

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

김남용*, 홍우표**, 이동주***

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

Nam-Yong Kim*, Woo-Pyo Hong**, and Dong-ju Lee***

ABSTRACT

The machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy and tool wear behavior when machining Ti-6Al-4V titanium alloy was studied to understand the machining characteristics. this material is one of the strong candidate materials present and future aerospace or medical applications. Nowadays their usage has already been broaden to everyday's commercial applications such as golf club heads, finger rings and many decorative items. Anticipating 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 deemed 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

타이타늄의 비중은 4.51로서 동이나 니켈의 약 50%에 해당하고 스테인레스의 약 60%로 대단히 가볍기 때문에 중량을 경량화 할 수 있다. 순수 타이타늄의 강도는 30~75kgf/mm²이며 타이타늄 합금의 경우는 60~160kgf/mm²로 500℃까지는 여타의 금속 재료 중 최대의 비강도를 갖는다¹⁾. 또한 최고의 내식성을 자랑한다. 타이타늄 합금은 실온 뿐 아니라 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 기존 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 월등히 높다. 이러한 장점 때문에 타이타늄 합금은 구조용 재료로서 항공, 우주, 군수분야, 자동차, 화학장치, 의료분야 등에 사용되고 있으며, 아직도 미개척 분야

에 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. 2천년 현재 국내에서는 아직 소재로서 개발되지 않아, 타이타늄 소재 소요량 전량을 외국으로부터의 수입에 의존하고 있으며, 가격이 고가이므로 기대되는 만큼 활발하게 이용되지 않고, 자연히 타이타늄 합금의 기계가공에 관한 연구도 활성화 되지않고 있다. 국내의 항공, 우주 산업 분야는 그 기초가 쌓여 가고 이미 성장의 단계로 나아가고 있기 때문에 그에 따른 타이타늄材 가공이 점차 많아지고 있으며, 나아가 타이타늄 소재의 국내생산도 예상해 볼 수 있

* 충남대학교 대학원 기계공학과

** 국방과학연구소

*** 충남대학교 기계공학과

는 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. 최적의 절삭조건을 선정하기 위해 여러 가지 절삭조건들에 따라 절삭력과 표면조도를 측정하고 이 데이터들을 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

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

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.

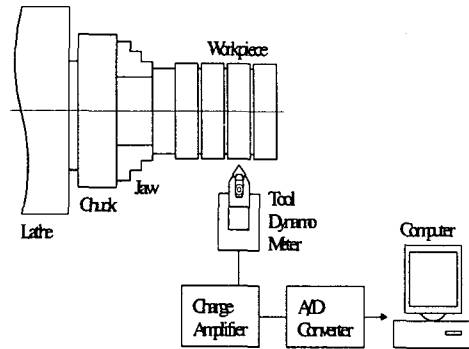


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for cutting test

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

Elements	Ti	Al	V	Fe	O2	C	N2	H2	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 (KSI)	0.2%YS (KSI)	EL(%)	RA(%)	Size
Longitudinal	148.7	138.3	12	29.3	$\phi 63 \times 200\text{mm}$
Transverse	144.7	133.5	12	21.6	

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 실

힘때마다 새로운 것으로 교환 사용하여 절삭 하였다. 절삭력 측정을 위하여 Table 4에서와 같은 조건으로 실험을 하였다.

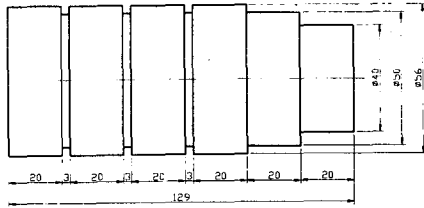


Fig.2 Specimen for cutting test

Table 4. Experimental cutting conditions for cutting test

Cutting speed(m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)
66	0.11	0.5
	0.16	0.75
	0.21	1.0
	0.32	1.5

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

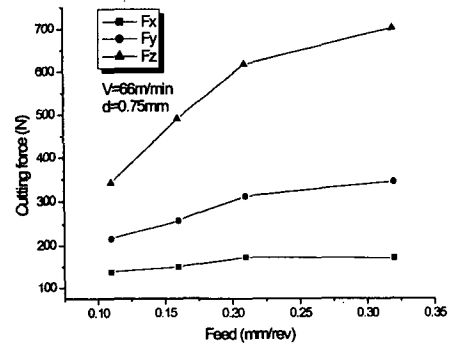
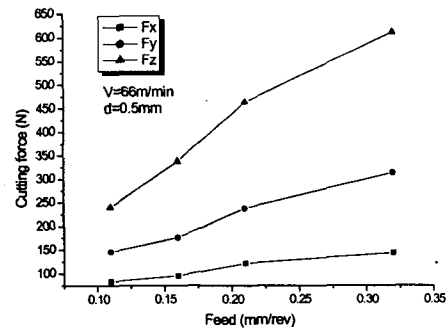
2.3 표면거칠기 측정

표면거칠기 측정기를 이용하여 정반위에 V-블록을 셋팅한 후, 그위에 피측정물을 수평으로 올려놓고 측정장비의 촉침(stylus tip)을 접촉이송시킨다. 2.5mm의 표면거리에서 거칠기값들을 읽도록 셋팅하였고, Cut off 값은 0.8mm로 설정하였다. 표면거칠기 값들은 ASCII 값으로 변환되어 Computer에 저장된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.2.1 절삭특성

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



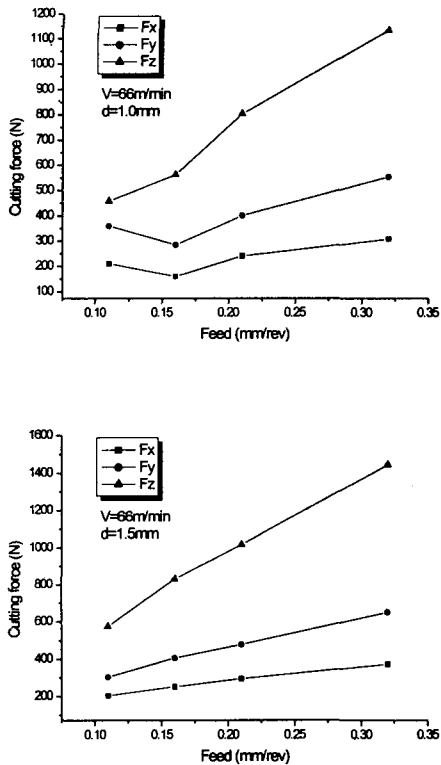


Fig.3 Comparison of cutting forces according to depth of cut variance

절삭력의 크기는 주분력, 배분력 및 이송분력의 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 1.0 mm를 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 절삭력의 초래를 의미하는 것이기 때문이다.

3.2.2 공구마멸

Fig.4는 초경합금 K10종을 사용하여 건식절삭한 공구수명시험의 결과를 보이고 있다. 각 조건들에서 공구수명인 마멸폭 $V_B=0.3\text{mm}$ 에 도달하는 데 소요된 가공시간을 나타낸다. 이송은 $f=0.3\text{mm/rev}$ 로 하고 절삭깊이를 $d=1.5\text{mm}$ 로 하여 절삭속도 V 를 변화시켰을 때의 시간에 따른 측면 여유면의 마멸 경과를 도식한 것이다. 공구면의 마멸량의 측정과 관찰에는 Hanmeasure 장비와 공구 현미경을 사용하였다.

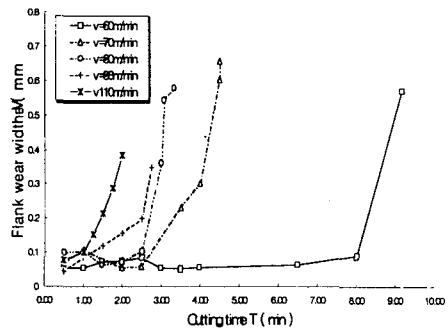


Fig 4. Comparison of tool life result

속도 60m/min 이하의 저속역(低速域)에서는 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 바로 Fig.6과 같은 형태의 크레이터 마멸이 진행되는 형태를 보이는 것도 특징적이다.



Fig. 5 Flank wear in machining of Ti-6Al-4V alloy

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 폭보다 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있을 만큼 크고 이 현상은 계속하여 관찰되었다. 그러나 크레이터의 마멸은 마멸 깊이 K_T 를 측정하는 것이 일반적이므로 공구상면의 마멸 폭을 공구 수명의 기준으로 하지 않았다. 마멸의 형태는 잘 알려진 대로 가공 시에 집중되는 열에 의하여 피삭재가 공구면에 용착하는 용착마멸의 형상을 하고 있다. 심한 경우에는 절삭 칩이 일부 공구에 용착한 경우도 관찰할 수 있었다.



Fig.6 Crater wear observed from flank plane

또한 절삭 칩의 형상이 Fig.7에서 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.²⁾ 이것은 톱날형 칩의 형성 기구가 칩 흐름의 불안정에 기인하는 것으로 해석하는데 있어서 이론적으로 더 검토해 보아야 할 것으로 사료된다.³⁾⁴⁾⁵⁾



Fig.7 Saw-toothed chip shape in machining Ti-6Al-4V

3.2.3. 표면거칠기

Fig. 8은 Table 4의 절삭조건들에 따른 표면거칠기 측정값을 보여주는 그림이다. 절삭 깊이가 증가할수록, 이송량이 증가할수록 표면거칠기가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

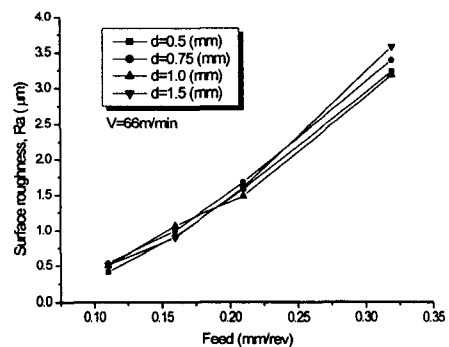


Fig. 8 Relation between feed and depth of cut

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

4. 결론

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

- 1) Ti-6Al-4V 타이타늄 합금의 건식선삭에
 서 선속도 60m/min 까지는 별다른 공
 구마멸 속도를 보이지 않으나 그 이상
 의 선속도에서는 매우 민감한 영향을
 보인다.
- 2) 공구마멸은 웅착마멸 형태를 보이며, 마
 멸 폭은 프랭크 마멸 폭보다 크레이터
 마멸 폭이 더욱 크고 뚜렷하게 관찰되었
 고, 주 절삭날에서 부터 크레이터가 시
 작되는 특징이 있다.
- 3) 절삭 깊이의 절삭력에 대한 영향선도에
 서, 주절삭력을 제외한 이송력 및 배분
 력은 절삭깊이 1.0 mm/rev을 경계로 하여
 그 이상에서는 별다른 증가를 보이지
 않는 특성을 보인다.
- 4) 표면거칠기는 같은 절삭속도에서 이송
 량이 크고 절삭깊이가 작을수록 증가한
 다.

참고문헌

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. 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.
3. 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.
4. J.C.Lemaire and W. A. Backofen,"Adiabatic
 Instability in the Orthogonal Cutting of
 Steel," Metallurgical Transactions, Vol. 3, pp.
 477-481, ASME, 1972.
5. 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