

초경공구를 사용한 Ti-6Al-4V 타이타늄 합금의 절삭가공시 공구마멸과 절삭특성에 관한 연구

김남용*, 고준빈**, 이동주***

A Study on the Tool Wear and Cutting Characteristics in the Machining of Ti-6Al-4V Using Tungsten Carbide Tool

Nam-Yong Kim*, Jun-Bin Ko**, Dong-Ju Lee***

Abstract

The machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy and tool wear behavior in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy was studied to understand the machining characteristics. This material is one of the strong candidate materials in present and future aerospace or medical applications. Recently, their usage has already been broaden to everyday's commercial applications such as golf club heads, finger rings and many decorative items. To anticipate the general use of this material and development of the titanium alloys in domestic facilities, the review and the study of the machining parameters for those alloys are necessary. This study is concentrated to the machining parameters of the Ti-6Al-4V alloy due to their dominant position in the production of titanium alloys.

Key Words : Cutting Characteristics(절삭특성), Cutting Force(절삭력), Machining(절삭가공), Surface Roughness(표면 거칠기), Ti-alloy(타이타늄 합금), Tool Life(공구수명), Tool Wear(공구마멸), Tungsten Carbide Tool(초경공구)

1. 서론

타이타늄은 가볍고 강하면서도 내식성이 양호하기 때문에 “꿈의 금속”이라고 하여 1947년 미국에서 처음 공업적

인 생산이 시작되어 공업재료로 등장한 이후로 반세기 가 경과하였다. 특히 타이타늄의 비중은 4.51로서 동이나 니켈의 약 50%에 해당하고 스테인레스의 약 60%로 가볍기 때문에 중량을 경량화 할 수 있다. 순수 타이타늄의 강도는

* 충남대학교 대학원 기계공학과
** 한밭대학교 기계설계공학과
(고준빈 kjb1002@hanbat.ac.kr)
*** 충남대학교 기계공학과

30~75kgf/mm²이며 타이타늄 합금의 경우는 60~160kgf/mm²로 500℃까지는 다른 금속 재료 중 최대의 비강도를 갖는다⁽¹⁾. 또한 내식성이 우수하고, 타이타늄 합금은 실온뿐 아니라 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65% 정도를 유지하기 때문에 기존 철강재료의 0.35~0.5% 정도에 비하여 우수하다. 이러한 장점 때문에 타이타늄 합금은 구조용 재료로서 항공, 우주, 군수분야, 자동차, 화학장치, 의료분야 등에 사용되고 있으며, 아직도 미개척 분야에 널리 이용될 가능성이 크다. 그러나 타이타늄의 대표적인 Ti-6Al-4V 타이타늄 합금의 가격은 1파운드 당 30달러 이상의 상당히 고가이므로 그 우수한 특성에도 불구하고 항공, 우주, 화학, 플랜트 등 특수한 용도에 거의 집중되게 사용되고 있는 형편이다. 현재 국내에서는 아직 산업소재로서 개발되지 않아, 타이타늄 소재 소요량 전망을 외국으로부터의 수입에 의존하고 있으며, 가격이 고가이므로 기대되는 만큼 활발하게 이용되지 않고, 자연히 타이타늄 합금의 기계가공에 관한 연구도 활성화 되지 않고 있다. 국내의 항공, 우주 산업 분야는 그 기초가 쌓여 가고 이미 성장의 단계로 나아가고 있기 때문에 그에 따른 타이타늄재 가공이 점차 많아지고 있으며, 나아가 타이타늄 소재의 국내생산도 예상해 볼 수 있는 단계에 도달해 있다고 생각된다. 따라서 타이타늄의 기계가공에 대한 기본적인 지식의 축적이 우선적으로 요망되는 시점에 있다.

이에 본 연구에서는 현재 절삭가공에서 주로 사용되고 있는 초경공구를 사용하고 타이타늄 합금의 50%이상을 차지할 만큼 많이 사용되는 Ti-6Al-4V 타이타늄 합금을 기준으로 절삭가공시 공구마멸과 절삭속도, 절삭깊이, 이송량의 변화에 따른 절삭특성에 대한 실험을 행하였다. 액체질소를 절삭제로 하였을 때 얻어지는 절삭온도의 저하와 그 효과에 관하여 실험적 방법으로도 연구하였다. 최적의 절삭조건 선정에 위해 여러 가지 절삭조건들에 따라 절삭력과 표면조도를 측정 후 이 데이터들을 비교 분석하였다. 또한 FEM을 이용하여 시뮬레이션으로 접근한 상용 해석프로그램인 AdvantEdge⁽²⁾를 이용하여 해석 후 실험 데이터와 비교, 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치 개략도는 Fig. 1과 같으며 실험기기 및 사양은 Table 1과 같다.

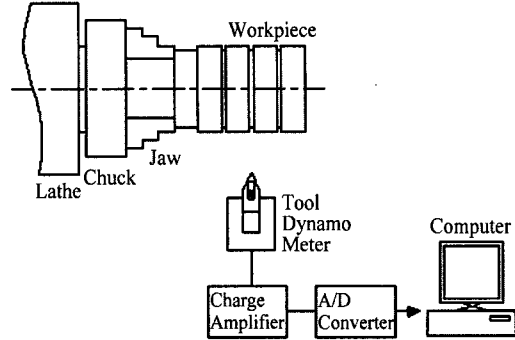


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for cutting test

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Apparatus Name	Manufacturer	Model
Lathe	GEMA (Germany)	GC-200
DC Charge Amplifier	Kistler	type 9257A
Oscilloscope	Iwatsu	SS-5702
Tool Dynamometer	Kistler	type 5011
A/D Converter	National Instrument	DAQ 1200
Tool Holder	Taegu Tec	CSDNN2525M
Insert Type	Taegu Tec	SNMA 120408(K10)

또한, 본 실험에 사용된 시험편의 화학성분 및 기계적 성질은 각각 Table 2 및 3과 같다.

Table 2 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy

Elements	Ti	Al	V	Fe	O ₂	C	N ₂	H ₂	Y
wt(%)	89.13	6.3	3.8	0.19	0.16	0.01	0.01	0.0015	0.001

Table 3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy

Direction	UTS (×10 ³ psi)	0.2%YS (×10 ³ psi)	EL (%)	RA (%)	Hardness (H _{RC})
Longitudinal	148.7	138.3	12	29.3	34
Transverse	144.7	133.5	12	21.6	

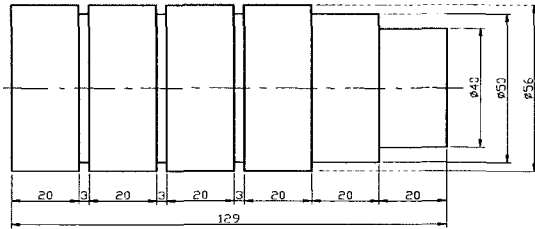


Fig. 2 Specimen for cutting test

2.2 절삭력 실험

시험편은 Fig. 2와 같이 4개의 단으로 가공하여 일정한 절삭깊이로 가공하면서 이송량을 변화시키면서 실험을 하였다. 피삭재의 휨과 진동을 최소화하기 위하여 심압대를 사용하였으며 절삭력의 측정에 필요한 공구동력계 및 공구를 설치하였다. 공구팁은 매 실험때마다 새로운 것으로 교환 사용하여 절삭하였다. 절삭력 측정을 위하여 Table 4에서와 같은 조건으로 실험을 하였다.

본 실험에서 사용된 공구동력계는 Kistler의 3분력 압전형으로 공구대에 부착하였으며 절삭시 발생하는 3분력(주분력, 배분력, 이송분력)을 동시에 측정하였으나 그 중 배분력 및 이송분력은 주분력과 그 파형은 유사하나 진폭이 제

Table 4 Experimental cutting conditions for cutting test

Cutting Conditions	Cutting speed (m/min)	50~120
	Feed rate (mm/rev)	0.1~0.3
	Depth of cut (mm)	0.5~1.5
	Cutting Circumstance	Dry Cutting
	Tool	SNMA 120408

일 크게 나타나는 주분력신호만을 증폭시킨 후 모니터링하면서 A/D 변환하여 컴퓨터에 저장하였다.

2.3 공구마멸 실험

여유면 마멸의 정의는 ISO의 규정에 의한 인서트의 노우즈(nose) 반경부와 절입경계부의 1/4을 제외한 절입부의 마멸 평균폭으로 정의하였으며, 마멸형상의 평균폭(flank wear land) V_B 로 규정하였다. 본 연구에서는 V_B 가 0.3mm에 도달되었을 때를 공구마멸로 보고 공구교환시기로 선정하였다. 이때 마멸 형상은 공구현미경을 사용하여 관찰하였다.

2.4 표면거칠기 측정

표면거칠기 측정기를 이용하여 정반위에 V-블록을 설치

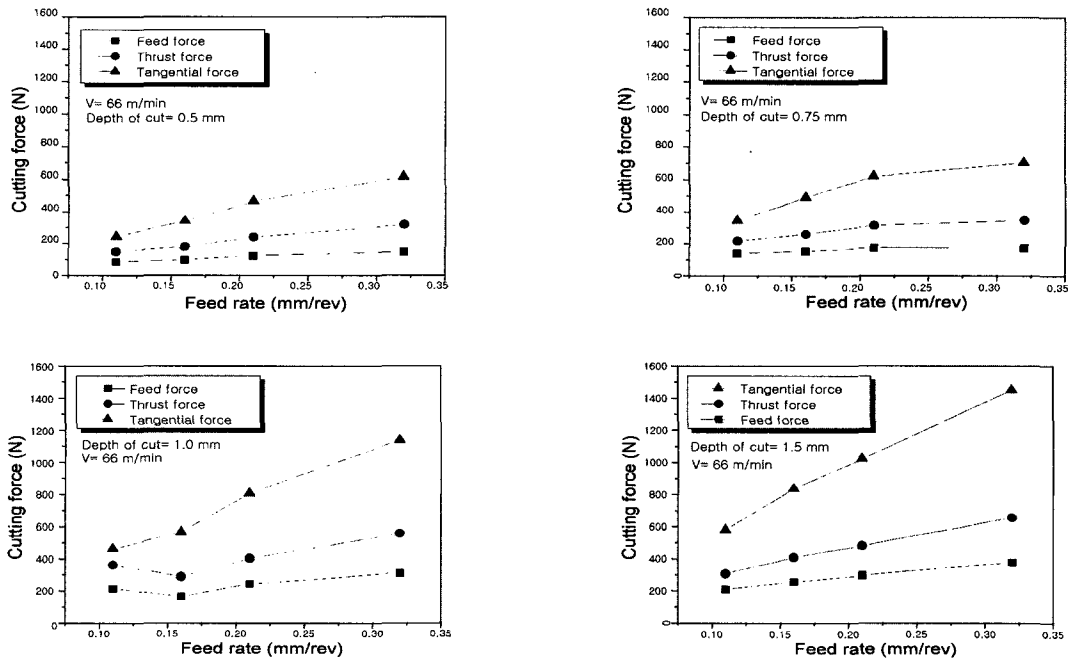


Fig. 3 Comparison of cutting forces according to depth of cut

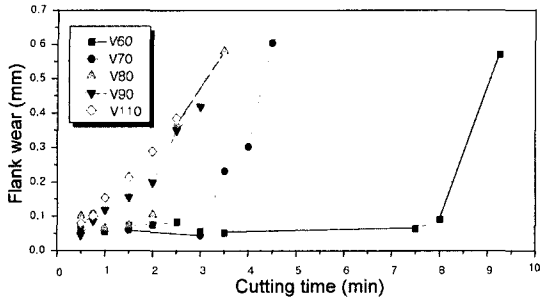


Fig. 4 Tool wear test results for Ti-6Al-4V alloy using carbide tool K10

한 후, 그위에 피측정물을 수평으로 올려놓고 측정장비의 촉침(stylus tip)을 접촉이송 시킨다. 2.5mm의 표면거리에서 거칠기값들을 읽도록 셋팅하였고, 기준길이(Cut off) 값은 0.8mm로 설정하였다. 표면거칠기 값들은 ASCII 값으로 변환되어 컴퓨터에 저장된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭특성

Fig. 3은 Ti-6Al-4V 타이타늄 합금의 절삭깊이에 대한 절삭특성을 비교한 것이다.

절삭력의 크기는 주분력, 배분력 및 이송 분력의 순이며, 절삭 깊이에 따라 그 크기가 증가하고 있다. 특히, 주분력의 경우 이송분력이나 배분력에 비하여 이송량의 영향을 보다 많이 받는 것을 알 수 있다. 이송량이 0.15mm/rev에서부터 그 이상의 이송량에서는 이송량의 크기에 비례적으로 균일한 상승을 하고 있으나 0.1mm/rev에서는 비례치 보다 다소 높다는 것을 같은 그림에서 볼 수 있다. 이것은 절삭깊이가 낮을 경우 치수 효과(size effect)에 의하여 절삭력의 증가를 초래한다고 하는 주장과 일치하는 것이라고 사료된다.

선삭에서는 2차원 절삭에서의 절삭 깊이와 밀접한 관계에 있는 것이 바로 3차원 절삭에서의 피이드라고 할 수 있기 때문이다. 한편 절삭깊이의 영향을 살펴보면 주분력의 경우에는 비례적 경향이 뚜렷하나, 이송 및 배분력의 경우에 있어서는 절삭깊이 1.0mm를 경계로 하여 그 이상에서는 절삭깊이가 커져도 절삭력이 별다른 증가를 보이지 않는다. 이 현상은 바로 위에서 피이드의 영향에서 검토한 특이 현상의 또다른 증거로 볼 수 있다고 사료된다. 즉, 절삭 깊이가 낮을 경우 치수효과에 의하여 비례치 보다 더 높은 절삭

력의 초래를 의미하는 것이기 때문이다.

3.2 공구마멸

Fig. 4는 초경합금 K10종을 사용하여 건식절삭한 공구수명시험의 결과를 보이고 있다. 각 조건들에서 공구수명인 마멸폭 $V_B=0.3mm$ 에 도달하는 데 소요된 가공시간을 나타낸다. 이송은 0.3mm/rev로 하고 절삭깊이를 1.5mm로 하여 절삭속도를 변화시켰을 때의 시간에 따른 측면 여유면의 마멸 경과를 도시한 것이다. 공구면의 마멸량의 측정과 관찰에는 Hanmeasure 장비와 공구 현미경을 사용하였다.

이하의 저속역에서는 시간의 경과에 따라 마멸 속도가 거의 눈에 띄지 않을 정도로 완만하게 마멸하다가 수명 부근에 이르러 급격히 마멸이 상승하는 현상을 보였으며, 절삭 속도를 70m/min 이상으로 높이면 이러한 마멸 정체 구간이 좁아지고 공구마멸이 시간에 따라 급속하게 진행되는 양상을 보였다. 급속 마멸은 Fig. 5의 예와 같이 절삭 날의 칩핑을 수반하고 그와 함께 공구의 주 절삭날에서 크레이터 마멸이 진행되는 형태를 보이는 것도 특징적이다. 여유면의 마멸에 따라 크레이터의 깊이를 측면 여유면 쪽에서 관찰할 수 있을 정도로 공구 상면에서의 마멸이 절삭날에 근접해서 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 마멸 폭에 있어서도 절삭 초기부터 공구 상면에서의 마멸폭이 측면 여유 면의 마멸 폭 보다 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있을 만큼 크고 이 현상은 계속하여 관찰되었다. 그러나 크레이터의 마멸은 마멸 깊이 K_r 를 측정하는 것이 일반적이므로 공구상면의 마멸 폭을 공구 수명의 기준으로 하지 않았다. 마멸의 형태는 잘 알려진 대로 가공 시에 집중되는 열에 의하여 피삭재가 공구면에 응착하는 응착마멸의 형상을 하고 있다. 심한 경우에는 절삭 칩이 일부 공구에 응착한 경우도 관찰할 수 있었다.

또한 절삭 칩의 형상이 Fig. 6에서 처럼 톱날 형상으로 발생하는 것을 거의 모든 실험속도에서 관찰되었다. Ueda 등의 실험에서 타이타늄의 가공 속도에 따라 피치가 증가한다고 하는 것과는 다소 다른 결과를 보이고 있다⁽³⁾. 이것은 톱날형 칩의 형성 기구가 칩 흐름의 불안정에 기인하는 것으로 해석하는데 있어서 이론적으로 더 검토해 보아야 할 것으로 사료된다^{(4)~(5)}.

3.3 표면거칠기

Fig. 7은 Table 4의 절삭조건들에 따른 표면거칠기 측정값을 보여주는 그림이다. 절삭깊이가 증가할수록, 이송량이 증가할수록 표면거칠기가 선형적으로 증가하는 것을 알 수

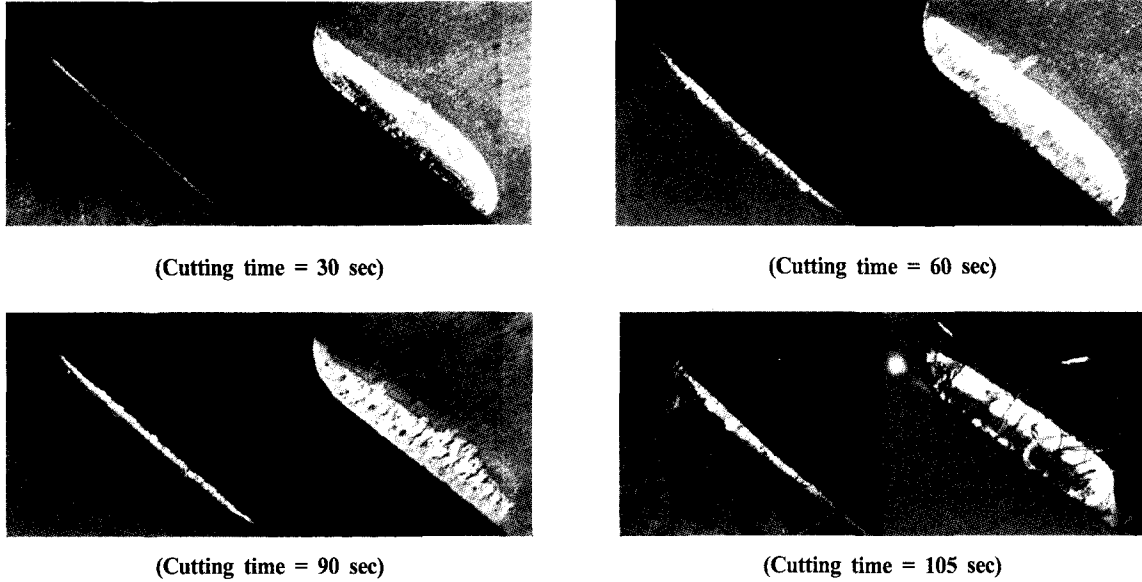


Fig. 5 Tool wear progression in machining of Ti-6Al-4V alloy (V=110)



Fig. 6 Saw-toothed chip shape in machining Ti-6Al-4V

있다. 또한 같은 절삭속도에서 이송량이 크고 잘삭깊이가 작을수록 표면거칠기는 증가함을 알 수가 있으며, 그 원인은 절삭력이 크므로 가공중 공작물과 공구사이에 진동에 의하여 표면거칠기가 절삭면에 나쁜 영향을 주는 것으로 생각된다.

4. Ti-6Al-4V 합금의 절삭시험 결과와 FEM 시뮬레이션의 비교

본 연구에서 FEM 해석은 AdvantEdge를 이용하여 수행하였으며 이 과정을 Fig. 8에 나타낸다.

Fig. 9는 본 실험에서 얻어진 주분력과 배분력을 FEM 시

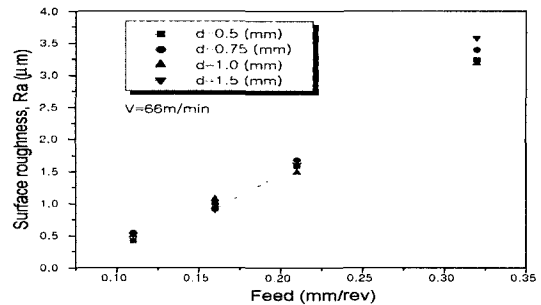


Fig. 7 Relation between surface roughness and feed

뮬레이션에 의한 비교 그래프이다. 실험데이터와 시뮬레이션 데이터가 서로 유사한 경향을 나타냄을 알 수가 있다. 실험데이터가 시뮬레이션 데이터보다 작은 것은 열연화 현상 등을 시뮬레이션에서 고려하지 못한 것으로 생각된다⁽⁷⁾.

Fig. 10은 절삭속도에 따른 절삭온도를 나타낸 그래프이다. 해석결과, 절삭속도가 증가할수록 절삭온도가 상승하는 것을 확인할 수가 있었으며, 저속 절삭가공에서는 절삭온도의 상승이 느리다는 것을 알 수가 있다. 고속 절삭가공에서는 시뮬레이션 절삭온도의 상승이 빠르게 진행된다는 것을 알 수가 있다. 실험데이터의 절삭온도는 저속 절삭가공과 고속 절삭가공에서와 마찬가지로 200℃ 정도로 유지하고 있다. 이것은 실험시 온도의 측정은 공구 날끝이 아닌, 공구

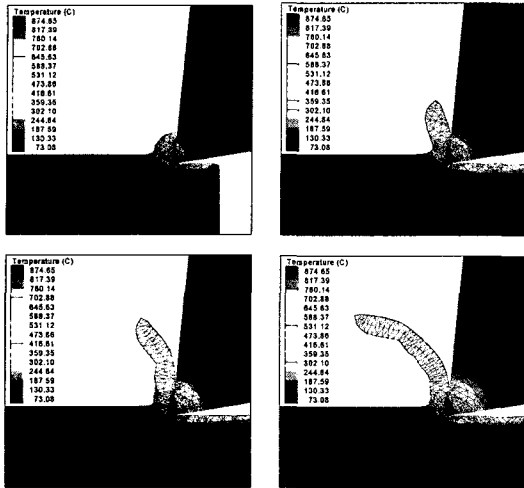


Fig. 8 Cutting simulation for turning by the AdvantEdge

날끝에서 1mm떨어진 거리에서 측정한 데이터이다. 따라서 시뮬레이션 데이터도 1mm간격을 두고 온도상승을 Fig. 10에서 나타낸다. 절삭속도의 차이에도 불구하고 실험데이터의 절삭온도의 차이가 분명히 나타나지 않은 점은 절삭온도 측정이 공구날끝이 아닌, 1mm떨어진 곳에서 측정하여 열

손실을 고려하지 못한것이라고 할 수 있다. 공구마모율의 증가가 분명한 차이를 나타내었던 것과 비교하면, 측정온도의 유사함은 바로 이점 때문이라고 할 수 있다⁽⁸⁾.

Fig. 11은 액체질소를 절삭제로 사용했을 때 냉각효과를 나타낸 그래프이다.

Ti-6Al-4V 타이타늄 합금의 선삭가공에서 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 상승하고, 절삭온도는 60m/min 이하의 저속가공에서는 수분 내에 열평형에 도달하여 정상상태에 도달하는 반면 90m/min이상의 고속에서는 수분 내에 열평형에 도달하지 못하고 계속하여 온도상승이 일어나는 것을 알 수가 있다. 60m/min의 저속으로 선삭가공시 액체질소를 공구상면에 10초 동안 20gr/sec의 액체질소 유량으로 직접 분사하였을 때, 350℃의 냉각효과와 더불어 2배의 수명연장 효과를 확인할 수 있었다. 절삭효율과 공구수명의 측면에서 타이타늄 합금 가공에 적합한 절삭속도인 60m/min의 속도로 선삭가공시 액체질소를 지속적으로 적용하지 않고 7분이내의 일정 시간 주기로 20gr/sec의 비율로 약 10초간 직접 분사하는 방법에 의한 냉각방법은 현장에서 실용화 가능성이 있다고 판단된다.

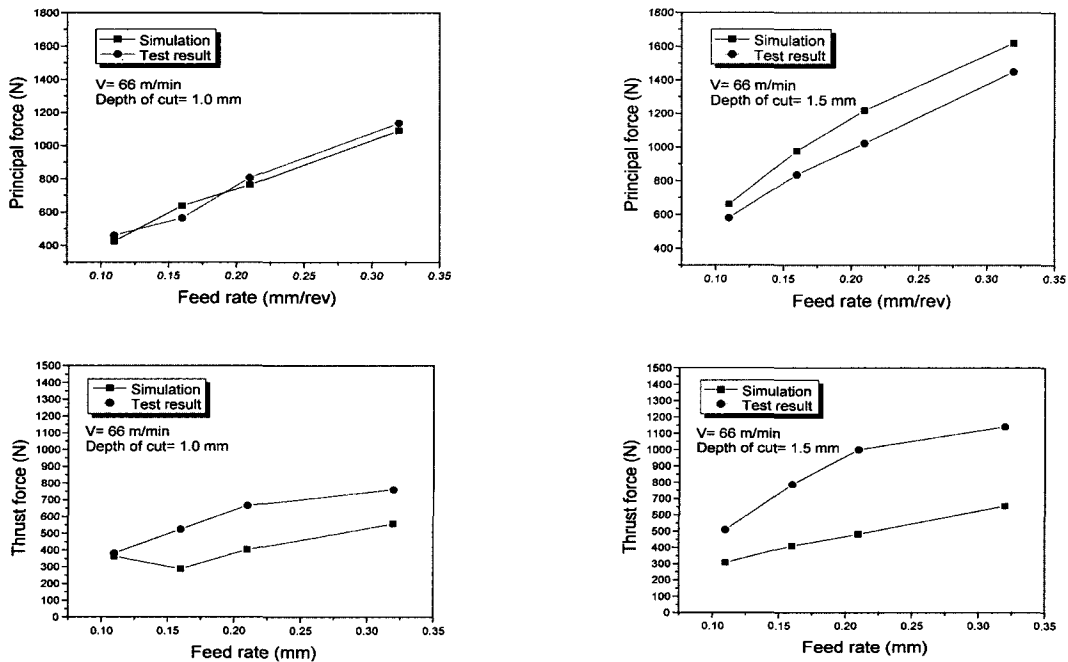
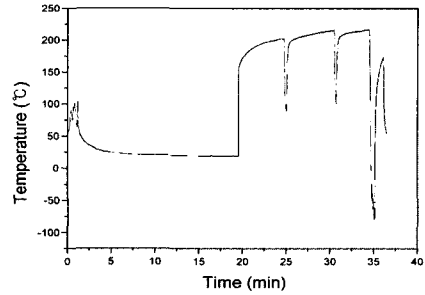
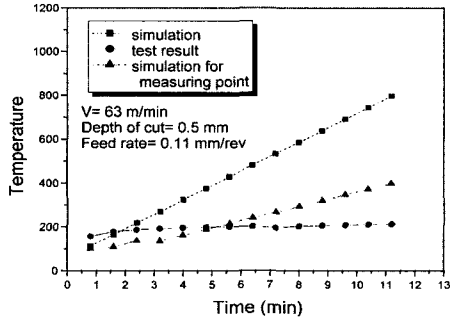
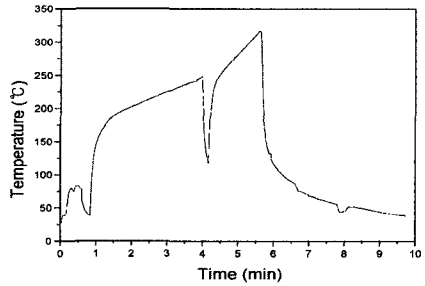
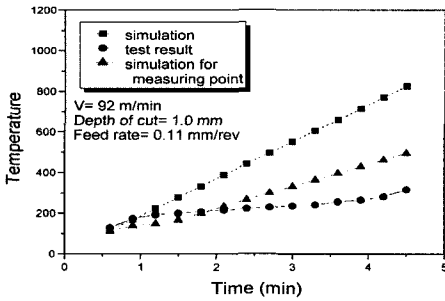


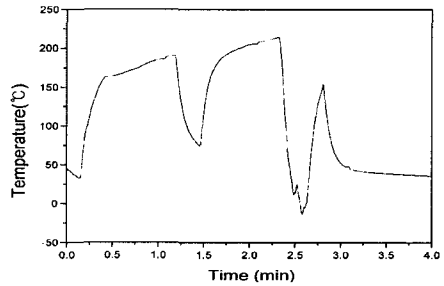
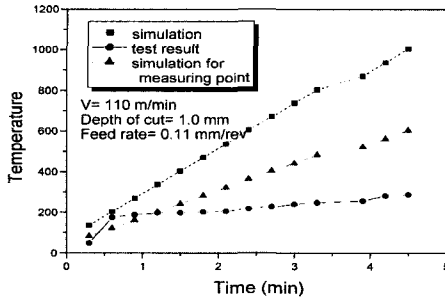
Fig. 9 Cutting force simulation and experimental result



(V=60m/min, f=0.11mm/rev, d=1.0mm)



(V=92m/min, f=0.11mm/rev, d=1.0mm)



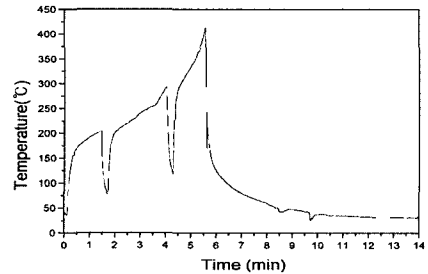
(V=108m/min, f=0.11mm/rev, d=1.0mm)

Fig. 10 Cutting temperature simulation and experiment result of cutting tool rake face

5. 결론

선반을 이용하여 Ti-6Al-4V 타이타늄 합금의 절삭조건에 따른 절삭특성(절삭력, 공구마멸 및 표면거칠기)을 실험적으로 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Ti-6Al-4V 타이타늄 합금 선삭시 초경공구 마멸 실험에 의하여 타이타늄의 마멸특징들을 확인하였으며 70 m/min부터 그 이상의 고속절삭에서는 초기, 정상, 급속마멸의 정형을 보이나 그 이하에서는 정상마멸 구간



(V=118m/min, f=0.11mm/rev, d=1.0mm)

Fig. 11 Measurement of temperature picked up by thermocouple inserted to rake face thru the holder

- 이 뚜렷하지 않고 수명이 길어진다.
- (2) 공구마멸은 웅착마멸 형태를 보이며, 마멸 폭은 프랭크 마멸 폭보다 크레이터 마멸 폭이 더욱 크고 뚜렷하게 관찰되었고, 주 절삭날에서부터 크레이터가 시작되는 특징이 있다.
 - (3) 주분력 및 배분력은 절삭깊이의 증가에 따라 절삭력의 크기가 증대하는 경향이 뚜렷하나 이송분력은 절삭깊이의 영향을 비교적 적게 받는 것으로 나타났으며, 표면거칠기에 있어서는 매우 크게 나타났다. 평균거칠기는 이론값에 일치하는 경향을 보이면서 양호한 상태를 보였다.
 - (4) 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 절삭온도 60m/min이하의 저속가공에서는 수분 내에 열 평형에 도달하여 정상 상태에 도달하는 반면에 90m/min이상의 고속에서는 수분 내에 열평형에 도달하지 못하고 계속하여 온도 상승이 일어났다.
 - (5) 액체질소를 절삭유제로 사용했을때 냉각효과가 최대 350℃를 낮출 수 있으며 공구수명의 연장과 절삭품질의 향상이 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) (社)チタニウム協會, “チタンの加工技術,” 日刊功業新聞社, 第1章 1992.
- (2) Third Wave AdvantEdge Theoretical Manual Version

- 3.6.
- (3) Noboru Ueda, Tetsuo Matsuo “A Study of Saw-toothed Chip Formation(1st) -Analysis of the Pitch of Shear Zones and the Distance of Slips”, J. of JSPE, Vol. 44, No. 9, pp. 1085~1091, 1978.
- (4) J. Sheikh-Ahmad and J.A.Bailey, “Flow Instability in the Orthogonal Machining of CP Titanium”, J. of Manufacturing Science and Engineering, ASME, Vol. 119, pp. 307~313, 1997.
- (5) J. C. Lemaire and W. A. Backofen, “Adiabatic Instability in the Orthogonal Cutting of Steel”, Metallurgical Transactions, Vol. 3, pp. 477~481, ASME, 1972.
- (6) Eiji Usui, Toshiyuki Obikawa, Takahiro Shirakashi, Study on Machining Process of Difficult-to-Machine Materials (2nd)-Analysis of Stress and Temperature Distributions by Visio-Plasticity Technique and Finite Difference Method, J. of JSPE, Vol. 52, No. 9, pp. 1623~1630.
- (7) 김남용, 홍우표, 이동주, “초경공구를 사용한 Ti-6Al-4V 합금의 절삭가공시 공구마멸과 절삭특성에 관한 연구”, 한국공작기계학회 추계학회 논문집, 2000.
- (8) 김남용, 홍우표, 이동주, “Ti-6Al-4V 합금의 절삭특성과 FEM 해석 비교에 관한 연구”, 한국공작기계학회 지, 2001.