. Thesis, Konkuk University, pp. 1~9, 2002
37. S. J. Youn, " A Study on the Machinability in Sculptured Surface Machining using the CAD/CAM", M.S. Thesis, Incheon University, pp. 30~35, 1999
38. Y. K. Kang, "A study on the flexible cutting force model in the ball end milling process" M.S. Thesis, Sunchon National University, pp. 7~34, 2003
39. 양민양, "절삭가공(이론과 실제)", 청문각, pp41~54, pp93, 1997
40. G. V. Stabler, "The fundamental Geometry of cutting tools", Proceedings of the institute of mechanical engineers, Vol 165, pp.1055~1064, 1952
41. S. J. Kang, "A Study on the Machining Characteristics in Inclined Plane Machining of Ball End Mill with Considering Economical Factors", M.S. Thesis, Chosun University, pp. 14~17 2000
42. C. Y. Cho, "Hemispheric cutting edge optimization of ball end mill for high speed machining", Ph.D Thesis, Chonbuk national university, pp. 25~27, 2009
43. S. Y. Lee, "A study on the High-Speed machining characteristics for Al6061 ellipse mirror machining using Millimeter-Wave Interferometer System", M.S. Thesis, Chungnam National University, pp. 6~22. 2007
44. K. T. Kim, Y. S. Kim, "Effects of Counterpart Materials on Wear Behavior of Thermally Sprayed Ni-based Self-flux Alloy Coatings", Journal of the korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 92~97, 2007
45. T.J. Ko, hoon Jeong, Hee Sool Kim, "Selection of Machining

- Inclination Angle of Tool Considering Tool Wear in High Speed Ball End Milling", Journal of the Korean Society of Precision Engineering. Vol. 15, No. 9, pp. 135~144, 1998
46. B. H. Kim, "Precision Machining Characteristics in Ball-end Milling of Sculptured Surfaces", Journal of KSMTE, Vol. 10, No. 1, pp. 80 2001
  47. C. Y. Cho, "A study on the cutting characteristic and tool wear for cutting path in ball-end milling", M.S. Thesis, Chonbuk national university, pp. 5~7, 2001
  48. H. W. Seol, "Cutting Characteristics of the ZrN coated Tool", M.S. Thesis, Kookmin University, pp. 9~11, 2005
  49. Y. W. Kim, "A study on optimal preparation conditions for higher corrosion resistance of Zn-Mg alloy thin films by PVD Application Process", M.S. Thesis, pp. 6~14, 2009
  50. H. J. An, "The Combined Surface Hardening Treatment of Tool Steel to Improve Durability", Kyungpook National University, pp. 7~13, 2007
  51. Ko. Pil-Ju, "Analysis of Temperature Effects on Slurry for Oxide CMP Characteristics Improvement", M.S. Thesis, Chosun University, pp. 42~45 2005
  52. Kwang Ho Lee, "Characteristic of ductile regime AFM machining using Acoustic Emission", M.S. Thesis, Hanyang University, pp. 3~4 2006
  53. Lee Gab-Jo, "A Study on Characteristics of Ultra-precision Machined Surfaces by AFM Measurement", Ph.D. Chosun University pp. 8~11 2007
  54. K. H. Park, "Surface analysis about bracket slots for orthodontics by AFM" M.S. Thesis, Kyong Hee University, pp. 3~5, 2009

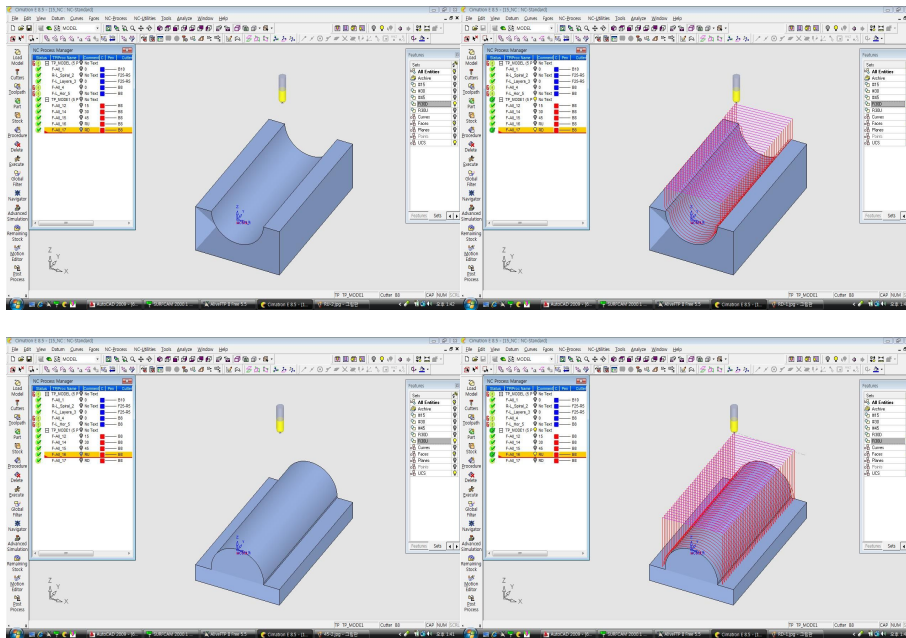
55. H. S. Noh, "Development of an evaluation method for standard surface roughness specimens", M.S. Thesis, Hanyang University, pp. 4~19, 2008
56. S. N. Ro, "A Study on the dimension error and surface roughness duets high speed end milling of SM20C Steel", M.S. Thesis, Seoul National University pp. 3~5, 2000
57. S. B. Jung, "Study of Physical Properties and Corrosion characteristic of TiN, TiAlN film by AIP", M.S. Thesis, Chonnam National University, pp.3~24 2008

# 부록

## 1. 절삭가공실험 모델링

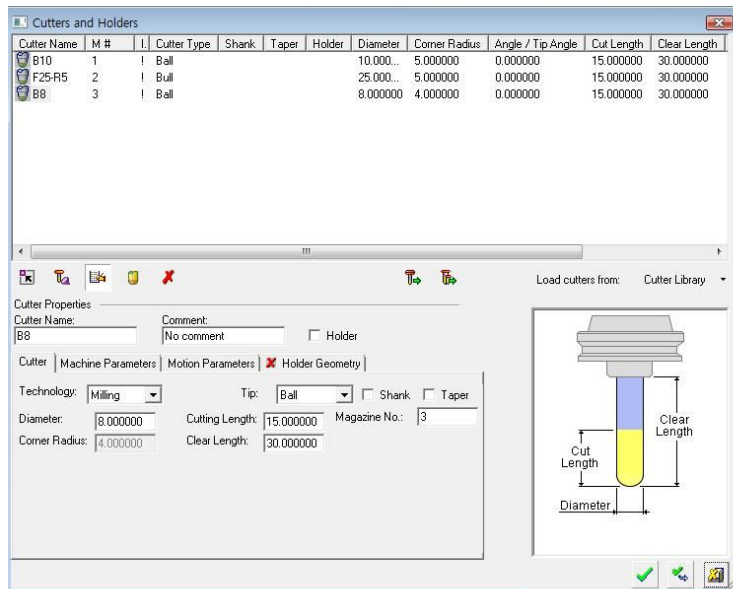


3D operation using Cimatron



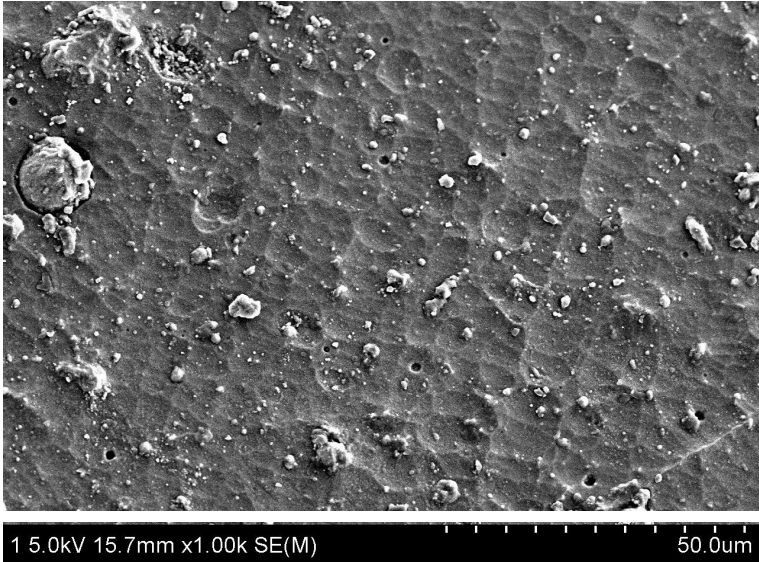
3D operation using Cimtron



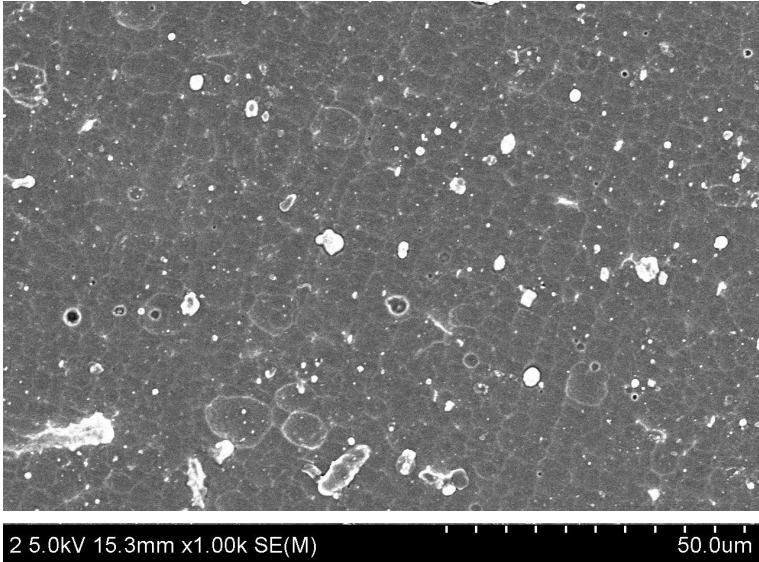


Design of process conditions using SurfCam

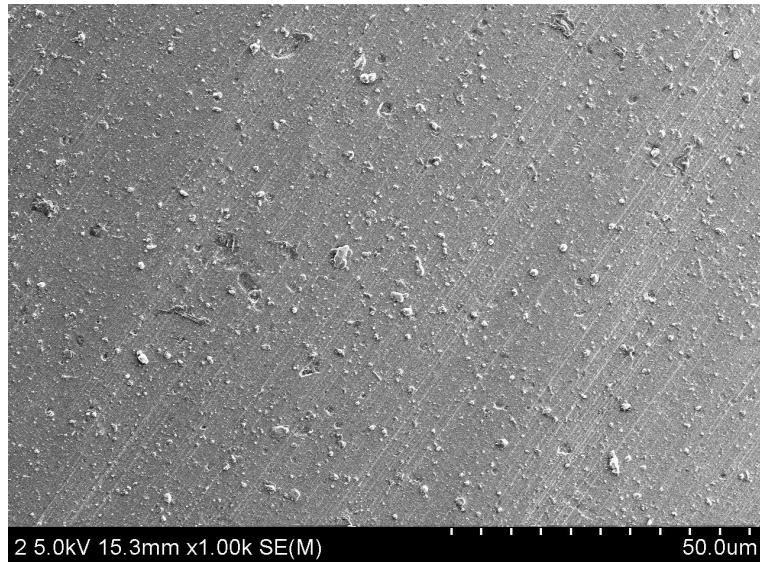
2. AlTiN코팅 볼 엔드밀 표면분석



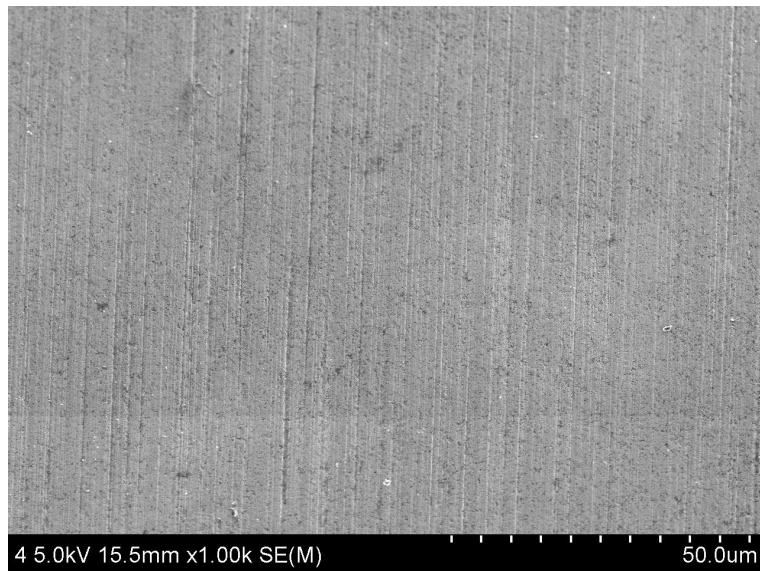
(a) Carbide Tool



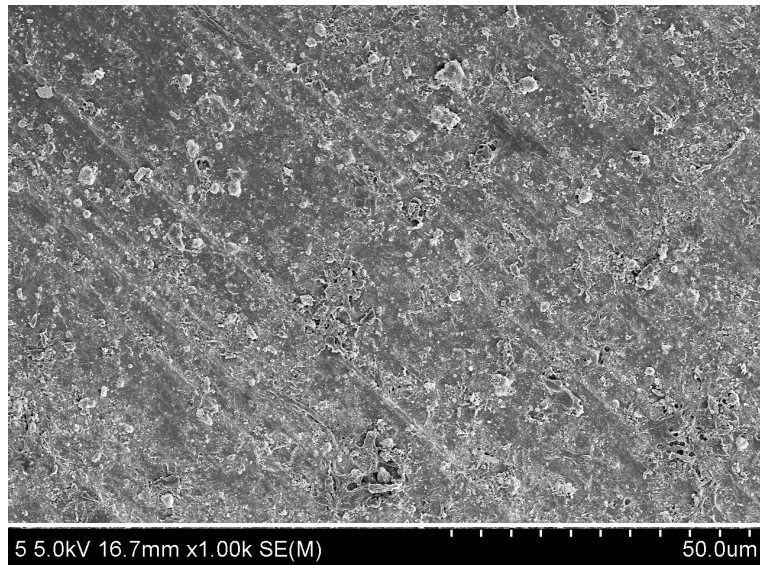
(b) Coating layer 1



(c) Coating layer 2



(d) Coating layer 3



(e) Coating layer 4

The Tool surface of AlTiN coating layer using SEM

### 3. 재료형상별 절삭분력 및 표면거칠기 결과

Cutting forces according to AlTiN coating layer  
(Inclined plane 15°, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	94.04	108.26	109.78	97.45	109	109.63	102.35	114.16	117.21
2	90.29	95.93	100.86	93.16	99.09	102.82	95.75	106.94	111.25
3	89.87	91.48	92.39	90.22	93.68	96.38	93.51	98.39	100.24
4	101.85	106.39	108.22	103.31	105.64	113.11	103.87	104.33	116.16
13,000rpm									
1	93.11	95.6	108.51	93.16	98.28	104.74	91.43	103.26	104.48
2	89.48	95.17	99.51	94.58	99	101.98	89.94	94.9	95.98
3	85.96	88.38	90.21	84.16	86.21	87.87	86.51	93.31	96.34
4	101	103.65	105.5	100.17	101.16	104.28	90.84	94.84	97.89
16,000rpm									
1	112.38	123.09	132.42	96.78	106.07	114.98	129.05	140.21	148.11
2	110.13	110.54	115.85	95.24	106.6	110.64	108.63	114.33	129.5
3	106.85	109.29	111.65	95.06	101.55	106.41	98.16	103.52	110.16
4	110.16	112.17	114.96	102.77	135.61	143.67	110.71	120.36	121.69

(Inclined plane 15°, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	112.79	113.8	117.88	110.16	114.9	118.88	120.25	125.25	120.1
2	104.02	110.83	113.57	99.7	103.76	107.02	111.48	118.48	122.52
3	100.57	102.81	102.99	97.26	98.6	99.18	104.92	111.32	109.96
4	108.72	113.59	115.17	107.97	110.86	112.68	118.23	120.23	129.6
13,000rpm									
1	103.16	115.71	118.74	95.82	106.74	108.56	110.86	116.51	121.65
2	103.73	105.57	106.21	95.83	103.32	103.63	100.52	105.63	107.99
3	96.52	104.75	105.45	95.42	97.18	100.59	99.04	104.23	112.56
4	114.98	110.72	123.61	105.22	109.66	115.54	101.7	118.72	109.93
16,000rpm									
1	122.26	122.31	132.39	118.32	122.11	123.45	127.23	156.52	156.35
2	111.17	115.08	117.19	107.28	112.76	123.87	136.99	136.61	140.36
3	108.26	116.05	117.08	102.36	105.81	120.33	114.3	117.03	133.12
4	121.64	122.49	134.08	119.45	126.63	128.46	127.52	135.47	145.33

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 15°, d=0.6mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	132.08	139.05	145.4	133.7	139.73	147.07	119.64	129.47	136.7
2	125.49	126.53	139.93	123.86	124.77	131.86	112.43	120.31	123.1
3	114.72	118.91	119.2	109.84	117.17	119.24	108.23	106.46	112.16
4	128.54	129.5	133.86	116.83	122.24	131.21	127.46	133.82	143.27
13,000rpm									
1	140.46	150.68	156.01	115.77	124.31	128.27	115.68	119.79	124
2	130.11	130.13	131.31	112.08	115.01	117.07	106.83	109.84	113.36
3	117.93	122.14	123.18	109.54	110.26	113.44	106.74	106.95	109.39
4	134.05	141.89	150.91	126.09	128.31	130.49	120.81	122.04	127.56
16,000rpm									
1	153.79	163.76	165.52	136.52	144.29	146.63	140.15	149.7	151.43
2	144.47	155.81	162.47	130.82	138.57	139.49	139.01	142.91	145.37
3	135.31	135.33	136.71	130.3	131.65	134.13	118.16	129.76	131.63
4	157.33	157.86	158.13	132.82	133.65	136.13	125.16	136.76	138.63

(Inclined plane 15°, d=0.6mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	143.9	151.55	159.28	133.59	136.25	138.35	134.79	138.07	146.18
2	134.51	138.61	140.39	122.91	123.26	129.38	124.76	132.84	140.54
3	119.48	130.07	130.42	117.21	119.52	121.1	119.21	120.34	121.04
4	136.23	138.24	142.61	124.3	124.25	123.35	151.96	152.23	154.5
13,000rpm									
1	145.32	149.22	159.24	129.37	130.9	138.68	128.42	130.05	141.87
2	145.3	149.55	151.33	115.06	131.33	133.98	127.43	131.29	133.54
3	124.33	128.46	130.9	111.02	115.42	117.99	122.34	122.35	122.66
4	134.89	141.86	149.91	117.21	126.04	129.08	134.18	134.34	139.47
16,000rpm									
1	158.46	161.95	164.02	150.38	153.06	155.12	148.22	153.89	156.84
2	146.54	147.81	148.86	141.58	144.47	144.51	140.25	150.38	151.58
3	141.76	143.52	144.92	140.65	142.08	142.31	134.54	136.32	137.04
4	145.91	157.31	158.71	124.48	143.58	144.31	134.36	142.62	149.93

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 15°, d=0.9mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	151.1	160.5	162.86	136.81	139.77	137.62	134.43	137.18	145.64
2	144.17	154.91	153.94	132.89	135.12	140.43	131.88	136.61	137.95
3	139.56	140.63	137.77	130.42	135.74	140.26	126.35	127.58	128.68
4	150.47	157.46	165.17	135.42	138.53	146.65	129.23	130.47	139.76
13,000rpm									
1	158.04	159.15	162.97	144.56	147.85	149.29	139.88	142.21	145.72
2	144.39	147.57	153.18	132.39	135.57	141.18	136.69	147.94	149.23
3	141.43	141.67	141.69	121.94	122.91	125.06	136.15	137.38	144.37
4	137.97	138.46	149.35	134.98	139.31	146.09	139.42	139.66	144.16
16,000rpm									
1	149.76	161.37	169.96	149.48	150.44	154.61	150.76	154.52	157.34
2	151.03	152.52	154.37	148.6	150	148.91	146.54	151.53	156.03
3	142.14	148.07	148.88	138.11	142.81	145.98	142.45	142.91	143.77
4	152.75	157.61	158.13	141.43	146.2	147.4	146.25	146.87	147.82

(Inclined plane 15°, d=0.9mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	153.88	163.9	164.38	148.62	145.58	144.39	156.62	163.55	166.74
2	149.68	157.6	157.15	141.52	142.69	139.15	153.92	158.71	160.69
3	142.96	144.25	150.06	139.6	141.25	144.17	149.34	150.2	157.99
4	153.35	161.78	166.02	142.53	154.25	158.52	154.87	165.87	166.07
13,000rpm									
1	164.45	165.91	167.83	153.35	155.63	159.28	155.61	156.06	165.14
2	156.49	157.31	158.2	144.49	145.31	146.2	148.55	155.34	158.75
3	145.38	146.3	146.15	126.5	130.3	134.5	141.39	146.86	147.59
4	150.05	150.22	152.51	138.81	141.46	148.44	158.22	160.19	164.33
16,000rpm									
1	169.64	179.65	181.43	157.16	160.17	165.15	164.8	168.21	173.22
2	154.23	161.21	164.67	150.96	157.06	161.22	164.3	167.67	169.75
3	144.71	152.64	152.43	143.76	146.54	158.15	146.18	155.13	161.41
4	156.94	160.67	163.87	142.39	149.37	162.37	166.56	168.78	175.33

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 30°, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	102.07	93.83	101.11	104.21	92.48	95.59	98.74	86.87	98.14
2	90.88	86.03	87.98	96.35	86.8	88.67	94.46	85.36	86.36
3	87.37	85.76	86.09	85.85	85.85	86.77	87.59	82.26	82.83
4	101.73	100.09	101.71	95.78	91.77	92.22	100.85	97.26	97.83
13,000rpm									
1	88.23	85.42	99.37	88.59	84.18	91.8	90.84	89	97.91
2	84.85	83.42	90.48	86.61	80.33	89.27	92.55	88.3	95.86
3	81.65	80.43	82.37	82.94	78.82	84.78	86.37	84.58	88.73
4	84.68	85.14	84.24	87.85	80.73	94.08	86.96	85.31	90.55
16,000rpm									
1	105.01	111	121.32	89.45	106.52	109.95	100.36	112.59	114.18
2	92.9	103.87	106.68	93.74	95.59	99.55	96.18	97.43	104.04
3	89.38	100.29	108.31	86.83	91.91	93.35	87.05	97.11	97.98
4	89.22	104.22	111.74	85.94	93.68	96.66	97.97	98.21	99.86

(Inclined plane 30°, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	106.73	94.96	104.49	108.24	95.28	103.96	119.25	105.37	119.39
2	97.39	90.55	93.72	100.97	92.17	100.14	114.78	104.16	107.06
3	92.21	88.37	89.98	92.23	90.12	91.64	94.94	90.58	98.08
4	105.48	101.15	103.98	107.1	91.89	97.08	109.21	105.58	110.03
13,000rpm									
1	99.9	97.15	101.84	94.32	92.47	97.01	105.66	104.19	111.17
2	94.27	90.06	95.46	93.99	92.16	96.76	98.12	97.37	98.38
3	92.6	85.72	94.51	91.68	85.94	89.11	95.83	94.66	97.48
4	92.6	87.28	104.03	88.45	87.17	102.4	93.34	91.37	96.98
16,000rpm									
1	114.39	123.14	122.15	103	112.94	113.91	121.22	123.96	129.69
2	107.74	107.31	110.62	95.93	100.25	101.91	105.29	111.23	118.3
3	100.48	103.04	108.34	93.3	94.31	94.69	99.94	107.73	110.47
4	92.28	100.95	109.03	98.07	98.67	112.18	107.47	113.12	123.52



Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 30°, d=0.6mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	114.65	109.12	118.22	118.77	115.19	119.75	108.89	105.44	124.77
2	114.63	107.16	115.94	115.68	107.51	116.89	106.37	101.1	116.09
3	99.98	98.23	101.51	96.62	95.85	97.02	102.91	97.56	105.25
4	109.93	105.03	109.35	103.23	97.22	108.04	105.2	102.62	106.31
13,000rpm									
1	121.63	111.52	119.54	121.66	106.83	120.9	112.4	101.22	109.07
2	115.65	108.43	112.48	105.76	102.06	105.53	109.39	98.07	101.89
3	112.17	104.97	107.9	99.01	92.19	98.14	106.93	97.64	99.36
4	115.54	105.38	108.29	109.09	101.7	104.05	120.22	103.33	110.1
16,000rpm									
1	114.99	118.4	126.33	127.37	130.38	139.51	129.68	131.53	136.42
2	111.09	113.25	117.98	122.87	126.25	132.66	122.14	131.08	132.31
3	107.57	108.02	115.46	106.98	112.91	118.09	103.44	105.75	118.82
4	124.43	124.44	126.35	114.12	117.29	122.63	110.53	115.08	117.1

(Inclined plane 30°, d=0.6mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	123.88	113.06	124.95	124.6	112.96	130.22	128.62	116.2	129.54
2	115.11	112.81	121.02	122.61	110.68	126.59	117.49	115.76	122.9
3	103.87	101.93	105.02	105.68	105.24	119.35	112.67	109.46	116.61
4	113.63	111.64	118.13	116.35	119.35	121.75	127.49	126.21	130.74
13,000rpm									
1	133.36	120.61	122.11	124.72	115.47	121.73	132.36	127.19	128.68
2	119.26	112.17	114.04	113.17	108.48	108.63	129.86	117.96	125.99
3	112.31	105.16	110.48	100.2	92.23	99.3	119.51	117.12	118.46
4	118.24	105.35	111.15	106.5	96.26	100.52	128.47	123.57	125.27
16,000rpm									
1	122.17	126.66	129.18	131.09	138.29	139.99	137.13	143.95	144.23
2	116.56	117.66	119.19	128.82	132.73	134.36	124.88	135.46	141.5
3	109.42	111.62	117.99	107.12	120.92	124.82	122.75	125.24	129.9
4	121.51	131.36	138.77	117.15	121.1	125.29	133.04	141.54	143.32

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 30°, d=0.9mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	139.24	142.24	157.32	134.16	137.69	138.76	132.65	136.04	139.96
2	132.33	132.74	132.82	127.74	129.64	132.9	128.15	131.03	135.27
3	125.21	125.61	126.8	119.53	121.32	122.61	124.58	124.86	126.94
4	130.21	131.64	135.67	125.45	132.05	134.24	123.19	129.48	134.51
13,000rpm									
1	140.13	141.28	143.4	145.39	149.49	150.77	139.42	139.66	144.19
2	134.97	135	135.04	133.45	135.56	136.47	136.37	138.28	138.64
3	123.89	128.8	129.18	124.23	125.48	129.45	133.11	136.73	138.92
4	135.61	135.65	136.79	134.64	136.34	142.22	130.56	134.81	135.22
16,000rpm									
1	140.8	141.93	142.14	142.18	148.67	153.23	141.4	142.33	152.13
2	135.18	136.18	136.86	135.14	136.84	140.21	136.89	137.81	147.77
3	131.18	133.37	141.11	128.08	134.08	135.67	130.55	137.1	142.46
4	139.29	140.48	153.22	136.94	137.97	145.55	134.23	135.67	141.85

(Inclined plane 30°, d=0.9mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	135.11	139.4	147.32	136.48	142.92	144.16	145.03	146.09	146.42
2	132.28	136.22	139.18	132.2	134.05	135.86	144.27	145.56	145.82
3	129.47	131.3	133.9	128.35	130.54	133.6	131.75	133	131.63
4	125.62	135.4	136.08	130.77	141.2	143.69	132.28	132.28	133.78
13,000rpm									
1	152.36	154.44	162.38	152.53	154.76	161.63	150.45	150.93	151.21
2	140.28	144.94	150.43	137.18	137.19	146.26	141.97	146.95	150.45
3	133.74	136.67	138.94	125.04	127.67	131.36	139.57	140.2	145.77
4	142.42	142.31	143.32	132.97	141.24	146.28	149.37	150.45	151.21
16,000rpm									
1	155.24	159.88	162.1	151.2	155.23	158.98	157.49	166.97	164.32
2	144.34	144.89	153.83	150.75	151.46	156.27	156.96	159.71	168.01
3	139.15	146.73	147.62	143.56	147.52	149.13	142.46	144.92	153.46
4	150.3	154.69	158.39	139.18	155.25	155.13	150.84	150.94	165.46

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 45°, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	92.62	88.89	100.35	88.81	87.83	90.44	93.22	86.98	96.06
2	84.12	77.81	90.45	78.19	81.13	81.96	84.5	79.5	92.66
3	79.55	77.33	82.34	75.98	75.2	77.12	76.45	75.02	84.38
4	82.34	81.16	90.82	78.14	77.63	79.43	79.14	79.07	90.31
13,000rpm									
1	86.27	80.15	92.18	80.85	80.41	81.85	90.03	88.79	96.71
2	81.13	79.61	82.8	77.2	76.26	82.74	87.3	78.53	87.33
3	80.83	78.42	81.79	75.87	75.27	78.64	77.5	76.14	78.42
4	82.49	81.77	84.22	81.98	81.02	82.2	82.85	76.74	84.14
16,000rpm									
1	85.15	91.27	97.18	88.78	95.28	101.09	94.1	101.68	105.55
2	85.61	87.13	91.21	88.28	89.77	93.35	83.24	91.97	94.74
3	82.96	85.2	90.85	78.9	81.88	91.43	79.23	87.65	93.69
4	83.77	86.43	92.57	81.08	92.43	92.83	81.61	91.51	95.98

(Inclined plane 45°, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	95.62	92.95	104.15	92.76	89.54	96.52	93.21	88.49	98.23
2	91.47	88.76	95.86	85	82.13	86.26	85.57	83.7	86.38
3	84.27	77.75	87.15	81.97	80.89	82.68	81.86	80.91	86.42
4	91.45	85.53	101.2	82.35	84.49	84.77	101.38	100.38	101.42
13,000rpm									
1	88.23	87.02	92.55	87.72	86.71	91.61	101.87	93.2	102.46
2	89.41	88.9	90.82	88.7	85.03	91.73	90.13	89.81	97.06
3	88.13	83.21	90.45	81.58	79.22	87.25	84.36	83.48	93.27
4	90.2	86.58	91.69	82.38	81.26	87.68	87.37	86.12	94.88
16,000rpm									
1	92.02	93.23	97.55	97.34	104.42	106.12	109.34	119.59	122.3
2	89.21	100.27	101.46	93.55	93.58	94.75	98.94	101.68	107.54
3	86.72	95.75	96.45	79.08	84.83	94.67	92.61	96.79	104.17
4	94.73	97.6	103.22	84.79	86.8	90.14	91.91	107.98	115.21

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 45°, d=0.6mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	97.74	98.8	100.88	101.95	101.78	103.92	94.52	95.86	98.54
2	94.55	98.38	104.24	90.48	94.92	100.72	91.65	94.25	96.57
3	88.18	91.24	92.68	89.11	93.32	95	90.63	91.53	93.25
4	92.84	95.42	97.23	90.02	96.59	96.12	93.24	94.53	95.7
13,000rpm									
1	94.63	99.73	101.29	100.58	103.95	107.64	93.95	97.7	104.86
2	91.32	97.86	101.64	93.15	96.99	97.48	95.01	95.25	101.45
3	89.52	90.16	91.81	90.88	92.41	92.67	92.1	95.28	98.33
4	101.72	103.63	109.56	99.16	102.14	108.28	98.4	102.99	106.07
16,000rpm									
1	107.4	119.08	119.54	116.76	119.95	124.83	108.1	113.79	117.54
2	101.88	103.23	108.53	112.33	113.52	117.3	105.18	105.93	108.79
3	95.31	97.51	102.98	97.9	99.13	99.07	97.55	101.01	107.92
4	95.66	99.49	102.81	101.41	102.71	113.36	102.8	103.55	106.45

(Inclined plane 45°, d=0.6mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	101.62	104.89	108.32	105.85	104.46	108.83	105.62	107.86	113.52
2	99.18	106.49	107.12	106.13	97.89	107.13	106.27	113.94	115.5
3	93.17	94.63	96.23	95.25	95.99	94.46	101.89	104.51	107.46
4	99.59	100.62	103.85	98.83	98.39	100.65	110.07	112.42	115.85
13,000rpm									
1	92.5	105.78	109.88	108.28	109.02	113.95	113.46	117.12	124.06
2	94.97	99.18	99.93	94.38	98.83	97.6	121.35	125.49	126.17
3	92.11	93.36	96.62	93.73	91.28	95.45	114.4	114.55	116.24
4	95.11	96.12	97.5	95.95	98.88	100.75	119.62	123.26	124.62
16,000rpm									
1	113.99	118.53	127.65	125.75	127.87	132.93	129.65	132.93	139.23
2	107.98	110.89	115.7	124.1	125.61	125.45	122.96	124.56	128.64
3	99.29	99.4	109.24	109	113.72	119.45	119.5	119.82	128.6
4	101.24	101.47	111.98	98.82	116.16	118.89	130.13	133.6	132.35

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 45°, d=0.9mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	113.75	113.89	116.02	117.42	118.63	127.46	122.07	122.28	135.12
2	109.82	111.68	112.09	111.6	116.73	119.43	119.09	126.42	129.31
3	105.79	111.08	114.93	108.74	116.14	116.33	115.89	122.89	125.77
4	114.29	119.9	120.09	116.09	118.26	118.89	120.71	122.32	123.68
13,000rpm									
1	121.15	121.76	123.12	125.34	131.22	131.24	136	138.94	139.62
2	120.32	120.96	122.62	120.64	124.21	128.22	131.07	131.21	131.77
3	118.14	119.58	120.18	116.61	117.44	120.64	119.95	121.86	122.29
4	131.15	131.76	132.38	116.99	120.14	127.31	129.56	130.84	133.55
16,000rpm									
1	135.15	136.79	139.34	134.51	138.53	139.11	136.92	138.24	138.92
2	133.46	133.76	134.99	126.84	130.88	134.15	135.12	136.63	137.8
3	126.38	127.53	128.88	122.59	124.03	129.43	125.33	126.35	127.55
4	132.66	132.86	134.66	128.89	128.98	131.73	126.92	132.66	134.18

(Inclined plane 45°, d=0.9mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	119.86	121.81	124.88	123.17	128.33	127.54	130.7	140.33	140.73
2	114.3	115.48	110.8	116.86	123.07	125.91	125.58	133.36	140.65
3	111.88	114.56	121.34	113.34	117.54	119.47	121.63	125.64	131.39
4	122.45	123.15	127.99	117.45	129.2	137.7	124.68	125.65	127.93
13,000rpm									
1	125.61	132.38	133.49	132.97	133.64	136.28	139.37	146.5	155.06
2	123.44	123.66	123.94	127.82	130.11	133.82	131.94	140.96	142.38
3	118.73	119.65	127.04	119.07	119.98	124.13	127.63	127.99	128.8
4	132.01	133.49	133.12	127.68	128.48	134.56	133.56	134.27	135.5
16,000rpm									
1	146.89	147.46	156.34	142.27	142.73	145.88	144.19	155.31	160.09
2	133.87	141.52	142.56	142.13	143.88	150.34	138.92	141.32	141.58
3	128.62	132.2	137.72	131.57	139.47	139.54	136.26	141.12	143.93
4	135.46	135.43	137.11	129.54	140.78	141.64	137.15	139.76	144.4

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Internal cutting, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	96.71	98.23	101.06	90.04	91.2	96.54	99.21	101.83	105.46
2	88.81	94.12	95.67	79.62	84.89	87.57	93.54	94.96	97.08
3	87.69	87.66	89.68	77.36	77.52	79.2	88.91	94.16	96.41
13,000rpm									
1	106.09	103.46	109	99.54	99.37	100	111.56	109.25	112
2	97.79	93.83	100.91	91.68	89.82	95.91	104.13	102.36	105.81
3	94.79	93.04	95.18	87.81	87	88.74	101.39	98.07	104.99
16,000rpm									
1	105.08	106.85	110	88.94	100.44	104.21	106.82	112.01	115.5
2	100.96	102.76	104.69	94.35	94.78	99.55	104.94	109.6	112.33
3	100.44	101.29	102.99	91.25	92.27	96.06	103.84	105.2	107.5

(Internal cutting, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	98.58	100.73	105.02	94.98	97.63	101.78	99.99	104.14	106.9
2	92.46	96.72	97.31	88.88	93.42	94.62	98.94	99.69	100.63
3	89.99	91.02	92.21	86.18	87.06	87.98	92.4	97	99.44
13,000rpm									
1	112.23	111.56	112.52	109.86	109.25	110.3	113.34	112.23	117.5
2	99.54	99.49	103.76	97.74	91.38	101.63	108.98	103.99	109.2
3	100.69	99	103.05	93.48	91.43	93.73	107.31	98.75	108.02
16,000rpm									
1	105.41	109.49	113.86	99.17	105.56	108.8	108.85	113.78	118.52
2	102.94	106.55	107.03	98.85	101.7	104.09	108.35	112.89	113.68
3	105.37	105.44	107.37	98.64	100.48	101.62	107.93	109.33	110.53

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Internal cutting, d=0.6mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	111.83	111.88	112.51	110.44	112.07	114.2	120.8	120.39	122.1
2	105.56	106.04	107.06	102.31	105.41	112.35	115.17	115.26	116.82
3	97.64	98.56	103.24	88.83	96.26	104.7	108.36	110	112.06
13,000rpm									
1	120.83	121.79	122.18	121.1	121.01	124.3	129.9	129.95	131.31
2	117.27	119.8	120.41	115.2	117.7	117.77	126.9	126.95	128.31
3	107.38	112.43	113.85	109.24	109.71	113.32	102.72	108.9	108.75
16,000rpm									
1	117.67	118.66	119.46	124.38	126.27	126.53	131.53	132.95	135.54
2	113.76	117.18	118.35	112.62	117.43	118.15	118.61	119.65	124.18
3	110.99	112.35	115.54	108.65	113.2	114.82	116.85	119.3	119.53

(Internal cutting, d=0.6mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	115.98	116.47	117.79	125.57	123.83	127.88	127.3	125.69	131.93
2	111.16	112.12	113.55	118.25	116.81	119.66	117.39	119.65	120.68
3	104.54	110.72	112.25	112.2	103.38	111.26	115.86	118.17	119.48
13,000rpm									
1	126.49	127.69	130.05	130.64	132.26	134.89	132.92	133.14	134.68
2	125.15	127.32	128.44	127.91	130.27	133.27	129.92	130.14	131.68
3	115.74	120.05	120.59	120.2	125.44	125.79	109.03	110.22	117.85
16,000rpm									
1	125.16	127.75	128.32	127.33	133.23	136.11	136.44	137.79	142.52
2	120.65	120.23	125.82	125.41	130.26	131.64	122.7	129.46	131.47
3	116.31	118.64	121.33	124.28	125.96	127.43	121.35	123.2	122.53

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(Internal cutting, d=0.9mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	124.31	127.29	130.69	118.6	121.99	124.64	135.37	138.71	145.04
2	119.14	124.45	129.38	116.94	117.42	119.56	129.72	137.27	139.37
3	111.51	110.99	110.79	107.64	115.79	116.43	118.33	119.84	121.83
13,000rpm									
1	143.6	146.39	155.86	124.71	128.24	134.22	142.89	147.89	152.17
2	127.24	133.36	136.38	123.8	130.84	131.33	132.39	134.79	135.65
3	123.27	127	127.86	119.9	123.16	124.67	127.86	128.15	129.14
16,000rpm									
1	137.09	145.44	147.65	133.73	141.37	146.68	139.83	150.32	150.92
2	135.18	135.88	141.28	130.12	130.33	139.06	135.15	140.49	141.65
3	126.02	129.8	133.05	123.54	128.73	131.24	129.46	133.38	135.82

(Internal cutting, d=0.9mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	137.16	145.1	147.36	135.32	144.54	143.69	152.01	158.82	159.53
2	138.83	141.23	143.27	132.72	140.41	143.5	146.18	152.06	155.08
3	132.6	132.41	134.73	127.78	131.02	131.03	130.57	132.64	148.37
13,000rpm									
1	154.59	159.2	163.06	157.29	162.72	166.48	155.23	163.66	167.63
2	139	141.99	147.11	143.8	146.75	147.84	138.36	148.89	152.58
3	127.45	134.37	139.25	128.41	135.87	137.91	132.74	133.82	138.38
16,000rpm									
1	145.09	146.82	151.74	152.31	153.1	153.99	152.57	153.43	160.2
2	135.13	144.27	144.44	139.14	140.81	148.16	137.84	152.71	158.16
3	131.52	136.73	140.81	134.9	137.68	148.93	136.21	145.48	148.55



Cutting forces according to AlTiN coating layer

(External cutting, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	92.03	82.14	86.8	85.75	76.7	83.36	87.16	77.82	80.39
2	81.67	77.69	80.78	78.93	73.62	76.26	81.86	75.17	79.54
3	71.52	68.24	71.3	71.44	67.43	67.9	74.75	65.87	70.55
13,000rpm									
1	89.26	79.53	83.94	89.82	74.95	81.68	94.76	77.81	78.74
2	80.03	78.57	79.82	78.63	76.93	78.26	86.19	81.12	83.68
3	76.26	73.6	75.98	75.09	74.05	76.18	79.98	73.2	79.87
16,000rpm									
1	98.45	97.46	101.62	86.88	88.27	92.3	90.31	93.85	98.78
2	87.58	90.08	90.32	83.56	84.78	85.08	87.58	91.4	92
3	82.72	88.09	89.78	82.14	83.95	85.13	82.44	86.36	90.75

(Internal cutting, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	91.8	86.8	88.23	91.71	84.21	85.87	91.48	82.9	84.44
2	85.38	81.4	85.1	85.67	81.4	83.81	87.9	77.33	83.13
3	77.46	70.6	75.09	76.7	70.33	73.66	76.19	67.16	69.68
13,000rpm									
1	92.07	83.44	84.95	92.53	82.98	84.25	94.26	83.25	83.02
2	83.82	81.68	82.71	84.55	81.38	82.8	89.06	83.43	87.59
3	80.32	74.41	79.95	80.37	74.45	80.13	81.1	78.26	81.23
16,000rpm									
1	98.52	100.77	103.55	93.35	94.94	98.56	94.12	94.23	105.57
2	89.3	93.24	93.47	89.51	91.83	93.16	92.45	96.75	95.35
3	87.31	90.65	92.6	86.95	90.07	92.18	83.21	92.85	92.04

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(External cutting, d=0.6mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	80.71	87.12	92.22	84.84	87.81	93.34	85.82	94.95	100.58
2	79.05	83.06	85	78.53	82.13	83.99	83.77	87.21	91.44
3	76.01	79.4	86.78	74.83	76.09	82.75	77.67	79.25	87.23
13,000rpm									
1	96.11	97.22	100.39	93.11	93.76	96.21	96.91	99.72	107.72
2	88	91.09	93.15	89.09	88.25	90.11	89.09	91.69	95.17
3	84.26	86.48	89.65	82.23	83.26	85.62	82.16	82.35	85.69
16,000rpm									
1	96.54	105.89	110.65	97.65	106.57	109.33	104.02	112.7	121.66
2	95.38	96.95	100.09	90.79	92.78	96.77	99.16	99.85	103.29
3	90.49	93.13	94.3	86.87	88.57	89.53	88.24	88.39	90.79

(Internal cutting, d=0.6mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	84.9	92.75	98.82	101.11	103.73	108.66	103.96	108.01	112.34
2	87.91	90.48	91.97	98.12	101.33	103.43	100.59	103.06	105.52
3	87.52	88.09	94.61	85.62	93.99	96.63	90.38	98.43	102.16
13,000rpm									
1	103.73	101.11	108.66	103.96	108.01	112.34	108.96	109.85	113.38
2	98.12	101.33	103.43	100.59	103.06	105.52	96.82	99.61	104.17
3	93.99	95.12	96.63	98.38	98.43	102.16	91.54	91.74	98.62
16,000rpm									
1	102.32	109.89	116.72	104.44	113.33	118.2	111.25	122.66	126.51
2	102.59	104.13	105.16	105.55	106.76	109.45	107.26	109.48	110.17
3	101.22	101.29	101.83	101.73	105.07	105.26	93.06	93.93	95.31

Cutting forces according to AlTiN coating layer

(External cutting, d=0.9mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	111.99	115.38	117.53	105.09	105.33	107.71	109.42	112.56	115.09
2	111.32	111.97	114.47	99.53	100.03	102.11	107.57	107.71	113.16
3	105.82	102.11	103.02	94.19	96.53	95.92	99.68	108.04	110.25
13,000rpm									
1	114.11	117.12	117.65	107.51	109.68	116.26	117.69	122.2	121.47
2	111.13	115.56	122.77	107.51	107.68	111.88	112.42	121.42	120.64
3	106.62	108.99	110.19	98.79	100.61	103.14	111.91	114.6	114.79
16,000rpm									
1	123.12	130.85	131.61	112.68	117.47	119.72	123.84	130.92	132.13
2	116.23	121.23	126.03	104.02	105.36	113.83	118.07	121.28	130.43
3	109.06	112.85	114.28	102.96	104.31	106.13	116.53	120.33	123.64

(Internal cutting, d=0.9mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Fx [N]			Fy [N]			Fz [N]		
	10,000rpm								
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	125.76	126.25	131.66	111.79	115.42	118.24	119.2	128.32	131.54
2	119.05	125.66	125.75	104.19	105.61	103.67	124.83	125.49	126.65
3	116.2	119.91	120.06	103.56	99.74	98.19	114.19	119.83	124.59
13,000rpm									
1	126.11	129.3	132.12	123.61	126.95	129.75	132.38	136.62	142.67
2	122.65	124.55	130.2	115.83	123.03	123.36	122.12	135.82	136.53
3	109.18	112.49	114.31	102.81	104.4	108.71	122.05	123.75	125.83
16,000rpm									
1	130.19	131.55	137.12	113.95	122.49	131.68	131.27	143.21	152.38
2	119.96	123.3	126.96	107.58	111.38	122.48	129.95	131.43	138.42
3	119.15	121.4	124.32	106.4	108.72	111.28	127.29	127.66	129.4

Surface roughness according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 15°, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.9178	0.96	1.1045	0.807	0.91	0.9965	1.0145	1.0352	1.23
2	0.7958	0.8925	0.9132	0.725	0.845	0.9825	0.8745	1.0036	1.325
3	0.7458	0.8632	0.8425	0.635	0.7125	0.8245	0.9325	0.9536	1.2358
4	0.8783	1.0861	0.9750	0.865	0.9125	1.0650	0.9570	0.9957	1.3683
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	1.0855	1.203	1.2666	0.9584	1.102	1.1954	1.1954	1.3675	1.452
2	1.12	1.235	1.325	0.9154	1.135	1.236	1.1524	1.2578	1.425
3	0.9625	1.0723	1.1436	0.8354	0.9625	1.0724	1.0724	1.1778	1.2445
4	1.1185	1.2283	1.398	0.9914	1.1185	1.3658	1.368	1.425	1.524
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.1311	1.1886	1.32	1.254	1.3857	1.6168	1.2885	1.4218	1.724
2	1.0985	1.162	1.2927	1.1463	1.2232	1.3578	1.31	1.3643	1.5627
3	0.9847	1.0326	1.1367	1.0478	1.1247	1.2478	1.1325	1.2658	1.4527
4	1.125	1.2306	1.365	1.1828	1.3227	1.3828	1.2675	1.4638	1.5877

(Inclined plane 15°, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.9965	1.098	1.2307	1.0172	0.9145	1.1076	1.1252	1.1076	1.36
2	0.9856	0.8745	1.0032	0.912	0.835	1.1087	0.9856	1.1078	1.452
3	0.9356	0.8245	0.9532	0.8452	0.7425	0.9356	1.0587	1.0578	1.3254
4	1.0681	1.025	1.0857	0.9777	0.8750	1.1912	1.1903	1.325	1.452
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	1.1786	1.365	1.3786	1.0855	1.203	1.3008	1.3008	1.4887	1.542
2	1.235	1.3325	1.452	1.0425	1.236	1.3658	1.2578	1.365	1.4457
3	1.0556	1.1658	1.2556	0.9625	1.0556	1.1778	1.1778	1.2525	1.3657
4	1.1563	1.2145	1.3254	1.2018	1.2419	1.475	1.2417	1.3535	1.575
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.2195	1.3412	1.452	1.3518	1.3919	1.625	1.3917	1.5035	1.725
2	1.23	1.2837	1.3447	1.2943	1.3344	1.4687	1.3342	1.446	1.6429
3	1.0635	1.1852	1.2347	1.1958	1.2359	1.3587	1.2357	1.3475	1.5329
4	1.1985	1.3832	1.3697	1.3308	1.4339	1.4937	1.3707	1.5455	1.6679

Surface roughness according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 30°, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.692	0.535	0.865	0.536	0.532	0.6785	0.748	0.7524	1.0425
2	0.6257	0.53	0.618	0.52	0.461	0.798	0.562	0.678	1.024
3	0.587	0.48	0.568	0.47	0.411	0.738	0.512	0.628	0.932
4	0.698	0.514	0.635	0.635	0.4975	0.824	0.652	0.715	1.12
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	0.965	0.7054	0.7944	1.0524	0.8164	0.8974	0.825	0.9994	1.1234
2	0.7275	0.6165	0.654	0.957	0.753	0.8085	0.8965	0.954	1.1254
3	0.725	0.52	0.609	0.867	0.631	0.712	0.712	0.814	0.938
4	0.835	0.6724	0.724	1.024	0.724	0.836	0.865	0.935	1.021
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.096	1.257	1.3368	1.2038	1.2807	1.4038	1.306	1.485	1.657
2	0.987	1.1254	1.2655	1.035	1.2355	1.4455	1.165	1.3144	1.5455
3	0.9135	1.0397	1.1798	1.038	1.1498	1.3598	1.149	1.2287	1.4598
4	1.0775	1.245	1.2998	1.158	1.2698	1.4798	1.269	1.456	1.5798

(Inclined plane 30°, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.765	0.685	1.036	0.657	0.615	0.852	0.7485	0.8654	1.1427
2	0.727	0.531	0.7254	0.634	0.574	0.962	0.634	0.735	1.098
3	0.677	0.56	0.648	0.55	0.491	0.912	0.592	0.708	1.123
4	0.824	0.674	0.845	0.685	0.5775	0.9985	0.632	0.821	1.2095
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	0.956	0.735	0.8874	1.121	0.8974	1.012	1.214	1.127	1.258
2	1.0321	0.7524	0.857	0.9635	0.8752	0.9175	1.0658	1.0315	1.245
3	0.824	0.567	0.702	0.9356	0.715	0.821	0.935	0.935	1.247
4	0.9882	0.8425	1.0245	1.057	1.1104	1.23	1.0875	1.1368	1.41
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.1964	1.4299	1.456	1.3855	1.485	1.6964	1.458	1.4964	1.758
2	1.025	1.2353	1.298	1.1356	1.3245	1.468	1.254	1.398	1.598
3	1.0394	1.1496	1.2729	1.1765	1.2388	1.4687	1.2285	1.3394	1.5394
4	1.1325	1.326	1.3929	1.2965	1.3588	1.5887	1.425	1.568	1.6594

Surface roughness according to AlTiN coating layer

(Inclined plane 45°, d=0.3mm, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.5854	0.4854	0.5354	0.6834	0.6374	0.6754	0.8704	0.6854	0.7414
2	0.6078	0.4178	0.5178	0.6547	0.4895	0.6158	0.6958	0.6178	0.845
3	0.55	0.36	0.46	0.616	0.41	0.558	0.638	0.56	0.745
4	0.6487	0.5087	0.5587	0.7147	0.524	0.6567	0.7367	0.6587	0.8437
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	0.666	0.724	0.735	0.687	0.742	0.812	0.724	0.8745	0.9445
2	0.587	0.6197	0.787	0.5887	0.6777	0.8127	0.6777	0.8282	0.8982
3	0.47	0.592	0.625	0.503	0.534	0.727	0.592	0.7425	0.8125
4	0.57	0.692	0.725	0.603	0.634	0.8425	0.692	0.827	0.9125
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	0.875	0.965	1.1604	0.945	1.1595	1.325	1.087	1.3704	1.459
2	0.854	0.965	1.0245	0.9097	1.035	1.1547	1.0206	1.1365	1.2578
3	0.723	0.8352	0.9354	0.8245	1.0245	1.124	0.9354	1.2354	1.324
4	0.854	0.854	1.065	0.9485	1.145	1.248	1.0594	1.235	1.423

(Inclined plane 45°, d=0.3mm, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.7634	0.5284	0.6404	0.7194	0.7204	0.789	0.9404	0.7504	0.8704
2	0.623	0.4897	0.5728	0.712	0.512	0.6874	0.8028	0.6971	0.8458
3	0.595	0.403	0.515	0.715	0.512	0.594	0.745	0.625	0.815
4	0.705	0.643	0.646	0.718	0.513	0.925	0.876	0.84	0.965
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	0.789	0.698	0.821	0.7535	0.835	0.896	0.8245	0.9478	1.0365
2	0.7072	0.5915	0.8109	0.612	0.758	0.865	0.7782	0.9015	0.9902
3	0.7376	0.5058	0.7252	0.6215	0.6215	0.8378	0.6925	0.8158	0.9045
4	0.9619	0.7284	0.988	0.9175	1.017	1.2284	0.99	1.0284	1.29
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	0.9882	1.1	1.254	1.057	1.2604	1.38	1.265	1.542	1.56
2	0.968	1.0502	1.1106	1.0505	1.2106	1.257	1.1578	1.365	1.3698
3	0.8532	0.965	1.0254	0.9653	1.1254	1.245	1.065	1.354	1.425
4	0.935	1.057	1.185	1.086	1.2494	1.254	1.189	1.368	1.549

Surface roughness according to AlTiN coating layer

(Internal cutting, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.865	1.012	1.18	1.067	1.016	1.267	1.187	1.077	1.438
2	0.776	0.865	0.943	0.988	0.87	1.148	1.025	1.098	1.289
3	0.723	0.812	0.9375	0.935	0.874	1.038	0.925	1.045	1.236
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	1.253	1.047	1.256	1.144	1.154	1.386	1.253	1.363	1.475
2	1.142	0.954	1.172	1.052	1.098	1.336	1.142	1.301	1.432
3	0.905	1.002	1.111	1.111	1.012	1.221	1.114	1.244	1.333
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.288	1.406	1.52	1.366	1.477	1.577	1.52	1.577	1.687
2	1.225	1.343	1.457	1.303	1.501	1.514	1.345	1.514	1.624
3	1.135	1.213	1.367	1.253	1.324	1.424	1.367	1.424	1.534

(Internal cutting, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.981	1.067	1.3	1.157	1.157	1.39	1.325	1.117	1.565
2	0.892	0.978	1.043	1.068	0.93	1.238	1.136	1.178	1.298
3	0.839	0.925	1.015	1.015	0.975	1.158	1.015	1.125	1.245
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	1.373	1.203	1.406	1.263	1.263	1.46	1.535	1.586	1.652
2	1.265	1.132	1.335	1.382	1.142	1.347	1.375	1.462	1.498
3	1.041	1.111	1.244	1.211	1.111	1.311	1.244	1.308	1.411
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.71	1.718	1.827	1.89	1.842	1.96	1.921	1.983	2.038
2	1.723	1.633	1.712	1.735	1.747	1.865	1.732	1.725	1.862
3	1.545	1.645	1.725	1.543	1.657	1.787	1.652	1.775	1.842

Surface roughness according to AlTiN coating layer  
(External cutting, Upward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.754	0.838	0.94	0.682	0.727	0.9	0.825	0.989	1.097
2	0.702	0.786	0.888	0.63	0.675	0.848	0.773	0.937	1.045
3	0.652	0.798	0.838	0.58	0.625	0.887	0.723	0.736	0.995
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	0.985	1.042	1.11	103.96	108.01	112.34	1.139	1.198	1.2233
2	0.828	0.883	1	100.59	103.06	105.52	1.087	1.165	1.1713
3	0.816	0.898	0.956	98.38	98.43	102.16	0.985	1.063	1.0693
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.179	1.217	1.337	1.22	1.354	1.427	1.355	1.427	1.54
2	1.123	1.161	1.281	1.196	1.275	1.371	1.352	1.371	1.484
3	1.037	1.075	1.195	1.078	1.212	1.285	1.213	1.285	1.398

(External cutting, Downward cutting)

AlTiN Coating layer	Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.3mm								
	10,000rpm			13,000rpm			16,000rpm		
	Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]			Feed rate[mm/min]		
	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700	1,300	1,500	1,700
1	0.952	0.934	1.067	0.842	0.932	1.052	1.112	1.125	1.167
2	0.882	0.888	0.937	0.823	0.813	0.913	1.015	1.115	1.142
3	0.763	0.832	0.985	0.652	0.763	0.965	0.887	0.838	1.065
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.6mm									
1	0.991	1.139	1.175	1.139	1.122	1.179	1.317	1.219	1.299
2	0.939	1.127	1.087	1.07	1.087	1.167	1.245	1.323	1.347
3	0.837	0.985	1.025	0.968	0.985	1.065	1.096	1.163	1.145
Surface roughness( $\mu\text{m}$ )--d=0.9mm									
1	1.442	1.553	1.652	1.553	1.652	1.775	1.656	1.885	2.012
2	1.301	1.371	1.483	1.383	1.472	1.583	1.505	1.585	1.817
3	1.215	1.285	1.397	1.285	1.374	1.485	1.395	1.585	1.707



#### 4. 절삭가공 프로그램

%	G0 Z100.	X-4.661 Z2.907
O0	X-52.83 Y9.5	X-4.357 Z2.962
G17 G40 G80 G90	Z-8.795	X-4.3 Z2.969
G49	G1 Z-9.995 F1500.	
S10000 M3	X-30.455 Z-4.	
G0 G90 X-52.83 Y5.	X-4.839 Z2.864	X-3.989 Z2.996
Z100.	X-4.661 Z2.907	
M8	X-4.357 Z2.962	X-3.804 Z3.
G0 Z-8.795	X-4.3 Z2.969	X3.804
G1 Z-9.995 F1300.	X-3.989 Z2.996	X3.989 Z2.996
X-30.455 Z-4.	X-3.804 Z3.	X4.3 Z2.969
X-4.839 Z2.864	X3.804	X4.357 Z2.962
X-4.661 Z2.907	X3.989 Z2.996	X4.661 Z2.907
X-4.357 Z2.962	X4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-4.3 Z2.969	X4.357 Z2.962	X30.455 Z-4.
X-3.989 Z2.996	X4.661 Z2.907	X52.83 Z-9.995
X-3.804 Z3.	X4.839 Z2.864	G0 Z100.
X3.804	X30.455 Z-4.	X-52.83 Y20.
X3.989 Z2.996	X52.83 Z-9.995	Z-8.795
X4.3 Z2.969	G0 Z100.	G1 Z-9.995 F1300.
X4.357 Z2.962	X-52.83 Y14.	X-30.455 Z-4.
X4.661 Z2.907	Z-8.795	X-4.839 Z2.864
X4.839 Z2.864	G1 Z-9.995 F1700.	X-4.661 Z2.907
X30.455 Z-4.	X-30.455 Z-4.	X-4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.839 Z2.864	X-4.3 Z2.969

X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y29.	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1700.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y24.5	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1500.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y39.5
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y35.	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1300.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969

X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1300.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y44.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1700.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y59.
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1700.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y54.5	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y50.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995

G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y65.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1300.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y80.
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1300.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y74.	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1700.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y69.5	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1500.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y84.5
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.

X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y95.	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1300.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y89.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1700.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y104.
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1700.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y99.5	X-3.989 Z2.996

X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y114.5	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y110.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1300.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y125.
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1300.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y119.	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1700.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962

X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y129.5	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1500.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y144.5
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y140.	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1300.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y134.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1700.	X3.804	G0 Z100.

X-52.83 Y149.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1700.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	X-52.83 Y164.
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	Z-8.795
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1700.
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864
X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907
X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962
X3.804	G0 Z100.	X-4.3 Z2.969
X3.989 Z2.996	X-52.83 Y159.5	X-3.989 Z2.996
X4.3 Z2.969	Z-8.795	X-3.804 Z3.
X4.357 Z2.962	G1 Z-9.995 F1500.	X3.804
X4.661 Z2.907	X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996
X4.839 Z2.864	X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969
X30.455 Z-4.	X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962
X52.83 Z-9.995	X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907
G0 Z100.	X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864
X-52.83 Y155.	X-3.989 Z2.996	X30.455 Z-4.
Z-8.795	X-3.804 Z3.	X52.83 Z-9.995
G1 Z-9.995 F1300.	X3.804	G0 Z100.
X-30.455 Z-4.	X3.989 Z2.996	M9
X-4.839 Z2.864	X4.3 Z2.969	G90 G49 M5
X-4.661 Z2.907	X4.357 Z2.962	M30
X-4.357 Z2.962	X4.661 Z2.907	%
X-4.3 Z2.969	X4.839 Z2.864	



## 감사의 글

학위과정부터 본 논문이 완성되기까지, 연구하는 자세와 방법을 일깨워 주시고, 나보다는 남을 먼저 생각하고, 지식인이기 보다는 인격자가 되길 원하시며 올바른 학문의 길을 인도해주신 조규재 지도교수님께 진심으로 감사드립니다.

본 논문이 보다 나은 논문이 될 수 있도록 먼 곳까지 마다 않으시고 심사 과정에서 열과 성의를 다하여 아낌없는 조언과 고견을 제시하여 주신 동아대학교 전언찬 교수님, 보다 좋은 논문이 될 수 있도록 많은 충고와 따뜻한 말씀으로 격려를 하여주신 김종관 교수님, 윤성운 교수님, 한길영 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러, 본 논문의 실험에서부터 완성되기까지 아낌없는 도움을 주신 조선이공대학 박기형 교수님, 김하식 교수님, 노찬승 교수님, 박종남 교수님, 최병희 교수님, 서강정보대학 김선진 교수님, 홍성인 교수님, 조선대학교 홍성오 박사님, 정성택 박사님, 장호섭 박사님, 박수정 박사님께 감사의 인사를 드리며, 본 학위논문이 완성될 수 있도록 연구수행에 도움을 주신 엠엔티(주) 정연오 사장님, Hi-Tech 정밀 황환호 사장님, 박석철 과장님, Sen Tech 김재중 사장님께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 박사학위 과정동안 학문적 교류와 함께 많은 도움을 주신 기계설계공학과 이길성 박사님, 김창오 박사님, 기계공학과 김광호 박사, 정밀기계공학과 양호동 박사, 신호준 박사, 전기공학과 고필주 박사에게도 감사를 드립니다. 그리고 학위과정동안 바쁘게 생활하면서도 정겨운 대화를 많이 나눈 양용준, 정한별, 김정대, 황우채, 민관웅, 손재경, 전근홍, 신영필, 광영삼과 기계공학과 대학원 선배님 모두에게 고마움을 표합니다.

오늘이 있기까지 헌신과 사랑으로 보살피 주신 아버님, 어머님께 이영광을 드리며, 항상 관심을 가지고 지켜보아 주신 형님, 형수님, 누님, 매형, 사랑

하는 조카 지우, 지상, 형우와 이 기쁨을 같이 나누고 싶습니다. 끝으로 오랜 시간동안 곁에서 많은 도움이 되어준 친구들과 이 작은 결실의 기쁨을 나누고자 합니다.

2010년 6월

모형 실험실에서 이 승 철 올림

## 저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20077334	과 정	박사
성 명	(한글) 이 승 철 (한문) 李 承 哲 (영문) Lee, Seung-Chul				
주 소	광주광역시 동구 학동 무등파크맨션 2동 803호				
연락처	e-mail : cjf9400@hanmail.net				
논문제목	(한글) AlTiN코팅 공구를 이용한 플라스틱 금형강의 절삭특성에 관한 연구				
	(영문) A study on the machinability of plastic mould steel using AlTiN coated tool				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 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 편집과 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 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함

동의여부 : 동의( 0 )    반대(    )

2010    년    8    월

작자 : 이 승 철 (인)

**조선대학교 총장 귀하**