creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000232748

*2006*年 *2*月

博士學位論文

TiAlN 코팅공구를 이용한 *Ti-6Al-4V* 합금의 선삭가공특성에 관한 연구

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

機械工學科

朴 鍾 南

TiAlN 코팅공구를 이용한 *Ti-6Al-4V* 합금의 선삭가공특성에 관한 연구

A Study on the Turning Operations Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy using TiAlN Coated Tool

2006 년 *2* 월 일

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

機械工學科

朴 鍾 南

TiAlN 코팅공구를 이용한 *Ti-6Al-4V* 합금의 선삭가공특성에 관한 연구

指導敎授　曺　圭　宰

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2005 年 *10* 月　日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

朴　鍾　南

朴鍾南의 博士學位論文을 認准함.

委員長	圓光大學校	敎授	金 東 炫	印
委 員	東亞大學校	敎授	全 彦 燦	印
委 員	朝鮮大學校	敎授	金 鍾 寬	印
委 員	朝鮮大學校	敎授	尹 聖 雲	印
委 員	朝鮮大學校	敎授	曺 圭 宰	印

2005 年 *12* 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 ····· Ⅺ

제 *1* 장 서 론

1.1 연구배경 및 연구동향 ····· 1
1.2 연구목적 ····· 4

제 *2* 장 이론적 배경

2.1 티타늄 재료의 특성 ····· 6
2.1.1 α- Ti합금 ····· 6
2.1.2 β- Ti합금 ····· 10
2.1.3 $\alpha+\beta$- Ti합금 ····· 10
2.1.4 티타늄 재료의 가공성 ····· 13
2.2 PVD TiAlN 코팅 공구 ····· 16
2.3 절삭저항 ····· 18
2.4 마찰마멸의 이론적 고찰 ····· 21
2.4.1 마찰현상 ····· 21
2.4.2 마멸현상 ····· 23

2.4.3 공구마멸 ····· 29
2.5 절삭가공면의 거칠기 ····· 40
2.5.1 절삭방향의 표면거칠기 ····· 40
2.5.2 이송방향의 표면거칠기 ····· 40
2.6 칩 처리성 ····· 44

제 3 장 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치 ····· 47
3.2 고정공구용 지그제작 ····· 53
3.3 시험편 및 절삭공구 ····· 54
3.3.1 시험편 ····· 54
3.3.2 절삭공구 ····· 55
3.4 실험방법 ····· 56

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 절삭특성 ····· 59
4.2 공구의 마멸 ····· 73
4.2.1 공구마멸 형태 ····· 73
4.2.2 절삭시간과 플랭크마멸량의 관계 ····· 78
4.2.3 공구수명식에 의한 절삭성 평가 ····· 80
4.3 표면거칠기에 대한 분석 ····· 83
4.4 칩 발생 형태 ····· 92
4.5 칩 처리성 ····· 94
4.6 가공경화층 측정 ····· 102

제 5 장 결 론 ····· 107

Reference ····· 109

LIST OF FIGURES

Fig. 2. 1 Schematic phase diagram of titanium and stabilizer elements 8
Fig. 2. 2 Chip formation in machining titanium alloys ····· 15
Fig. 2. 3 Structure of TiN and TiAlN coating ····· 17
Fig. 2. 4 Components of cutting force ····· 20
Fig. 2. 5 Contact condition of surface ····· 22
Fig. 2. 6 Holm's theory of adhesion wear ····· 25
Fig. 2. 7 Archard's theory of adhesion wear ····· 25
Fig. 2. 8 A model of abrasive wear ····· 27
Fig. 2. 9 A model of corrosive wear ····· 29
Fig. 2.10 Schematic of tool wear configuration ····· 31
Fig. 2.11 Crater wear ····· 32
Fig. 2.12 Flank wear ····· 36
Fig. 2.13 Typical flank wear progression of sintered carbide tool ····· 39
Fig. 2.14 Surface roughness of vertical radius R=0 ····· 40
Fig. 2.15 Surface roughness of vertical radius R≠0 ····· 42
Fig. 2.16 The classification of chip shape INFOS standard ····· 46
Fig. 3. 1 Schematic diagram of measuring equipment ····· 50
Fig. 3. 2 Shape and dimensions of jig ····· 53
Fig. 3. 3 Insert of dimple type chip former ····· 55
Fig. 4. 1 Relations between cutting time and cutting force
on Ti-6Al-4V alloy for TiAlN coated carbide tool
(V=70m/min, F=0.2mm/rev, D=1.0mm) ····· 60
Fig. 4. 2 Relations between cutting time and cutting force

on Ti-6Al-4V alloy for TiAlN coated carbide tool
(V=70m/min, F=0.2mm/rev, D=0.5mm) ····· 62
Fig. 4. 3 Tangential force with respect to depth of cut (F=0.2mm/rev) 64
Fig. 4. 4 Radial force with respect to depth of cut (F=0.2mm/rev) ····· 66
Fig. 4. 5 Longitudinal force with respect to depth of cut
(F=0.2mm/rev) ····· 68
Fig. 4. 6 Cutting force components with respect to feed rate
(V=70m/min) ····· 70
Fig. 4. 7 Cutting force with respect to cutting speeds
(F=0.2mm/rev, D=1.0mm) ····· 72
Fig. 4. 8 Wear progression of TiAlN coated carbide tool
(V=90m/min, F=0.2mm/rev, D=2.0mm) ····· 76
Fig. 4. 9 Tool wear of TiAlN coated carbide tool
(V=90m/min, F=0.2mm/rev, D=2.0mm) ····· 77
Fig. 4.10 Flank wear test results for Ti-6Al-4V alloy using TiAlN
coated tool ····· 79
Fig. 4.11 Tool life diagram by logarithm of the axes ····· 82
Fig. 4.12 Surface roughness test results vs. theoretical values ····· 84
Fig. 4.13 Surface roughness with respect to cutting speed and feed rate
(R=1.2mm, D=1.5mm) ····· 85
Fig. 4.14 Surface roughness with respect to feed
(V=70m/min, D=0.5mm) ····· 87
Fig. 4.15 Surface roughness with respect to feed
(V=70m/min, D=1.0mm) ····· 88
Fig. 4.16 Surface roughness with respect to feed
(V=70m/min, D=1.5mm) ····· 89

Fig. 4.17 Surface roughness with respect to feed
(V=70m/min, D=2.0mm) ····· 90
Fig. 4.18 Surface roughness with respect to feed
(V=70m/min, D=2.5mm) ····· 91
Fig. 4.19 Good region for chip treatment in cutting speed ····· 101
Fig. 4.20 Vickers hardness of Ti-6Al-4V titanium alloy ····· 103

LIST OF TABLES

Table 2. 1 Properties of titanium and other metals ····· 7
Table 2. 2 Schematic relationship between mechanical properties and titanium alloy phases ····· 9
Table 3. 1 Specification of CNC lathe ····· 48
Table 3. 2 Specifications of experimental apparatus ····· 48
Table 3. 3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy ····· 54
Table 3. 4 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy ····· 54
Table 3. 5 Specifications for cutting tool in machining characteristics test ····· 55
Table 3. 6 Cutting conditions ····· 58
Table 4. 1 Tool life according to cutting speeds ····· 80

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 3. 1 Experimental setup for measurements of machining characteristics ····· 49
Photo. 3. 2 Surface roughness testing system ····· 51
Photo. 3. 3 Video microscope system ····· 51
Photo. 3. 4 Vickers hardness testing system ····· 52
Photo. 4. 1 Saw-toothed chip shape in machining Ti-6Al-4V alloy ····· 92
Photo. 4. 2 Pitch of saw-toothed chip in machining Ti-6Al-4V alloy ·· 93
Photo. 4. 3 Chip treatment cutting speed 30m/min ····· 95
Photo. 4. 4 Chip treatment cutting speed 50m/min ····· 96
Photo. 4. 5 Chip treatment cutting speed 70m/min ····· 97
Photo. 4. 6 Chip treatment cutting speed 90m/min ····· 98
Photo. 4. 7 Chip treatment cutting speed 100m/min ····· 99
Photo. 4. 8 Chip treatment cutting speed 110m/min ····· 100
Photo. 4. 9 Optical macro-scope of hardness measure point. ····· 104
Photo. 4.10 SEM micrographs showing the cross-section of Ti-6Al-4V alloy ····· 105

NOMENCLATURES

Ar	:	*Real contact area*
a	:	*Constant*
a_1	:	*Atom of A metal*
b_1	:	*Atom of B metal*
D	:	*Depth of cut*
d^3	:	*Wear volume of an atom*
F	:	*Friction force*
F_f		*Longitudinal force*
F_p		*Radial force*
F_v		*Tangential force*
Ha	:	*Hardness of abrasive grain*
Hm	:	*Hardness of metal surface*
Hv	:	*Vickers hardness*
K	:	*Constant*
K_T	:	*Depth of crater*
L	:	*Sliding distance*
Na	:	*Total number of atom in the sliding distance*
N_t	:	*Total load of touch face*

P : *Contact load*

R : *Nose radius*

R_a : *Average arithmetic roughness*

$R_{\max}$: *Maximum height*

r : *Crater radius*

t : *Cutting time*

V : *Cutting speed*

V_B : *Width of flank wear*

$V_{B_{\max}}$: *Maximum width of flank wear land*

V_N : *Boundary wear*

W : *Crater volume*

σ : *Contact pressure*

τ : *Shear stress*

σ_0 : *Uniaxial yield stress*

μ : *Coefficient of friction*

β : *Between angle*

Ψ : *Approach angle*

σ_1 : *Maximum principal stress*

σ_3 : *Minimum principal stress*

σ' : *Equivalent stress*

ABSTRACT

A Study on the Turning Operations Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy using TiAlN Coated Tool

Park, Jong-Nam

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

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

In this paper, turning with the TiA1N coating tool that PVD coating was applied to was processed according to the cutting speed at 30m/min～110m/min, cutting depth of 0.5mm～2.5mm and feed rate at 0.1mm/rev～0.3mm/rev in order to find out the cutting characteristics of Ti-6A1-4V alloy occupying over 50% of titanium alloys.

The results on the influence of cutting force by the cutting depth and feed rate, the relationship between the cutting time and the degree of tool wear, tool life according to the cutting characteristics, surface roughness by the feed rate's changes, chip treatment and how machinability affects the hardness are as follows:

1. Cutting depth influences much more on the cutting force than the feed

rate and the big difference of the cutting force emerged because the end of tool had the high temperature when the cutting speed was over 70m/min.

2. The cutting force was largely strong when using the tool with the nose with a radius of 1.2mm than that of 0.8mm and tangential force decreased a little, radial force was constant and longitudinal force grew as the cutting speed increased.

3. The crater wear began at the end of cutting edge and the equation with the tool life $VT^{0.7317} = 236.28$ was set up on the basis of the flank wear.

4. When it comes to the wear characteristics of Ti-6Al-4V alloys, the cutting speed should be under 70m/min to extend the life because the wear speed was very fast at the cutting speed of over 70m/min, while it was largely slow at cutting speed of 50m/min.

5. Surface roughness was largely affected by the feed rate and surface roughness of the precision areas in turning was in the 0.1㎛~0.4㎛ range. Accordingly, feed rate for the precision machining was suitable below 0.15mm/rev.

6. The figure of the chip was largely good as the feed rate increased and chip treatment was the best at the cutting speed of 90m/min and feed rate of 0.25mm/rev~0.3mm/rev according to the chart of the emission

chips by the cutting conditions.

7. According to the hardness experiment of processing section for the machinability of titanium alloys, the hardness was hardly different and PVD TiAlN coating tool had no difficulties in work hardening during the cutting processing of titanium.

제 *1* 장 서 론

1.1 연구배경 및 연구동향

자동차산업, 정보통신산업, 환경산업, 생명공학산업분야 등의 기술혁신이 21세기에 들어와 본격화되고 있는 상황에서 이에 따른 인류의 생활환경도 변화가 일어날 것이라고 공감하고 있다. 특히, 기계가공분야도 변화에 따른 기계제품의 정밀도와 생산성 향상을 위한 자동화 기술의 보급이 보편화된 현재 상황으론 신소재 개발 및 난삭재에 대한 가공기술 개발이 먼저 해결해야 할 과제라 판단된다. 많은 금속 중 난삭재로 분류되고 있는 티타늄은 비강도가 높고, 내식성, 내열성, 생체적합성 및 환경조화성 등의 우수한 특성을 가지고 있어 향후에도 티타늄의 역할은 더욱 더 증대 될 것으로 기대된다.

국내에서 티타늄은 산업이 다양해지면서 티타늄 소재의 수요가 점차적으로 증가하고 있는 추세에 있다. 초기에는 티타늄 소재를 주로 수입에 의존하거나 일부 부품제조를 위한 단순 기계가공 수준에 있었으나, 최근에 들어서는 티타늄 소재의 생산기술 연구에서부터 우주항공재료, 자동차 부품, 의료용기기, 화학공장, 토목・건축자재, 스포츠 용품, 악세사리 등에 이르기까지 다양한 제품이 개발되어 사용되고 있다.

티타늄은 주조, 단조 등의 소성가공이 가능하며, 용접, 접착, 브레이징, 확산 등 접합 및 다양한 기계가공이 가능하다.[1~3] 그러나 티타늄은 다른 금속재료보다 산소와의 결합력이 강하고 활발한 반응성 때문에 원광석에서 추출하는데 많은 에너지가 소요되며, 합금제조가 어려워 소재가격이 강의 약 2배에 달한다. 또한, 대체로 낮은 열전도도와 높은 활성에 기인하기 때문에 기계가공 중에 발생한 열이 절삭 칩을 통해 발산되지 않고 가공부위에 집중되는 현상이 발생하여, 절삭가공시 공구에 열을 집중시켜 공구의 마멸 촉진과 높은 가공정밀도를 얻지 못하는 결점 등을 갖고 있다.

티타늄합금은 난삭재임에도 불구하고 여러 산업분야의 대체품으로 충분한 특성을 가지고 있어 많은 연구가 수행되어지고 있다. 관련 연구동향을 살펴보면, Zlatin[4~5]등이 신소재의 기계가공과 티타늄의 기계가공에서 티타늄합금의 기계적 성질과 가공성에 대하여 연구하였으며, Komanduri[6~7]는 난삭재인 티타늄합금의 가공에 있어서 칩 형성 과정 메커니즘에 대하여 연구하였고, Mcquillan,[8] Kahles[9]등은 티타늄합금의 선삭, 연삭, 드릴링 등 기계가공에 있어서 공구의 절삭성능에 대하여 각각 연구를 수행하였다.

Elgomayel[10]는 화학증착법(CVD, Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 초경공구에 Ti을 코팅하여 티타늄합금 가공에 있어서 코팅공구의 절삭특성에 관하여 연구하였으며, Zlatin[11]는 티타늄 합금의 열전도율이 매우 낮은 특징과 관련하여 선삭시 공구-칩 간의 인터페이스 온도분포에 대하여 연구하였다.

Rajurkar[12]는 티타늄합금에 대한 다른 절삭방법을 시도하였다. 펄스전기 화학가공, 화학밀링, 레이저 빔 가공 등이 가장 많이 다루어졌으며 이러한 비전통적 가공방법들은 양호한 표면을 가진 복잡한 형상을 가공하는 데는 효과적이지만, 절삭능률은 그다지 좋지 않으며, 표면상 피팅(Pitting)과 열적손상(Thermal damage)등 또 다른 하나의 제한으로 등장하였다.

Yankoff,[13] Mazurkiewics[14]등은 티타늄 합금의 효율적인 가공을 위하여 주요한 장애요인이던 고온의 절삭온도를 낮추기 위한 방법으로 절삭공구의 상면과 플랭크면에 고압의 절삭유를 분사하여 윤활과 냉각을 도모하는 고압 윤활 시스템을 이용하는 방법을 연구하였으나 초경 인서트에 윤활용 구멍을 뚫어야 하므로 구조적으로 공구의 강도를 낮추는 문제가 있고 강력한 냉각제를 절삭 시스템에 공급하지 못하는 약점이 있었다.

Fox-Raboinovich[15]는 이중의(Ion nitriding+TiCrN) PVD 코팅공구와 3겹(Ion nitriding+Ion mixing+TiCrN)의 PVD 코팅공구를 통하여 마멸특성에 관한 연구 등 많은 연구가 수행되어져 왔다. 국내에서의 티타늄합금 가공에 관한 연구는 Hong[16]의 시뮬레이션을 통한 티타늄합금의 절삭력 및 온도예측에

관한 연구와 Kim[17] 등의 초경공구를 이용한 티타늄합금의 절삭가공시 공구 마멸과 절삭특성에 관한 연구 등이 있으나 그다지 많지 않은 실정이다.

앞으로 티타늄 제품의 사용이 다방면에서 급속한 신장을 하고 이에 따라 이 분야에서 더욱 더 활발한 연구가 기대되는 입장에서 티타늄합금의 가공상 문제점에 대한 연구·분석이 필요하다고 판단된다.

1.2 연구 목적

티타늄합금은 가벼우면서도 내식성과 내마모성이 매우 우수하며, 비강도가 높게 유지되고 피로강도나 파괴인성과 같은 기계적 성질 및 해수에 대한 내식성이 우수한 것 등 많은 장점을 지니고 있어 우주·항공분야를 비롯한 경량의 첨단소재로 많이 사용되고 있으며, 생체적합성에서도 탁월한 특성을 갖는 금속이기 때문에 의료분야 등으로 티타늄의 사용범위가 계속적으로 급증하고 있다. 일반적인 티타늄의 사용 방법은 CP-Ti(Commericial Pure- Ti)에 특정 요구사항에 적합한 조건을 갖추기 위하여 Al, Ta, V, Nb, Si, Zr등의 원소를 첨가하여 합금의 형태로 사용되어지고 있다. 티타늄합금 중 가장 대표적인 합금인 Ti-6Al-4V는 스포츠 기구용으로부터 자동차부품소재, 우주·항공의 첨단소재, 치과용 임플란트 등의 용도로 개발 및 폭넓게 사용되고 있으며, 앞으로도 신소재로 주목을 받고 점차 적용의 범위도 확대될 것으로 기대된다.

티타늄이 신소재로서 앞으로 지속적인 발전으로 각광을 받기 위해서는 현재까지 주로 이용되고 있는 항온 단조, 열간 압출 및, 열간 압연 등의 소성가공에 의존하지 말고 성형의 제품을 최종의 제품으로 마무리하는 기계가공기술, 즉, 티타늄이 가지고 있는 난삭성의 문제를 우선적으로 해결되어야 할 것이다. 특히, 티타늄 재료로 고부가가치의 부품들을 정밀가공에 의해 자력으로 해결할 수 있으면 국가산업 전반에 크게 기여하리라 생각된다.

본 연구에서는 티타늄의 기계가공에 대한 기본적인 지식의 축적이 우선적으로 요망되는 시점에서 기계적 성질이 우수하고 여러 가지 독특한 특성을 가진 티타늄 합금의 가공 상의 문제들 가운데 정밀가공에 초점을 두고 가공품의 치수 및 형상에 있어서 요건들이 충족될 수 있도록 저온공정에서 제작되어 피삭재의 열 집중을 보안할 수 있는 물리증착법(PVD, Physical Vapor Deposition)으로 처리한 TiAlN코팅공구를 사용하여 Ti-6Al-4V합금의 선삭가

공을 통해 가공조건의 변화에 따른 절삭력, 공구마멸, 표면 거칠기, 칩 처리성 및 가공경화층에 따른 경도 등을 분석·고찰하여 문제점을 규명함으로써 티타늄합금의 선삭가공에 대한 기초 자료를 제시하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 티타늄재료의 특성[50)]

티타늄의 특성은 Table 2.1 나타낸 것처럼 비중이 4.51g/cm^{3}으로 철강의 약 60% 정도로 가벼우며, 비강도가 다른 금속들에 비해 높아 항공기용 소재로 많은 개발이 이루어져 왔으며, 융점이 1,668℃로 철보다 높고, 열팽창계수가 스테인레스 강의 50%에 불가하여 열에 대한 안정성이 좋으며, 열전도도가 낮은 특징을 가지고 있으며,[18~20)] 티타늄 표면에 형성된 산화 티타늄의 부동태 피막이 견고하고 산화성 환경에서 파괴 즉시 재생이 쉽기 때문에 내식성 및 해수 부식성이 우수하다.

티타늄은 원소 주기율표상 IV A족에 속하는 천이(遷移)금속으로, 저온영역에서는 조밀육방결정(HCP)의 α 상으로 존재하고, 885℃에서는 체심입방결정(BCC)의 β 상으로 동소변태를 하며, Fig. 2.1에 나타낸 것처럼 β 안정화 원소의 함량에 따라 α -Ti 합금, $\alpha+\beta$ -Ti합금, β -Ti합금으로 3분류되며, β -Ti합금은 안정 β합금, 준안정 β합금으로 분류할 수 있다.[21)] Table 2.2에 Ti합금의 특징을 나타내었다.

2.1.1 α -Ti합금

α -Ti합금은 O, Sn, Zr, Al과 같은 α 안정화 원소를 첨가한 것으로 이들의 육방 결정 구조는 변형에 대한 저항이 크기 때문에 가공경화를 일으키기 쉽다. 반면, 열처리 성이 좋지 않기 때문에 마르텐사이트가 비교적 적게 생성되어 용접성이 좋은 특징을 가지고 있다. 또한, creep 성질과 저온에서의 기계적 특성이 우수하나 단상으로만 존재하기 때문에 시효처리 등과 같은 열처리에 의한 강도 증가를 기대할 수 없다. α -Ti합금의 대표적인 금속은 Ti-5Al-2.5Sn, Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si 등이 있다.

준 α -Ti합금은 Ta, Nb, Mo 등과 같은 β 안정화 원소를 약 2%까지 함유하고 있는 합금으로 β 안정화 원소를 약 2%함유할 때 α -Ti합금 중에서 가장 높은 인장강도를 갖는다. 또한, 이 합금은 600℃근방의 고온에서 크립 저항성과 피로강도가 매우 우수한 합금으로 평가되어 제트 엔진의 주요부품이나, 압축 디스크 등으로 사용된다. 이들의 대표적인 합금은 Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si(Ti-1100), Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si(IMI834) 등이 있다.

Table 2.1 Properties of titanium and other metals

Metal	Melting point(℃)	Density (g/㎤)	Poisson's ratio	Electric conductivity (against Cu, %)	Thermal conductivity (cal/㎠/s/℃/㎝)
Titanium	1,668	4.51	0.34	3.1	0.041
Ti-6Al-4V alloy	1,540-1,650	4.42	0.30-0.33	1.1	0.018
Al	660	2.70	0.33	64.0	0.487
Al alloy (75S-T6)	476-638	2.80	0.33	30.0	0.294
Fe	1,530	7.86	0.31	18.0	0.145
STS (18-8)	1,400-1,427	8.03	0.29	2.4	0.039
Cu	1,083	8.93	0.34	100	0.923

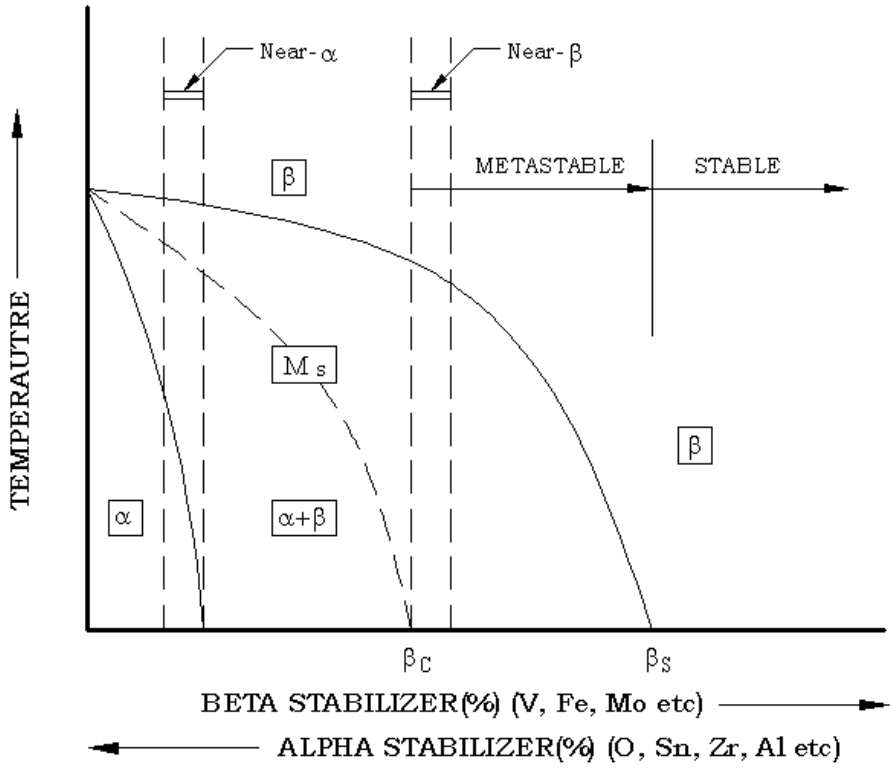
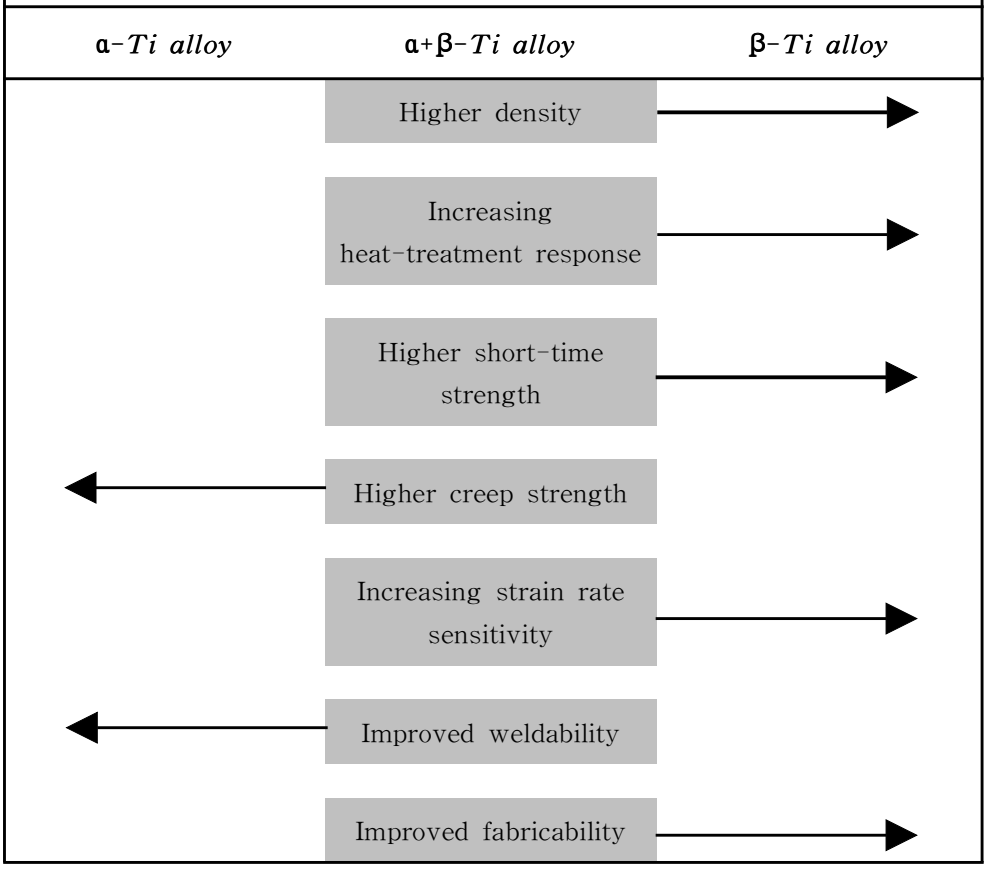


Fig.2.1 Schematic phase diagram of titanium and a stabilizer elements

Table. 2.2 Schematic relationship between mechanical properties and Ti alloy phases

Alloy type	α-*Ti alloy*	α+β-*Ti alloy*	β-*Ti alloy*
Alloy	* Unalloyed Ti * Ti-5Al-2.5Sn * Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.2Si	* Ti-6Al-4V * Ti-6Al-6V-2Sn * Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	* Ti-8Mo-8v-2Fe-3Al * Ti-10V-2Fe-3Al * Ti-13V-11Cr-3Al * Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn



2.1.2 β-Ti합금

β-Ti합금은 냉각시 마르텐싸이트의 생성을 피하기 위하여 β 안정화 원소인 V, Fe, Mo 등을 충분히 첨가한 합금이다. 즉, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 β-Ti합금은 β 변태점 이상의 온도에서의 냉각시 β 상이 α 상으로 변태 할 때는 핵생성-성장 혹은 마르텐싸이트 변태를 하게 되지만 다량의 β 안정화 원소의 첨가로 인해 Ms점이 상온 이하로 감소하게 되어 β 상을 고온에서 상온으로 급냉 하여도 α 상으로 변태하지 않고 준안정 혹은 안정 β 상으로 존재하게 된다. β 합금은 일반적으로 $\alpha+\beta$합금에 비해 월등한 피로 저항 특성을 지니고 있으며, 비교적 $\alpha+\beta$합금 보다 낮은 탄성계수와 보다 큰 강도 및 인성을 갖는 장점 때문에 β-Ti합금은 가공 조건, 미세구조, 재료 특성의 변화에 따라 항공분야, 스포츠 용품 분야, 의료용 분야 등 광범위한 응용이 가능한 합금이다.[47~48] 최근에는 비 항공분야에서 저가 β-Ti합금을 개발하여 자동차를 비롯한 다양한 산업에서 사용되고 있다.

안정 β 와 준안정 β 는 모두 담금질 한 후에 100% β 상으로 상온에서 존재하나, 시효처리한 후에 준안정 β 는 α 상을 석출하는 합금이다. 따라서 준안정 β 는 시효 처리 조건에 따라 시효 경화 효과를 얻을 수 있으나, 안정 β 는 시효 경화 효과는 얻을 수 없다.[49]

2.1.3 $\alpha+\beta$ Ti합금

$\alpha+\beta$ Ti합금은 1951~52년에 Ti가 미국과 일본에서 공업적으로 생산되기 시작한 이래로 군사용, 항공용, 의료용 등으로 가장 많이 사용되고 있는 합금이다. $\alpha+\beta$ Ti합금에서 그 기계적 성질은 미세 조직에 의해 크게 좌우되는데 미세조직은 열처리 및 가공 방법에 따라 다양하게 변화한다.

본 실험에 사용된 Ti-6Al-4V 합금은 $\alpha+\beta$ 합금에 속한다. $\alpha+\beta$ Ti합금은 β 변태점을 낮추는 β 상 안정화 원소를 함유하지만 일반적으로는 α 상

을 강화하는 α 성 안정화 원소 및 중성 원소를 함유하고 있다. $\alpha+\beta$ 합금은 공존하는 두 가지 상의 양적 비에 따라 그 성질이 크게 변화하는데 β 상이 적은 합금은 α 합금과 같은 거동을 보이고, α 상이 적은 합금은 β 합금과 같은 거동을 나타낸다. 통상 $\alpha+\beta$ 합금은 상온에서 β 안정화 원소를 10%에서 최대 50%까지 함유하고 있다. 가장 대표적인 합금이 Ti-6Al-4V 합금이며, Ti-6Al-4V 합금 보다 β 상이 많은 합금으로는 Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-7Al-4Mo 등이 있으며, β 상을 소량 함유하고 α 합금의 고온 특성을 개선한 준 α 합금을 포함하여 $\alpha+\beta$ 합금은 전체 티타늄합금의 60%이상이 생산되고 있고 그 중에서도 Ti-6Al-4V합금이 전체 티타늄 재료의 50% 이상을 차지하고 있다.[22)] 이것은 Ti-6Al-4V 합금이 단조품, 압연품, 판 및 여러 가지 형상으로 가공할 수 있고, 강도・연성・인성의 적당한 조합을 갖는 성질을 가지며, 성형성, 용접성 등에도 우수한 성질을 가지고 있기 때문이다.

Ti-6Al-4V합금은 화학적으로도 반응성이 강한 금속으로, 산소, 질소, 수소 등과 친화력이 강하기 때문에, 열처리 중 분위기에 포함되어 있는 이들 기체들과 반응하기 쉽다. 산소와의 반응은 산화 스케일이 생성되면서 시작되며, 산화 스케일의 표면은 450℃ 부근에서는 갈색, 450℃를 넘으면 푸른색이 감돌고, 600℃이상에서는 황백색이 된다. 티타늄의 산소 고용한계는 매우 크기 때문에 산소는 스케일을 통해서 티타늄 기지내로 확산하여 산소 부화 층을 형성한다. 이층을 “Alpha Case”라하며, Alpha Case는 딱딱해서 깨지기 쉽기 때문에 열처리 후에 제거하여야 한다. 열처리 후의 스케일을 없애는 방법은 Shot blast 또는 Sand blast로 스케일을 제거한 후에 표면을 산세척(Acid Rinse)하면 Alpha Case를 제거할 수 있다.

티타늄은 수소를 흡수하기 쉽다. 수소 흡수의 원인은 산세나 열처리시 가열분위기 중에 유리된 수소 또는 수증기와의 반응 때문이다. 따라서 연소로에서 가열하는 경우, 공기비를 높게 해서 약 산화성의 분위기로 할 필요가

있다. 수소를 흡수하면 충격치가 크게 저하되기 때문에, 수소의 흡수를 가능한 한 피해야 한다. 그러나 수소가 흡수된 경우에도 고진공하에서 650℃이상으로 가열하며 수소를 쉽게 제거할 수 있다.

티타늄은 개발 초기에는 군용장비인 항공기나 잠수정에 응용되어 사용되었었고, 티타늄합금이 가지고 있는 우수한 특성에 대한 이해, 가공기술 및 이용기술의 발전으로 우주·항공 산업분야, 화학 산업분야, 자동차 산업분야, 의료 산업분야, 토목·건축 산업분야, 스포츠 레저 및 일상용품 산업 등에 많은 응용이 되고 있다.[23)]

2.1.4 티타늄 재료의 가공성

티타늄은 철강 등의 재료에 비해 내식성, 인장강도, 융점, 활성 등이 높은 반면에, 열전도도 및 열확산계수 등이 낮은 특징을 가지고 있다. 일반적으로 티타늄은 난삭재로 분류되는데, 그 이유는 낮은 열전도도와 높은 활성에 기인한다.[24] 이와 같은 특성으로 인하여 공구수명이 단축되는 문제가 발생하기 쉬운데, 티타늄에 대하여 절삭가공 시에 일어나기 쉬운 문제는 다음과 같다.

첫째, 티타늄은 열전도율이 대단히 작기 때문에 절삭 중에 발생한 열이 방출되지 않고 공구와 가공물에 축적되어 결과적으로 대부분의 절삭 열이 절삭날과 공구표면에 집중된다. 이로 인하여 절삭가공이 이루어지고 있는 공구날과 공구면의 온도가 국부적으로 높아져 공구의 마멸이 쉽게 되며, 공구수명, 가공 정밀도, 가공 능률 등이 좋지 않게 된다.

둘째, 티타늄 합금은 난삭성을 가지고 있어 가공이 어렵다. 가장 큰 이유는 공구의 선단부에 치핑(Chipping)이 집중되기 때문이다. 일반적으로 절삭저항이 크면 절삭하기 어렵지만, 티타늄의 절삭저항은 쉽게 절삭되는 중탄소강보다 작은 것으로 보아 절삭저항이 절삭성에 어려운 절대적인 원인은 아니다. 오히려, 티타늄은 공작기계의 관점에서는 소비동력이 적어 비교적 절삭이 용이한 재료라고 할 수 있다. 그러나 절삭저항이 강의 가공에 비해 공구와 절삭 편과의 접촉 면적이 작기 때문에 공구의 선단부분에 절삭저항이 집중되고, 강의 가공에 비해 전단각이 커지는 것은 단열전단변형을 일으키기 때문이다.

셋째, 세로탄성계수가 강의 약 1/2로 작기 때문에, 탄성변형을 일으키기 쉬워 절삭할 때에 발생하는 절삭력에 의한 가공물의 변형량은 강의 약 2배로 변형한다. 따라서, 가공물에 대하여 적절한 지지 장치가 없거나 절삭 깊이가 작은 경우에는 공구가 공작물로부터 밀려나가는 경향이 있다. 그리고 가공물이 가느다란 형상일 때에는 절삭력에 의한 처짐이 일어나 채터, 공구와 공작물의 비절삭 마찰, 가공 정밀도 저하나 불량 등을 일으키는 원인이 된다. 따라서 적절한 공구 선정 및 강성이 있는 가공장비 선정이 필수적이며 가공특

성에 대해서도 특별한 주의를 기울여야 한다.

네째, 공구의 마모가 큰 절삭조건이나 얇은 절삭 칩이 나오는 조건으로 절삭할 경우, 화학적으로 대단히 활성이 큰 금속이기 때문에 공구와 반응하기 쉽다. 절삭속도를 빠르게 하면 절삭온도가 높아져 티타늄이 더욱 활성화되며, 칩의 연소와 함께 공구마모가 심해진다.

다섯째, 일반적으로 티타늄 합금을 절삭하면 단면이 톱날모양의 절삭 칩이 발생된다. 이 같은 형상의 칩은 스테인레스강이나 제트엔진부품 등에 쓰이는 Ni, Co, Fe 베이스의 초합금(Super alloy)을 절삭 할 때도 생성된다. 이러한 칩의 형태로 발생되는 재료는 절삭이 어려워 난삭재로 분류하고 있다.[25)]

R. Komanduri[26)]는 고속카메라를 이용해서 절삭 칩이 생성되는 과정을 Fig. 2.2와 같이 관찰하였다. 공구가 재료 쪽으로 접근하면 경사부면 전체가 변형되어 화살표 1의 부분이 부풀어 오르기 시작한다. 이와 동시에 바로 한 단계 전의 절삭 칩이 공구에 달라붙어서, 화살표 2, 3의 경계면를 미끄러져 올라간다. 이어서 절삭공구 인선에 가까운 화살표 4부분의 재료가 절삭공구에 의해 절삭 칩이 나오는 방향으로 미끄러지면서 열이 발생한다. 이와 같은 티타늄의 변형한 일에 의해 발생한 절삭 열이 티타늄 재료의 열전달율이 낮은 특성으로 인하여 화살표 5의 부분에 열이 집중되어 그 부분이 국부적으로 변형된다. 이러한 과정을 규칙적으로 반복하여 톱날 형상의 절삭 칩이 만들어진다.

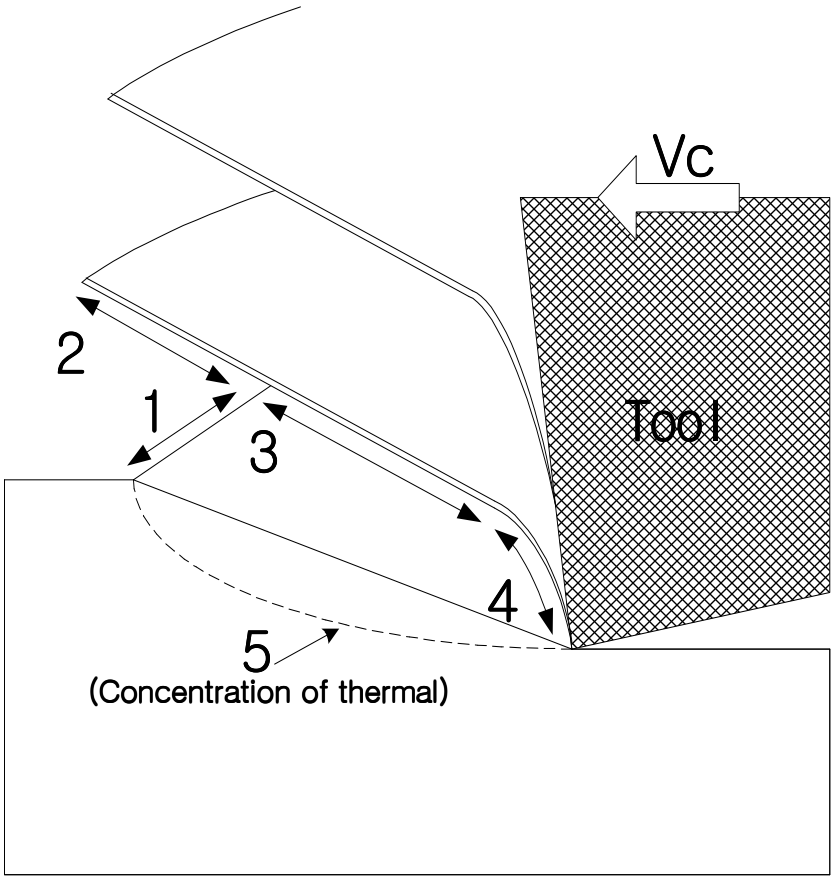


Fig. 2.2 Chip formation in machining titanium alloys

2.2 PVD TiAlN 코팅 공구

고속도강 공구는 우수한 인성을 가지고 있어 고속가공 시 이송속도를 증가시킬 수 있는 장점은 있지만, 경도가 낮기 때문에 절삭속도는 초경제품보다 떨어지며, 고속가공 중에 공구가 받는 연속적인 열적 물리적 응력은 고속도강 공구의 수명과 성능저하를 야기 시킨다. 이와는 대조적으로 고경도의 초경 공구는 인성이 약하기 때문에 작업 중 파손과 같은 문제가 발생하기도 한다. 이러한 각종 공구의 다양한 재질의 특성에 의한 단점들을 보완하기 위해서 공구의 표면에 고경도 및 인성이 우수한 표면처리 층을 위하여 최근에는 화학증착법(CVD)과 물리증착법(PVD)을 이용한 코팅으로 기능성표면처리를 실시하고 있다.

절삭공구의 코팅에는 CVD, PVD 등 기법에 따른 차이뿐만 아니라 여러 가지 코팅물질에 따라서 다양한 특성 및 기능을 가지고 있으므로 절삭공구의 코팅을 통하여 우수한 표면층을 얻기 위해서는 현재 개발되어 있는 각 코팅의 특성을 이해하고 적용코자 하는 가공공정에 검증을 통하여 적용을 추진하는 것이 좋을 것이다.

PVD TiAlN 코팅은 1996년 개발된 코팅법으로서 공정순서는 Heating - Etching - Coating - Cooling 의 4단계로 이루어지며, TiAlN 합금코팅을 위한 소요시간은 약 9~10시간 정도이다. 코팅 층에 따라 단층과 다층코팅이 있으며, 높은 열응력에 강하여 드릴, 엔드밀, 인써트 등의 절삭공구에 적용이 가능하다. 또한 절삭가공 시 발생하는 피삭재와 절삭공구간의 마찰계수를 낮추어 절삭유를 사용하지 않고도 작업이 가능하도록 공구의 성능을 향상시켜준다. 뿐만 아니라 고온에서 내 산화성이 있어 고속가공이 가능하며, 열전도성이 낮아 절삭가공 시 절삭 날에 발생하는 대부분의 열이 가공 칩과 함께 배출시켜 제거되므로 열적으로도 안정하며 고온 내식성이 우수한 특성을 가진다. 고온에서 강도와 안정성이 있어 고온 경도 및 고온강도가 안정적이고, 내마모성이 우수하며, 내화학성이 좋아 크레이터마멸을 감소시킨다.

TiN코팅은 600℃이상에서 산화되지만 TiAlN코팅은 800℃ 까지도 안정된 내산화성을 가진 이유는 TiAlN의 격자구조가 Fig. 2.3과 같이 면심입방구조(FCC)로서 육면체의 꼭지점에는 티타늄 원자가 위치하고 면의 중앙에 알루미늄 원자가 그리고 반응한 질소는 티타늄 원자와 알루미늄 원자의 틈세에 위치하고 있어 최외층에 형성된 치밀한 Al_2O_3 막이 TiAlN의 확산 및 내마모성을 증가시켜주기 때문에 TiAlN코팅은 TiN코팅에 비하여 절삭조건을 향상시키는 것이 가능하다.

(a) TiN (b)TiAlN

Fig. 2.3 Structure of TiN and TiAlN coating

2.3 절삭저항

절삭과정은 칩의 생성과정을 의미하며, 대부분의 금속절삭시 칩 생성은 전단영역이라 불리우는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단 소성변형에 의해 이루어진다. 이 때에 생성된 칩은 공구 경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다.

절삭상태는 전단 소성변형의 크기, 속도 및 저항과 칩-공구 경사면의 마찰계수 및 마찰저항 등에 따라 크게 달라지며, 이들 절삭변수에 의해 특정 지어지는 전단과정과 마찰과정은 독립적으로 일어나지 않으며 서로 영향을 미치면서 절삭과정의 근간을 이룬다.[27)]

절삭저항의 3분력은 절삭방향 분력인 주분력(F_v), 이송방향 분력인 이송분력(F_f), 그리고 그것과 직각방향인 배분력(F_p)으로 나눈다.

주분력은 주축에 가해지는 회전 토오크, 주축의 구동력 및 발생하는 절삭열은 이러한 주분력에 비례한다. 이송분력은 이송기구에 가해지는 힘 및 주축의 스러스트 등은 이것과 관계가 있으며, 배분력은 동력과는 무관하나 공작물이나 공구의 탄성변형이 배분력에 비례하여 오차가 발생되므로, 특히 가공면의 거칠기에도 이 배분력의 영향이 크다.

Fig. 2.4에서와 같이 횡절인각인 approach각을 절인경사각이 0°인 바이트를 가지고 절삭 깊이 d, 이송속도를 f 로 절삭 하였을 경우, $d > f$ 혹은 $d > \gamma_\epsilon$ (코너 반경) 일 때에는 근사적으로 절삭 폭 $b = d/\cos\psi$, 절삭두께 $h = f \cdot \cos\psi$ 인 2차원 절삭과 같이 생각하게 되므로 주분력(F_v)은 식(2. 1)과 같이 되며,

$$F_v = d f \tau_s \left(\cot\phi + \tan\omega\right) \tag{2.1}$$

여기서, τ_s는 피삭재의 전단변형응력, w는 공구의 경사각, ϕ는 전단각이다.

이송분력(F_f)과 배분력(F_p)은 각 각 식(2.2)와 식(2.3)이 된다.

$$\begin{aligned} F_f &= F\cos(\psi + L_C) \\ &= df\tau_s(\cot\phi \cdot \tan\omega - 1)\cos(\psi + L_c) \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} F_p &= F\sin(\psi + L_C) \\ &= df\tau_s(\cot\phi \cdot \tan\omega - 1)\sin(\psi + L_c) \end{aligned} \tag{2.3}$$

단, L_c는 칩의 유출각, ϕ는 전단각, τ_s는 피삭재의 전단변형응력, ψ 는 횡절인각 이다. 따라서 배분력을 적게 하기 위해서는 절삭 깊이에 대한 이송속도(f/d)의 비를 적게 하여야 한다. approach 각을 줄이면 이송분력이 증가하고 배분력이 감소한다는 것은 식(2.2), 식(2.3)에서 알 수 있다.

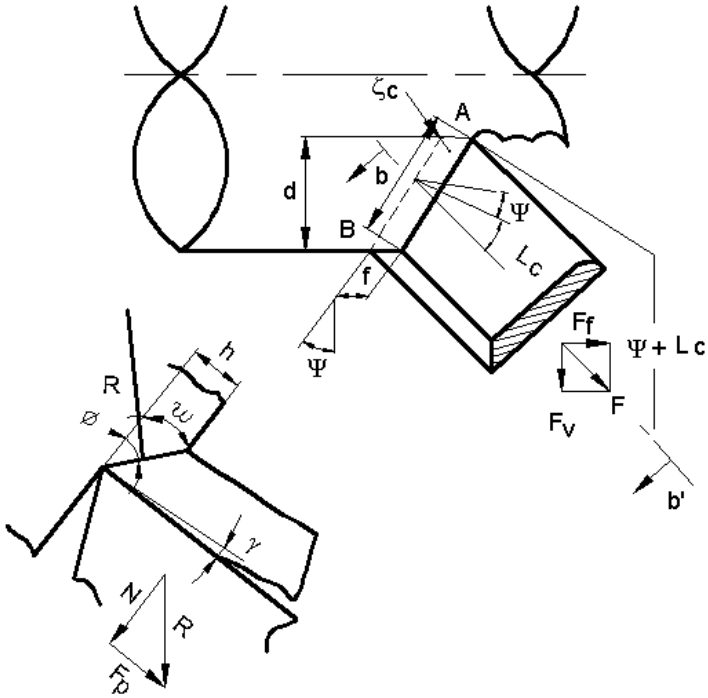


Fig. 2.4 Components of cutting force

2.4 마찰마멸의 이론적 고찰[43)]

2.4.1 마찰현상

평활하게 보이는 면에도 실제로는 표면에는 미세한 굴곡이 있고, 아무리 평활하여도 금속표면은 방향성을 가진 결정의 집합체로서 결정의 방위에 따라 변형이 달라지며, 결정입계는 입내보다 경하므로 두 면을 압착하는 것만으로도 표면에 굴곡이 생기게 된다. 따라서 서로 접촉하는 두 금속면을 마찰시키면 돌기부가 차례로 마멸되어 미끄럼이 발생하여 평활도가 저하하게 된다. 따라서 굴곡으로 인해 마찰부분의 실제접촉면적은 겉보기 면적에 비하여 적고, 접촉압력이 높기 때문에 실제 접촉부는 일반적으로 소성변형을 하게 된다. 접촉면에서 소성변형 된 실제 접촉점이 마찰되면 더욱 크게 변형하여 표면의 오염이나 얇은 산화막이 파괴되어 두 금속자체끼리 접촉하여 응착을 일으키게 된다. 즉, 접촉하는 두 표면의 원자들이 근접하여 격자간격 만큼의 가까운 거리가 되면 원자인력이 작용하여 점차 원자의 집합체인 금속표면이 응착하게 된다. 이와 같이 응착된 금속표면을 더욱 마찰시키면 일부분은 접촉만 할 정도로 미소한 압력의 접촉점도 존재하지만, 대부분의 돌기는 상대재료와 소성변형을 하게 되어 전단이 일어날 때까지 계속된다. 이와 같은 접촉상태를 Fig. 2.5와 같이 경질금속의 표면에 연질금속이 압착되는 2차원 모델을 생각할 때, 두 금속이 접촉하중 P에 의하여 미끄럼운동에 의하여 전단파괴 되는 데에 필요한 접선력, 즉, 마찰력 F 가 작용하면 접촉부에는 전단응력 τ가 나타난다. 이 때의 최대주응력 σ_1 및 최소주응력 σ_3 은 식(2.4)와 같이 되고,

$$\sigma_1,\ \sigma_3 = \sigma/2 \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2/2} \tag{2.4}$$

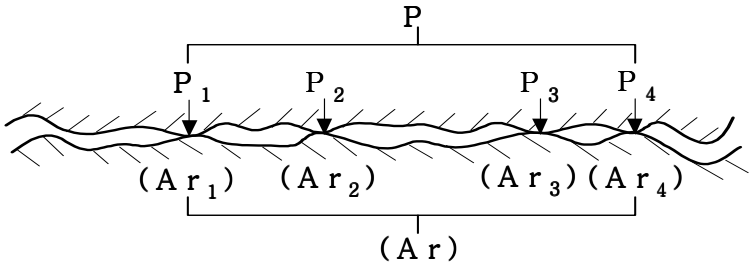


Fig. 2.5 Contact condition of surface

조합응력에 의한 탄성파손에 대하여 von Mises 의 항복조건[28]을 이용하면 상당응력 σ' 은 식(2.5)로 주어진다.

$$\sigma' = \sqrt{(2\sigma^2 + 6\tau^2)/2} = \sigma_0 \tag{2.5}$$

따라서

$$\sigma^2 + 3\tau^2 = {\sigma_0}^2 \tag{2.6}$$

가 되며, 또한 탄성파손이 Tresca의 항복조건[29]에 따르면 식 (2.4)에서

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\sqrt{\sigma^2/4 + \tau^2} = \sigma_0 \tag{2.7}$$

따라서

$$\sigma^2 + 4\tau^2 = {\sigma_0}^2 \tag{2.8}$$

이 되며, 소성유동이 일어나게 된다. 여기서, σ_0는 단축응력의 항복점에 상당하며 실제접촉면적을 Ar이라고 하면, $\sigma = P/Ar$, $\tau = F/Ar$이다. 만일, 접선력 F 가 작용하지 않는다면 $\tau = 0$이 되며, $\sigma = f$가 된다. 따라서 $\sigma_0 = f$이므로 식 (2.6)으로부터 식 (2.9)와 같이 되며,

$$\sigma^2 + 3\tau^2 = f^2 \tag{2.9}$$

여기서, f 는 연질재료의 소성유동 압력이다.

접선력이 작용하여 소성유동이 일어나면 Ar은 증대하여 소성유동이 멈추게 되며 τ의 평형상태가 존재한다. 따라서 마찰계수 μ는 식(2.10)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{Ar \cdot \tau}{Ar \cdot \sigma} = \frac{\tau}{f} \tag{2.10}$$

결합부의 전단파괴는 일반적으로 계면보다 연질재료 내에서 일어나므로 τ는 연질재료의 전단강도이며, 계면의 결합력이 연질재료의 강도보다 약할 때는 τ는 계면의 전단강도가 되어 마찰계수는 작게 된다. 또한 재료에 따른 μ의 차는 재료자체의 흡착성 및 흡착층의 전단강도에 의존하므로 μ를 감소시키기 위해서는 수직응력에 충분히 저항할 수 있는 경한 면상에 전단에 대하여 용이하게 변형하는 연질박막을 생성시키면 가능하게 된다.

2.4.2 마멸현상

마멸은 기계부품이 하중을 받아 상대운동을 할 때 필연적으로 발생하게 되며 일반적으로 인장강도, 경도 및 피로시험에서 얻어지는 값과 같이 재질에 의하여 정해지는 성질이 아니라, 서로 조합되는 상대재료, 하중, 마찰속도, 미끄럼거리, 기지조직의 변화 및 환경 등의 조건에 의하여 그 기구가 변하게 된다. 따라서 공업 상 마멸이 문제가 될 때에는 우선 문제의 마멸현상을 정성적으로 파악하여 가능한 마멸만을 고려한 순수한 형으로 그 현상을 추론할 수 있는 실험장치를 제작하여 운전의 제조건과 마멸량과의 정량적 관계를 구하여 문제가 되는 마멸현상을 해명하게 된다. 마멸은 Burwell,[30] Lipson[31]등의 연구자들에 의하여 응착마멸(Adhesion wear), 기계적 마멸(Abrasive

wear), 부식마멸(Corrosive wear), 피로마멸(Fatigue wear)로 대별되어 왔다.

1) 응착마멸

응착마멸의 이론으로서 고전적으로 중요한 것은 Holm[32]의 이론이며 그 개요는 다음과 같다. Fig. 2.6에 표시한 바와 같이 A, B 두 금속의 임의의 접촉부분에서 두 표면원자 a_1과 b_1은 고체내부에 있어서의 원자간 거리 정도로 근접하고 있다고 생각할 때, A가 이동하면 a_1원자는 순차적으로 b_1, b_2, b_3와 차례로 만나게 되고 그 사이에 어떤 확률로서 B의 원자가 제거되어 진다고 가정하면, 실제접촉을 하는 부분의 면적 Ar과 하중 P와의 사이에는 식(2.11)의 관계가 있다.

$$P = f \cdot Ar \tag{2.11}$$

근접원자간 거리를 d라고 하면 접촉원자수는 $Ar/d\,(P = d/f)$가 되며 미끄럼거리 L 사이에서 만나는 상대원자수를 L/d 정도라고 가정하면 L 사이의 접촉면 전체에서 만나는 원자수 Na은 식(2.12)와 같다.

$$Na = P/(d \cdot f) \cdot L/d \tag{2.12}$$

서로 만나는 원자가 상대측 원자에 의해 제거되어지는 확률을 Z라 하고 1개의 원자가 제거되어지는 마멸체적을 d^3으로 근사시키면 전체의 미끄럼거리 L 사이의 마멸체적 W는 식(2.13)과 같이 표시된다.

$$W = Z \cdot Na \cdot d^3 = Z \cdot L \cdot P/f \tag{2.13}$$

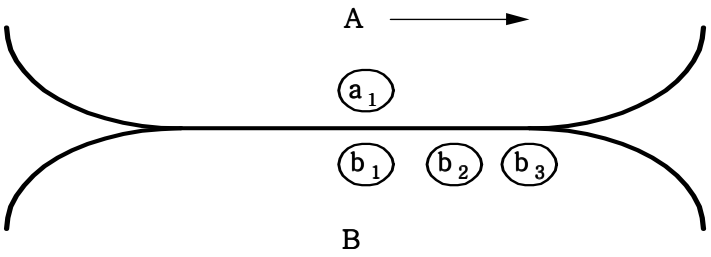


Fig. 2.6 Holm's theory of adhesion wear

또한, 소성유동압력 f는 연질재료의 경도 Hv 와 같기 때문에 이는 식(2.14)과 같이 표시할 수 있다.

$$W = Z \cdot L \cdot P / Hv \tag{2.14}$$

즉, 마멸체적은 미끄럼거리 L 과 하중 P 에 비례하고 소성유동압력 f 에 반비례한다. 실제 마멸분은 원자크기에 비하여 상당히 크다는 점에서 Archard[33]는 거시적인 마멸기구를 제창하였다. 즉, Fig. 2.7(a), (b), (c)에 나타낸 바와 같이 반경이 a 인 원형 접촉점이 n개 존재한다고 가정하면 Ar은 식(2.15)와 같이 된다.

$$Ar = n \cdot \pi \cdot a^2 \tag{2.15}$$

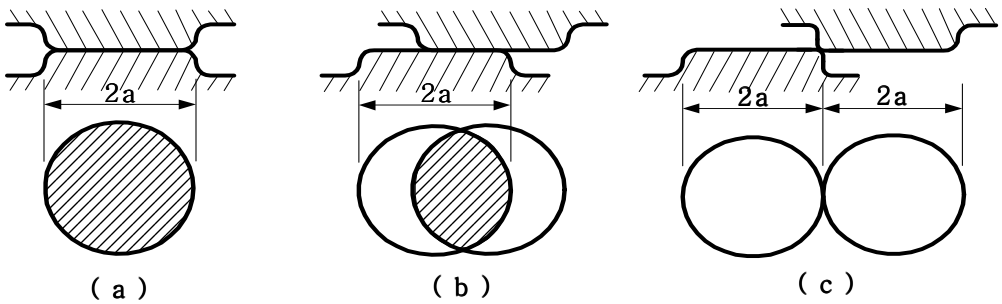


Fig. 2.7 Archard's theory of adhesion wear

Fig. 2.7(a)과 같이 접촉상태에서 미끄럼이 일어나면 Fig. 2.7(b)와 같이 접촉면적이 감소하고 Fig. 2.7(c)에서 분리되지만, 다른 부분에서 새로운 접촉이 일어나 식(2.15)는 항상 유지된다. 1개의 돌기가 접촉할 때 미끄럼거리는 $2a$가 되고, 전체미끄럼거리 L사이의 접촉점의 총수를 Np라 하면 식(2.16)으로 나타낼 수 있다.

$$Np = n \cdot L/2a = P \cdot L/(2 \cdot \pi \cdot a^3 \cdot f) \tag{2.16}$$

마멸분은 접촉부에서 확률 Z 에 의해 직경이 $2a$가 되는 반구상으로 형성된다고 가정하면 미끄럼거리 L 사이의 마멸체적 W 는 식(2.17)로 나타낸다.

$$W = 2/3\,Z \cdot Np \cdot \pi \cdot a^3 = 1/3\,Z \cdot L \cdot P/f \tag{2.17}$$

즉, 마멸량은 식(2.13)과 같이 $L \cdot P/f$에 비례하고, 이와 같은 개념이 성립하는 마멸현상은 윤활제 등을 포함하지 않는 모든 건조마멸의 경우이다. 많은 연구의 실험결과에서 W는 대체로 하중 P에 비례하여 증가하지만, 재료의 소성유동압력 f 나 미끄럼거리 L과 W의 관계는 복잡하다. 또한 Holm 및 Archard의 이론에서는 미끄럼속도의 영향이 포함되어 있지 않지만, 이것은 접촉점의 온도에 크게 관계하기 때문에 중요하며 철강재료의 건조마멸의 경우에는 마멸분 자체가 마멸에 관계하기 때문에 접촉하는 두 물체의 마멸기구의 이해를 혼란시킨다. 또한 마찰면의 온도와 마찰속도 혹은 하중을 독립시켜 변하게 하는 것이 실험상 무척 어렵기 때문에 이에 대한 마멸현상의 해명은 그다지 진행되어 있지 않다.

2) 기계적 마멸

기계적 마멸의 모델은 Rabinowicz[34]에 의하여 Fig. 2.8과 같이 설명된다.

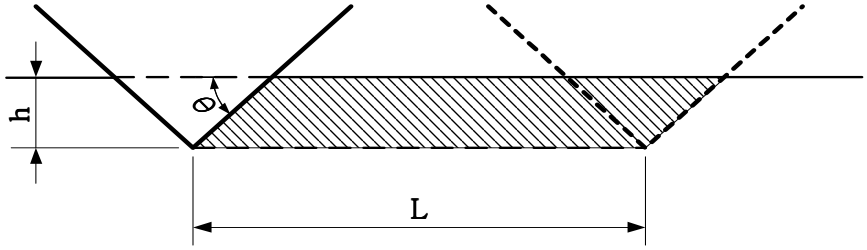


Fig. 2.8 A model of abrasive wear

한쪽의 선단이 모두 동일한 반정각 θ를 가진 원추형의 경한 돌기가 상대측 연질의 평활한 깊이 h 만큼 파고 들어간 것으로 가정하여 이것이 거리 L 만큼 이동하는 사이에 빗금 친 부분이 절삭되어 마멸된 것이라 하면 이 돌기에 가해진 하중 P는 식(2.18)과 같이 되며,

$$P = \pi \cdot (h \cdot cot\theta)^2 \cdot Hv \tag{2.18}$$

마멸체적 W는 식(2.19)처럼 미끄럼방향에서 볼 때 돌기가 파고 들어간 부분의 투영면적과 L과의 곱으로 계산된다.

$$W = P \cdot L \cdot tan\theta / Hv \tag{2.19}$$

많은 연구자들이 기계적 마멸에 대하여서는 경도가 가장 중요한 변수라는 것을 확인하고 있다. Kruschov[35]는 어닐링 한 순금속의 경도와 기계적 마멸의 상대내마멸도는 직선적 관계가 있다고 하였지만, 순금속의 마찰전의 가공경화는 마멸율에 어떠한 효과도 줄 수 없다고 하였다. 또한 Richardson[36]으 내마멸을 경도의 비 Hm/Ha 의 함수로서 검토 할 때, 이 값이 0.8이상이 되면 내마멸력은 급격히 증가한다고 밝히고 있다. 여기서, Hm은 금속표면의 경도이며, Ha는 연삭입자의 경도이다.

$Hm/Ha < 0.8$ 의 영역은 기계적 마멸이 크고, $Hm/Ha > 0.8$ 의 영역은

기계적 마멸이 적으며, 이 경우 Hm/Ha가 1보다 훨씬 크게 될 때까지 기계적 마멸이 일어난다고 하였다.

이와 같이 기계적 마멸은 경질고체에 의한 연질고체의 연삭이며, 철강재료의 산화물 및 응착마멸에 의하여 생성된 연질입자가 액체 중에 분산되어 있어도 역시 같은 작용을 하게 된다.

3) 부식마멸

부식마멸의 개념도로서 Tao[37]는 Fig. 2.9와 같이 나타내고 있다. 마찰면과 환경, 즉, 산소 또는 첨가제와의 화학반응이 진행되면 시간의 경과와 더불어 산화물이나 유화물로 된 막이 성장하지만, 이들은 일반적으로 모지금속보다도 취약하며 또한 비체적이 크기 때문에 막의 두께 t 가 어느 임계치를 넘으면 용이하게 박리된다. Fig. 2.9는 2가지의 극단적인 경우를 상상한 모델로서 모델 1은 반응이 순간적으로 진행되어 생성물의 제거에 시간이 걸리는 경우이며, 모델2는 반대로 반응이 늦어져 생성물의 제거가 즉시 행하여지는 경우이다. 이와 같은 두 가지 모델의 차이는 부식반응속도에 의존된다고 생각된다. Tao는 오일 중에 있어서 베어링강의 마멸을 산소에 의한 부식마멸이라고 생각하여 모델에 의한 계산과 비교한 결과로부터 모델 2의 것이 바람직하다고 설명하고 있다. 유중에 있는 상대가 산소의 경우라면 부식마멸의 개념으로서 모델 2를 고려하면 좋을 것이다. 그렇지 않을 경우에는 부식마멸의 연구는 오로지 반응 자체에 주목된다. 또한 부식이 마멸의 주요인 일 때에는 다양한 마멸기구 사이에 일반적으로 복잡한 상호작용이 관계되고 표면피막의 마멸은 응착이 주원인이며, 마멸 중에서 생성되는 산화철은 일종의 연마재의 역할을 하기 때문에 부식과 기계적 마멸이 조합되어 나타나게 된다. 그러나 산화막과 부식생성물은 마찰에 의하여 완전히 제거되지 않고 어느 정도의 두께를 가지고 존재하므로 금속돌기의 응착을 방지하는 윤활작용도 하게 되므로 반드시 유해한 것이라고는 생각되지 않는다.

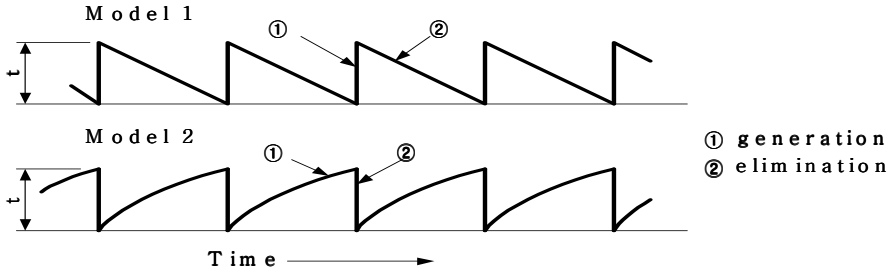


Fig. 2.9 A model of corrosive wear

2.4.3 공구마멸

절삭공구의 마멸은 절삭 중 공구의 절삭 날 부분의 공구상면, 측면, 및 앞면은 공작물과 칩에 의해 고압을 받고 절삭작용과 칩의 유출 작용으로 전단열과 마찰열에 의하여 지속적으로 고온 하에 접촉과 이동이 일어나는 가혹한 상태로 여러 가지 손상을 받게 된다. 절삭가공 중 경화된 칩이 공구상면을 유동할 때 공구상면에서 마모작용을 하면서 움푹 패인 현상이 생기는데, 이것을 크레이터마멸(Crater wear)이라 하며, 가공면에 평행한 공구 측면에서 측면 절삭 날에 따라 여유면 마멸이 발생하는 데, 이것을 플랭크마멸(Flank wear)이라 한다.[38] 마멸 흔적의 일반적인 형태는 절삭 날 선에 따라 균일하지 않고 폭의 크기에 변화가 있으며, 날끝 둥금부에서는 폭이 넓어지는 데, 이것을 날끝마멸(Nose wear)이라고 한다. 그리고 공작물 표면과 접촉하는 경계부에 깊이 파여서 홈이 생긴 마멸을 경계마멸(Boundary wear)이라 한다. 날끝마멸이 크게 발생하는 경우는 일반적으로 고속 절삭의 경우에 많이 볼 수 있으며, 경계 마멸은 주로 공작물의 재질과 표면 상태에 지배되며 단조, 주조, 열간가공 시의 가공경화 때문이다. 가공 경화성이 큰 재질일수록 전 가공 때의 가공 경화층 때문에 경계 마멸이 심하다. 경계 마멸은 국부적으로 집중시키는 것은 공구수명에 좋지 않으므로 절삭 깊이의 변화를 넓게 분포시키는 것이 좋다.

절삭 날 상의 치핑은 공작기계의 진동, 단속 절삭 등의 기계적 작용에 의해 생기기 쉽고 국부적인 응착이나 열적 충격에 의하여 생기는 수도 있다. 일반적으로 치핑은 취성이 큰 초경공구나 세라믹 공구 등에 생기기 쉽고 고속도강 공구의 경우는 적다. 또 구성인선 탈락 시에도 미소한 치핑이 생길 수도 있다.

위와 같이 절삭 날의 마멸 및 파손은 공구의 역할을 둔화시킴으로서 치수정밀도의 저하, 절삭저항의 증가, 다듬질 면의 악화, 절삭온도의 상승, 진동 및 떨림을 발생시켜 결국 공구는 절삭 불능의 상태가 된다.[39)]

공구마멸 중에서 여유면마멸과 경사면마멸이 가장 중요하므로 이들의 마멸에 대한 이론 해석을 요약한다.

절삭공구의 플랭크마멸과 크레이터마멸의 형상은 Fig. 2.10과 같다.

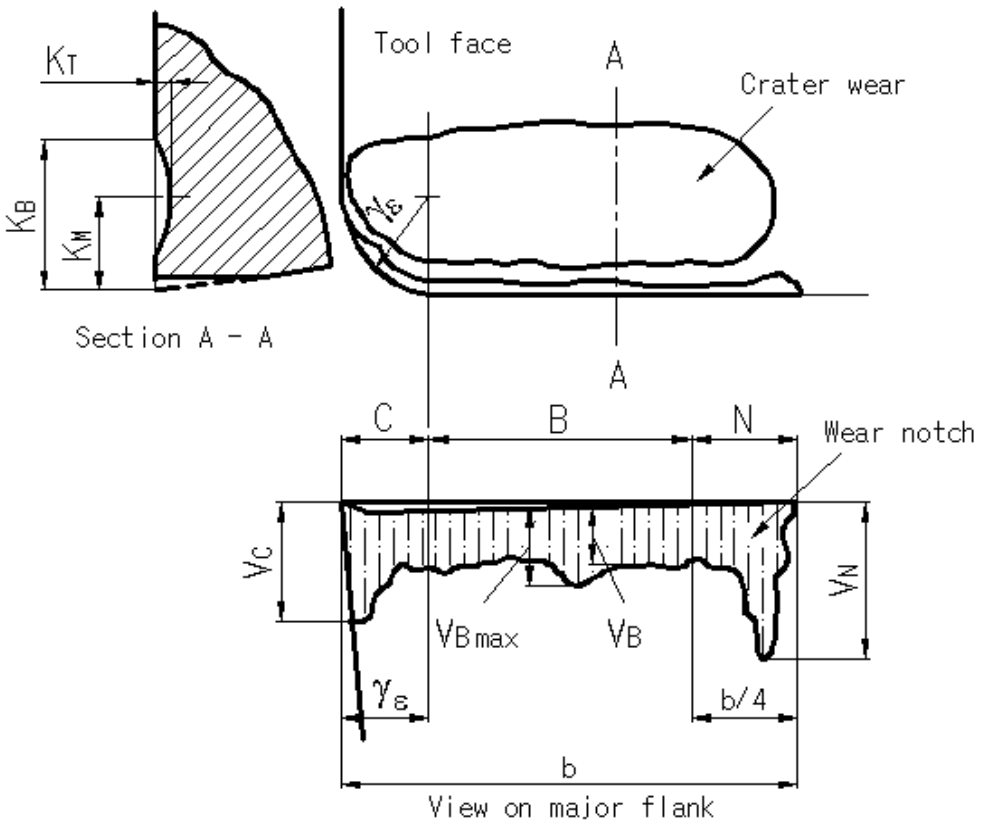


Fig. 2.10 Schematic of tool wear configuration

1) 경사면마멸

절삭 공구면에 형성된 크레이터는 칩 아래 면과 같은 모양이 되며, 칩-공구 접촉면적에 제한되어 발생한다. 더구나 절삭 날에 인접하여 고착마멸이나 구성인선이 일어나는 지역은 비교적 마모가 적다.

절삭에 있어서 최고온도는 절삭 날로부터 공구면을 따라 조금 떨어진 거리에서 발생한다. 높은 온도에서 고속도강은 재료의 열 연화 때문에 공구마멸이 매우 빠르게 일어난다. 초경공구는 이 같은 높은 온도에서도 경도를 유지하지만, 고체상태의 확산이 급속한 마멸을 초래할 수 있다.

Taylor[40]는 마멸속도가 마멸흔적의 면적에 비례한다고 가정하고 크레이터의 성장을 다음과 같이 해석하고 있다.

Fig. 2.11에서 2차원 절삭의 절삭 폭을 b, 크레이터 반경을 r, 그 협각을 β라 할 때의 마멸체적 W는 식(2.20)과 같다.

$$W = \frac{1}{2} r^2 (\beta - \sin\beta) b \tag{2.20}$$

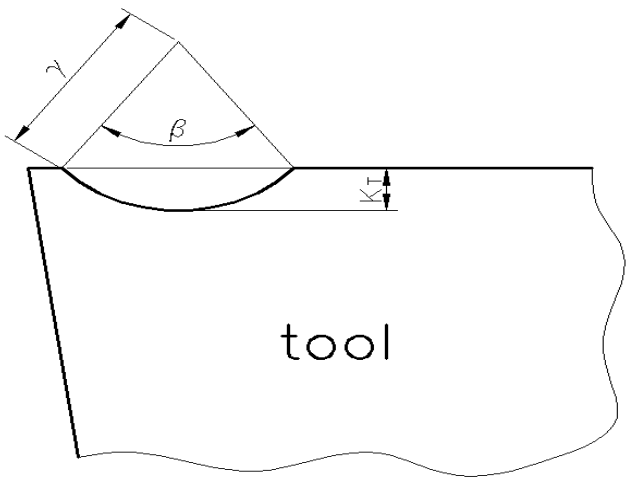


Fig. 2.11 Crater wear

$\sin\beta$를 급수로 전개하고 β가 작으므로 β^4 이상의 고차 항을 무시하면 W는 식(2.21)로 표시된다.

$$W = \frac{r^2 \beta^3 b}{12} \tag{2.21}$$

이 경우 마멸 흔적의 면적은 $r\beta b$ 이므로 마멸속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{r\beta^3 b}{12}\right) = K\beta r\, b \tag{2.22}$$

$$3r\beta\frac{d\beta}{dt} + 2\ \beta^2\frac{dr}{dt}\ = 12K \tag{2.23}$$

$$r^{4/3}\ \frac{d(\beta)^2}{dt} + \frac{4}{3}\ \beta^2 r^{1/3}\ \frac{dr}{dt}\ = 8Kr^{1/3} \tag{2.24}$$

$$\therefore\quad \beta^2\ r^{4/3}\ = 8K\int r^{1/3}\,dt + C \tag{2.25}$$

여기서, t는 절삭시간, K와 C는 상수이다.

또 Taylor는 r은 시간의 경과에 따라 식(2.26)과 같이 감소한다고 가정하였다.

$$r = a\,t^n \tag{2.26}$$

단, a 및 n은 상수로서 $n<0$이다. 이 r을 식 (2.25)에 대입하여 적분하고 β를 구하면 식(2.27)과 같은 관계가 성립한다.

$$\beta \propto t^{\frac{1-n}{2}} \tag{2.27}$$

크레이터마멸의 깊이 K_T 는 크레이터가 얕을 경우에는 식(2.28)과 같이

쓸 수 있다.

$$K_T = r\left(1-\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \fallingdotseq \frac{r\beta^2}{8} \tag{2.28}$$

이 식의 r 및 β에 대해서 식(2.26) 및 (2.27)을 대입하면 식(2.29)와 같은 관계가 얻어진다.

$$K_T \propto t \tag{2.29}$$

즉 크레이터의 최대깊이는 절삭시간에 비례하여 직선적으로 증가한다. Trigger[41]등은 크레이터마멸은 주로 응착마멸에 의하여 매우 촉진된다고 생각하였다.

응착마멸에 대하여 마멸체적 W은 Holm[32]의 마멸 식에 의하여 식(2.30)과 같이 표시된다.

$$W = Z\frac{N_t}{H}L \tag{2.30}$$

단, H는 접촉부의 연질금속 쪽의 경도, N_t은 접촉면의 전 하중, L은 마찰거리이며, Z는 마멸을 생기게 하는 확률 값으로 Holm의 마멸확률이라고 하며, 식(2.31)의 형식으로 쓸 수 있다.

$$Z = \text{const.}\ \ \mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}\,\overline{\theta_t}}} \tag{2.31}$$

단, R은 기체상수, $\overline{\theta_t}$ 는 공구상면의 절대온도, E는 공구와 공작물의 조합에 의하여 결정되는 활성화 에너지이다. 또 마찰면의 진실 접촉점의 경도 H는 변형률 속도, 가공경화의 영향이 없다고 하면 식(2.32)와 같이 표시된다.

$$H = \text{const.}\ \ e^{\frac{E'}{R\overline{\theta_t}}} \tag{2.32}$$

단, E'는 마모시의 실제접촉점의 활성화 에너지이다.

2) 여유면마멸

여유면마멸의 경우 공구마멸 영역을 B영역, C영역, N영역과 같이 3영역으로 나누어서 해석된다. B영역은 가공을 중심적으로 수행하는 영역으로서 마멸의 폭이 균일하게 발생되기 때문에 공구의 마멸 판정기준으로 거의 사용되고 있고, C영역은 공구선단부분이다. N영역은 절삭깊이의 끝부분에 해당되는 것으로 공구와 공작물의 초기접촉이 빈번하게 발생하고 초기의 충격으로 인하여 다른 영역의 여유면마멸보다 크지만 실제 가공시에는 별다른 해가 없는 것으로 알려져 있다.

본 항에서 여유면마멸에 대한 이론적인 해석은 Shaw[42]등이 Holm의 이론을 이용하여 하였다.

Fig. 2.12에 도시하는 바와 같이 플랭크마멸 폭 V_B에 대한 공구의 마멸체적 W는 식(2.33)과 같다.

$$W = \frac{1}{2} b V_B^{\,2} \tan\gamma \tag{2.33}$$

여기에서, b는 절삭 폭이고 γ는 측면 여유각이다.

b와 γ는 절삭 중 일정하며, $W \propto V_B^{\,2}$이 되므로 식(2.30)으로부터 식(2.34)의 관계가 얻어진다.

$$L \propto \frac{V_B^{\,2}}{N_t} \tag{2.34}$$

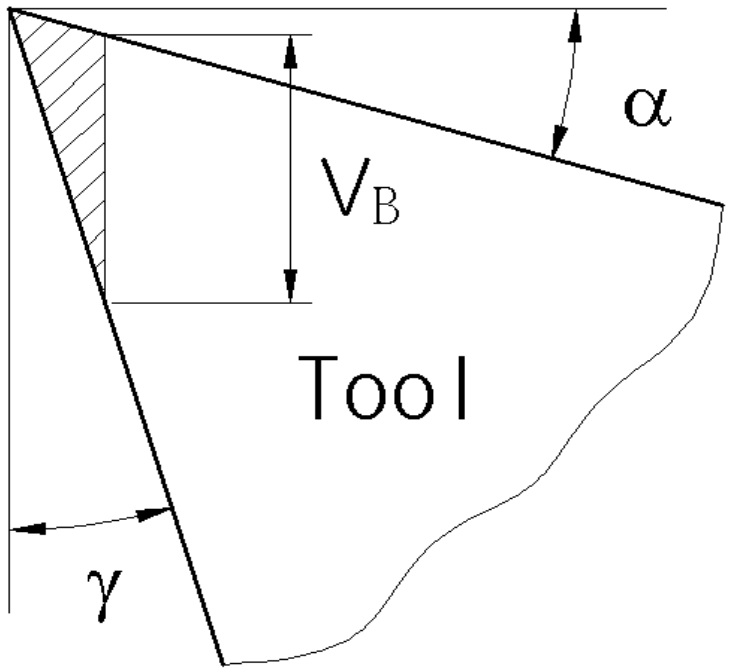


Fig. 2.12 Flank wear

만약 V_B 가 커져도 N_t 가 일정하면,

$$V_B \propto \sqrt{L} \tag{2.35}$$

이 되고, N_t 가 V_B 에 비례하면,

$$V_B \propto L \tag{2.36}$$

로 된다. 이 식(2.35) 및 (2.36)은 일반적으로 공구마멸에 있어서 마멸량이 급증하는 초기마멸 및 직선적인 정상마멸을 표시하는 것이다.

앞에서 언급한 공구 상면의 경우와 같이 공구의 마멸속도가 마멸 흔적의 면적에 비례한다고 가정해서 절삭 시간에 대한 플랭크마멸 폭의 성장을 다음과 같이 유도하고 있다.

2차원 절삭에서는 플랭크면 마멸 폭이 절삭 방향과 평행한 평면으로 형성되는 것이라고 가정하면 식(2.33)으로부터 W는 식(2.37)과 같이 된다.

$$W = 1/2\, Ab \cdot V_B^{\,2} \tag{2.37}$$

마멸속도는 식(2.38)과 같이 계산된다.

$$\frac{dW}{dt} = K\ V_B\ b \tag{2.38}$$

여기서, A와 K는 상수이다. 식(2.37)를 식(2.38)에 대입하면 식(2.39)와 같다.

$$Ab\ V_B \frac{dV_B}{dt} = K\ V_B\ b \tag{2.39}$$

공구의 플랭크마멸 폭은 다음과 같이 구해진다.

$$V_B = \int \frac{K}{A}\, dt = \frac{K}{A}\, t + V_{BO} \tag{2.40}$$

단, V_{BO} 은 시간 $t = 0$ 일 때의 플랭크 면 마멸 폭이다.

식(2.40)은 플랭크마멸 폭의 증가가 시간에 대하여 직선관계에 있음을 표시하고 있으며, Taylor[40]는 광범위한 절삭조건에 있어서의 실험 결과로부터 이 관계를 입증하고 있다. 그러나 이러한 직선관계는 정상적인 마멸의 구간 범위에서만 성립한다. 마멸형태에 따라 마멸의 진행과정을 Fig. 2.13과 같이 3단계로 구분한다. 첫 번째 단계는 예리한 절삭 날이 급속히 파손되어 플랭크마멸 폭이 일정한 폭으로 안정되어지기까지의 초기마멸단계, 두 번째는 일정한 마멸율로 정상적인 마멸이 진행되고 있는 정상마멸단계, 마지막단계는 마멸 폭이 증가함으로써 마찰열에 의한 공구의 온도상승으로 인하여 급속히 마멸이 진행되는 급속마 단계이다.

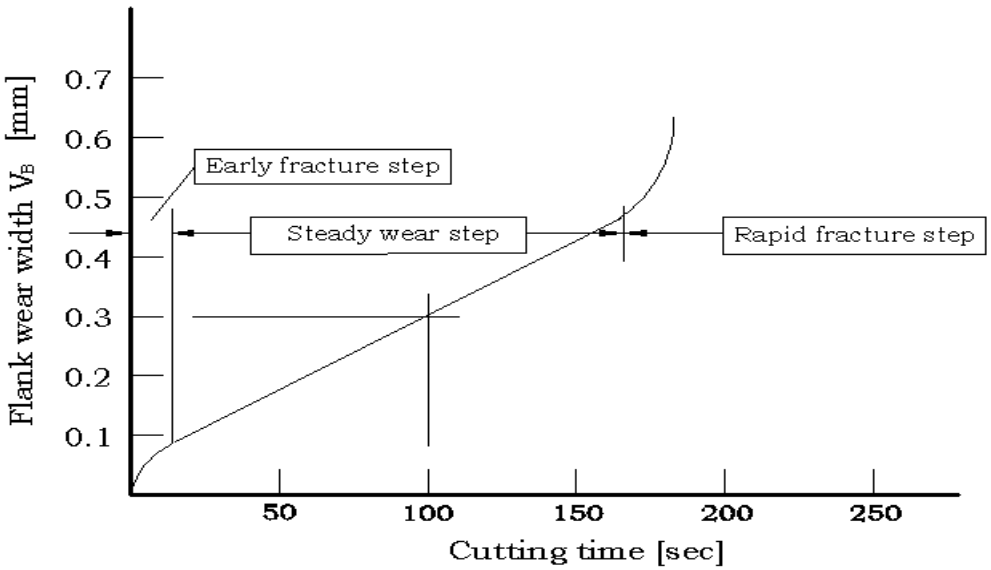


Fig. 2.13 Typical flank wear progression of sintered carbide tool

2.5 절삭가공면의 거칠기

이론표면거칠기는 다듬질면의 측정방향에 따라 절삭방향의 표면거칠기와 이송방향의 표면거칠기로 구분할 수 있다. 절삭방향 표면거칠기는 주로 공구의 절삭성에 따라서 영향을 받게 되며, 이송방향의 표면거칠기는 공구 날 끝의 노즈 반경과 공작물 1회전의 이송량에 따라서 기하학적으로 결정된다. 보통의 절삭 다듬질면의 거칠기로서는 이송방향의 것이 큰 값을 나타내고 있으므로 이것을 측정하여 다듬질면의 거칠기를 나타내고 있다.

2.5.1 절삭방향의 표면거칠기

절삭상태가 이상적 유동형의 칩일 경우에는 절삭방향의 다듬질 면이 凹凸 없이 완전한 평면이 되어야 한다. 그러나 실제는 구성인선(Built up-edge), 진동 등의 발생에 의해 평면은 되지 않는다.

2.5.2 이송방향의 표면거칠기

공구의 이송에 의해서 인선의 凹凸이 다듬질 면에 나타나는데 이것은 절삭방향의 표면거칠기와 비교하면 크고, 일반적으로 브로우칭, 리머, 기어절삭 등의 공정에서는 절삭방향의 표면거칠기가 크지만, 선삭, 형삭, 평삭, 밀링, 보링, 등의 작업은 이송방향의 표면거칠기가 더 크다.

1) **선단 반지름** $R=0$**인 경우**

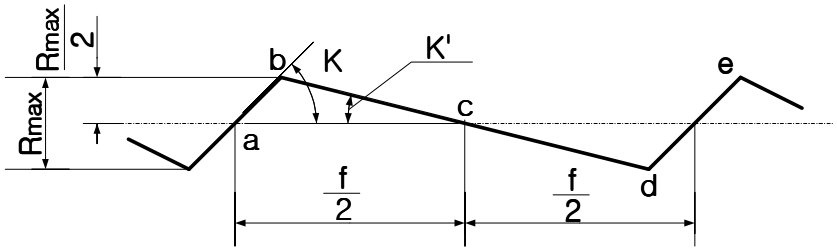


Fig. 2.14 Surface roughness of vertical radius R=0

Fig. 2.14에서 평균표면거칠기 R_a는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_a = \frac{|\triangle abc| + |cde|}{f} \tag{2.41}$$

$$R_a = \frac{2\times \triangle abc}{f} = \frac{2}{f}\times\frac{1}{2}\left(\frac{f}{2}\cdot\frac{R_{\max}}{2}\right) = \frac{R_{\max}}{4} \tag{2.42}$$

$$\frac{f}{2} = \frac{R_{\max}}{2}\cdot\cot K + \frac{R_{\max}}{2}\cdot\cot K' \tag{2.43}$$

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K'} \tag{2.44}$$

$$R_a = \frac{f}{4(\cot K + \cot K')} \tag{2.45}$$

2) **선단반지름** $R \neq 0$**인 경우**

Fig. 2.15(a)와 같이 이송이 극히 적고 표면거칠기의 산이 원호인 즉, $f \leq 2R\cdot\sin K'$인 경우에 식(2.46)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{f}{2}\right)^2 + (R - h_{\max})^2 = R^2$$

$$h^2_{\max} - 2R\cdot h_{\max} + \frac{f^2}{4} = 0$$

$$\therefore h_{\max}(= R_{\max}) = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - f^2}$$

$$\fallingdotseq R - \frac{1}{2}\left(2R - \frac{f^2}{4R}\right)$$

$$\fallingdotseq \frac{f^2}{8R} \tag{2.46}$$

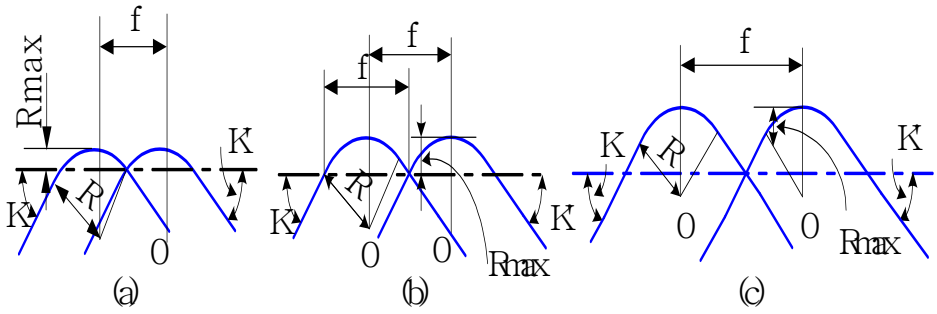


Fig. 2.15 Surface roughness of vertical radius R≠0

Fig. 2.15(b)에서 이송량이 약간 큰 경우, 즉 $f > 2R \cdot \sin K'$ 인 경우에는 식(2.47)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R[1 - \cos K'(1 - \frac{f}{R}\sin K) - \sin K'\sqrt{2\frac{f}{R}\sin K'(\frac{f}{R}\sin K')^2}\ ]$$

$$= R[1 - \cos K + T\cos K' - \sin K'\sqrt{T(2-T)}\ ] \qquad (2.47)$$

Fig. 2.15(c)에서 주절인과 부절인의 무늬가 양측에서 나타나는 경우에는 식(2.48)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = R + \frac{f}{\cot K + \cot K'} - R \cdot \frac{\cos(\frac{K - K'}{2})}{\cos(\frac{K + K'}{2})} \qquad (2.48)$$

$f \gg R$ 라 하고 1항과 3항을 무시하면 식(2.49)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot K + \cot K'} \tag{2.49}$$

2.6 칩 처리성

절삭가공에 있어서 칩 형상의 결정은 절삭 조건이 동일하여도 형상은 쉽게 변할 수 있으며, 주요인으로서 칩에 가해지는 외력의 변화와, 공구손상 및 마멸에 따른 절삭 날의 형상변화, 공구 경사면의 윤활상태 변화, 공구 및 피삭재의 진동에 따라 칩의 형상은 다양한 형상으로 변화할 수 있다.

칩 형상을 결정짓는 인자로서는 공구 경사면에 평행한 축의 주위회전(상향 Curl), 공구 경사면에 수직한 축의 주위회전 (횡향 Curl), 칩 유출각 등 3가지 대소와 조합에 의해 칩 형상이 결정된다.

Curl 된 칩은 반드시 가공물이나 공구에 부딪치게 되고 이 때, 큰 스트레인 을 받아 그 칩은 휘어진다. 선삭의 경우 그 절단양식을 보면 4가지 형태로 분류한다.

1) 가공물 장애형

상향 Curl(위쪽으로 배출되는 칩)만의 칩으로, 공구경사각이 적을 때 일어난다. 칩 브레이크에 의해 Curl 된 칩이 가공물의 단면에 부딪쳐 바깥쪽으로 굽힘 작용을 받아 절단된다. 가공물에 의한 장애형은 짧게 전단되기 때문에 칩 처리성에 있어서는 바람직하지만 절단될 때 큰 힘을 요하며, 진동발생이나 공작물 장애를 일으키기 쉽기 때문에 그렇게 바람직하지 못하다.

2) 나선형

상향 Curl만의 칩으로, 공구경사각이 크면, 가공물의 단면에 부딪친 칩이 그대로 감겨 나선형으로 될 때, 바깥쪽으로 작용하는 굽힘 작용에 의해 절단한다. 이 나선형은 절단에 요하는 힘이 적고 칩 체적도 적기 때문에 가장 바람직한 형태이지만 실현되는 절삭조건 범위가 매우 작다.

3) 여유면에 의한 장애형

상향 Curl 과 횡형 Curl이 혼합되어 나선상으로 발생하며, 하강한 칩의 끝이 공구 날의 여유면에 부딪칠 때 바깥쪽으로 굽힘 작용을 받아 절단된다. 이송량의 대소로 절단되는 칩 형상은 이와는 다르며 여유면에 의한 장애형

은, 칩 브레이크에 의한 경우 가장 많이 나타나는 절단 형태이다. 절단에 요하는 힘은 비교적 적어 바람직하지만 공구 여유면을 상하게 하는 결점이 있다.

4) 횡형 Curl

횡형 Curl의 대표적인 형으로 여유면 장애의 일종으로 공구 날의 여유면에 부딪쳐 절단되는 양식이다. 이 횡형Curl은 칩 브레이커가 없는 공구에서도 절삭 깊이에 비하여 이송량을 크게 하면 일어나는 형상이며, 황삭가공 일 때에 유효하나 절단에 필요한 힘이 크다.

Fig. 2.16은 독일의 절삭정보 센터(INFOS)가 절삭 데이터에 의해 칩 형상을 10종류로 분류하여 번호로 표시한 것을 나타낸다.

1번~3번 칩은 연속적으로 칩이 생겨 공구나 공작물의 휘감아 표면거칠기 및 공구손상에 영향을 미치므로 칩 처리성에서는 불량한 칩으로 분류한다. 특히 강을 가공할 때 자주 나타나며, 칩 운반이나 저장 시에도 부피를 많이 차지하여 여러 가지로 불편한 칩이다.

6~8번 칩은 길이 약 5㎝정도로 한 바퀴 반 정도 감긴 것으로서 칩 처리성이 가장 좋은 칩으로 분류된다. 가공에 있어 자동화시 칩이 6~8번 사이로 나오도록 절삭조건을 선정해야 생산성을 향상 시킬 수 있다. 나머지 4번 5번 9번 10번의 칩의 형상은 칩 처리성이 보통인 경우이다.

Fig. 2.16 The classification of chip shape INFOS standard

제 3 장 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에서의 절삭실험은 CNC선반(Hwa Cheon Hi-ECO 10E)을 이용하여 실시하였다. 공작기계의 사양을 Table 3.1에 나타내었으며, 실험에 사용된 실험장치의 요소들에 대한 제원은 Table 3.2에 나타내었다. 그리고 실험에 사용된 실험장치의 사진과 개요도를 각각 Photo. 3.1과 Fig. 3.1에 나타내었다.

절삭력 측정은 압전형 공구동력계(Swiss Kistler, 9257b)와 공구동력계로 부터의 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위하여 멀티채널 챠지 엠프리파이어(Multichannel Charge Amplifier, 5019b)를 사용하였으며, 공구동력계 및 공구홀더를 지지할 수 있도록 공구장착용 지그를 제작·사용하여 측정하였다.

가공 후의 표면 거칠기는 촉침식 조도 측정기(Mitutoyo사, BRT-S916)를 이용하여 공작물을 120°씩 회전시켜 3회 측정하여 측정치의 평균 값으로 정하였고, 절삭가공에서 배출된 칩 형태와 공구마모량은 비디오 마이크로스코프(Vms-305b)와 산업용현미경(Sometech, iCam scope)을 사용하여 측정하였으며, 표면 거칠기 측정과 공구마모 측정에 사용된 시스템을 각 각 Photo. 3.2와 Photo. 3.3 나타내었다.

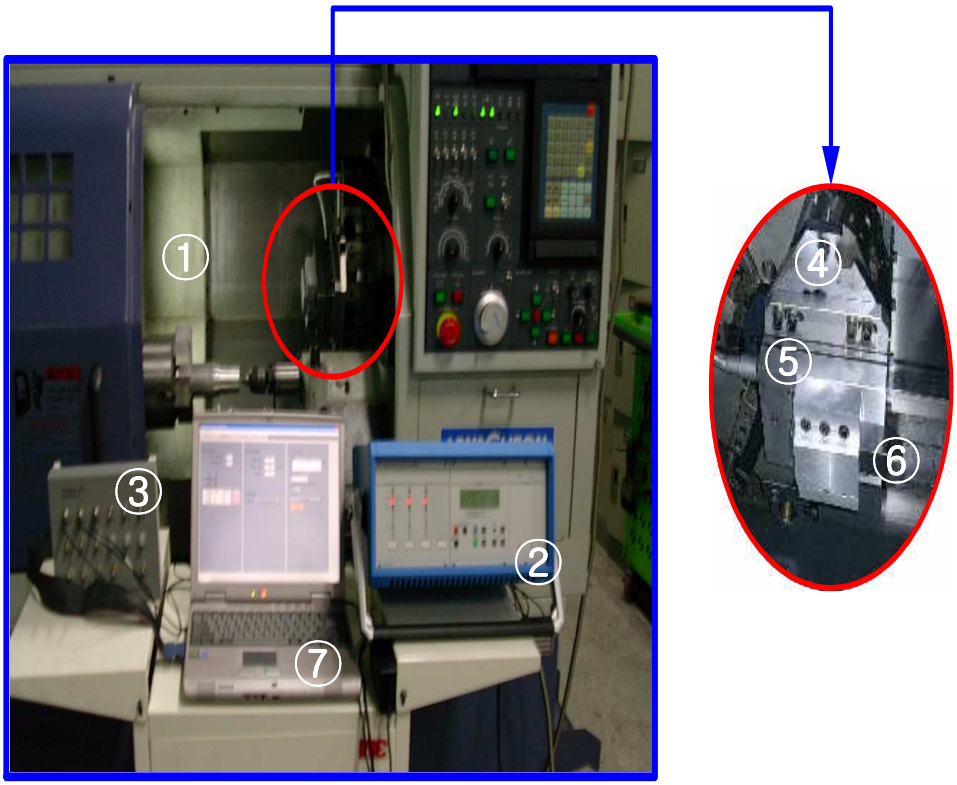
경도시험은 피삭재의 단면을 다이아몬드 휠 커팅기로 절단한 후 절단면을 비커어스 경도측정기(Akashi, HM-122)를 이용하여 측정하였으며, 전자주사현미경(SEM, Scanning Electronics Microscope, Jeol, JSM840-A)을 이용하여 피삭재의 가공 단면조직을 검사하였다. 경도측정에 사용된 시스템을 Photo. 3.3에 나타내었다.

Table 3.1 Specification of CNC lathe

Specification	*Unit*	*Standard*
Swing over bed	mm	ϕ400
Max. cutting diameter	mm	ϕ220
Max. worksheet size	mm	400
(X-axis) travel	mm	130
(Z-axis) travel	mm	445
Spindle speed	rpm	30 ~ 4,500
Rapid feed (X/Z)	mm/min	2,000
Jog feed rate	mm/min	1,260
Cutting feed rate	mm/rev	0.001 ~ 500
Spindle Motor	kW	7.5/5.5
Feed shaft Motor	kW	X: 1.0 Z: 1.0
Oil Motor	kW	2.2kW × 4P
Height	mm	1,540
Dimensions	mm	1,700 × 1,365
Weight	kg	2,200

Table 3.2 Specifications of experimental apparatus

Apparatus Name	*Manufacturer*	*Model*
Lathe	Hwa Cheon	Hi-ECO 10E
Multichannel Charge Amplifier	Kistler	5019b
Tool Dynamometer	Piezoelectric Transducer Kistler	9257b
A/D Converter	National Instrument	DAQ-6024Q
SEM	Jeol	JSM840-A
Vickers hardness tester	Akashi	HM-122



①Lathe ②Multichannel charge amplifier ③A/D converter ④Jig
⑤Tool dynamometer ⑥Tool holder ⑦Notebook computer

Photo. 3.1 Experimental setup for measurements of machining characteristics

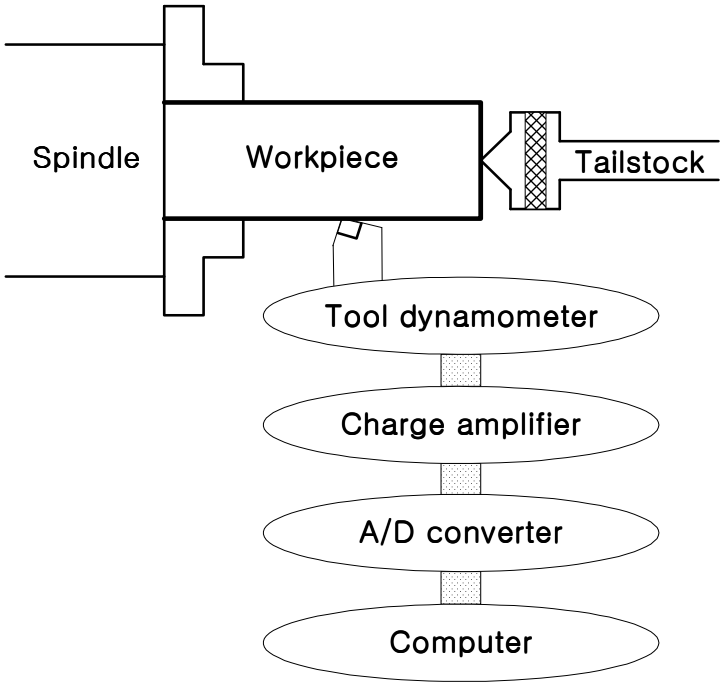


Fig. 3.1 Schematic diagram of measuring equipment

Photo. 3.2 Surface roughness testing system

Photo. 3.3 Video microscope system

Photo. 3.4 Vickers hardness testing system

3.2 고정공구용 지그제작

본 연구에서는 터렛형 공구대가 장착되어 있는 CNC선반을 사용하였으며, 터렛형 공구대에 공구동력계 및 공구홀더를 설치하여 절삭 중의 절삭력 데이터를 측정하기 위해 터렛 공구대에 장착할 수 있는 형식의 고정공구용 지그를 설계·제작하여 절삭실험에 활용하였으며, 제작된 지그의 형상 및 치수는 Fig. 3.2에 나타내었다.

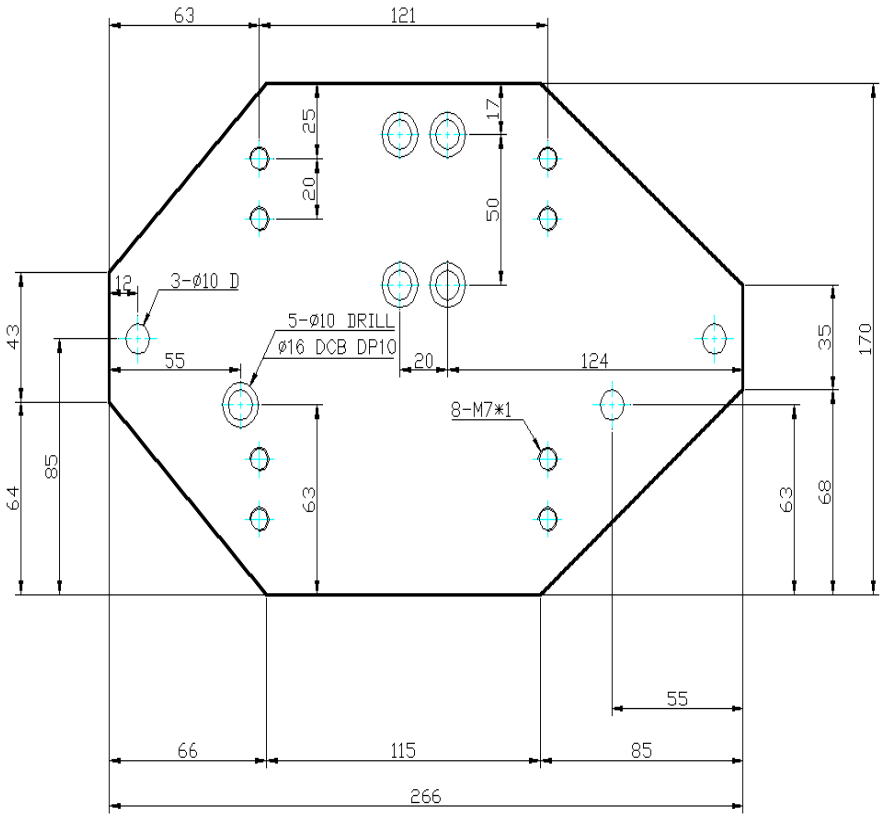


Fig. 3.2 Shape and dimensions of jig

3.3 시험편 및 절삭공구

3.3.1 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 티타늄합금의 60%이상이 생산되고 전체 티타늄 재료의 약 50%를 차지하고 있는 Ti-6Al-4V합금의 $\alpha + \beta$ 합금 계열로서 ϕ 60㎜×150㎜의 크기를 가진 티타늄 봉이다.

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

Table 3.3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy

Direction	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL(%)	RA	H_RC
Longitudinal	1012.19	935.65	20.8	42.3	36

Table 3.4 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy

Elements	Ti	Al	V	Fe	O_2	C	N_2	H	Y
wt(%)	89.13	6.2	4.19	0.2	0.17	0.027	0.023	0.016	0.001

3.3.2 절삭공구

실험에 사용한 절삭공구는 PVD방식을 적용한 TiAlN코팅 처리한 외경 중·황삭용 공구로 인서트의 노즈 반경이 각각 0.8mm, 1.2mm인 TA(Throw Away)형의 마름모형이고 여유각은 0°이다. 칩 브레이크는 Fig. 3.3에 나타낸 것과 같이 3차원 형식의 딤플형 칩 포머(Dimple type chip former)가 형성되어 있는 인서트 팁(Insert Tip)이다.

공구홀더(Tool holder)는 레버 록 식으로 팁의 구속 면은 2면으로 클램핑할 때 팁을 끌어당기면서 고정하므로 팁의 반복 위치 정밀도가 우수한 장점을 가지고 있는 형식이다. 절삭실험에 이용된 공구홀더 및 인서트의 사양을 Table 3.5에 나타내었다.

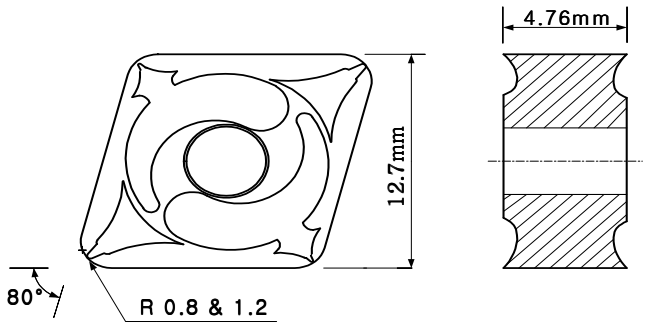


Fig. 3.3 Insert of dimple type chip former

Table 3.5 Specifications for cutting tool in machining characteristics test

Item	Descriptions	
Insert	Throw away type	CNMG 120408 Nose R=0.8mm
		CNMG 120412 Nose R=1.2mm
Tool holder	PCLNR 2525-12 Back rake angle -5°	

3.4 실험방법

본 실험은 CNC 선반을 이용하여 TA형의 외경 중·황삭용 인서트를 바이트 홀더에 장착한 후 티타늄합금 중 $\alpha+\beta$ 합금 계열인 Ti-6Al-4V합금을 선삭가공 하여 절삭가공 시 나타나는 절삭특성을 규명하기 위해 각 각 절삭속도는 50m/min～110m/min , 이송속도를 0.5mm/rev～2.5mm/rev, 절삭 깊이를 0.5mm～2.5mm의 범위 내에서 조건들을 정하고 노즈의 반경이 각 각 0.8mm, 1.2mm인 2종류의 중·황삭용 인서트를 사용하여 CNC 프로그램을 작성하여 가공하였다. 실험에 적용한 절삭조건을 Table 3.6에 나타내었다.

절삭력을 측정하기 위해 공구동력계를 터렛 공구대 측면에 자체 제작한 지그를 설치하였고, 툴 홀더를 지그에 장착할 때는 바이트가 정확히 이송되도록 고정공구를 이용하여 충분한 힘으로 체결하였다. 또한, 절삭가공 시 채터링과 진동발생을 최소화하기 위해 가공시편의 우측 단면의 중심을 센터드릴 작업을 하여 심압대로 지지하여 실험하였으며, 본 실험에 들어가기 전 Ti-6Al-4V합금이 형성하고 있는 Alpha Case 라는 단단한 피막 층을 제거목적으로 표면을 0.5mm 깊이로 실험 전에 선삭가공 한 후 건식으로 절삭실험을 하였다.

각 실험조건에 대한 절삭력 변동 성분을 압전형 공구동력계를 사용하여 측정하였으며, 이 때 공구동력계로부터 측정된 절삭력 성분은 증폭기를 사용하여 증폭하였다. 증폭된 아날로그 신호를 A/D 변환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털화 하여 노트북 컴퓨터에서 데이터에 대한 해석을 하였으며, 컴퓨터에 전송된 신호는 절삭력 소프트웨어(Dynoware)를 이용하여 분석하였다.

실험에 사용된 공구동력계는 스케일을 1V 당 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 3차원의 촉침식 표면조도기를 사용하였으며, Cut-off 값은 0.8mm, 이송속도는 0.5mm/s, 측정범위는 20㎛로 각 각 설정하여 측정을 하였으며, 측정거리는 시편의 가공길이가 10mm인 점을 고려하여 시작부분과 끝나는 부분을 각 각 1mm씩을 뺀 8mm를 대상으로 측정하였다. 표면거칠기 값(R_a)은 정확성을 위해 축 방향으로 120°씩 회전시켜 3회 측정값의 평균값으로 정리했다.

절삭가공에서 배출된 칩의 형태 관찰은 산업용현미경(Video Microscope System) i Cam scope로 배율을 ×300으로 하였고, 측정시 Light Guide Cap를 사용하여 Halogen lamp의 빛이 피삭재에 집중조사 될 수 있도록 하였으며, 공구마모는 노즈 반경이 0.8mm인 인서트를 이용하여 절삭속도를 각 각 50, 70, 90m/min 로 정하고 공구의 이송속도와 0.2mm/rev, 절삭깊이를 1.5mm로 일정하게 정하여 시간에 따라 가공한 후 이에 따른 공구마멸의 형태를 산업용현미경을 이용하여 배율을 ×100 로 하여 관찰하였으며, 실험에서 공구수명 판단기준은 플랭크마멸 폭(V_B=0.3mm)을 기준으로 정하였다.

절삭가공 중 실험에 사용된 시험편에 대한 가공경화의 정도를 살펴보기위해 절삭실험을 마친 후 시험편의 단면을 다이아몬드 휠 커팅기로 절단을 하여 비커어스 경도계를 이용하여 소재의 최외각의 50㎛에 해당되는 위치에서부터 소재의 중심방향으로 50㎛ 간격으로 경도측정을 하였다. 경도측정시 조건은 누르는 하중을 0.5㎏, 측정시간을 10초로 정하였다. 가공경도 변화와 관련하여 조직을 확인하기 위하여 전자주사현미경을 이용하여 피삭재의 가공단면조직을 검사하였다.

Table 3.6 Cutting conditions

Cutting speed (m/min)	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/rev)				
		0.1(a)	0.15(b)	0.2(c)	0.25(d)	0.3(e)
30, 50, 70, 90, 100, 110	0.5 (i)	i a	i b	i c	i d	i e
	1.0 (ii)	ii a	ii b	ii c	ii d	ii e
	1.5 (iii)	iii a	iii b	iii c	iii d	iii e
	2.0 (iv)	iv a	iv b	iv c	iv d	iv e
	2.5 (v)	v a	v b	v c	v d	v e

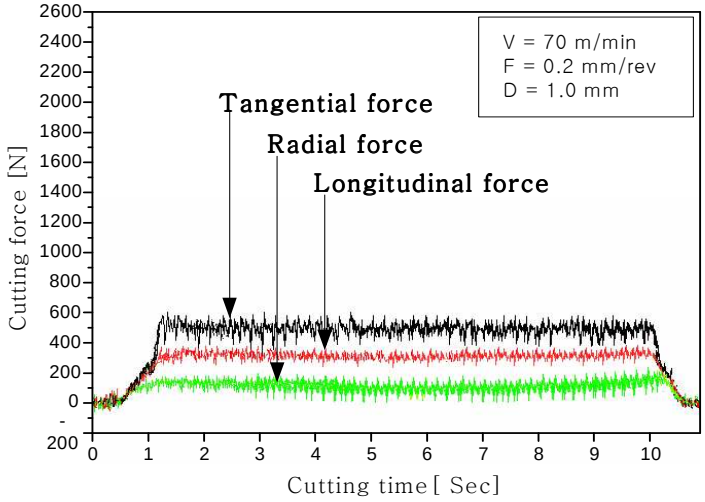
제 *4* 장 실험결과 및 고찰

4.1 절삭특성

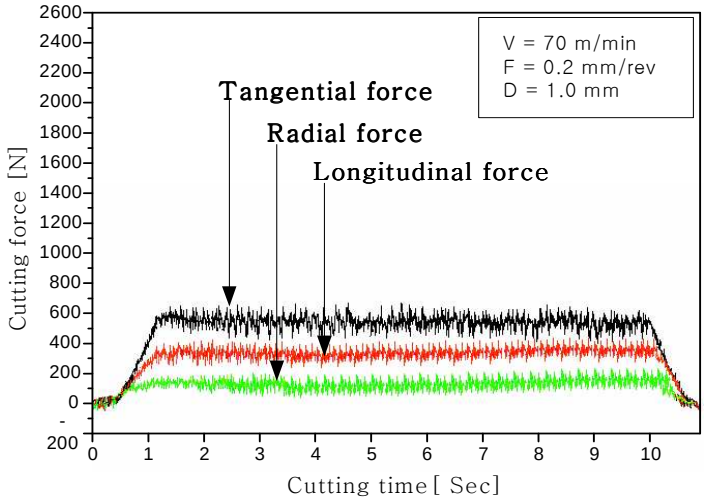
Fig. 4.1(a), (b)는 PVD TiAlN 코팅 처리된 노즈 반경이 각각 0.8mm, 1.2mm인 외경 중·황삭용 마름모형 인서트를 이용하여 절삭속도 70m/min, 이송속도 0.2mm/rev 및 절삭 깊이를 1.0mm의 절삭조건에서 가공 하였을 때 절삭력을 나타내었다.

Fig. 4.1(a), (b)에서와 같이 절삭력의 크기는 주분력이 노즈 반경이 0.8mm에서 545.4N, 1.2mm에서 586.6N의 값으로 가장 크게 나타났으며, 이송분력은 노즈 반경 0.8mm와 1.2mm에서 각각 297N, 296N 이며, 배분력은 노즈 반경 0.8mm와 1.2mm에서 각각 165.2N, 159.6N 으로 크기의 차이를 보였다. 절삭력의 변화는 시간에 따라 주분력은 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있으며, 반면에 배분력과 이송분력은 약간 증가하고 있다.

주분력의 감소 원인은 크레이터마멸 위치가 일반 강의 경우와 비교되는 티타늄은 주 절삭 날 인선부의 매우 가까운 곳에서 열에 의한 공구연화로 공구 선단의 온도가 높아져 크레이터마멸을 촉진시켰기 때문으로 사료되며, 배분력과 이송분력의 증가는 플랭크마멸에 의한 결과로 판단된다.



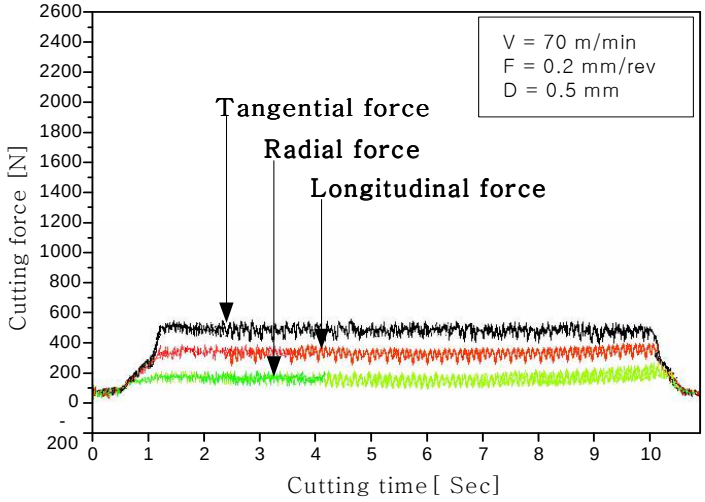
(a) R=0.8



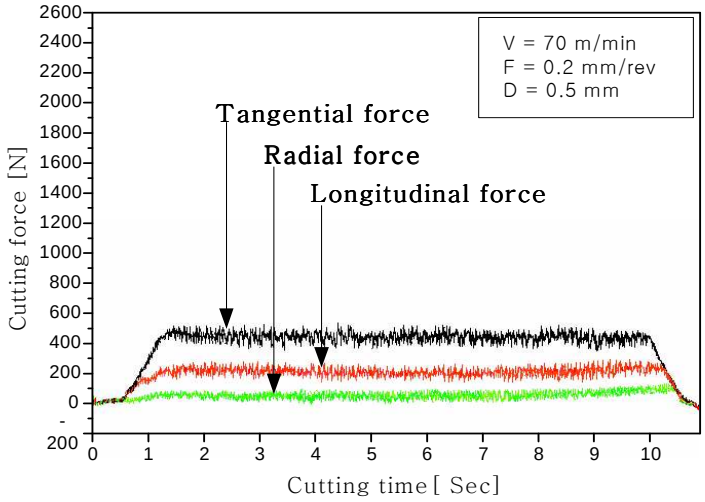
(b) R=1.2

Fig. 4.1 Relations between cutting time and cutting force on Ti-6Al-4V alloy for TiAlN coated carbide tool
(V=70m/min, F=0.2mm/rev, D=1.0mm)

Fig. 4.2(a), (b)는 Fig. 4.1(a), (b)와 동일한 절삭속도 70m/min, 이송속도가 0.2mm/rev의 조건에서 절삭깊이만 0.5mm로 작게 한 경우의 절삭력 그래프이다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2를 비교해보면 절삭 깊이의 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있었으며, 절삭 3분력 모두 절삭깊이가 얕아짐에 따라 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 주분력은 노즈 반경이 0.8mm인 공구에서 413.8N으로 약 130N 정도, 노즈 반경이 1.2mm인 공구에서는 468N으로 약 120N 정도의 낮은 값을 나타내어 공구의 노즈 반경에 따른 감소율에 별다른 차이가 없어 보이지만, 배분력은 노즈 반경 0.8mm와 1.2mm에서 각각 89.4N, 48.8N이며, 이송분력은 노즈 반경 0.8mm와 1.2mm에서 각각 240.6N, 213.8N으로 노즈 반경이 1.2mm인 공구에서 감소율이 더 커짐을 알 수 있었다.



(a) R=0.8



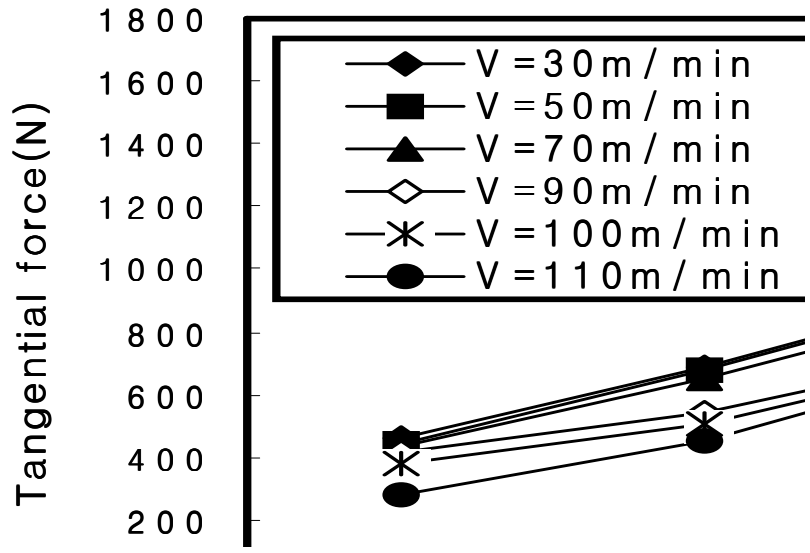
(b) R=1.2

Fig. 4.2 Relations between cutting time and cutting force on Ti-6Al-4V alloy for TiAlN coated carbide tool
(V=70m/min, F=0.2mm/rev, D=0.5mm)

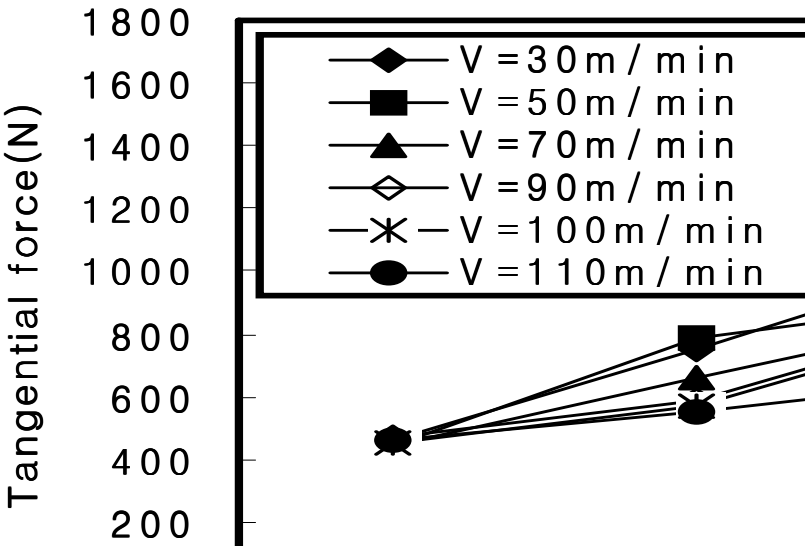
Fig. 4.3(a), (b)는 노즈 반경이 각각 0.8mm, 1.2mm의 공구로 이송속도를 0.2mm/rev로 일정하게 하여 절삭깊이에 의한 주분력의 영향을 절삭속도 변화에 의한 영향과 함께 나타내었다. Fig. 4.3(a), (b)에서처럼 주분력은 절삭깊이가 증가함에 따라 선형에 가까운 모습으로 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 4.3(a)에서 절삭속도가 30m/min～70m/min 일 때 주분력이 크고, 절삭속도가 90m/min～110m/min로 높을 때 주분력이 적은 주분력의 차이가 생기는 것을 볼 수 있다. 이것은 고속절삭의 경우 공구가 절삭시 티타늄 재료의 소성변형에 따른 전단, 인장응력에 의한 전단각 생성시 발생된 높은 열이 절삭공구를 연화하여 공구의 마멸이 진행되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 4.3(b)에서 절삭깊이가 0.5mm일 때 절삭속도에 상관없이 가장 안정적인 모습을 보이고 있으며, Fig. 4.3(a), (b)에서 절삭속도 50m/min, 절삭깊이 1.5mm이상의 조건에서부터는 다른 조건과 비교해 상대적으로 큰 증가량을 보였다. 이러한 경향으로 보아 주분력의 변동은 절삭깊이의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었다.



(a) R=0.8

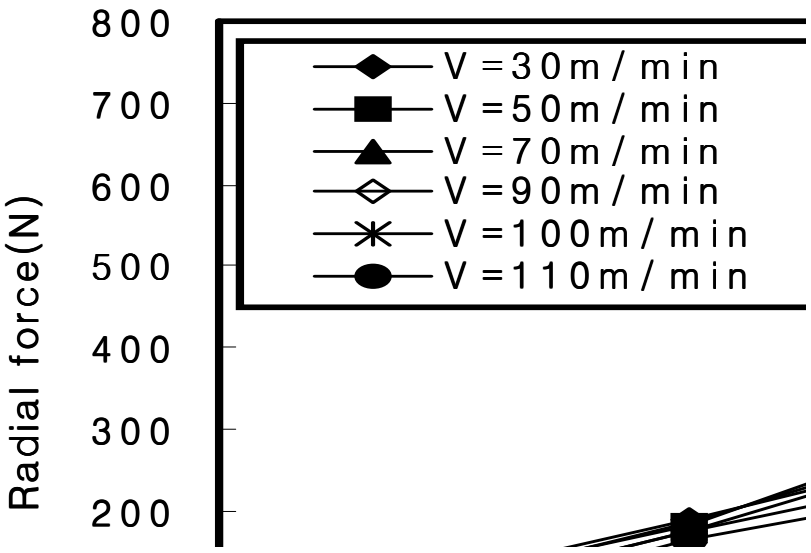


(b) R=1.2

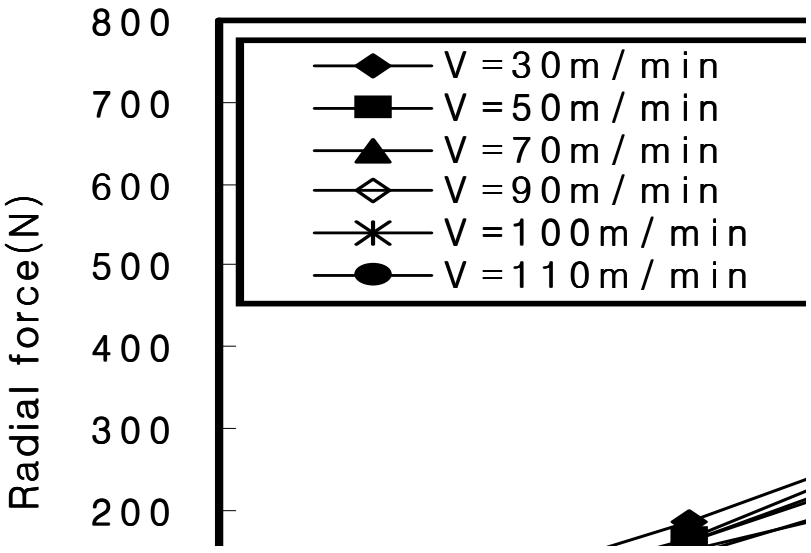
Fig. 4.3 Tangential force with respect to depth of cut (F= 0.2mm/rev)

Fig. 4.4(a), (b)는 노즈 반경이 각각 0.8mm, 1.2mm의 공구로 이송속도를 0.2mm/rev로 일정하게 하여, 배분력과 절삭깊이와의 관계를 절삭속도 변화에 의한 영향과 함께 나타내었다.

배분력도 주분력과 같이 절삭깊이에 따라 전반적으로 선형의 형태로 증가하였으며, 배분력은 절삭 깊이가 0.5mm～1.0mm의 영역에서 대체로 안정적이었다. 절삭속도가 낮을수록 배분력은 크게 나타났으며, 절삭깊이 1.5mm부터는 절삭깊이가 깊을수록 더욱 크게 나타난 것으로 보아 배분력도 절삭깊이의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었다.



(a) R=0.8

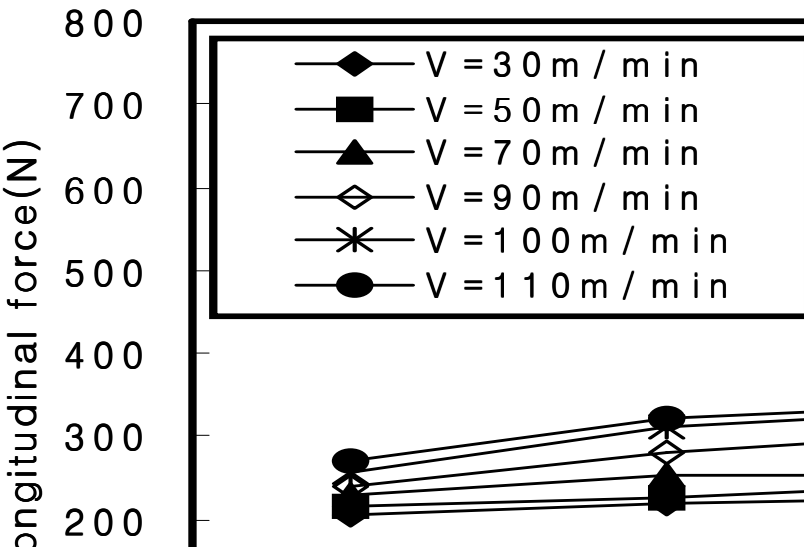


(b) R=1.2

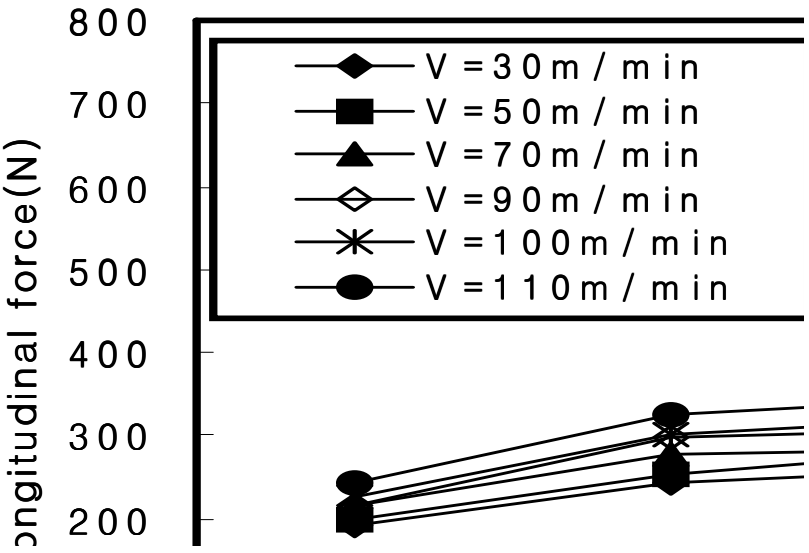
Fig. 4.4 Radial force with respect to depth of cut (F=0.2mm/rev)

Fig. 4.5(a), (b)는 노즈 반경이 각각 0.8mm, 1.2mm의 공구로 이송속도를 0.2mm/rev로 일정하게 하여 절삭깊이에 의한 이송분력의 영향을 나타낸 것이다.

Fig. 4.5(a), (b)에서 절삭속도 70m/min 전후의 조건에서 절삭속도가 적을 때 이송분력의 크기의 차이가 생기는 것은 절삭속도가 70m/min 이상에서 부터는 절삭속도가 커짐에 따라 공구선단의 온도가 상승하여 공구의 마멸을 촉진시켰기 때문으로 사료된다. 이송분력은 전반적으로 절삭깊이에 큰 영향을 받지 않으며, 또한 변화량도 절삭 깊이의 변화에 뚜렷한 상관관계를 찾기 어려울 정도로 미약함을 알 수 있다. 절삭깊이에 따른 이송분력은 절삭깊이가 깊을수록 컸으며, 절삭속도가 낮을수록 크게 나타났다.



(a) R=0.8



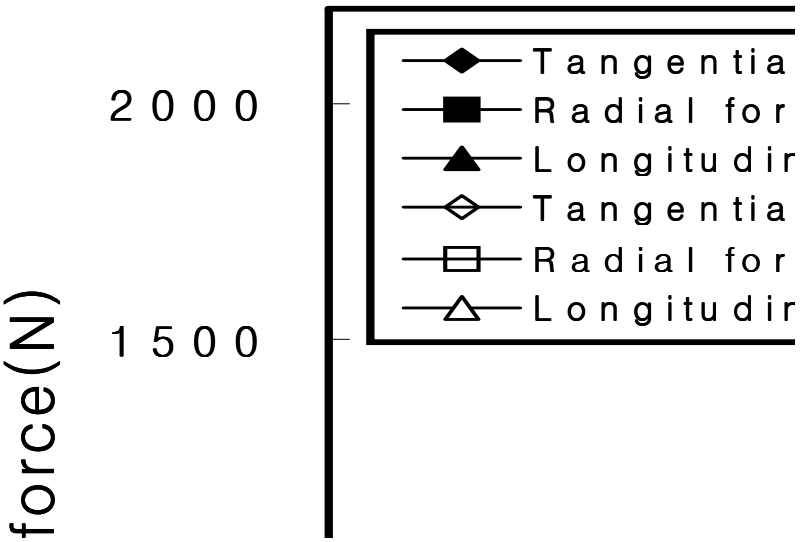
(b) R=1.2

Fig. 4.5 Longitudinal force with respect to depth of cut (F= 0.2mm/rev)

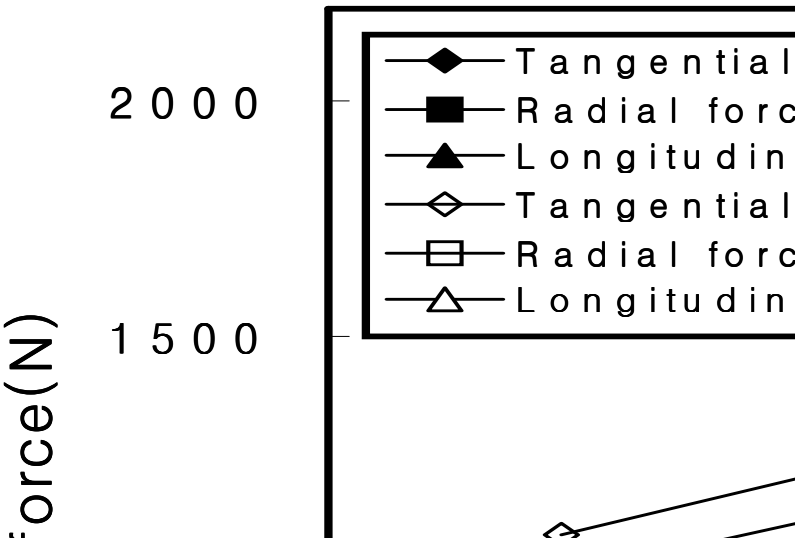
Fig. 4.6(a), (b)는 노즈 반경이 각각 0.8mm, 1.2mm인 공구로 절삭속도를 70m/min로 일정하게 하고, 절삭깊이를 각각 0.5mm, 2.5mm로 정하여 이송속도 변화에 따른 절삭 3분력을 나타낸 것이다. Fig. 4.6(a)에서 같이 절삭 3분력 모두 이송속도 증가에 따라 미소량 증가세를 보이고 있다. Fig. 4.6(b)에서는 이송속도에 따라 절삭력은 Fig. 4.6(a)와 비교해서 보면 뚜렷한 증가를 나타내었다. 특히 주분력은 배분력과 이송분력에 비하여 상대적으로 이송속도 증가에 따라 큰 증가세를 보이고 있다.

이송분력의 경우 절삭깊이와 이송속도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며, Fig. 4.6(a)에서 배분력은 절삭깊이가 적을 경우 이송분력보다 낮은 값을 나타내는 경향이 있는 데, Fig. 4.6(b)에서는 배분력이 이송분력보다 큰 값을 가지는 것으로 보아 배분력은 절삭 깊이의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 배분력이 절삭깊이의 영향을 크게 받는 것은 절삭깊이가 증가하면서 피삭재와 공구 여유면과의 접촉 면적의 증가 때문으로 사료된다.

Fig. 4.6(a), (b)에서 절삭력은 절삭깊이의 영향이 이송속도의 영향보다 상대적으로 크게 받음을 알 수 있었으며, 절삭능률을 위해서는 절삭깊이의 영향보다는 공구의 온도상승에 영향력이 적은 이송속도를 높여야 할 것으로 사료된다.



(a) D=0.5㎜



(b) D=2.5㎜

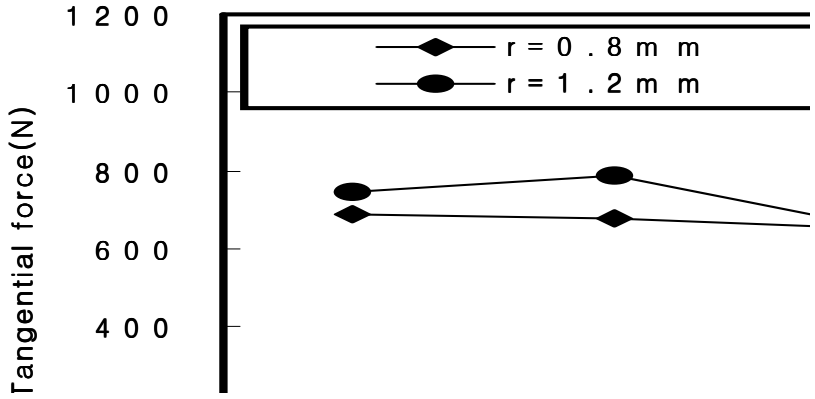
Fig. 4.6 Cutting force components with respect to feed rate (V=70m/min)

Fig. 4.7(a), (b), (c)는 이송속도를 0.2mm/rev, 절삭깊이를 1.0mm로 정하고, 절삭속도를 30～110m/min로 변화를 주어 가공 중의 절삭력를 측정하여 도시하였다.

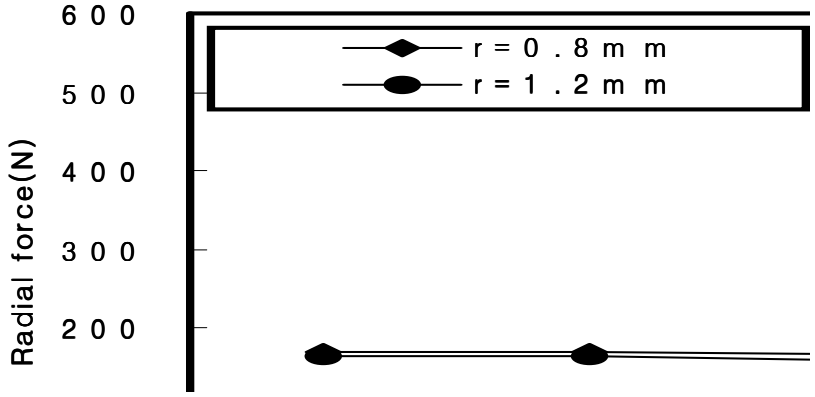
그림에서 절삭분력을 보면 주분력과 이송분력은 노즈 반경이 1.2mm인 공구에서 크게 나타났으며, 배분력은 노즈 반경이 상대적으로 적은 0.8mm의 공구에서 크게 나타났다. 주분력의 크기는 절삭속도가 증가할수록 미소량 감소하였으며, 배분력은 절삭속도 변화에 따라 기울기가 거의 없었다. 그러나 이송분력은 절삭속도가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있었다.

공구의 노즈 반경의 변화는 역학적으로 공구수명을 크게 좌우한다. 절삭단면의 형상에서 노즈 반경이 증가하면 절삭면적은 동일하지만 유효 어프로치각은 증가하고 최대절삭두께는 감소하게 된다. 그리고 노즈 반경이 작으면 절삭 날의 선단에 마멸이 집중되고 비교적 열에 강한 절삭공구는 치핑이나 결손 등으로 인하여 공구수명 한계에 이른다. 반면에, 노즈 반경이 크면 절삭날 부위의 강도가 상대적으로 증가하여 절삭 시작점에서 절삭 날의 접촉충격을 감소시키는 역할을 한다. 이로 인하여 노즈 반경의 증가하면 임계 절삭속도가 상승한다.

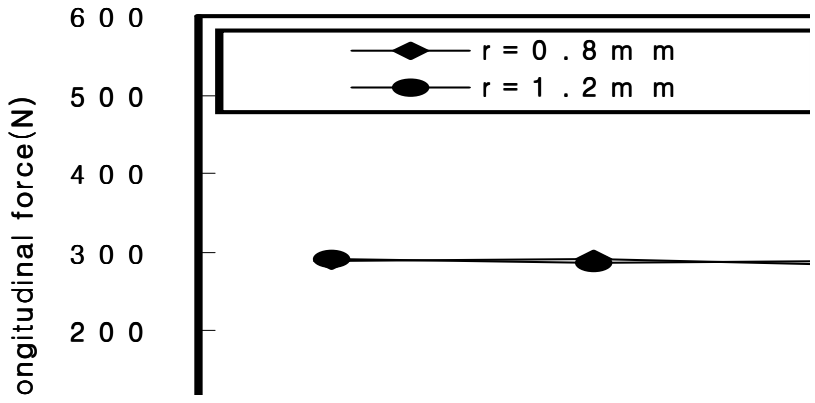
따라서, 이송이 큰 절삭의 경우 채터 진동의 영향이 없는 범위 내에서 노즈 반경이 큰 공구를 선택하는 것이 유리하다고 판단할 수 있다.



(a) Tangential force



(b) Radial force



(c) Longitudinal force

Fig. 4.7 Cutting force with respect to cutting speeds(F=0.2㎜/rev, D=1.0㎜)

4.2 공구의 마멸

본 실험에서 공구의 마멸 실험은 노즈 반경이 0.8mm인 PVD처리한 TiAlN 코팅공구를 사용하여 절삭깊이와 이송속도를 각 각 2.0mm, 0.2mm/rev로 일정하게 정하고, 절삭속도를 50, 70, 90m/min로 변화시켜 Ti-6Al-4V합금을 건식절삭 한 후 이에 따른 마멸의 형태와 공구수명의 변화를 알아보았다. 공구의 마모량 측정은 *i*-Came scope를 이용하였고, 측정배율은 x100배로 하였다.

4.2.1 공구마멸 형태

Fig. 4.8(a)~(e)는 절삭깊이와 이송속도를 각각 2.0mm, 0.2mm/rev로 일정하게 하고, 절삭속도를 90m/min 으로 하여 가공했을 때 시간에 따른 공구의 상면과 여유면의 마멸진행상황이다. 그림에서와 같이 공구상면인 크레이터 마멸과 여유면의 플랭크마멸의 형상은 가공 초기부터 절삭 날 부위의 마멸대가 나타나고 있으며, 플랭크 면 보다 크레이터 면에서 마멸진행의 폭이 크고 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다.

플랭크 면의 마멸은 가공시간 105초까지는 플랭크 면의 절삭 날 부위의 마멸대의 광택이 서서히 증가함을 알 수 있었다. 가공 시작시간 105초 이후부터는 플랭크마멸의 폭을 더욱 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

Fig. 4.8(c)~(e)를 보면 공구마멸 부분에 칩이 붙어있는 것을 볼 수 있다. 이것은 절삭 중 발생되는 절삭 열의 상승으로 인하여 절삭 칩의 일부가 공구마멸 부분에 녹아 붙은 융착(welding) 현상을 나타내고 있는 것이다.

Fig. 4.8(c)~(e)에서 공구의 상면을 나타내고 있는 오른쪽의 그림들을 보면 Fig. 4.8(c)에서부터 크레이터마멸은 절삭 날의 매우 가까운 위치에서 서서히 증가하여 깊어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 일반적인 재료에 비교해 티타늄에서의 크레이터마멸은 절삭 날 인선으로부터 더 가까운 부분에서부터 마멸

이 진행되기 때문이라고 생각할 수 있다. 절삭 날에서 가까운 부분에서 크레이터마멸이 시작되는 것은 티타늄 재료의 절삭 시 피삭재의 전단면에서 단열전단변형을 일으켜서 피삭재에서 절삭 칩으로 변화할 때, Ti-6Al-4V합금의 전단각이 매우 크기 때문에 공구와 칩 사이의 접촉 길이가 짧고 이에 따라 크레이터마멸도 절삭 날 인선부 가까이에서 시작하는 것이라고 알려져 있다. 이런 현상은 공구와 절삭 칩 사이의 접촉면적을 작도록 만들기 때문에 작은 절삭력으로도 절삭 날에 걸리는 응력을 크게 하여, 절삭 날의 마멸, 치핑, 파손 등의 결함을 촉진시키는 원인이 되기도 한다.

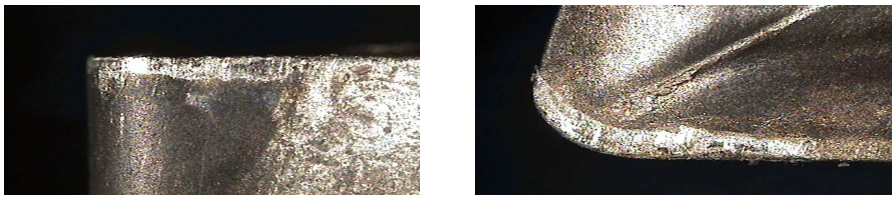
Fig. 4.8(d)는 150초 동안 가공한 후의 공구 여유면과 상면을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 가공 중 높은 열의 발생으로 인하여 절삭 날 주위의 고온부인 플랭크 면과 크레이터 면으로 열이 전달되어 온도구배를 일으킨 결과 공구가 변색 및 탈색 된 열영향부와 그 이외의 부분으로 뚜렷하게 구분되고 있다. 이러한 현상은 티타늄 재료는 밀도가 작아 발생한 열량에 비하여 상대적으로 온도는 쉽게 올라가고 열전도율이 낮은 특성 때문에 열을 신속히 소산하지 못하고 미소 절삭 부분에 집중된 채로 열이 누적되어 다른 재료에 비하여 고온이 발생하는 것으로 사료된다.

공구의 플랭크마멸은 초기보다 상당히 증가하여 275.3㎛의 값을 나타내고 있으며, 열영향부를 보면 변색부분이 마멸부위 아래에 하나의 모습으로 나타나고 있다. 이것은 선삭가공시 조건이 일정하게 진행되었음을 나타내주는 결과라 사료된다.

Fig. 4.8(e)는 195초 동안 가공한 후의 공구 여유면과 상면을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 Fig. 4.8(d)와 비교해서 공구의 플랭크마멸과 크레이터마멸은 상당히 진행되고 있는 모습니다. 플랭크마멸량은 312.3㎛로 본 실험에서 정한 공구수명 기준치에 도달하였다. 특히, 절삭 날의 플랭크 면을 보면 심하게 마멸된 것을 쉽게 알 수 있는데, 이것은 티타늄 재료가 힘을 가했을 때 변형의 정도를 나타내는 영률이 작아 탄성변형을 일으키기 쉽고, 높은 절삭온도와 절삭력, 그리고 가공 중 일어나는 응착부위의 취성으로 인한 미세한

충격이나 진동에 의한 치핑의 원인으로 절삭 날 부위를 크게 손상시켰기 때문으로 사료된다.

(a) Cutting time(15sec)



(b) Cutting time(60sec)

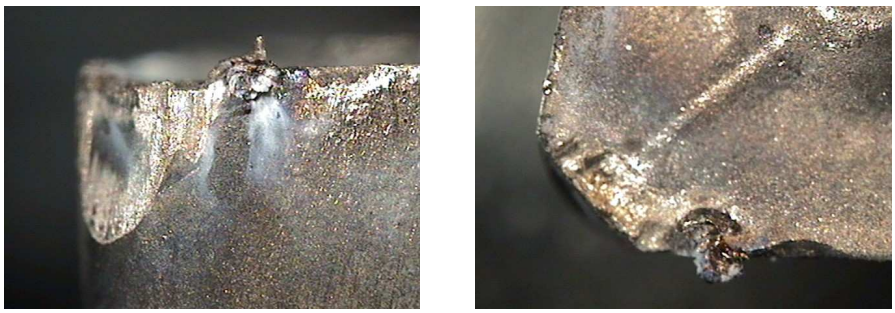
(c) Cutting time(105sec)

(d) Cutting time(150sec)

(e) Cutting time(195sec)

Fig. 4.8 Wear progression of TiAlN coated carbide tool (V=90m/min, D=2.0mm, F=0.2mm/rev)

Fig. 4.9는 240초 동안 가공한 후의 공구 여유면과 상면을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 공구의 절삭 날은 심하게 마모되어 더 이상 공구의 역할을 할 수 없게 되었다. 이것은 티타늄 재료가 화학적으로 활성이 매우 큰 금속이기 때문에 큰 절삭 조건이나 절삭조건이 맞지 않은 경우에 공구와 쉽게 반응하여 절삭가공 중 흔히 나타나는 현상으로 동일한 절삭조건에서 가공시간 195초가 지나는 시점에서부터 가공 중 발생되는 높은 열로 인하여 스파크가 일어나면서 칩에 불이 붙어 절삭 날과 칩 사이에 극심한 융착 현상을 초래시켰기 때문으로 사료된다.



Cutting time(240sec)

Fig. 4. 9 Tool wear of TiAlN coated carbide tool
(V=90m/min, D=2.0mm, F=0.2mm/rev)

4.2.2 절삭시간과 플랭크마멸량의 관계

Fig. 4.10은 Ti-6Al-4V합금을 PVD처리한 TiAlN 공구를 이용하여 절삭깊이를 2mm로, 공구의 이송속도를 0.2mm/rev로 일정하게 하고 절삭속도를 50, 70, 90m/min로 변화를 주어 선삭가공한 후의 각 각의 절삭속도에 대한 절삭시간과 플랭크마멸의 정도를 나타낸 것이다.

마멸 폭 크기의 변화에서 절삭속도 50m/min의 저속가공에서는 시간의 경과에 따른 마멸의 속도가 완만하게 진행되다가 공구수명의 가까이에 이르러서는 마멸의 폭이 급격히 증대하여 급속마멸단계에 이르는 현상을 보이고 있다. 이것은 공구의 마멸량 측정을 공구 상면이 아닌 플랭크 면에서 마멸 폭 V_B를 측정한 자료에 근거한 현상으로서 피삭재인 티타늄 합금 재료의 열전도계수가 상당히 작고, 비중이 작다고 하지만 절삭속도 50m/min 이하의 저속에서는 전단면의 전단변형이나 공구와 칩간의 마찰에 의한 열을 티타늄합금 재료 내에서 수용할 용량이 있다는 것을 의미한다.

절삭속도를 70m/min 이상으로 높이면 이러한 마멸 정체구간이 공구의 플랭크 마멸 폭 V_B가 시간에 따라 명료하게 진행하는 정상마멸구간으로 대체되는 것을 볼 수 있다. 이것은 절삭 열이 공구에 축척되어 시간의 흐름과 함께 지속적인 마멸량을 나타내는데 기인한 것으로 사료된다.

이처럼 티타늄 재료의 선삭가공시 마멸특성은 절삭속도에 매우 민감한 반응을 받는다는 것을 알 수 있으며, 본 실험조건에서 절삭속도 50m/min의 속도에서는 속도에 둔감한 반면, 절삭속도가 70m/min 이상의 속도에서는 매우 빠른 마멸의 형태를 가져옴으로 티타늄 재료의 가공시 수명연장을 위한 절삭속도는 70m/min 이하가 되도록 조절 해 주는 것이 매우 중요할 것으로 사료된다.

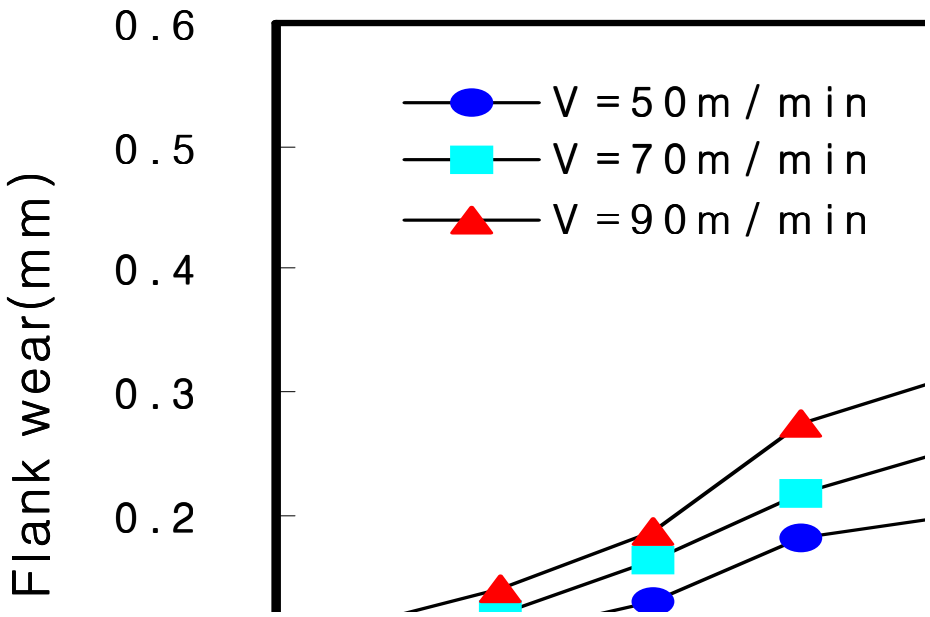


Fig. 4. 10 Flank wear test results for Ti-6Al-4V alloy using TiAlN coated tool

4.2.3 공구수명 식에 의한 절삭성 평가

공구의 수명에 대해서는 절삭시간에 따른 공구마멸 추세선을 최소자승법으로 구하여 ISO의 공구마멸 기준으로 정한 플랭크마멸 폭이 V_B=0.3mm에 도달하는 시점으로 속도별 수명을 구했으며, 그 결과는 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Tool life according to cutting speed

Cutting speed(m/min)	Tool life(min)
50	9.0
70	5.5
90	3.25

절삭가공에서 일반적으로 적용하는 공구 수명식은 테일러에 의한 식으로서 식 (4.1)과 같다.

$$VT^n = C \tag{4.1}$$

여기서, V는 절삭속도, T는 공구수명, C는 상수이며, 공구수명이 1분으로 되는 절삭속도를 의미한다. 또 n은 양축 대수좌표 상에서 직선으로 표현된 수명곡선의 음(-)의 기울기이다.

식 (4.1)에서 C 값이 크면 공구수명 1분에 해당하는 값이 큰 것이기 때문에 절삭공구의 마멸율이 상대적으로 작아서 절삭성이 좋다는 것을 의미하고, n 값이 작으면 공구의 마멸율이 절삭속도에 민감하게 변한다는 것을 의미한다.[44)]

Fig. 4.11은 절삭속도에 대응하는 공구수명 값을 양축 대수좌표 상에 나타내었고, 이들 세 개의 측정점에 대하여 테일러의 공구수명 방정식 유형에 맞는 “X의 누승(累乘)” 유형의 회귀 추세선으로 아래의 식(4.2)와 같이 공구수명 방정식을 구하였다.

$$\log V = -0.7317 \log T + 236.28 \tag{4.2}$$

이것을 다시 쓰면,

$$VT^{0.7317} = 236.28 \tag{4.3}$$

로 된다.

일반적인 C값은 초경공구를 사용한 건식절삭에서 보통 204(주철;H_B 200)에서 6,590(경합금)까지의 범위를 나타내고 있다.[45]

본 실험의 티타늄합금의 가공에서 C값은 236.28로 앞에서 언급한 일반적으로 알려진 범위의 최소치에 가까운 낮은 값을 가진다. 이것은 그 만큼 공구의 마멸이 다른 일반금속재료를 가공할 경우에 비하여 매우 빠른 것을 의미하므로 결국, 티타늄합금의 난삭성을 나타내는 것이다.

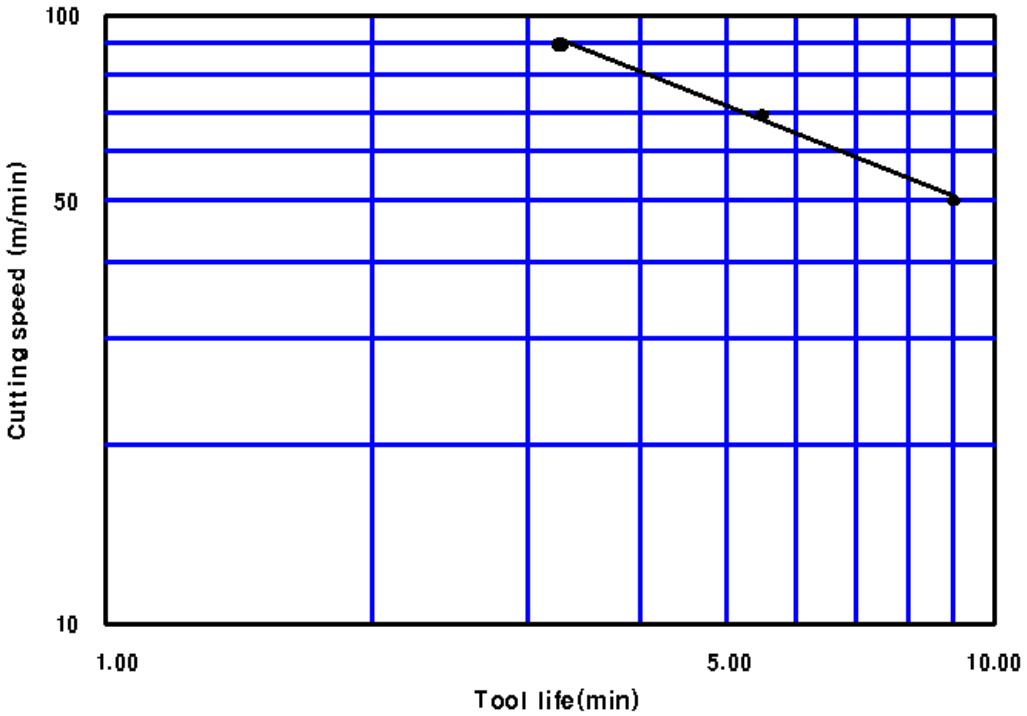


Fig. 4.11 Tool life diagram by logarithm of the axes

4.3 표면거칠기에 대한 분석

기계가공에서 가공 정밀도나 표면거칠기는 사용한 공작기계의 종류에 따라 표면거칠기의 형태가 달라지며, 기계의 마모, 절삭공구의 조건, 가공표면의 성분, 절삭방법, 작업자의 습관, 작업환경의 조건 등에도 영향을 받는다. 그러나 최종적으로는 공구와 가공물과의 상대운동을 거쳐 절삭가공이 이루어지고 그 결과로 가공물의 형상과 면이 이루어진다고 볼 수 있다.

본 실험에서 사용한 표면거칠기 측정은 촉침식 측정기를 사용하였으며, 축방향과 일치하여 Traverse length는 2.5mm, Cut off는 0.8mm로 하여 측정하였다.

Fig. 4. 12는 절삭속도 70m/min, 절삭깊이 1.5mm의 조건에서 이송속도 변화에 따른 표면거칠기를 이론식에 의한 이론 값과 함께 나타내었다. 그림에서와 같이 표면거칠기는 이송속도가 증가할수록 표면거칠기는 전체적으로 증가를 하였으며, 노즈 반경이 1.2mm일 때가 0.8mm보다 표면거칠기가 양호함을 알 수 있었다. 또한, 실험에 의한 결과는 식(2.28)의 중심점의 표면거칠기 이론값과 비교하여 이송속도가 0.1mm/rev 일 때 오차는 0.00㎛~0.04㎛ 정도로 거의 일치하였으며, 이송속도가 증가할수록 이론과 실험에 의한 오차는 크게 발생되었으며, 오차는 노즈 반경이 0.8mm일 때는 0.97㎛, 1.2mm일 때는 0.46㎛의 차이가 생겼다. 이 결과 표면거칠기를 위한 공구의 이송은 낮은 속도로 적용을 시켜야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

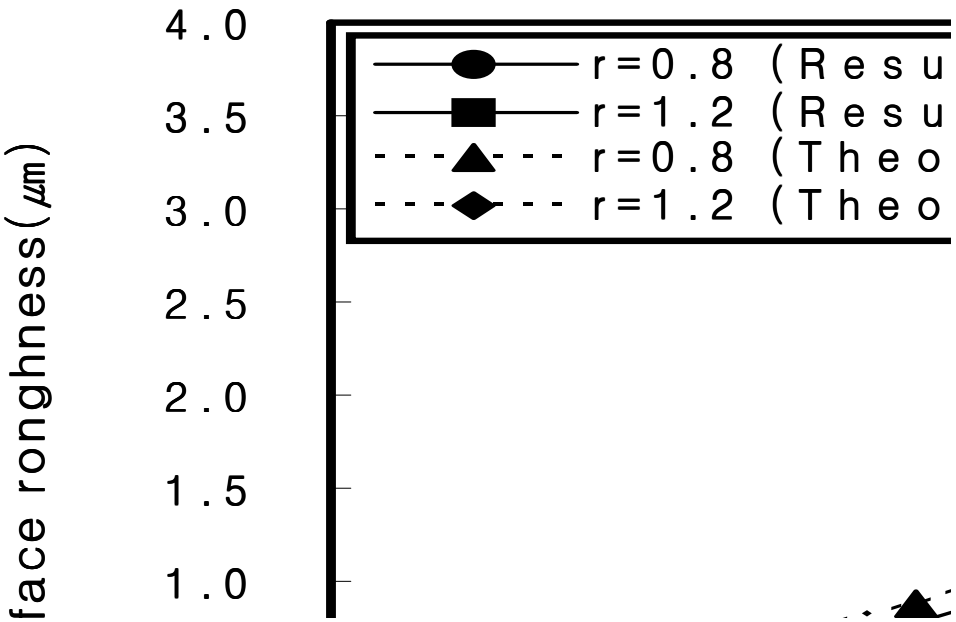


Fig. 4. 12 Surface roughness test results vs. theoretical values

Fig. 4.13은 노즈 반경이 1.2mm인 공구로 절삭속도와 이송속도 변화에 따른 표면거칠기 값을 절삭깊이를 1.5mm로 일정하게 한 조건에서 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 절삭속도가 증가할수록 표면거칠기는 양호함을 알 수 있었다. 표면거칠기는 이송속도가 0.1mm/rev ~ 0.15mm/rev에서는 절삭속도 변화에 상관없이 대체로 안정적이었으며, 이송속도가 0.2mm/rev 이상부터는 절삭속도가 작을수록 거칠기 값이 크게 나타남을 알 수 있었다.

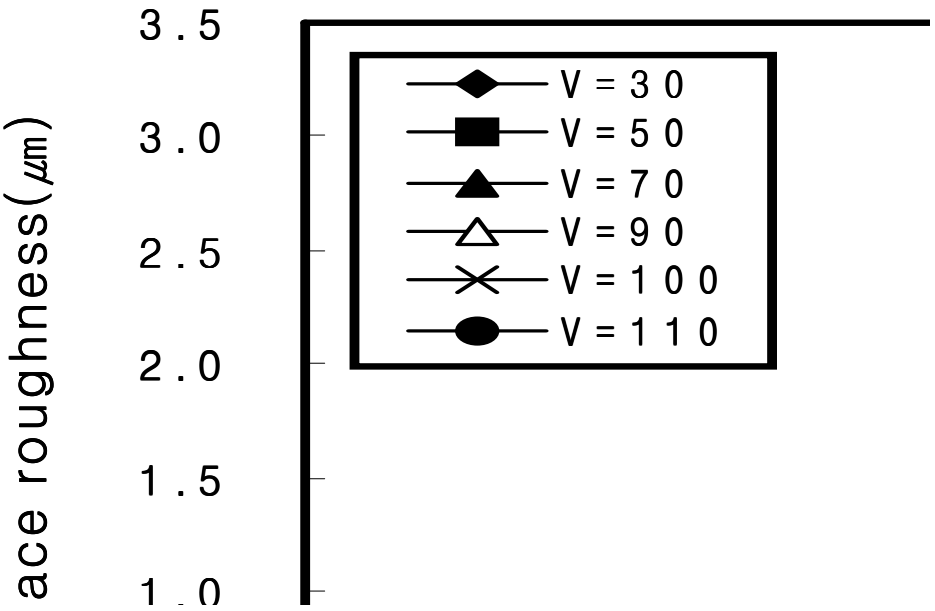
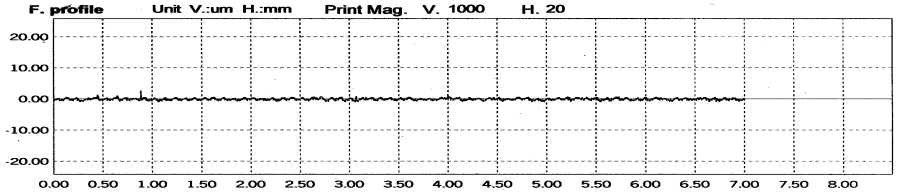


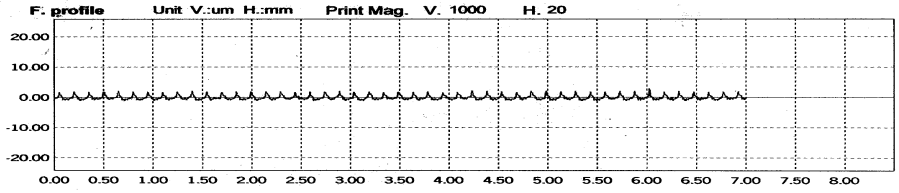
Fig. 4. 13 Surface roughness with respect to cutting speed and feed rate (R=1.2㎜, D=1.5㎜)

Fig. 4.14~4.18은 절삭깊이와 이송변화에 따른 표면거칠기 값을 Fig. 4.12에서 결과 값과 이론 값을 비교해서 상대적으로 오차가 적게 발생한 노즈 반경이 1.2mm인 인서트를 사용하여, 절삭속도를 70m/min 로 일정하게 한 조건에서 거칠기의 정도를 나타내고 있다. 그림에서처럼 표면거칠기는 이송속도가 증가할수록, 절삭깊이가 깊을수록 나빠짐을 알 수 있었다. 표면거칠기는 절삭깊이에 대한 영향은 적게 받았으며, 반면에 이송속도의 영향은 많이 받음을 알 수 있었다.

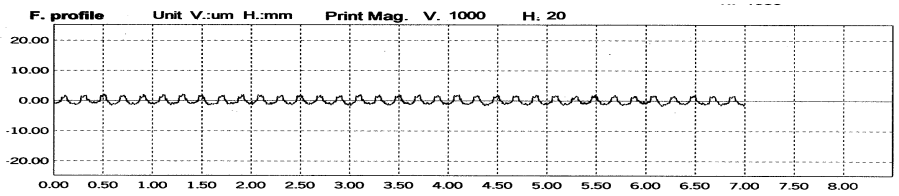
티타늄 재료는 활성이 높은 금속으로 건식절삭에서는 절삭가공 중 절삭 칩이 스파크를 일으키면서 절삭 칩이 타는 경우도 있기 때문에 절삭유제를 사용하면 칩의 연소를 방지하고 표면거칠기 향상에도 좋을 것으로 사료된다.



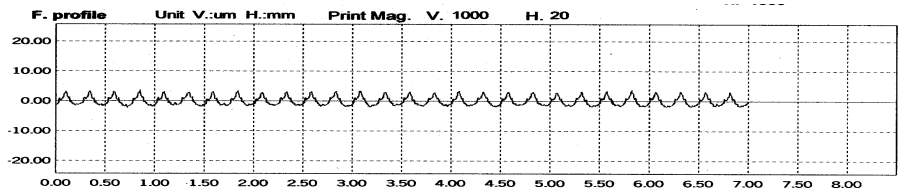
(a) F=0.1mm/rev



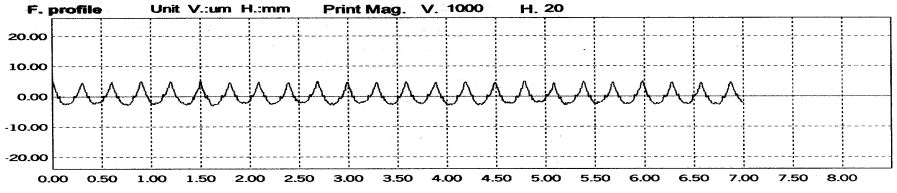
(b) F=0.15mm/rev



(c) F=0.2mm/rev

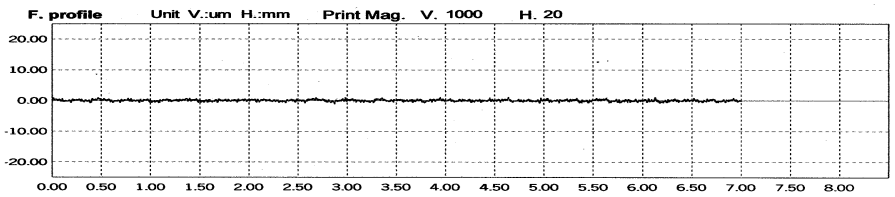


(d) F=0.25mm/rev

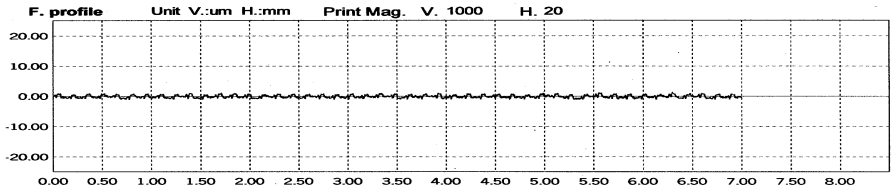


(e) F=0.3mm/rev

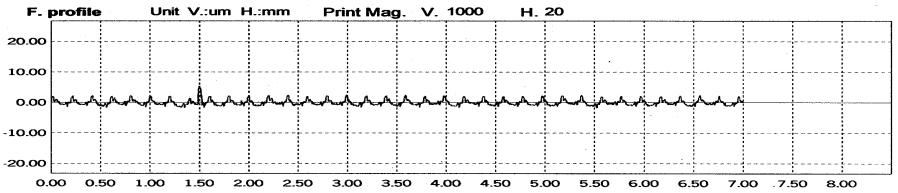
Fig. 4. 14 Surface roughness with respect to feed (V=70m/min, D=0.5mm)



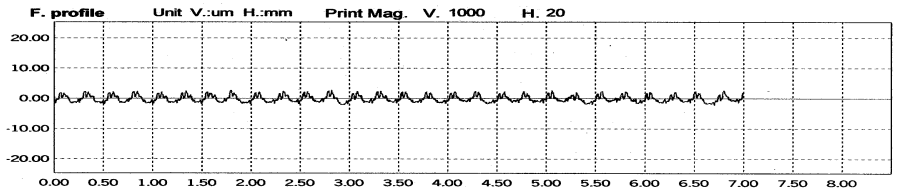
(a) F=0.1mm/rev



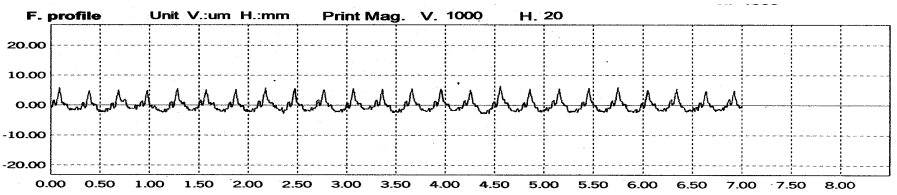
(b) F=0.15mm/rev



(c) F=0.2mm/rev

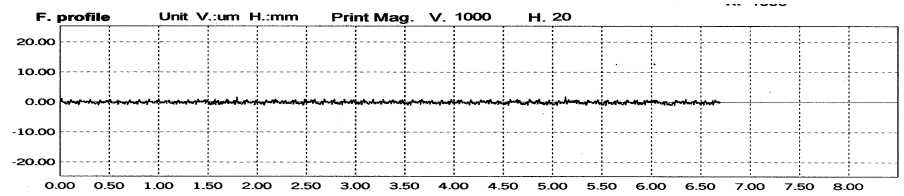


(d) F=0.25mm/rev

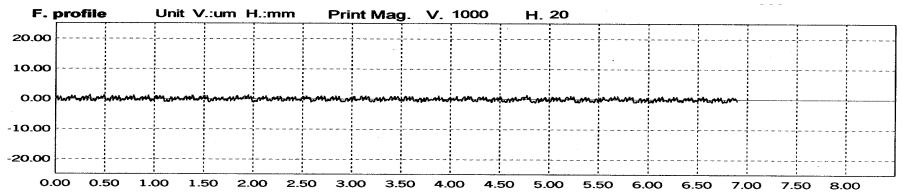


(e) F=0.3mm/rev

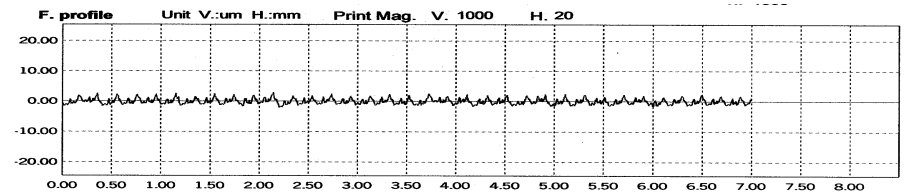
Fig. 4. 15 Surface roughness with respect to feed (V=70m/min, D=1.0mm)



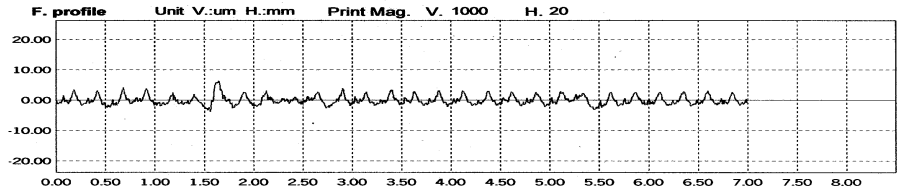
(a) F=0.1mm/rev



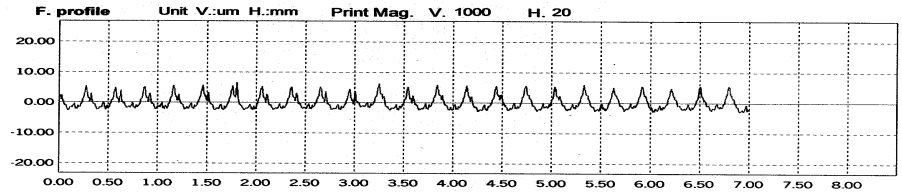
(b) F=0.15mm/rev



(c) F=0.2mm/rev

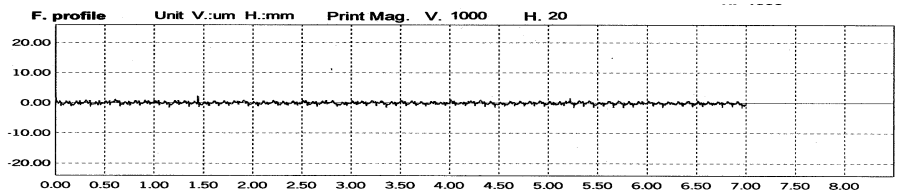


(d) F=0.25mm/rev

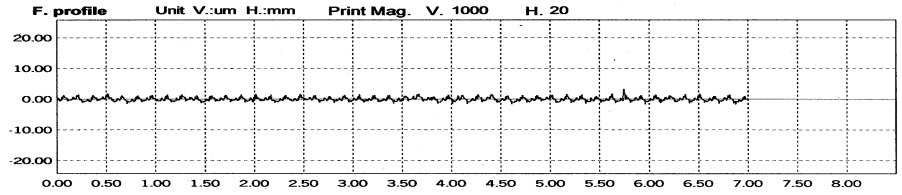


(e) F=0.3mm/rev

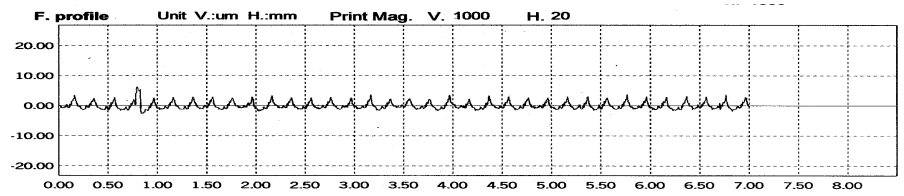
Fig. 4. 16 Surface roughness with respect to feed (V=70m/min, D=1.5mm)



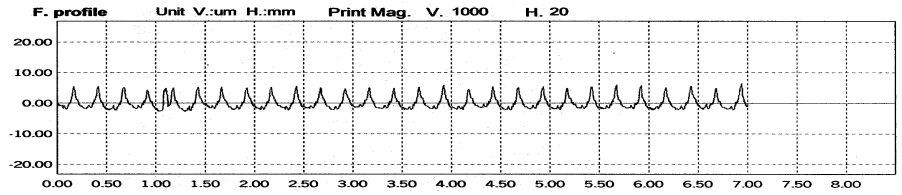
(a) F=0.1mm/rev



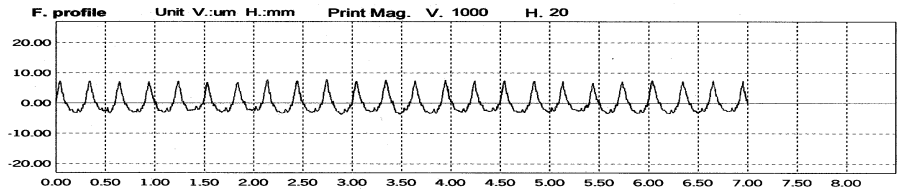
(b) F=0.15mm/rev



(c) F=0.2mm/rev

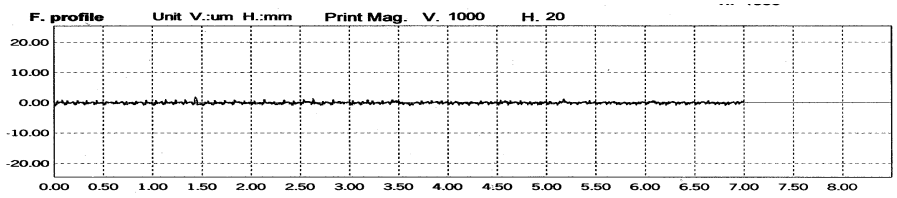


(d) F=0.25mm/rev

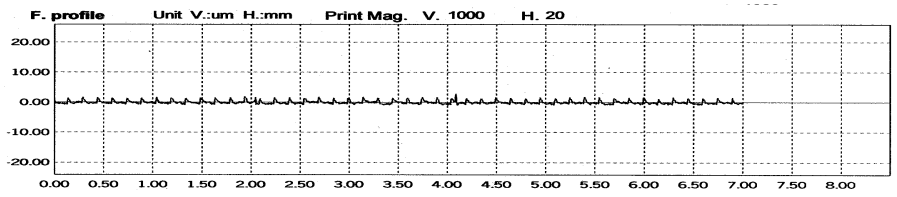


(e) F=0.3mm/rev

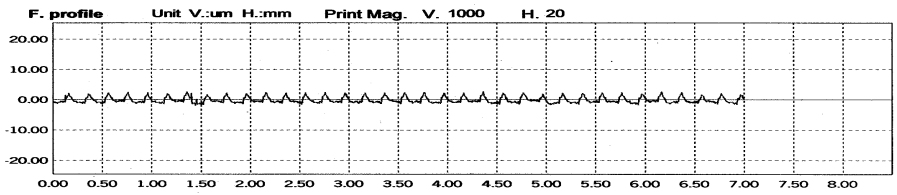
Fig. 4. 17 Surface roughness with respect to feed (V=70m/min, D=2.0mm)



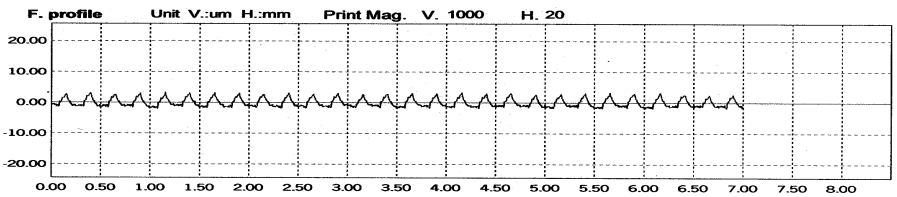
(a) F=0.1mm/rev



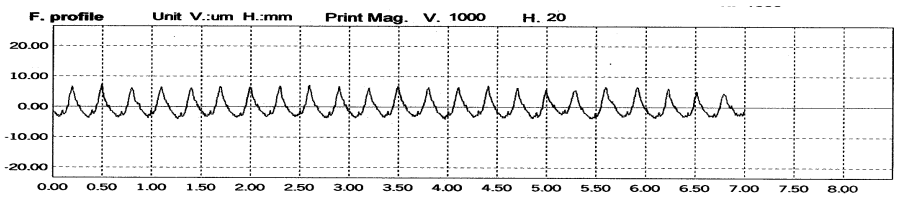
(b) F=0.15mm/rev



(c) F=0.2mm/rev



(d) F=0.25mm/rev



(e) F=0.3mm/rev

Fig. 4. 18 Surface roughness with respect to feed (V=70m/min, D=2.5mm)

4.4 칩 발생 형태

실험중에 관찰된 칩의 형태는 거의 모든 절삭조건에서 연속형 칩으로 나타났다. 절삭된 칩의 모양은 장비에서 상세하게 관찰하였다. 절삭 칩의 형상은 제2장 1절에서 설명된 바와 같이 Photo. 4.1에서처럼 모든 절삭 조건에서 Ti-6Al-4V 합금 가공에서 전형적으로 발생되는 미세한 톱날 형 칩이 관찰되었다. Photo. 4.2에 절삭속도를 110m/min로 일정하게하고 절삭 깊이를 각각 0.5mm, 2.5mm, 이송속도를 각각 0.1mm/rev, 0.3mm/rev로 하여 절삭가공 후 배출 된 칩의 톱날형 요소간의 피치를 표시하였다. 그림에서 칩의 피치는 절삭 깊이가 0.5mm, 이송속도가 0.1mm/rev 일때 75.714㎛로 가장 적게 나나내었으며, 절삭깊이가 2.5mm, 이송속도가 0.3mm/rev 일 때 323.857㎛로 가장 크게 나타내었다. 이러한 결과로 보아 톱날형 요소간의 피치는 절삭깊이가 적을수록, 이송속도가 낮을수록 작게 나타나 표면 거칠기로 양호함을 알 수 있었다.

Photo. 4.1 Saw-toothed chip shape in machining Ti-6Al-4V alloy

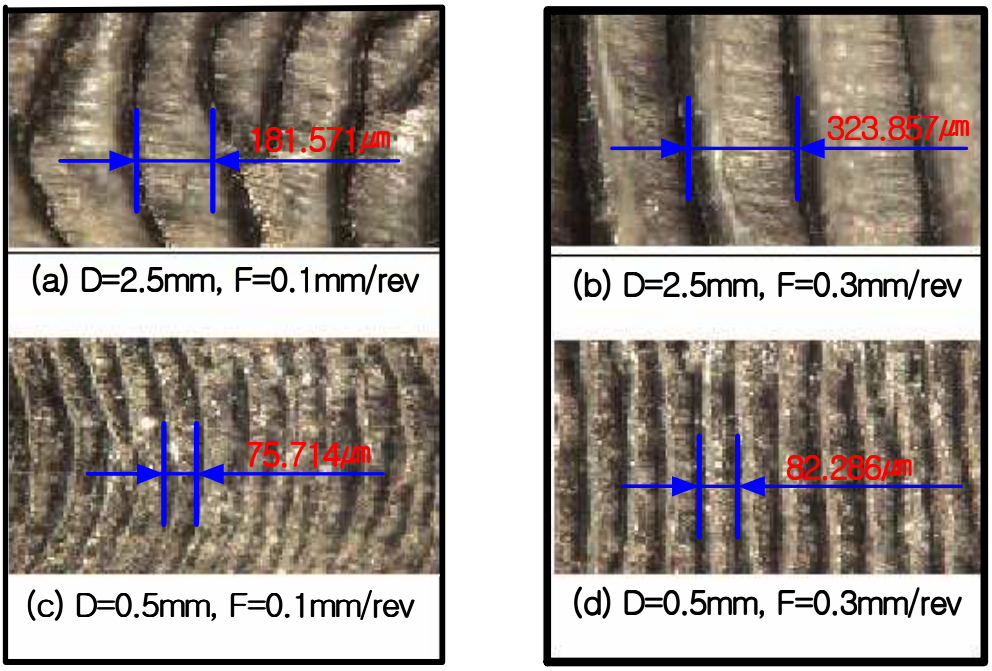


Photo. 4.2 Pitch of saw-toothed chip in machining Ti-6Al-4V alloy

4.5 칩 처리성

칩 브레이크의 기능은 칩을 전단하는 것으로 특히, 선삭 가공에서 칩 브레이크는 공구 수명의 연장, 절삭 저항의 경감, 다듬질 면 거칠기의 개선 등 팁의 종합 성능을 높이는 등의 중요한 역할을 한다.

본 실험에서 칩 처리성을 파악하기 위해 사용한 절삭공구는 노즈 반경이 0.8mm로서 칩 브레이크는 절삭인선부의 각이 11.5°이고, 측면 각이 10.5°인 중절삭형을 사용하였다. 칩의 발생형태는 대부분의 실험조건에서 연속형의 칩이 발생되었으며, 절삭 칩은 Photo. 4.1에 나타낸 것처럼 Ti-6Al-4V합금 가공시에 전형적으로 발생되는 미세한 톱날 형상으로 관찰되었다.

절삭속도 조건에 따라 배출된 칩 형상 사진을 Photo. 4.3～4.8에 나타내었으며, 칩의 형상 분류는 INFOS 기준에 의거하여 안정, 사용, 불안정한 영역 중에 불안정 영역을 제외한 영역들을 분류하여 그래프 한 결과를 Fig. 4.19에 나타내었다.

Photo. 4.6에 나타난 바와 같이 칩 처리성이 사용가능한 영역이 가장 많은 절삭속도 90m/min에서는 안정된 칩의 형상인 Short tubular chips 와 Spiral tubular chips의 칩들이 주로 나타났으며, 절삭속도 90m/min이하에서의 사용가능한 영역에서는 주로 Long tubular chips형상이 나타났다. Photo. 4.3의 절삭속도 30m/min에서 안정된 영역이 가장 적었고, 전체 실험조건에 있어 불안정한 칩 형상을 보인 영역의 조건들서는 주로 Tangled chips 형상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.19에 나타난 바와 같이 칩 처리성은 절삭깊이의 영향보다 이송속도의 영향을 더 받았으며, 대체로 절삭속도가 증가할수록 칩 처리성은 양호하였으며, 절삭속도 90m/min에서 가장 안정적인 칩들이 배출되었다.

2.5	5	2	2	2	6
2.0	2	2	2	2	6
1.5	2	2	2	2	6
1.0	2	2	2	2	6
0.5	2	2	5	5	5
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

2.5					
2.0					
1.5					
1.0					
0.5					
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Photo. 4.3 Chip treatment of cutting speed 30m/min

2.5	2	2	2	2	6
2.0	2	2	2	2	5
1.5	2	2	2	5	5
1.0	2	2	2	5	5
0.5	2	2	5	5	6
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

2.5					
2.0					
1.5					
1.0					
0.5					
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Photo. 4.4 Chip treatment of cutting speed 50m/min

2.5	2	2	2	2	6
2.0	6	2	2	2	5
1.5	2	2	2	2	6
1.0	2	2	2	5	5
0.5	2	2	4	4	5
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

2.5					
2.0					
1.5					
1.0					
0.5					
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Photo. 4.5 Chip treatment of cutting speed 70m/min

2.5	2	2	2	5	7
2.0	2	2	2	5	7
1.5	2	2	2	5, 6	7
1.0	2	2	2	5, 6	6
0.5	2	4	4	4	6
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

2.5					
2.0					
1.5					
1.0					
0.5					
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Photo. 4.6 Chip treatment of cutting speed 90m/min

2.5	2	2	2	2	6
2.0	2	2	2	2	6
1.5	2	2	2	2	6
1.0	2	2	2	5	6
0.5	2	2	5	5	6
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

2.5					
2.0					
1.5					
1.0					
0.5					
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Photo. 4.7 Chip treatment of cutting speed 100m/min

2.5	2	2	2	2	6
2.0	2	2	2	2	6
1.5	2	2	2	2	6
1.0	2	2	2	2	6
0.5	2	2	5	5	5
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

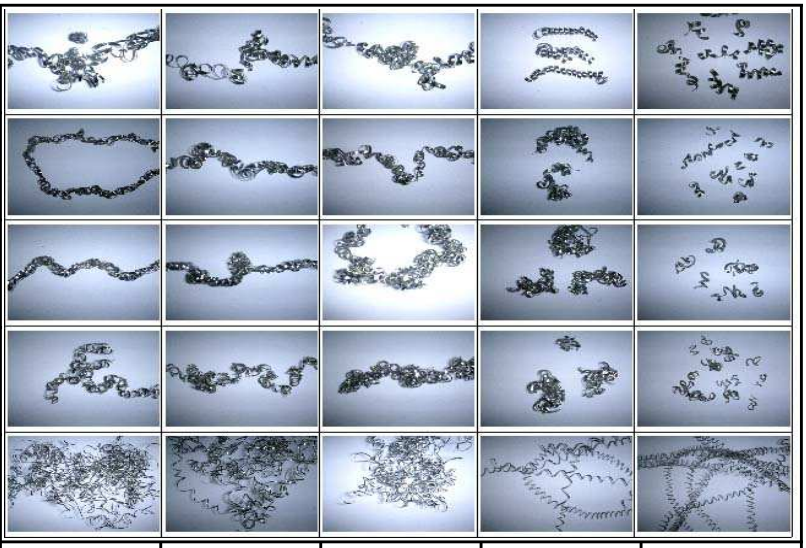
2.5					
2.0					
1.5					
1.0					
0.5					
D / F	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Photo. 4.8 Chip treatment of cutting speed 110m/min

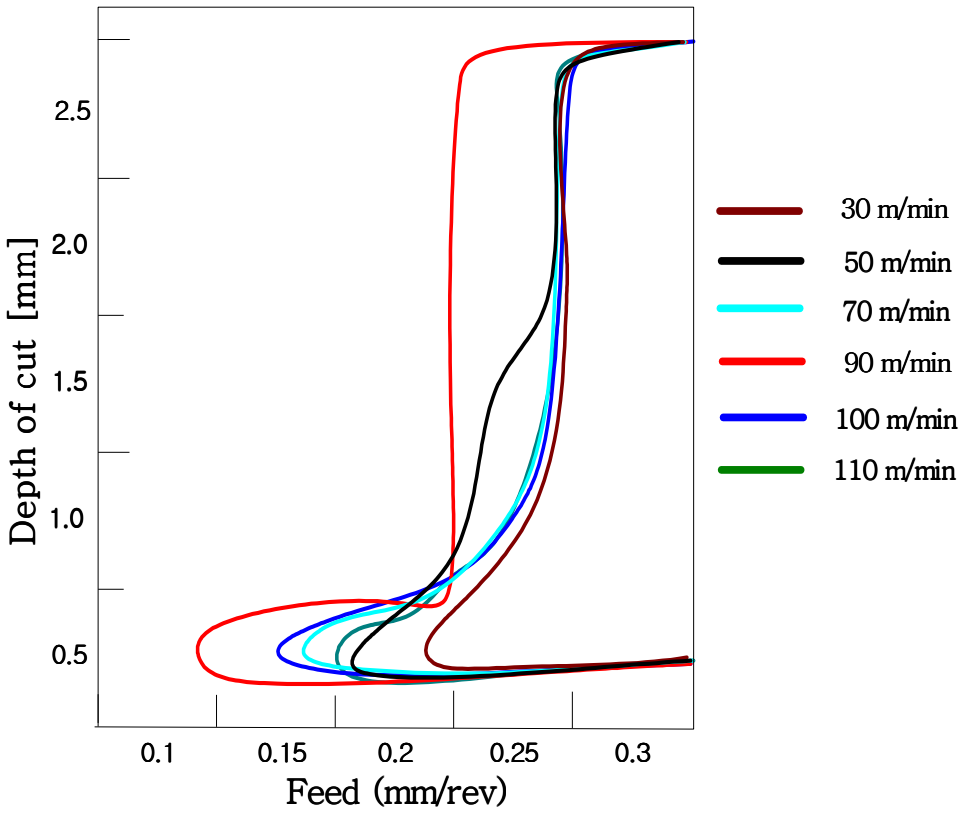


Fig. 4.19 Good region for chip treatment in cutting speed

4.6 가공경화층 측정

일반적으로 피삭재의 경도는 피삭성에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서 티타늄합금에 대하여 가공경화층을 알아보기 위해 경도실험을 실시하였다.

경도실험은 ϕ60×130mm 크기의 Ti-6Al-4V 티타늄합금 봉으로 절삭실험을 마친 후 가공부위를 다이아몬드 휠 컷팅기를 이용하여 단면을 절단하여 측정하였다. 경도측정은 비커어스 경도계를 이용하여 하중 0.5kg, 측정시간을 10초로 했다.

Fig. 4.20은 절삭속도 50m/min, 70m/min, 90m/min 시험편의 위치에 따른 경도 측정값을 나타낸 것으로서 각 측정부의 경도차는 거의 없었다. 경도의 측정부위는 원형단면 최외각의 50㎛ 안쪽 위치에서부터 50㎛간격을 유지하면서 소재의 중심방향으로 이동하면서 실험하였다. 그래프에서 보는바와 같이 최외각으로부터 50㎛ 떨어진 부근에서 경도 값이 다른 영역의 경도 값에 비해 약간 작은 값을 보였으나, 이 것은 경도차가 거의 없는 것으로 보아도 될 것으로 사료된다. Photo. 4.9는 절삭속도 70m/min 속도에서 가공을 마친 재료의 최외곽으로부터 50㎛ 떨어진 위치부터 50㎛의 간격으로 소재의 중심방향으로 경도측정부의 표면을 광학현미경(×50배)으로 촬영한 것이고, 측정부의 조직을 검사하기 위하여 전자주사현미경으로 촬영하여 Photo. 4.10에 나타내었다. 그림에서처럼 조직상태 또한 비교하기 힘들 정도로 거의 비슷한 모습을 나타내었다. 티타늄합금을 가공함에 있어서 가공경화 현상은 공구의 사용이 적절하지 못한 경우에 흔히 발생되는 데 본 실험에서 절삭가공 후 경도차가 거의 발생되지 않은 것은 가공에 사용된 PVD TiAlN 코팅공구는 티타늄의 절삭 중 가공경화에 의한 가공의 어려움이 별로 없다는 것으로 판단 할 수 있다.[46)]

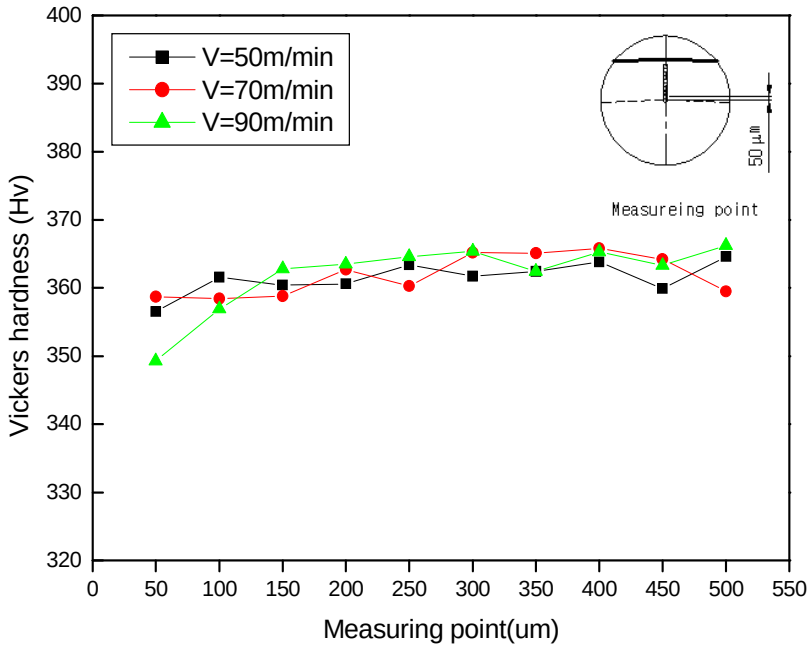
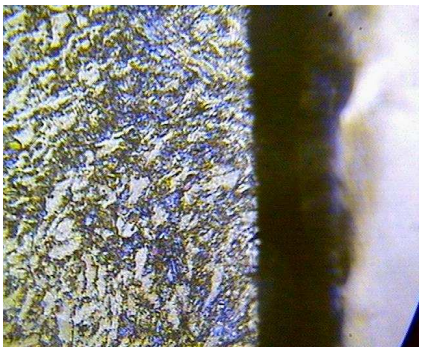
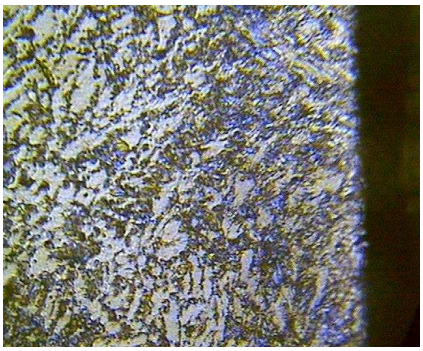


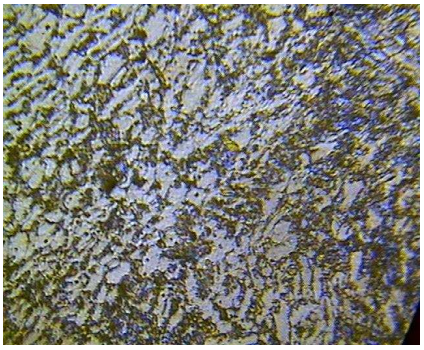
Fig. 4.20 Vickers hardness of Ti-6Al-4V titanium alloy



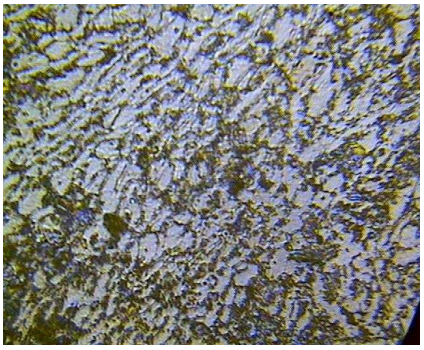
(a) 50㎛



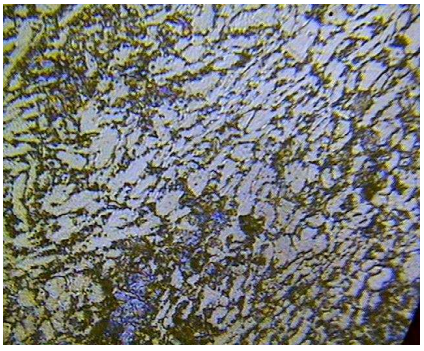
(b) 100㎛



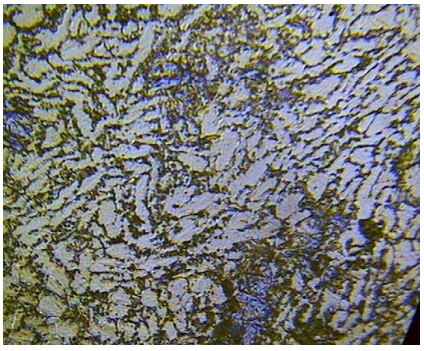
(c) 150㎛



(d) 200㎛

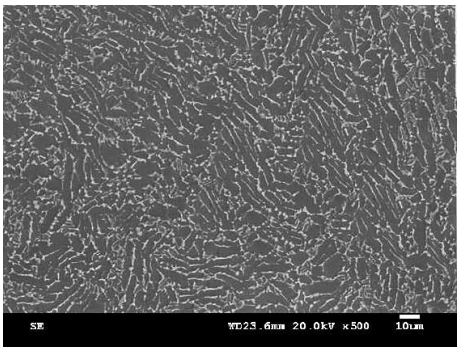


(e) 250㎛

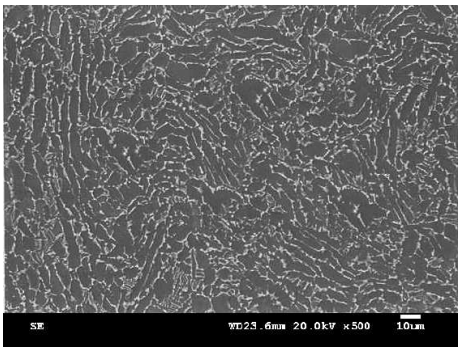


(f) 300㎛

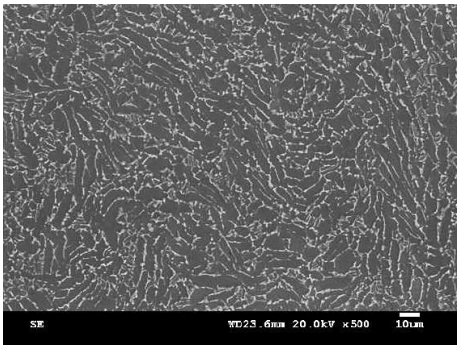
Photo. 4.9 Optical macro-scope of hardness measure point.



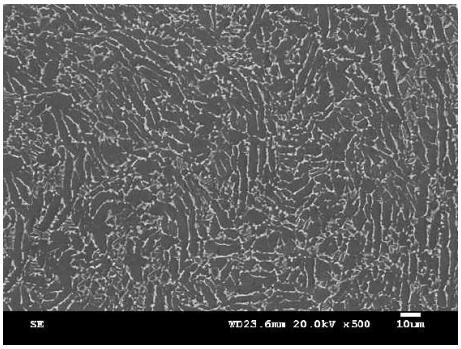
(a) 50㎛



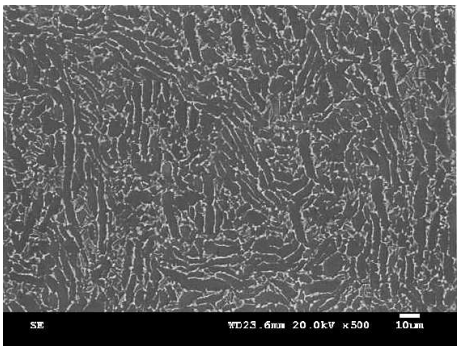
(b) 100㎛



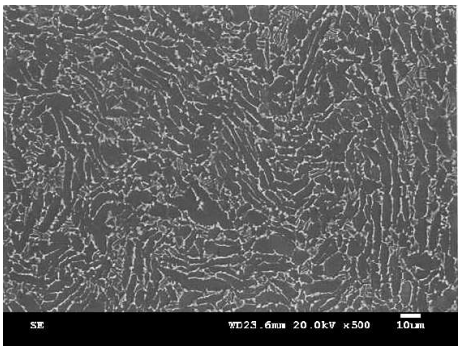
(c) 150㎛



(d) 200㎛



(e) 250㎛



(f) 300㎛

Photo. 4.10 SEM micrographs showing the cross-section of Ti-6Al-4V alloy

제 5 장 결론

본 연구는 PVD 코팅기술을 적용한 TiAlN코팅 공구를 이용하여 티타늄합금의 50% 이상을 차지하고 있는 Ti-6Al-4V 합금에 대한 절삭특성을 알기 위하여 절삭속도 30m/min～110m/min, 절삭깊이 0.5mm～2.5mm 및 이송속도 0.1mm/rev～0.3mm/rev로 변화를 주어 선삭가공을 통하여 실시하였다.

절삭깊이와 이송속도에 따른 절삭력의 영향, 절삭시간과 공구마멸량의 관계, 절삭특성에 따른 공구수명, 이송속도 변화에 따른 표면거칠기, 칩 처리성 그리고 피삭성이 경도에 미치는 영향 등을 실험적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 절삭력은 절삭깊이에 대한 영향이 이송속도에 대한 영향보다 컸으며, 절삭속도가 70m/min 이상에서는 공구선단의 높은 온도로 인하여 절삭력의 차이가 크게 발생되었다.

2. 노즈 반경이 1.2mm의 공구를 사용했을 때가 0.8mm 일 때 보다 절삭력은 대체로 컸으며, 절삭속도가 증가함에 따라 주분력은 미소량 감소하였으며, 배분력은 거의 일정하였고, 이송분력은 증가하였다.

3. 크레이터마멸은 절삭 날 인선의 끝부분에서 시작되었으며, 플랭크마멸을 기준으로 공구수명 방정식 $VT^{0.7317} = 236.28$ 을 구하였다.

4. Ti-6Al-4V 합금의 마멸특성은 절삭속도 50m/min에서는 마멸속도가 대체로 완만한 반면, 절삭속도가 70m/min이상의 속도에서는 매우 빠른 마멸의 형태를 가져 수명연장을 위한 절삭속도는 70m/min이하로 주어야 함을 알 수 있었다.

5. 표면거칠기(Ra)는 이송속도의 영향을 많이 받았으며, 선삭에서의 정밀영역의 표면거칠기는 0.1～0.4㎛ 정도의 범위이므로[51] 정밀가공을 위한 이송속도는 0.15mm/rev 이하가 적정함을 알 수 있었다.

6. 배출된 칩들의 형상사진을 절삭조건에 따라 도표화한 결과 이송속도가 증가할수록 칩의 형태는 대체로 양호하였으며, 절삭속도 90m/min, 이송속도 0.25～0.3mm/rev에서 칩 처리성이 가장 양호하였다.

7. 티타늄합금에 대한 피삭성을 알아보기 위하여 가공단면의 경도실험을 한 결과 경도의 차이가 거의 없는 것으로 보아 PVD TiAlN 코팅공구는 티타늄의 절삭 중 가공경화에 의한 가공의 어려움이 별로 없었다.

참 고 문 헌

1. (社)チタニウム協會, “チタンの加工技術”, 日刊工業新聞社, p. 825, 1992
2. 이용택, 김승언, 현용택, 정희원, “꿈의 신소재 티타늄”, 한국철강신문 p. 130, 2003
3. 이용태, 이종형, “티타늄 가공기술”, 청문각, pp. 25～35, 2002
4. N. Zlatin, J. D. Christopher and J. T. Cammett, “Machining of new materials”, USAF Technical Report AFML-TR, pp. 73～165. 1973
5. N. Zlatin, “Machining of titanium”, Proc. Symp. on Machining and Grinding Titanium. Watertown Arsenal. Watertown. MA. March 31. 1953. U. S. Army Ordnance Corps. p. 36, 1953
6. R. Komanduri, B. F. Von Turkovich, “New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys”, Wear. Vol. 69, pp. 179～188, 1981
7. R. Komanduri, “Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys”, Wear. Vol. 76, pp. 15～34, 1982
8. A. D. Mcquillan and M. K. Mcquillan, “Titanium”, Joumal of the Frankin Institute, Vol. 261, p. 574, 1956
9. J. E. kahles, M. Field, D. Eylon and F. H. Froes, “Machining of titanium alloys”, J. of Metals, Vol. 37, No 4, pp. 27～34, 1985
10. J. I. Elgomayel, J. F. Radavich and Miendger Tseng, “The study of the wear mechanism of titanium carbide coated carbide tools”, International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 19, Issue. 4, pp. 205～219, 1979
11. N. Zlatin, “Procedures and precautions in machining titanium”, Titanium and it's Alloys, ASM. Metal park. Ohio, 1982
12. K. P. Rajurkar, J. Kozak, B. Wei and J. A. McGeough, “A Study of

pulse electrochemical machining characteristics", Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 231～234, 1993

13. G. Yankoff, "Method and apparatus for machining", United States Patent, No.4, pp. 461～467, 1986

14. M. Mazurkiewics, Z. Kabala and J. Chow, "Metal machining with high pressure water jet cooling assistance-a new possibility", ASME journal of Engineering for Industry, Vol. 111, p. 712, 1989

15. G. S. Fox-Rabinovich, S. C. Veldhuis, G. C. Weatherly, A. I. Kovalev, S. N. Korshunov, V. N. Scvortsov, G. K. Dosbaeva, L. Sh. Shuster and D. L. Wainstein, "Improvement of 'duplex' PVD coatings for HSS cutting tools by ion mixing", Surface and Coatings Technology. Vol. 187, Issues. 2～3, pp. 230～237, 2004

16. 홍우표, "Ti-6Al-4V 타이타늄 합금 旋削特性에 관한 硏究", 충남대학교, 2001

17. N. Y. Kim, J. B. Ko and D. J. Lee, "A Study on the Tool Wear and Cutting Characteristics in the Machining of Ti-6Al-4V Using Tungsten Carbide Tool", Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 9～16, 2002

18 M. J. Donachie, Jr., "Titanium and Titanium Alloy Source Book", ASM, Metals Park, Ohio, p. 3, 1982

19 W. F. Smith, "Structures and Properties of Engineering Alloy", McGraw Hill, p. 411, 1981

20 양훈영, 김수영, "금속재료학", 문운당, pp. 441, 1991

21 R. Boyer, G. welsch, E. W. Collings, "Materials Properties Handbook-Titanium Alloy", ASM, 1994

22. M. J. Donachie, "Titanium-A Technical Guide", ASM, International, Metals Park, OH, p. 15, 1989

23. 이용택, 김승언, 현용택, 정희원, “꿈의 신소재 티타늄”, 한국철강신문 pp. 203～236, 2003

24. R. L. Grand, “Manufacturing engineer's manual”, McGraw-Hill, p. 258, 1971

25. J. C. Lemaire and W. A. Backofen, “Adiabatic instability in the orthogonal cutting of steel”, Metallurgical Transactions, Vol. 3, No. 2, pp. 477～481, 1972

26. R. Komanduri, “Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys”, Wear. Vol. 76, pp. 15～34, 1982

27. N. N. Zorev, “Interrelationship Between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting”, Proc. Inter. Res. Prod. Conf., Carnegie Inst. of Tech., pp. 42～49, 1963

28. Von Mises, R., “Mechanik der festen korper im plastisch deformablen zustan”, Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, p. 582, 1013

29. Tresca, H., “Sur 1′ ecoulement des corps solides soumis a defortes pressions”, C. R. Acad. Sci. Paris, 59, p. 754, 1864

30. J. T. Burwell, “Survey of possible wear mechanisms”, Wear, 1, pp. 119-141, 1957

31. C. Lipson, L. V. Colwell, “Handbook of mechanical wear”, The University of Michigan Press, p. 445, 1961

32. R. Hom, “Electric contacts”, Hugo, Gerbers Ferlag, P. 214, 1946

33. J. F. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces”, J. App. Phys., 24-8, pp. 981～986, 1953

34. E. Rabinowicz, “Friction and wear of materials”, John Willey and Sons, p. 168, 1965

35. M. M. Kruschov, “Resistance of metals to wear by abrasion: Related to hardness”, Insten Mech. Engrs Conf. Lubrication and Wear, London,

pp. 655～659, 1957

36. R. C. D. Richardson, “The wear of metals by Relatively soft abrasives”, Wear, 11, pp. 245～275, 1968

37. F. F. Tao, “A Study of oxidational phenomena in corrosive wear”, ASLE Trans., 12, p. 97, 1969

38. 서남섭, “기계공작법”, 동명사, pp. 802～803, 1998

39 손명환, “절삭가공론”, 문운당, 제9장 2절, 1993

40. J. Taylor, J. of Mach Tool Des. and Res. 2, p. 119, 1962

41. K. J Trigger and B. T. Chao, “The mechanism of crater wear of cemented carbide tools”, Trans. ASME. Vol. 42, p. 317, 1950

42. M. C. Shaw and S. O. Dirke, “On the wear of cutting tool”, Microtechnic, Vol. 10, No. 4, pp. 181～187, 1956

43. 박홍식, “오스템퍼링한 저합금 구상흑연주철의 기계적 성질 및 마멸특성에 관한 연구”, 한양대학교, pp. 7～16, 1986

44. Ki Soo Kim, Dai Gil Lee, Yoon Keun Kwak and Suk Namgumg, “Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning”, J. of Materials Processing Technology, Vol. 32, pp. 553～570, 1992

45. “The American Society of Metals Handbook”, Vol. 3 - Machining

46. 이용태, 김승언, 현용택, 정희원, “꿈의 신소재 티타늄”, 제3장 6절, 2001

47. Mitsuo Niinom, “Mechanical properties of biomedical titanium allots”, Materials Science and Engineering A, Vol. 243, Issues 1～2, pp. 231～236, 1998

48. O. P. Karasevskya, O. M. Ivasishin, S. L. Semiatin and Y. V. Matviychuk, “Deformation behavior of Beta-titanium alloys”, Materials Science and Engineering, pp. 1～12, 2003

49. I. Weiss and S. L. Semiatin, “Thermomechnical processing of beta titanium alloys-an overview”, Materials Science and Engineering, A243,

PP. 46～65, 1998

50. 반재삼, “Ti-10Ta-10Nb 합금의 고온 변형 거동에 관한 연구”, 전남대학교, pp. 4～8, 2003

51. 서남섭, “신판 정밀공작법”, 대광서림, 제1장, 2002

52. 염영하, “공작기계의 절삭이론”, 동명사, 1985

53. S. k . Bhaumik, C. divakar and A. K. Singh, “Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool”, Materials & Design. Vol. 16, pp. 221～226, 1995