

Ti-6Al-4V합금의 절삭성에 관한 연구

박종남⁺, 김재열*, 조규재**

(논문접수일 2009. 12. 21, 심사완료일 2010. 01. 21)

A Study on the Machinability of Ti-6Al-4V Alloy

Jong-nam Park⁺, Jae-yoel Kim*, Gyu-jac Cho**

Abstract

The Titanium has many superior characteristics which are specific strength, heat resistance, corrosion resistance, organism compatibility, non-magnetic and etc. and their quantity are abundant. this study performed turning operation of Ti-6Al-4V alloy using the TiAlN Coated Tool which treated Physical Vapor Deposition.

Experimental works are also executed to measure cutting force, tool wear, chip figuration and surface roughness for different cutting conditions.

As a result of study. Cutting depth influences on the cutting force much more than the feed rate and the value of the cutting force is the most stable at the depth of 1.0mm. And tool wear was serious at over 100m/min of cutting speed and cutting condition was excellent at 1.0mm of cutting depth.

Key Words : Specific Strength(비강도), Heat Resistance(내열), Corrosion Resistance(내식), Physical Vapor Deposition(물리증착), Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면 거칠기), Cutting Speed(절삭속도), Tool Wear(공구마멸)

1. 서론

난삭재인 티타늄 합금은 비강도가 높을 뿐만 아니라 내식성, 내열성, 생체적합성 등이 우수한 독특한 특성으로 인하여 자동차, 생체의료기기, 우주항공용 부품, 석유화학공장, 일상용품 및 일반산업용 등 다방면에서 이용되고 있으며^(1,2),

앞으로도 사용의 범위는 점점 확대되어가게 될 것임에 틀림이 없다. 그러나 티타늄 합금은 절삭가공을 함에 있어 일반강과 비교하면 낮은 열전도도와 높은 활성으로 인하여 가공 중 발생하는 열이 발산되지 않고 가공부위에 집중되는 현상이 발생하여 기계가공 시 절삭공구에 열을 집중시켜 공구마멸을 촉진시키며, 고정밀도를 얻지 못하는 문제점 등이 발생

+ 조선이공대학 컴퓨터응용기계과 (jnpark@chosun-c.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

* 조선대학교 메카트로닉스공학과

** 조선대학교 기계공학과

되어 이에 대한 집중적인 연구가 필요하다고 사료된다.

난삭재 및 티타늄합금에 관한 선행연구로는 Shaw⁽³⁾ 등에 의하여 1950년대 초반부터 티타늄합금의 기계가공에 대한 연구가 수행되기 시작하였으며, Zlatin⁽⁴⁾는 티타늄 합금의 기계적 성질과 가공성에 대하여 연구하였다.

Mcquillan⁽⁵⁾ 등은 티타늄 합금의 선삭, 연삭, 드릴링 등 기계 가공에 있어서 공구의 절삭성능에 대하여 연구하였고, Zlatin⁽⁶⁾는 티타늄 합금의 열전도율이 매우 낮은 특징과 관련하여 선삭시 공구-칩간의 인터페이스 온도분포에 대하여 연구하였다.

Kim⁽⁷⁾ 등은 초경공구를 이용하여 Ti합금의 절삭가공 시 공구마멸과 절삭특성을 대하여 연구 수행하였다.

본 연구는 티타늄 시장에서 50%이상을 점유하고 있는 Ti-6Al-4V합금을 기계가공에 관련한 전반적인 절삭특성을 규명하여 국내·외 산업 전반에서 더욱 더 확대·사용되어질 수 있도록 물리적 증착방법을 이용한 TiAlN 코팅공구를 이용하여 선삭가공 시 발생하는 절삭특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험은 터렛 공구대가 장착된 CNC선반을 사용하여 공구 동력계를 장착 할 전용지그를 제작·장착하였다. 공구동력계(Kistler사, 9257b)는 압전형을 사용하였고, 공구동력계로부터의 미세한 전압을 멀티채널 차지 Amplifier로 증폭한 후 A/D변환기를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장



- ① Lathe ② Multichannel Charge Amplifier
- ③ A/D Converter ④ Jig ⑤ Tool Dynamometer
- ⑥ Tool holder ⑦ Notebook computer

Fig. 1 Experimental setup for measurements of machining characteristics

하여 절삭력을 검출하였다. 본 실험에 앞서 Ti-6Al-4V합금이 형성하고 있는 “Alpha Case”라 불리는 단단한 피막을 제거하는 기초 작업을 실시하였고, 피삭재의 휨과 진동을 최소화하기 위하여 심압대를 사용하였다.

Fig. 1은 실험장치를 나타내었다.

2.2 시험편 및 절삭공구

본 실험에 사용한 재료는 Ti-6Al-4V합금이며, 절삭가공용 인서트는 덤플 형 칩 포머가 형성되어 있는 인서트 팁(CNMG 120408)의 공구를 사용하였고, 공구홀더는 PCLNR 2525-12를 사용하였다. 실험에 사용한 Ti-6Al-4V합금 시험편의 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 Ti-6Al-4V합금을 CNC선반을 이용하여 각각 절삭속도, 절삭 깊이 및 공구의 이송속도를 변화시켜 건삭가공을 실시하였다. 공구동력계를 활용하여 절삭력을 측정하였고, 가공된 절삭면의 표면거칠기를 측정하였으며, 절삭이 끝난 후에 공구마멸과 칩의 형상을 절삭특성에 따라 비교·분석하였다.

Table 3에 실험에 적용한 절삭조건을 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of Ti-6Al-4V

Direction	UTS ($\times 10^3$ psi)	YS ($\times 10^3$ psi)	EL (%)	Ra (%)	H _{Rc}
Longitudinal	146.8	135.7	20.8	42.3	36
Transverse	144.7	134.5	21.7	46.4	

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

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

Table 3 Cutting conditions

Process parameter	Condition
Cutting speed(m/min)	30, 50, 70, 90, 100, 110
Feed rate(mm/rev)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3
Depth of cut(mm)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
Nose radius(mm)	0.8

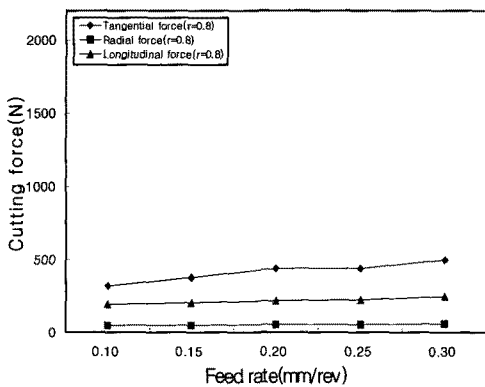
3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭력

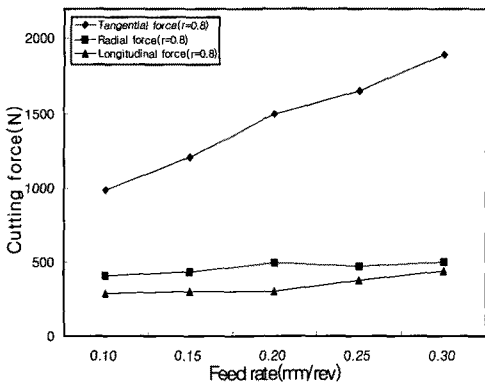
Fig. 2(a), (b)는 절삭속도를 70m/min, 절삭 깊이를 각각 0.5mm, 2.5mm 일 때 공구 이송속도 변화에 따른 절삭력을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)는 절삭 3분력 모두 공구의 이송속도 증가에 따라 완만하게 증가세를 보이고 있다.

Fig. 2(b)는 공구의 이송속도에 따라 절삭력은 뚜렷한 증가를 나타내었다. 특히 주분력은 배분력과 이송분력에 비하여 상대적으로 공구의 이송속도 증가에 따라 큰 증가세를 보이고 있다. 이송분력의 경우 절삭 깊이와 공구의 이송속도



(a) d=0.5mm



(b) d=2.5mm

Fig. 2 Cutting force components with respect to feed (V=70m/min)

의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며, 배분력은 절삭 깊이가 적을 경우 이송분력보다 낮은 값을 나타내는 경향이 있는데, Fig. 2(b)에서는 배분력이 이송분력보다 큰 값을 가지는 것으로 보아 배분력은 절삭 깊이의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 배분력이 절삭 깊이의 영향을 크게 받는 것은 절삭 깊이가 증가하면서 시험편과 공구 여유면과의 접촉면적의 증가 때문으로 사료된다.

3.2 공구마멸

본 실험에서 공구의 마멸 실험을 위하여 절삭 깊이와 공구의 이송속도를 각각 2.0mm, 0.2mm/rev로 일정하게 정하고, 절삭속도를 50, 70, 90m/min으로 변화시켜 Ti-6Al-4V 합금을 절삭 한 후 이에 따른 마멸의 형태와 공구수명의 변화를 알아보았다. 공구의 마모량 측정은 i Came scope를 이용하였고, 측정시 배율은 x100배로 하였다.

Fig. 3(a)-(d)는 절삭속도를 90m/min으로 하여 가공했을 때 시간에 따른 공구의 상면과 여유면의 마멸 진행상황이다. 그림에서처럼 공구마멸의 형상은 가공 초기부터 절삭 날 부위의 마멸대가 나타나고 있으며, 플랭크 면 보다 크레이터 면에서 마멸의 폭이 크고 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다.

Fig. 3(b)-(d)에서 공구의 상면을 나타내고 있는 오른쪽의 그림들을 보면 Fig. 3(b)에서부터 크레이터 마멸의 깊이가 절삭 날의 위치에서 서서히 증가하여 깊어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 일반적인 재료에서의 크레이터 마멸은 절삭 날로부터 일정량 떨어진 부위에서 시작되어지는 것이 보통이지만 티타늄 재료는 크레이터 마멸이 절삭 날에 부분에서부터 진행되기 때문이라고 생각할 수 있다.

Fig. 3(d)는 195초 동안 가공한 후의 공구 여유면과 상면을 나타내고 있다. Fig. 3(c)와 비교해서 공구의 플랭크 마멸과 크레이터 마멸은 상당히 진행되고 있는 모습이다. 플랭크 마멸량은 312.3μm로 본 실험에서 정한 공구수명 기준치(VB=0.3mm)에 도달하였다. 특히, 절삭 날의 플랭크 면을 보면 심하게 마멸된 것을 쉽게 알 수 있는데, 이것은 높은 절삭온도와 절삭력 및 가공 중에 일어나는 응착부위의 취성으로 인한 미세한 충격이나 진동에 의한 치핑의 원인으로 절삭 날 부위를 크게 손상시켰기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 절삭 깊이를 2mm로, 공구의 이송속도를 0.2mm/rev로 일정하게 하고 절삭속도를 50, 70, 90m/min로 변화를 주어 선삭가공한 후의 각각의 절삭속도에 대한 공구마멸의 정도를 나타낸 것이다.

마멸 폭 크기의 변화에서 절삭속도 50m/min의 저속가공

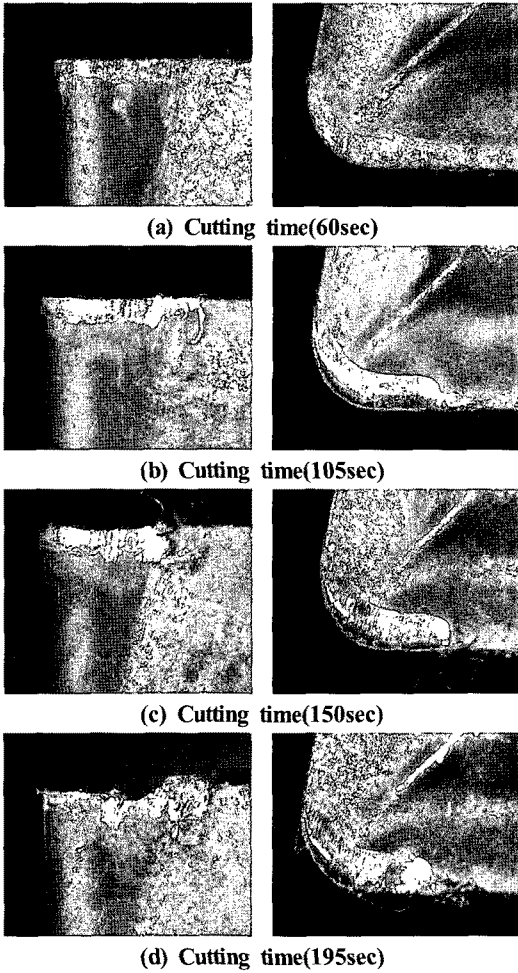


Fig. 3 Wear progression of TiAlN coated carbide tool (V=90m/min, d=2.0mm, f=0.2mm/rev)

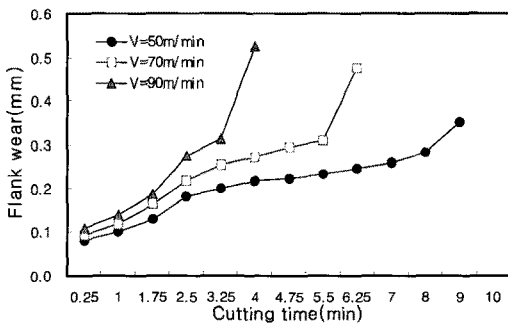


Fig. 4 Flank wear test results for Ti-6Al-4V alloy using TiAlN coated tool

에서는 시간의 경과에 따른 마멸의 속도가 완만하게 진행되다가 공구수명의 가까이에 이르러서는 마멸의 폭이 급격히 증대하여 급속마멸단계에 이르는 현상을 보이고 있다.

절삭속도를 70m/min 이상으로 높이면 이러한 마멸 정체가 구간이 공구의 플랭크 마멸 폭 VB가 시간에 따라 명료하게 진행되는 정상마멸 구간으로 대체되는 것을 볼 수 있다.

이처럼 선삭가공에서 티타늄합금의 마멸특성은 절삭속도에 매우 민감한 반응을 받는다는 것을 알 수 있으며, 절삭속도 70m/min 이상의 속도에서는 매우 빠른 마멸의 형태를 나타내었다.

3.3 절삭특성에 따른 공구수명

본 실험에서 절삭특성에 따른 Ti-6Al-4V합금의 선삭가공의 공구수명을 알아보기 위해 플랭크마멸량과 절삭시간, 절삭시간과 절삭분력의 관계 및 공구마멸과 절삭분력의 관계를 검토하였다.

Fig. 5는 절삭속도를 70m/min, 이송속도를 0.2mm/rev, 그리고 절삭 깊이를 2mm로 할 경우의 공구마모에 따른 절삭시간과 절삭분력의 관계를 나타내었다. 그림에서처럼 절삭분력들은 절삭 초기에는 공구와 피삭재의 마찰로 인하여 상승하였다가 절삭시간의 경과에 따른 수명한계전의 영역에서는 서서히 감소하고 있다. 그러나 수명한계지점 부근에서부터는 절삭 3분력 모두가 급속히 높아지는 것을 알 수 있다. 이것은 SAE강의 고속도공구강을 이용한 선삭가공에서 공구의 마모에 따른 절삭분력의 변화⁽⁸⁾와 비슷한 유형의 곡선으로 나타난 것으로 보아 Ti-6Al-4V합금에 대한 선삭가공시 절삭시간과 절삭분력의 관계도 예측이 가능하리라 사료된다.

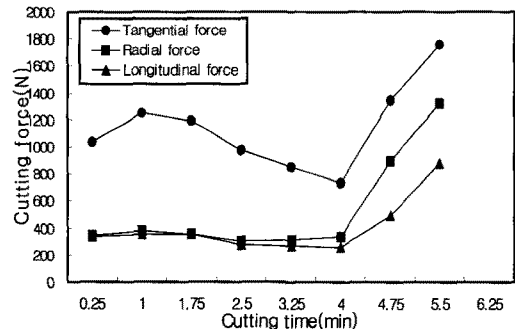


Fig. 5 Relation of cutting time on the cutting force for TiAlN coated tool (V=70m/min, f=0.2mm/rev, d=0.2mm)

3.4 표면 거칠기

본 실험에서 사용한 표면 거칠기 측정기는 축침식 측정기를 사용하였으며, 축 방향과 일치하여 traverse length는 2.5mm, cut off는 0.8mm로 하여 측정하였다.

Fig. 6은 절삭속도 70m/min, 절삭 깊이가 1.5mm의 조건에서 공구의 이송속도가 변화에 따른 표면 거칠기를 이론식에 의한 이론치와 함께 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 표면 거칠기는 공구 이송속도가 증가할수록 표면 거칠기는 전체적으로 선형적인 증가를 하였다. 실험에 의한 표면 거칠기 (Ra)의 결과는 이론값과 비교하여 공구 이송속도가 0.1mm/rev 일 때 오차는 0.00 μ m~0.04 μ m 정도로 매우 일치하였으며, 실험한 표면 거칠기는 이론값보다 양호하게 나타나는 데 이는 물리적 측정방법을 통한 TiAlN 코팅공구가 Ti-6Al-4V합금의 선삭가공 시 마찰에 의한 마모가 적기 때문으로 사료된다.

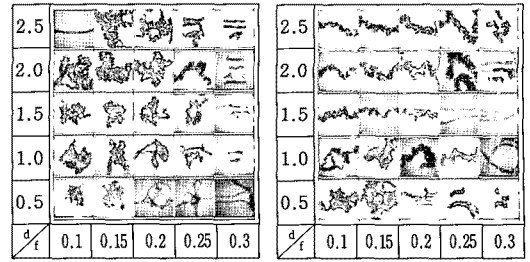
3.5 칩 처리 형상

본 실험에 사용된 칩 브레이크는 중 절삭 형으로서 절삭인 선부의 각도는 11.5°이며, 측면의 각도는 10.5°이다.

절삭 가공 시 칩 브레이크에 의한 칩 발생형상을 관찰하여

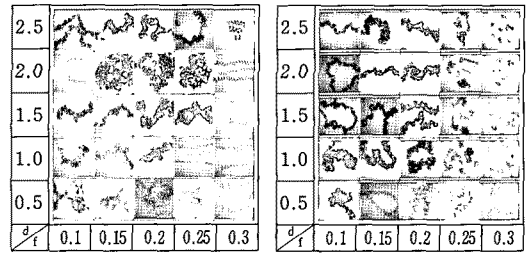
Fig. 7은 절삭속도의 조건에 따라 배출된 칩 형상을 Fig. 8은 INFOS기준에 칩 형상을 분류하여 칩 처리성이 양호한 영역을 나타내었다.

절삭속도 90m/min에서 칩 처리성이 양호한 영역이 가장 많았으며, 절삭속도 30m/min에서 가장 적었다. 양호한 영역에서는 Spiral chip 형태가 많았고 불량영역에서는 Tubular chip 형태가 많이 나타났다. 또한 절삭가공 조건에서 절삭 깊이가 작을수록, 공구 이송속도가 낮을수록 칩의 컬링이 심하였다.



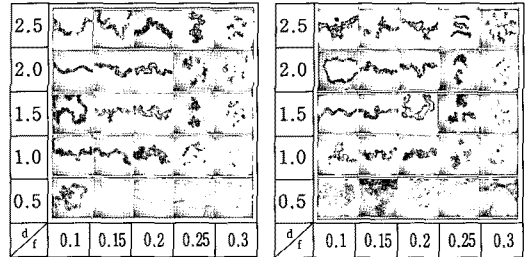
(a) V=30m/min

(b) V=50m/min



(c) V=70m/min

(d) V=90m/min



(e) V=100m/min

(f) V=110m/min

Fig. 7 Chip treatment of Ti-6Al-4V alloy

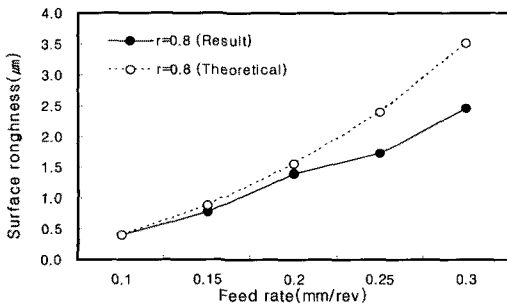


Fig. 6 Surface roughness test results vs. theoretical values

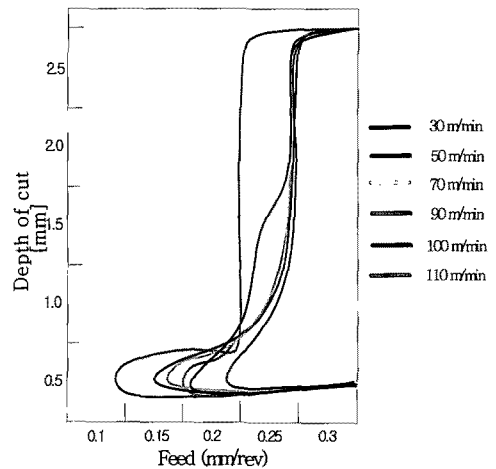


Fig. 8 Good region for chip treatment in cutting speed

4. 결론

- (1) 절삭 3분력은 절삭 깊이에 대한 영향을 많이 받았으며, 절삭 깊이가 증가함에 따라 주분력과 배분력은 크게 증가하였고 이송분력은 미소량의 완만한 증가세를 보였다.
- (2) 공구마멸은 절삭 날 부분에서 형성되었으며, 플랭크 면보다 크레이터 면에서 마멸의 폭이 크고 뚜렷하게 발달하였다.
- (3) Ti-6Al-4V 합금의 마멸특성은 절삭속도에 따라 크게 나타남을 알 수 있었으며, 절삭속도 50m/min에서는 마멸속도가 대체로 완만한 반면에 절삭속도가 70m/min이상의 속도에서는 매우 빠른 마멸의 형태를 가져 수명연장을 위한 절삭속도는 70m/min이하로 주어야 함을 알 수 있었다.
- (4) 선삭가공에서 공구마모에 따른 절삭분력의 변화는 SAE강의 고속도공구강을 이용하여 선삭가공한 경우와 비슷한 유형의 곡선을 나타내었다.
- (5) 표면거칠기(Ra)는 공구 이송속도 0.2mm/rev이상부터 실험값이 이론값 보다 양호하게 나타남을 알 수 있었다.
- (6) 배출된 칩은 공구의 이송속도가 증가할수록 칩의 형태는 양호하였으며, 절삭속도 90m/min에서 가장 양호한 칩 처리성을 보였다.

참고 문헌

- (1) Lee, Y. T., Kim, S. E., Hyeon, Y. T., and Jeong, H. W., 2003, "Advanced materials of the dream-titanium," The Korea metal journal, p. 3.
- (2) Oh, S. H., 2003, The refractory metals texturing technique and trend of research, *KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 25~31.
- (3) Shaw, M. C., and Dirke, S. O., 1956, "On the wear of cutting tool," *Microtechnic*, Vol. 10, No. 4, pp. 181~187.
- (4) Zlatin, N., Christopher, J. D., and Cammett, J. T., 1973, "Machining of New Materials," USAF Technical Report AFML-TR-73-165.
- (5) Mcquillan, A. D. and Mcquillan, M. K., 1956. "Titanium," Butterworths Scientific Publications, London, Vol. 261, pp. 374~382.
- (6) Zlatin, N., 1982, *Procedures and Precautions in Machining Titanium*, Titanium and it's Alloys ASM. Metal Park, Ohio.
- (7) Kim, N. Y., Go, J. B., and Lee, D. J., 2000, "A Study on the Tool Wear and Cutting Characteristics in the Machining of Ti-6Al-4V using Tungsten Carbide Tool," *KSMTE*, Vol. 11, No. 2, pp. 361~366.
- (8) Yeom Y. H., 1985, "The cutting theory of the machine tool," Dongmyungsa, Korea, p. 167.