

티타늄 합금의 연삭에 관한 연구, Part 1 : 연삭력, 비연삭에너지, 표면거칠기, 연삭비

김성현*, 임종고, 하상백(금오공대 기계설계 대학원), 최 환, 이종찬(금오공대 기계공학부)

A Study on the Grinding of Titanium Alloy, Part 1 : Grinding force, Specific grinding energy, Surface roughness, G-ratio

S. H. Kim, J. G. Lim, S. B. Ha(Dept. of Eng. Sci. Mech., KNUT),
H. Choi, J. C. Lee(Dept. of Mech. Eng., KNUT)

ABSTRACT

This investigation reports the grinding characteristics of titanium alloy(Ti-6Al-4V). Grinding experiments were performed at various grinding conditions and the grinding forces and specific grinding energies were measured to investigate the grindability of titanium alloy with the three different wheels including Diamond, Green carbide and Alumina. To investigate the grinding characteristics of titanium alloy grinding force, force-ratio, specific grinding energy and grinding-ratio were measured. Surface roughness was also measured with tracer and the ground surfaces were observed with SEM. Force-ratio of grinding of titanium alloy was very lower than that of grinding of SKD-11. Specific grinding energy are almost five times larger and rougher surface was obtained in titanium grinding.

Key Words : Grinding force (연삭력), Surface roughness (표면거칠기), Specific grinding energy (비연삭에너지), Table speed (테이블 이송속도), Material removal rate (재료제거율)

1. 서론

최근들어 항공우주 산업의 발달로 인하여 티타늄의 수요가 급증하게 되었다. 티타늄은 가벼우면서도 강하고 내식성이 좋은 특징 때문에 이상적인 금속으로서, 특히 가볍고 강한 비강도가 높은 재료를 필요로 하는 항공기 재료에 적용이 되며 내식성이 우수하여 스테인레스 강이 부식되는 분야에서 사용 가능하여 화학공업용 장치에 없어서는 안될 중요한 재료이다. 비용적인 측면에서 고가금속으로 인식되기도 했으나 티타늄은 적용 후에 긴 수명을 유지할 수 있고 타 금속의 대체 소재로서의 응용보다는 티타늄이 갖고 있는 특별한 소재특성을 활용한 설계 및 응용을 행함으로써 경제성 측면에서 매우 유리한 재료이다. 티타늄은 철강등의 재료에 비해서 내식성, 내열성, 인장강도 등이 우수한 특성을 가지고 있지만 기계가공의 경우, 그 우수한 특성으로 인하여 공

구수명을 단축시키는 문제가 일어나고 있다.

티타늄의 연삭가공에 있어서 재료 자체의 열전도율이 매우 작아 가공중에 발생한 열이 방출되지 않고 축적되는 특징이 있어 연삭과 같이 열이 많이 발생하는 가공에 있어서 연삭열이 가공점에 축적되어 슷돌입자의 마모가 크게 되며 활성이 매우 강하여 산소, 질소, 탄소 등과의 반응을 쉽게 일으켜 슷돌의 수명을 단축시키는 결과를 가져온다. 최근 티타늄 합금의 연삭성능, 연삭조건등에서 많은 연구⁽⁴⁾가 행하여 지고 있으며 최적조건선정⁽⁵⁾, 가공물에 미치는 영향⁽⁶⁾등의 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 항공용재료로 쓰이는 고강도 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 연삭가공 특성을 살펴보기 위하여 슷돌 종류에 따른 연삭특성을 알아보고 연삭시 발생하는 chip 과 그 현상에 관하여 실험하였다. 또한, 연삭조건변화에 따른 연삭저항력의 변화를 측정하고, 연삭가공된 면에 대해 표면 거칠기(Ra, Rmax)

값을 측정, 연삭횟수에 따른 연삭력과 표면조도, 비연삭에너지와의 관계를 살펴보았다. 연삭시 일어나는 현상을 알아보기 위해 절삭chip을 SEM으로 성분 검사 및 chip의 미시적 관찰을 하였다.

2. 실험조건 및 방법

본 실험에 사용된 슷들은 입도가 #100이고, 결합도 N, 집중도 100인 레진본드 Diamond wheel과 입도 #80, 결합도 K 인 Green silicon carbide(GC), Alumina(WA) 비트리파이드 슷들을 사용하였고, 공작물은 티타늄 합금중에서 Ti-6Al-4V 를 사용하였다. Ti-6Al-4V 의 물리적 특성은 인장강도가 1500MPa 이상의 고강도 티타늄 합금으로서 열과 전기 전도율이 매우 작고 변형의 정도를 나타내는 영률이 철의 1/2로서 얇은 공작물에 있어 변형을 일으키기 쉬우며, 비자성체이다. Table 1은 본 연구에 사용된 실험조건을 나타내고, Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 공작기계는 1 μ m까지 절입이 가능하도록 디지털 장치가 부착된 부분 유압식 범용 횡축 수평형 평면연삭기(Model: YGS-50A (1.5kW, 3440rpm))를 사용하였다. 연삭저항력의 측정을 위해 압전형 공구 동력계(Kistler, 9254)를 연삭기 테이블 위에 설치하고 그 위에 지그를 설치한 후 공작물을 고정하였다. 공작물 연삭시 공구동력계에서 발생된 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5019A)에서 증폭된 후 아나로그-디지털변환기(IOtech, DaqBook)를 거쳐 디지털화되어 개인용 컴퓨터(PC)로 전송되고, Grinding force software를 사용하여 실험에서 얻어진 연삭저항력 값을 측정하였다. 연삭된 공작물의 Cross feed 방향의 표면거칠기(Ra와 Rmax)는 촉침식 표면조도계(Mitutoyo, SV-600)를 사용하여 측정하였으며, 이때 Cut Off 값은 0.8mm로 모든 연삭조건과 공작물에 대하여 동일하게 적용하였다. 연삭칩의 사진은 전자주사현미경(SEM)을 사용하여 촬영하였다.

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	Horizontal spindle surface grinding machine
Grinding wheel	CD100N100(180D× 31.75d× 10t) GC80K· WA80K(180D× 31.75d× 10t)
Grinding conditions	Wheel speed(V_s):32.4m/s
	Table speed(v_w):3, 6, 9, 12m/min
	Depth of cut(a_p):5,10,15,20,25,30 μ m
	Grinding type:Up & Plunge & Wet
Grinding fluids	Syntilo 9954 (Castrol, 40:1)
Dressing conditions	diamond : WA120 stick Depth of cut : 10 μ m
	WA,GC : One point diamond dresser Depth of cut : 20 μ m
	Table speed:6m/min

3. 실험결과 및 검토

Fig. 2는 이송속도 6m/min, 절입깊이 5 μ m으로 200회 가공하는 동안 Diamond, GC, WA의 연삭저항력을 법선방향 연삭저항력(F_n)과 접선방향 연삭저항력(F_t)에 대해 각각 비교한 것이다. 티타늄의 연삭저항력은 Diamond에서 가장 적게 나오고 WA에서 가장 크게 나오며, 전체적으로 F_n 에 대한 F_t 의 연삭저항력이 일반강에 비해 크게 나타나고 있으며 Diamond에서는 횡수가 증가함에 따라 F_t 가 F_n 에 비해 증가하고 있으나 그 차이는 적으며, GC에서는 F_t 의 연삭력이 F_n 보다 훨씬 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 그러나 WA에서는 F_n 이 더 크게 나타나고 있다. SKD-11의 경우⁽²⁾ F_n 의 값이 3~5배 높게 나오는 것이 일반적인 현상이다. GC의 경우 F_n , F_t 의 차이가 감소하다 100회에서부터 비슷한 증가 추세를 보이며 WA는 F_n , F_t 의 값이 증가하다100회를 기점으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 3은 연삭횟수에 따른 이분력비를 나타낸 것으로 Diamond와 WA는 큰 변화가 없으나 GC는 증가하는 경향을 보이고 있다.

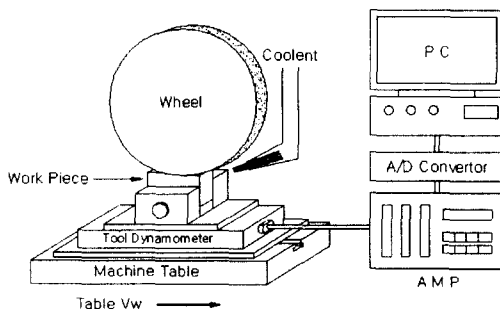


Fig. 1 Experimental set-up

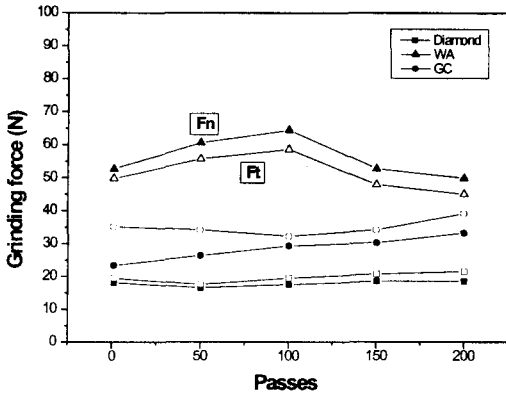


Fig. 2 Grinding force for Grinding passes with Diamond, GC and WA ($v_w=6\text{m/min}$, $a_p=5\mu\text{m}$)

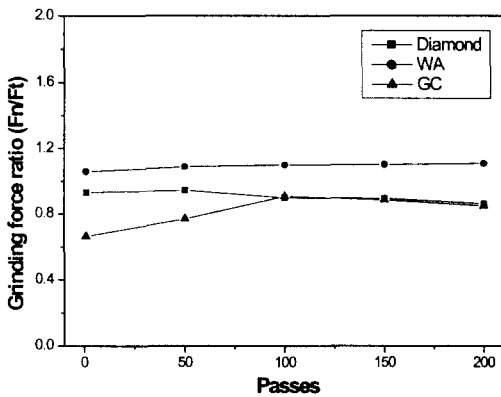


Fig. 3 Grinding force ratio versus Grinding passes

Fig. 2와 Fig. 3에서 Diamond는 연삭저항력이 GC, WA에 비해 낮고, 이분력비도 큰 변화가 없어 연삭 횟수에 따라 큰 영향을 받지 않으며 GC의 경우 연삭 저항력이 증가경향을 보이고 이분력비도 증가하는 것으로 보아 연삭횟수에 따라 계속적인 wheel의 마모가 일어난다고 보아지며 WA는 연삭저항력이 Diamond, GC에 비해 매우 높고 이분력비의 큰 변화가 없으며 연삭저항력이 증가하다 100회에서 오히려 떨어지는 것으로 보아 입자 탈락에 의한 자생작용이 일어나는 것으로 생각되어진다. 티타늄 합금과 달리 SKD-11⁽²⁾에서는 이분력비가 연삭횟수에 따라 증가 추세를 보이며 Fn의 값이 Ft의 값보다 매우 높게 나타나므로 이분력비의 값은 3~5정도의 값을 가진다. 이것으로 보아 티타늄 합금의 연삭에 있어서 Ft의 값이 다른 재료에 비해 매우 높게 나타나므로 결국 연삭동력이 많이 필요한 것을 알 수 있다.

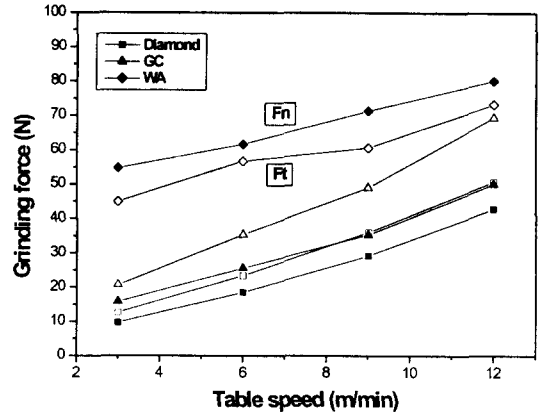


Fig. 4 Grinding forces versus Table speed

Fig. 4은 이송속도 변화에 따른 Diamond, GC, WA의 연삭저항력을 나타낸 것이다. WA의 경우 GC에 비해 연삭저항력이 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 특히 저속에서 그 차이가 더 크게 나타나고 있다. 또한 Diamond, GC숫들에 있어서 Ft의 연삭저항력이 Fn보다 크게 나타나고 있으며 이송속도가 클수록 더 큰 차이를 보이고 있으며 WA는 반대로 법선 방향의 연삭저항력이 더 큰 것을 알 수 있다. 이송속도가 증가 할 수록 GC와 WA의 Ft값이 서로 격차가 줄어들어 12m/min에서 거의 비슷해지는 것을 볼 수 있다.

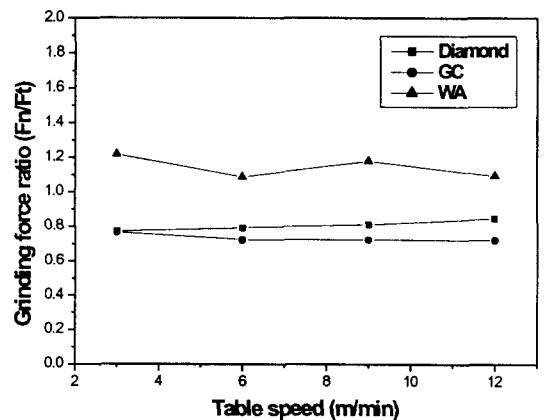


Fig. 5 Grinding force ratio versus Grinding passes

Fig. 5는 이송속도변화에 따른 이분력비를 나타낸 것이다. Diamond는 이송속도에 큰 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있으며 GC는 이송속도가 커 질수록 Ft의 증가율이 Fn보다 크기 때문에 이분력비가 작아지는 것을 알 수 있으며 WA의 경우 Diamond, GC와

달리 Fn의 값이 높게 나타나므로 이분력비가 높게 나올을 알 수 있다.

Fig. 6은 티타늄에 대한 Diamond, GC, WA의 재료제거율에 대한 비연삭에너지값을 나타낸 것이다. 연삭가공에 필요한 비연삭에너지는 다음 식(1)을 이용하여 구하였다.

$$u = \frac{P}{Q_w} = \frac{F_t V_s}{b a_p v_w} \quad (1)$$

여기서, F_t 는 접선방향 연삭저항력(N/mm), V_s 는 휠 속도(m/s), d_w 는 휠 직경(mm), v_w 는 공작물 이송속도(m/min)이며, b 는 휠 폭(mm)이다.

6m/min에서 티타늄합금에 대한 Diamond의 비연삭에너지는 GC에 비해 1/2 정도이고, WA에 대해서는 2/5정도로 작게 나타났으며 이송속도가 느릴수록 WA의 비연삭에너지 값이 커지므로 그 차이는 더욱 커진다. Fig. 6에서 살펴보면 재료제거율에 대한 비연삭에너지의 값이 Diamond, GC의 경우 큰 변화가 없으나 WA는 재료제거율이 증가함에 따라 비연삭에너지가 지수함수적으로 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 다른 재료와 비교했을때의 재료제거율에 대한 비연삭에너지를 살펴보면 SKD-11⁽²⁾ (HRC60, WA80)의 경우 초기 증가하다 120~160정도의 값을 보이나 티타늄합금에서는 낮은 재료제거율에서 5~6배, 높은 재료제거율에서 2배 정도 높음을 볼 수 있으며 비연삭에너지가 높은 것에서 볼 수 있듯이 연삭가공시 많은 열이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 티타늄의 경우 낮은 이송조건에서 더 좋은 특성⁽⁴⁾을 보이나 Ti-6Al-4V에서는 좋지 않은 결과를 보이고 있다.

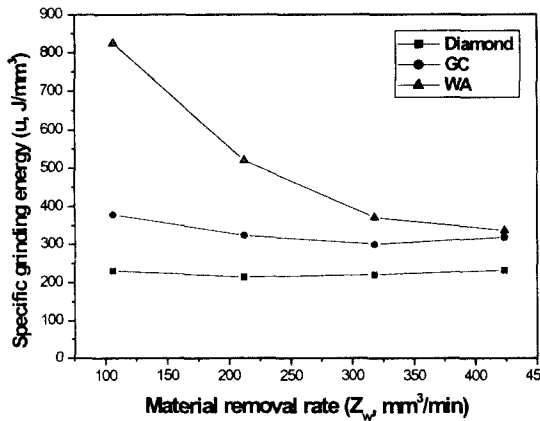


Fig. 6 Fig. 8 Specific grinding energy versus Material removal rate

Fig. 7는 티타늄합금을 Diamond, GC, WA로 습식연삭을 하고 난 후의 chip에 대한 SEM사진이며, 연삭깊이는 10 μ m로 하였다. Fig. 7(a), (b)는 GC와 WA의 습식연삭한 chip의 형상으로 칩이 과도한 연삭저항력에 의해 뜯겨져 나간 형상을 보이고 있으며 Diamond의 경우 Fig. 7(c)에서처럼 경작형의 칩이 생성되고 있는 것을 볼 수 있다.

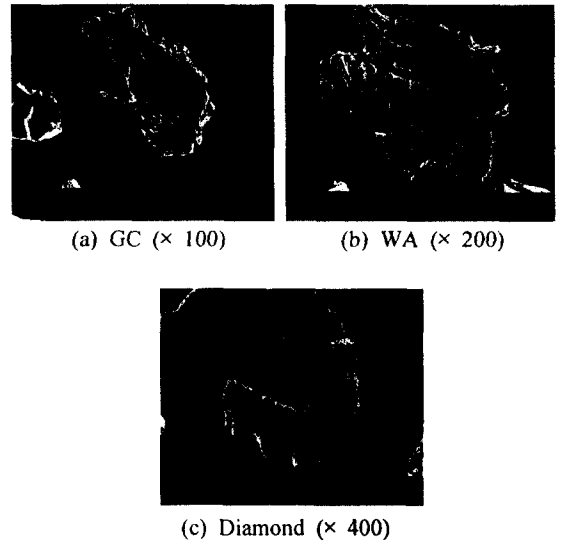


Fig. 7 SEM photograph of chip ($V_w=6$ m/min, $a_p=10$ μ m)

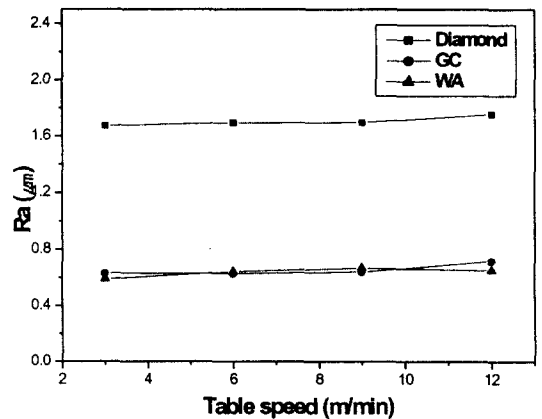


Fig. 8 Surface roughness for Table speed

Fig. 8은 이송속도변화에 따른 표면거칠기를 살펴본 것이다. Fig. 8은 Ra값을 나타낸 것으로 GC와 WA 둘다 Ra 값이 약간 증가하나 이송속도 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가진다고 볼 수 있으며

Diamond의 값이 매우 높음을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 Diamond의 값이 GC와 WA에 비해 매우 높은 값을 보이는데 이것은 Fig. 7의 (c)에서 보는 것과 같이 칩의 모양이 경작형이 나오는 것으로 보아 Diamond wheel의 입자 모양이 공작물에 그대로 전사되는 것이라고 보여지며 GC, WA는 Diamond에 비해 표면 거칠기의 값이 좋게 나오지만 SKD-11⁽³⁾에 비교했을 때 Ra의 값이 매우 높은 것을 알 수 있으며 이것으로 보아 GC, WA는 과도한 힘과 함께 정상적인 연삭이 아닌 다른 형태의 연삭이 되어졌다고 생각되어진다. 그리고 Fig. 4와 Fig. 8의 결과를 살펴보면 이송속도가 높아짐에 따라 연삭저항력은 증가하지만 표면조도에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

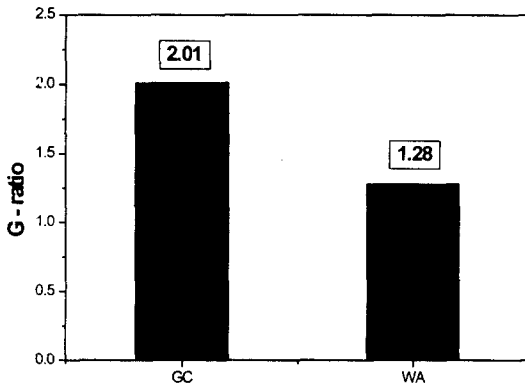


Fig. 8 G-ratio for GC and WA

Fig. 8은 200회 연삭후의 GC와 WA의 연삭비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 연삭력이 크게 나타난 WA의 경우가 연삭비가 작게 나타났으며, 또한 연삭비가 일반강(SKD-11⁽³⁾)에 비해서 매우 작게 나타나고 있는 것도 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 연삭특성을 파악하기 위해 Diamond·Green carbide·Alumina wheel로 연삭 가공하여 연삭저항력, 이분력비, 표면거칠기와 비연삭에너지를 구하고 비교, 검토하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 티타늄합금의 연삭횟수에 따른 연삭저항력과 이분력비로 보아 Diamond는 연삭횟수에 크게 영향을 받지 않으며 GC의 경우 입자의 계속적인 마모가 일어나고 WA는 입자 탈락에 의한 자생작용이 일어나는 것을 알 수 있다.

(2) 재료제거율에 대한 비연삭에너지의 값이

Diamond, GC의 경우 큰 변화가 없으나 WA는 재료제거율이 증가함에 따라 비연삭에너지가 지수함수적으로 감소하고 있다. 일반 티타늄에서의 사용조건과 반대적인 결과를 보이고 있다.

(3) 티타늄 합금의 표면거칠기에서 GC, WA에 비해 Diamond의 값이 매우 높으며 경작형의 chip이 나오는 것으로 보아 wheel의 입자 모양이 공작물에 그대로 전사되는 것을 알 수 있다.

(4) 티타늄 합금 연삭에 있어서 이송속도의 변화는 표면조도에 큰 영향을 미치지 않는다

(5) 티타늄 합금의 연삭비는 일반강에 비해 매우 작음을 알 수 있고 연삭저항력이 크고 자생작용이 발생하고 있는 WA의 연삭비가 더 낮게 나오는 것을 알 수 있다.

(6) 티타늄 합금은 SKD-11에 비해 연삭저항력, 표면조도의 값이 매우 높게 나오며 Ft의 값또한 훨씬 큰 값을 가지는 것으로 보아 보다 큰 연삭동력이 필요하며 그로 인한 에너지의 손실(열)이 크다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. Malkin, S., "Grinding Technology", Ellis Horwood, 1989, p.148
2. 하상백 외 4인, "A Study on Burning Phenomenon of Grinding", KSPE Vol. 1, 1998. 5, pp.120~123
3. 전영길 외 4인, "A Study on the Dry and Wet Grinding for Hardened Steels", KSPE Vol. 2, 1999. 5, pp. 927~930
4. 남기준(日本 taiga번역), "기계가공기술시리즈7", 성안당, 1997
5. "티타늄의 가공 기술", 한국기계연구원(日本티타늄협회 번역), 2000, pp. 49-53
6. Bobji MS, Venkatesh K, Biswas SK, "Roughness generated in surface grinding of metals", ASME , V.121 N.4 , 1999. 9, pp. 746-752