

Ti-6Al-4V 티타늄 합금의 공구 재종에 따른 선삭 특성

최종근*, 김형선⁺, 정진오⁺⁺

(논문접수일 2007. 9. 11, 심사완료일 2008. 1. 30)

Turning Characteristics of Various Tool Materials in the Machining of Ti-6Al-4V

Jong-Guen Choi*, Hyung-Sun Kim⁺, Jin-Oh Chung⁺⁺

Abstract

Titanium and its alloys, due to their superior properties of high specific strength and excellent corrosion resistance, are increasingly used in living applications in the 21st century. The applications in aerospace and medical industries demand machining process more frequently to obtain a desired product. But unfortunately, this material is one of the most difficult-to-cut. In the turning process of titanium alloys, the key point for successful work is to select proper tool materials and cutting conditions. This study suggests a guidance for selecting the tool materials and the cutting speeds to improve tool life and surface integrity in Ti-6Al-4V titanium turning process. The experiments investigate the change of surface roughnesses, cutting forces and flank wear with various cutting parameters of tool materials, depth of cuts and feeds. As the results, K10 type of insert tip was assured as the best for turning of Ti-6Al-4V titanium alloy.

Key Words : Cutting(절삭), Tool life(공구수명), Tool wear(공구마멸), Surface roughness(표면거칠기), Titanium alloy(티타늄 합금), Difficult-to-cut(난삭재)

1. 서론

원자번호 22번의 티타늄은 비중이 4.51로 구리의 약 절반, 철의 약 60% 정도로 가벼우며, 해수 중에서 백금에 필적할 만큼 좋은 내식성을 가지고 있다. 또 티타늄은 같은 무게일 때 알루미늄의 6배, 철의 약 2배에 달하는 높은 강도를 가지고

있으며, 내열성 및 고온특성도 매우 우수하다⁽¹⁾.

티타늄은 소결, 단조, 주조, 절삭가공 등을 통하여 제품화 되고 있으나 최근 우주항공 산업분야에서의 높은 정밀도를 갖는 부품의 수요 증가로 절삭가공의 필요성이 높아지고 있다. 티타늄은 절삭가공이 어려운 대표적인 난삭재이다. 그 주된 이유로는 첫째, 강도가 높아 절삭공구의 파손과 칩핑

* 순천대학교 기계우주항공 공학부 (jgchoi@sunchon.ac.kr)

주소: 540-742 전남 순천시 매곡동 315번지

+ 한국폴리텍V대학 순천캠퍼스 컴퓨터응용기계과

++ 순천대학교 기계우주항공 공학부

(chipping)을 일으키기 쉽고, 둘째, 열전도율이 낮아 공구의 급격한 온도상승과 마멸을 촉진하며, 셋째, 탄성계수가 작아 절삭력에 의한 변형이 커서 정밀가공이 어렵고, 넷째, 화학적 활성화가 매우 큰 금속으로 가공 중 온도상승에 의해 공구와 반응하기 쉽다는 점을 들 수 있다⁽²⁾. 따라서 흔히, 난삭재를 분류할 때 공구수명 단축에 따라 경제성이 크게 떨어지는 경우와, 제품의 표면거칠기와 같이 원하는 가공정도에 도달하기 어려운 재료로 나누어지는데 티타늄의 경우에는 두 가지 모든 측면에서 난삭재라 할 수 있다.

티타늄합금은 난삭재임에도 불구하고 그 우수한 화학적, 기계적 성질 때문에 가공에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. Kim⁽³⁾ 등은 초경합금 공구를 사용한 티타늄합금 가공에서의 공구마멸과 절삭속도, 절입깊이, 이송량의 변화에 따른 절삭특성을 연구하였고, Lee⁽⁴⁾는 TiAlN 코팅공구를 이용한 티타늄합금의 선삭가공시 절삭특성에 관하여 연구하였다. Wang⁽⁵⁾ 등은 고속밀링가공에서의 BCBN(binderless cubic boron nitride)공구를 이용한 티타늄합금의 슬롯가공에서 공구의 성능과 마멸특성을 공구수명의 관점에서 연구하였으며, Ezugwu⁽⁶⁾은 그의 논문을 통하여 현재 연구되고 있는 난삭재 가공의 예로서 회전공구에 의한 선삭가공방법, 고압의 절삭유를 공급하는 방법, 고온가공 등을 소개하고 있다.

이와 같은 티타늄합금 가공에 관한 지금까지의 연구결과에도 불구하고 현장에서의 가공 상황을 고려할 때 아직까지 작업자들이 가공조건 선정에 필요한 정보가 충분히 제공되지 못하고 있다. 따라서 본 연구는 티타늄합금 가공에 널리 사용되는 공구재를 중심으로 가공특성을 조사하여 최적의 공구재를 선정 할 수 있는 자료 확보에 그 목표를 두었다. 이를 위해 일반적으로 난삭재 가공에 널리 사용되는 6가지의 공구재를 선택하고 절삭속도, 절입깊이, 이송속도의 변화에 따른 절삭력의 변화와 표면거칠기를 관찰하였다. 또한 절삭속도, 이송속도와 가공시간의 변화량에 따른 공구여유면의 마멸량을 관찰하여 공구수명을 판정하였다.

2. 가공실험

2.1 피삭재

실험에 사용한 피삭재는 우주·항공산업, 의학, 자동차 및 석유산업에 널리 사용되는 Ti-6Al-4V 봉재(ASTM B265 Grade 5)를 사용하였으며, Table 1과 Table 2는 각각 피삭재의 화학적 성분과 피삭재의 기계적 성질을 보여준다.

2.2 공구 및 공구홀더

신공구재에 따른 가공특성을 비교하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 대구택사의 6가지 공구재의 인서트 팁(P10, K10, AB30, TT1300, KB90, TB650)을 선택하였다. Photo 1은 이들에 대한 사진이며, Table 3은 제조사에서 제공하는 각각의 인서트에 대한 특징을 간단히 설명한 것이다. 사용된 모든 인서트 팁의 단면 형상은 사각이며, 여유각은 0°이고, 칩브레이커(chip breaker)가 없는 SNMA 120408의 규격을 사용하였다. 또한, 이 팁을 장착할 틀홀더는 범용 선반 절삭실험의 경우는 대구택사의 외경절삭용 75°의 절입각(entering angle)을 갖는 CSRNR 2525 M12를 사용하였고, CNC선반을 사용하는 경우에는 PSBNR 2020 K12를 사용하였다. 여유각 0°인 인서트 팁을 이 틀홀더에 장착하였을 때 얻어지는 실제 여유각은 6°가 되며, Photo 2는 실험에

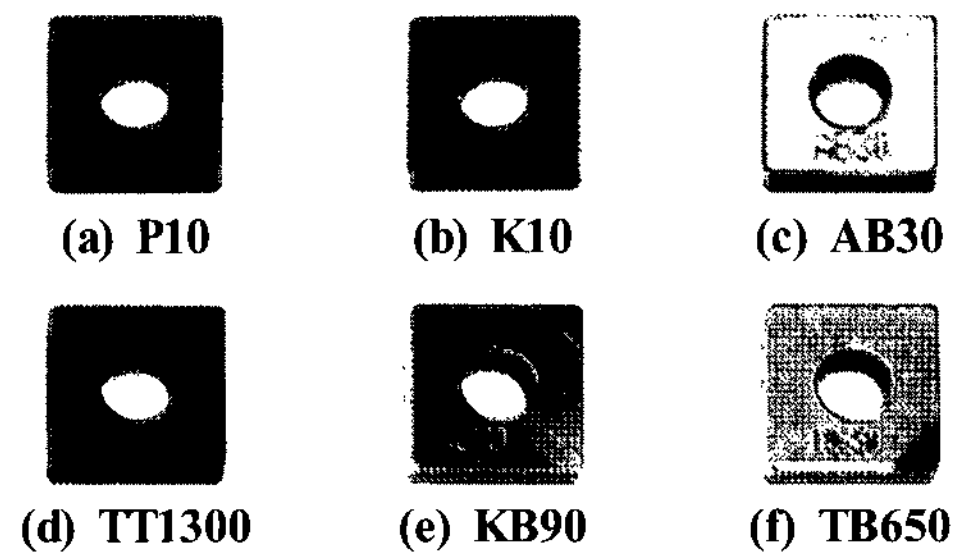


Photo 1 Insert tips

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy

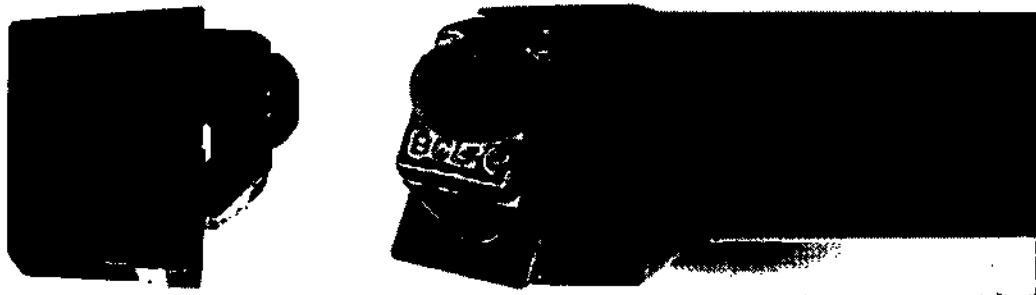
Content	Al	V	Fe	O	C	N	H	Y	Ti
wt(%)	6.26	4.12	0.17	0.18	0.006	0.012	0.0024	0.001	89.2486

Table 2 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy

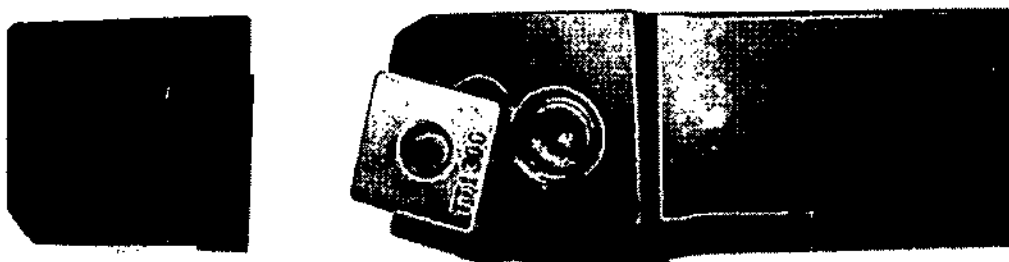
Alloy	UTS[MPa]	YS[MPa]	Elong(%)	RA(%)	Hardness(HRC)
Ti-6AL-4V	983.9	908.8	18.3	42.0	33

Table 3 Specification of insert tips

Tool material	Specification
P10	P10 uncoated CARBIDE added TiC and TaC. It has good thermal and wear resistances for turning of steel.
K10	K10 uncoated CARBIDE is excellent wear resistant grade for general turning of cast iron, exotic alloys and non-ferrous materials including aluminum and copper alloys.
TT1300	TT1300 CVD coated grade is ideal for high speed turning of cast iron and steel. Its thick aluminum oxide coating on a high wear resistant substrate makes it suitable for rough & finish machining of cast iron.
AB30	AB30 Al ₂ O ₃ + TiCN based CERAMIC for general use on hard materials and cast iron. The mixed ceramic with high wear resistance and toughness is applicable for interrupted machining.
KB90	KB90 CBN grade for high speed machining of cast iron and interrupted machining of hard materials. Excellent toughness with high CBN content.
TB650	TB650 CBN grade for wide range of turning applications on hard materials. It is a high wear resistant grade with optimal CBN content.



(a) CSRNR 2525 M12



(b) PSBNR 2020 k12

Photo 2 Tool Holder

사용된 툴홀더를 보여준다.⁽⁷⁾

2.3 공작기계 및 측정장치

절삭력과 표면거칠기 측정실험을 위한 공작기계로는 화천 기계의 범용선반(HL-380B)을 사용하였고, 공구마멸실험을 위한 공작기계로는 남선하이테크의 CNC선반(MECCA-3)을 사용하였다. 또한, 가공 중 절삭력의 측정에는 Kistler사의 피에조 타입(piezo electric type) 공구 동력계(tool dynamometer, model 9257B)와 동일 회사의 전하 앰프(charge amplifier, model 5019B)를 사용하였다.

공구 마멸량의 측정은 가공중 측정에 따른 가공조건의 변화를 최소화 하기 위하여 인서트 팁을 툴홀더에 그대로 둔 상태로 측정하는 방식을 택하였으며, 이를 위하여 Peak사의 50배 배율의 눈금자가 내장된 휴대용 측정 현미경을 사용하였다. 가공 후 피삭재의 표면거칠기는 Mitutoyo사의 표면조도 측정기(SJ-402)를 이용하여 측정하였다.

2.4 가공실험 방법

실험은 공구재, 절삭속도, 이송을 절삭조건 변수로 선택하고, 각각의 조합에 대하여 표면조도, 절삭력, 공구마멸을 측정인자로 선택하여 진행하였다. 공구는 앞서 소개한 대로 P10, K10, AB30, TT1300, KB90, TB650의 6가지 공구재를 적용하였다. 먼저, 일정 절삭속도에서 공구재, 절입깊이, 이송의 변화에 따른 가공 중 절삭력의 변화를 측정하였다. 이를 위해 절삭속도를 57m/min로 고정한 후 절입깊이를 1.0, 1.5mm로 하고, 이송을 0.06, 0.12, 0.18mm/rev로 하여 실험을 진행하였다. 가공 중 안정된 절삭력을 얻기 위하여 피에조 앰프의 저역필터는 1kHz로 설정하였으며, 가공 후 각각의 공구재와 이송의 조합에 대하여 가공면의 표면거칠기를 측정하였다.

또한, 앞서 주어진 6가지 공구재 각각에 대한 공구마멸 실험에서는 이송속도를 0.12mm/rev로 일정하게 하고 절삭속도를 90, 110m/min, 그리고 절입깊이를 1.0, 1.5mm로 하여 진행하였다. 공구의 마멸 진행정도를 측정하기 위해 가공 중 30초 간격으로 공구여유면의 마멸량을 측정하였다.

Fig. 1은 절삭력 측정실험에서 얻어지는 절삭력의 분력으로 주분력, 이송분력, 배분력과 그들의 작용방향을 표시한 것이며, Fig. 2는 절삭력 측정을 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다.

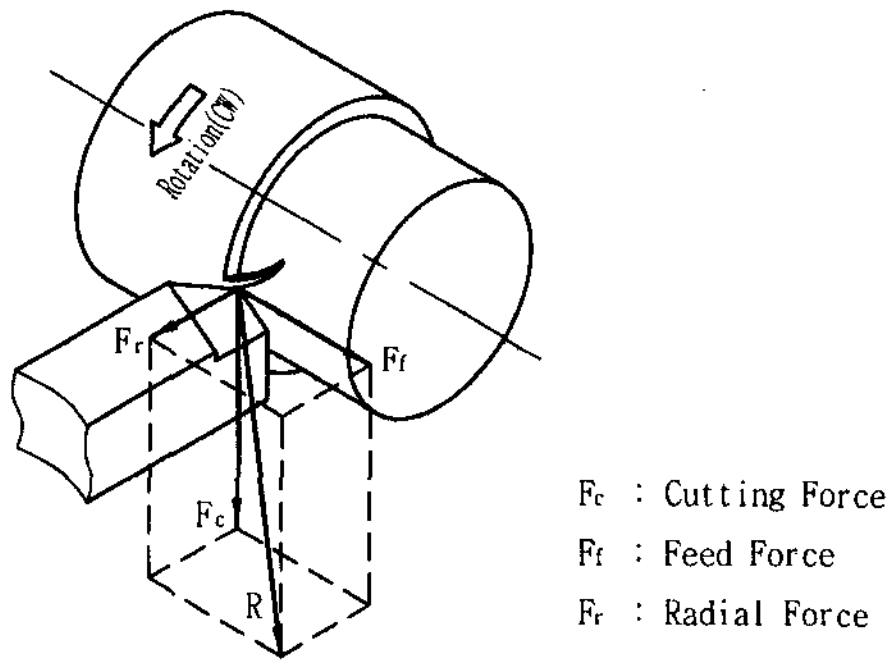


Fig. 1 Cutting forces and their directions

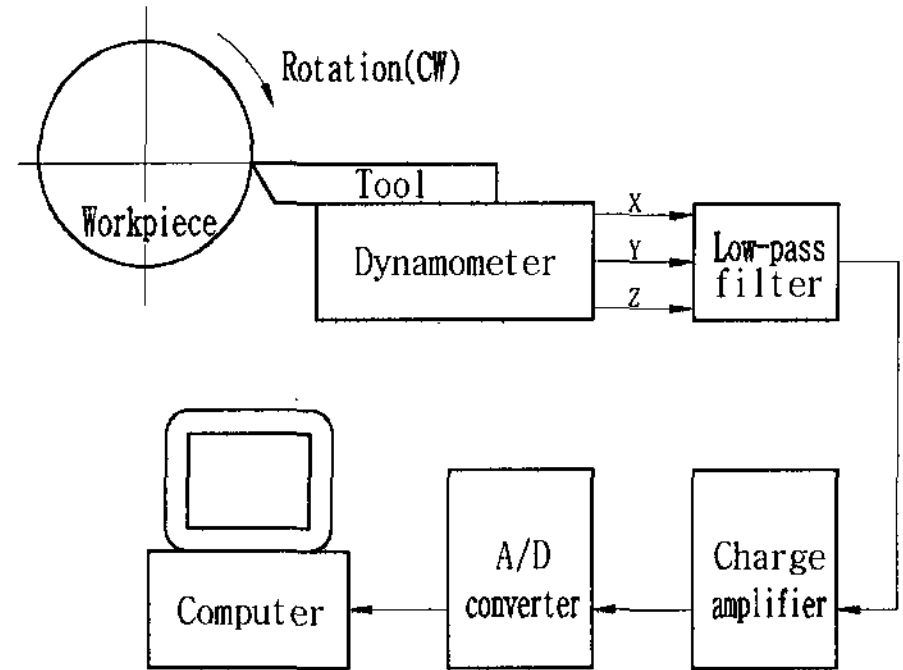
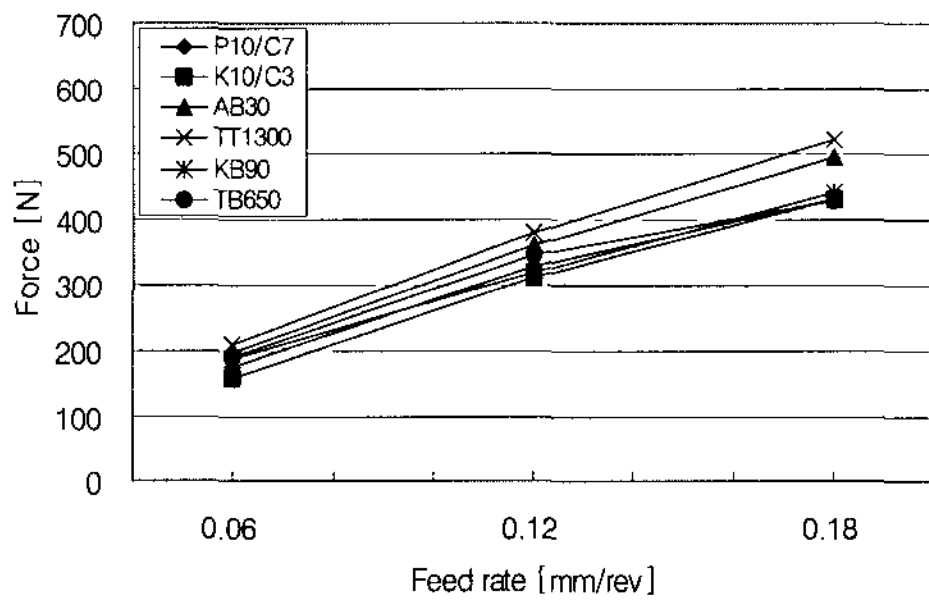
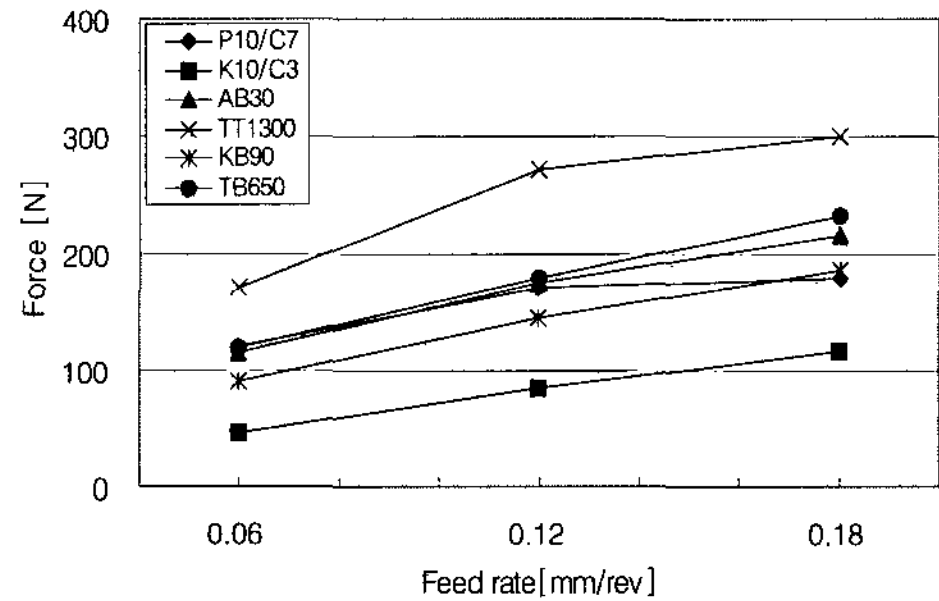


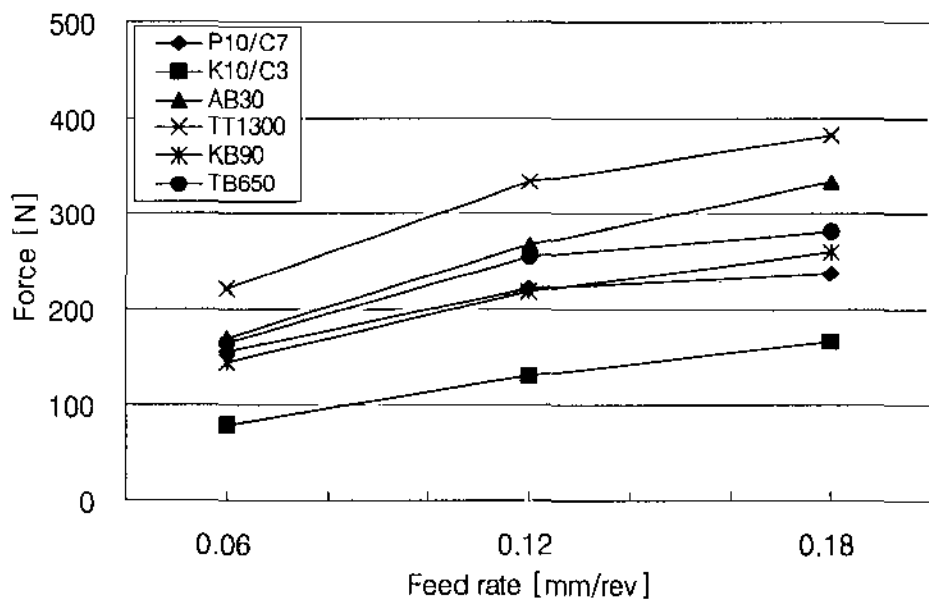
Fig. 2 Schematic diagram of the experiments



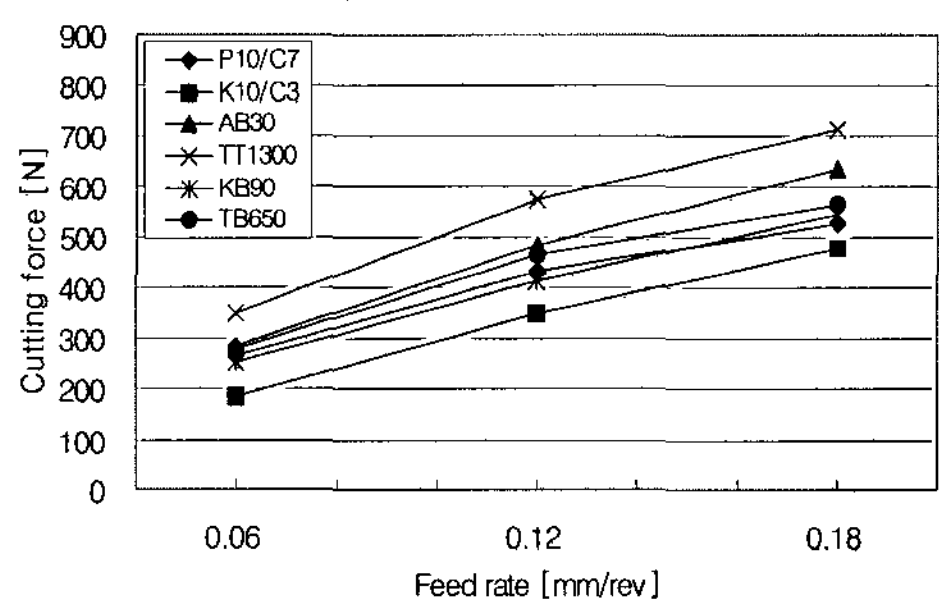
(a) Cutting force



(b) Radial force



(c) Feed force



(d) Resultant force

Fig. 3 Measured cutting forces at depth of cut of 1.0[mm]

3. 실험결과 및 고찰

3.1 티타늄 가공 절삭력 측정실험

Fig. 3과 Fig. 4는 앞서 제시한 6가지 공구 재료의 인서트 팁(P10, K10, AB30, TT1300, KB90, TB650)을 절삭 속도 57m/min로 고정하고 공구의 이송속도를 0.06, 0.12, 0.18mm/rev, 절입깊이를 1.0, 1.5mm하여 절삭력의 크기변화를 측정하는 결과이다. 절삭력의 크기는 모든 조건에서 주분

력이 가장 크고 배분력과 이송분력 순으로 나타나며, 이송속도의 증가에 의해 배분력과 이송분력은 그 변화가 크지 않음을 알 수 있으나 주분력은 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 이러한 경향은 절입깊이가 다른 경우에도 비슷하게 유지됨을 알 수 있다. 절삭력 실험의 결과에서 6가지 공구재의 인서트 팁 중 K10이 가장 작은 절삭력을 나타낸 반면, 코팅공구인 TT1300은 가장 큰 절삭력을 나타냈다. 절삭력이 작게 나타난다는 것은 공구마멸의 원인이 공구와 피삭재 사이의

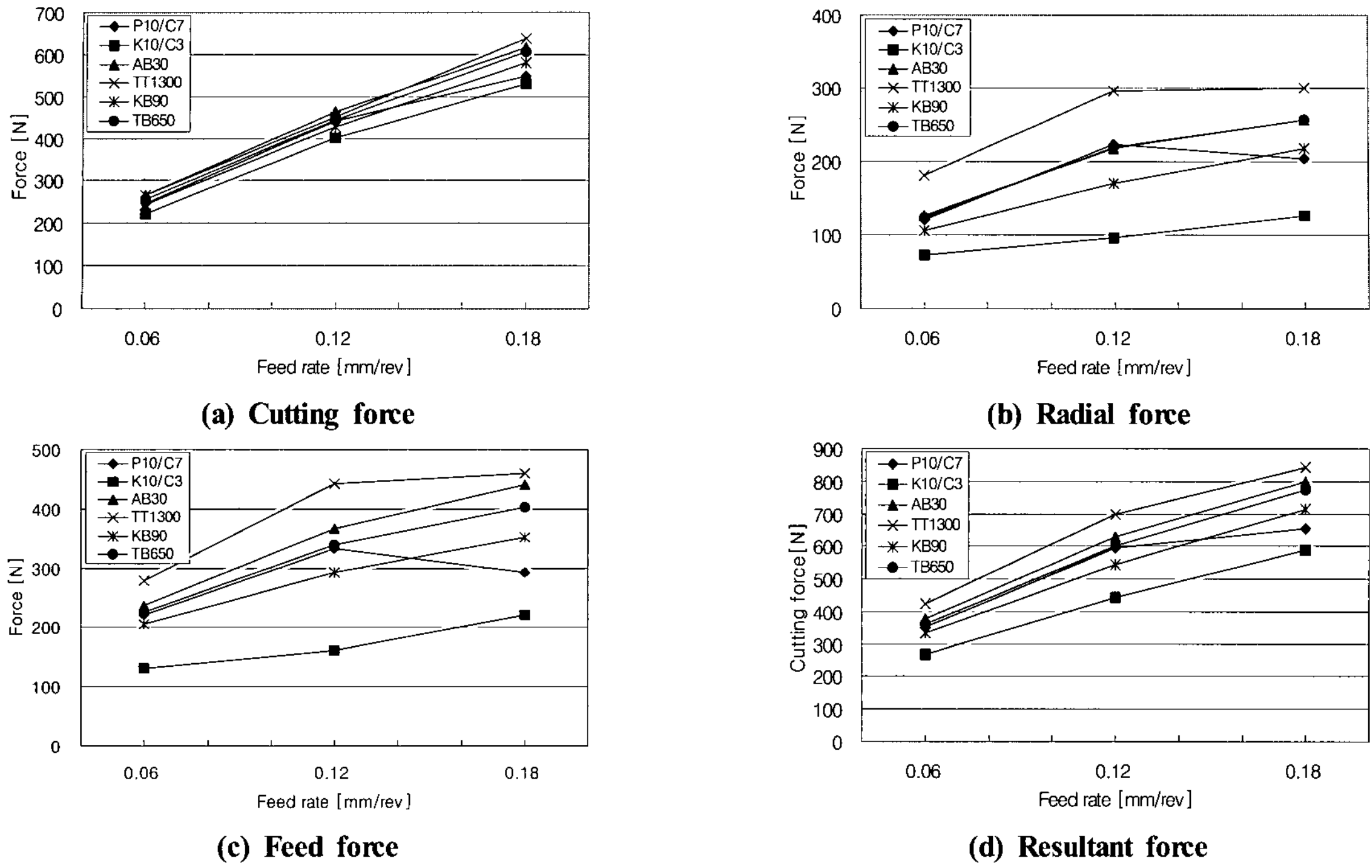


Fig. 4 Measured cutting force at depth of cut of 1.5[mm]

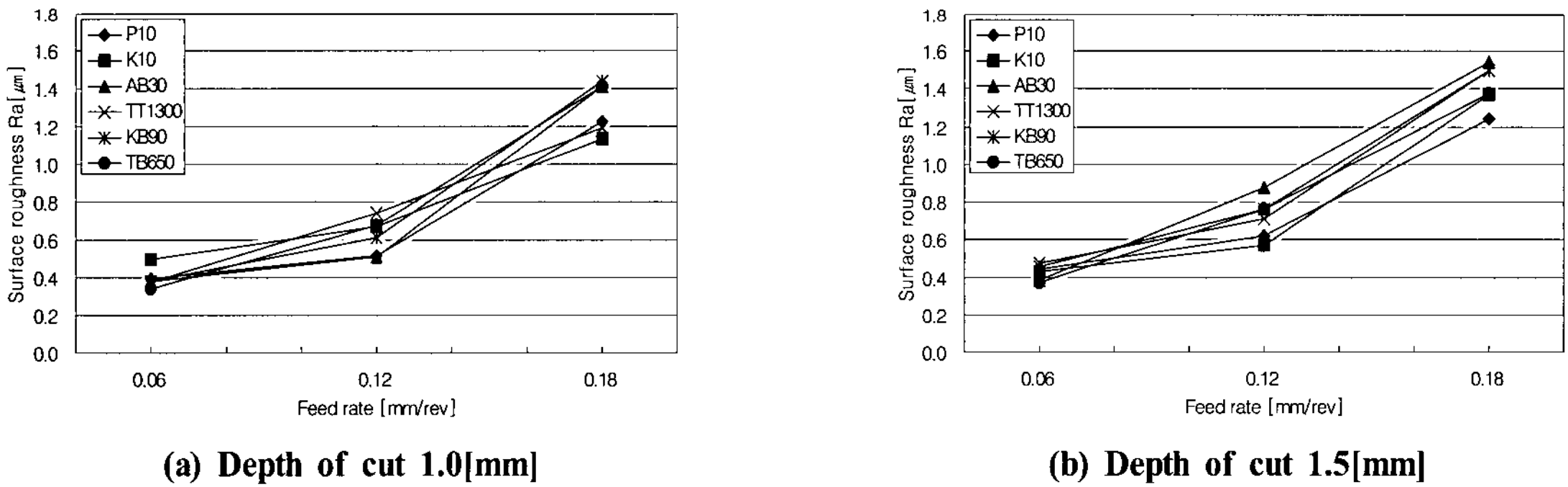


Fig. 5 Surface roughnesses for several feeds and tool materials

압력과 마찰이 작다고 볼 수 있으므로, 해당 공구의 수명도 우수할 것으로 기대할 수 있다.

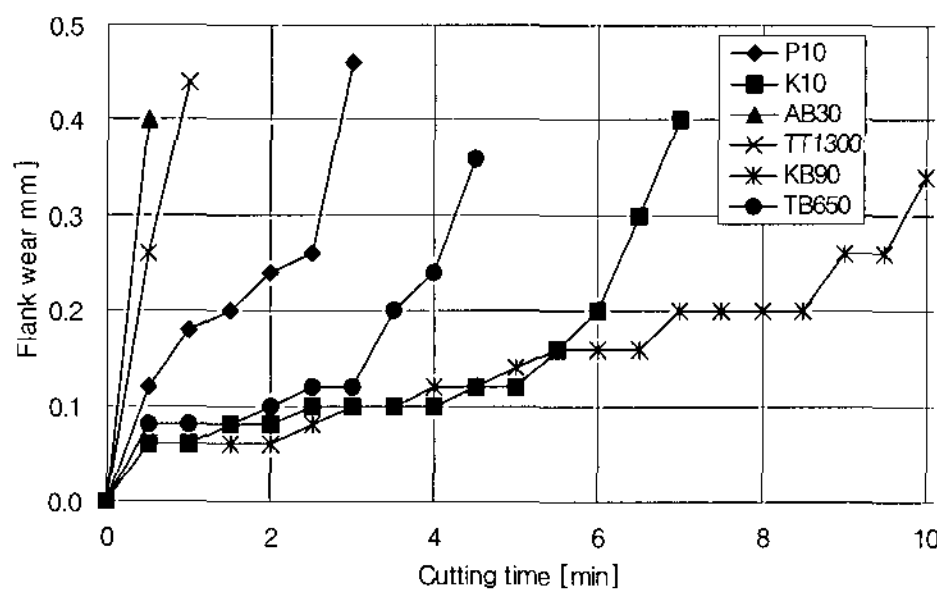
3.2 표면거칠기

Fig. 5는 실험에서 사용된 6가지 공구재의 인서트 팁(P10, K10, AB30, TT1300, KB90, TB650)에 대하여 절삭속도를 57m/min로 고정하고, 공구의 이송속도를 0.06, 0.12, 0.18mm/rev로 하여, 절입깊이를 1.0, 1.5mm로 하여 실험하고 이송속도의 변화에 따른 공작물의 표면거칠기를 측정

한 결과이다. 표면거칠기는 예상대로 절입깊이의 변화에는 별다른 차이가 없고, 이송속도의 증가에 따라서는 그 크기가 증가함을 알 수 있다. 또한, 6가지 공구재의 인서트 팁에 따른 표면거칠기는 별다른 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다. 따라서 인서트 팁의 재종의 차이와 절입깊이의 변화는 표면거칠기에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 우수한 표면거칠기를 얻기 위해서는 이송속도를 감소시키는 것이 용이한 수단임을 알 수 있다.

3.3 절삭속도에 따른 공구마멸특성

Fig. 6은 6가지 종류의 인서트 팁에 대하여 이송속도와 절입깊이를 각각 0.12mm/rev, 1.5mm로 일정하게 하고, 절삭속도를 90, 110m/min로 변화를 주면서 가공시간에 따른 여유면 마멸량의 변화를 측정하여 얻은 결과이다. 각각의 공구에 대하여 실제 절삭시간의 매 30초마다 여유면 마멸량을 측정하였으며, 여유면 평균 마멸랜드(wear land) 폭이 공구수명 한계치인 0.3mm에 도달할 때까지 진행하였다⁸⁾. 절삭속도가 다른 두 가지 경우를 비교하였을 때 절삭속도가 증가할수록 여유면의 평균 마멸량이 급격히 증가함을 보여 준다. 따라서 일반 강재의 가공에서 얻을 수 있는 마멸특성과 마찬가지로 티타늄가공에서도 절삭속도를 작게 하는 것이 공구수명에 유리하다는 것을 알 수 있다. 절삭속도 90m/min에서는 CBN 재종인 KB90이 가장 우수한 공구수명을 보였으며, K10과 TB650 순으로 공구수명이 우수하였다. 또한 절삭속도 110 m/min에서도 KB90이 가장 우수한 공구수명을 나타냈으며, TB650과 K10 순으로 공구수명이 우수하였다.



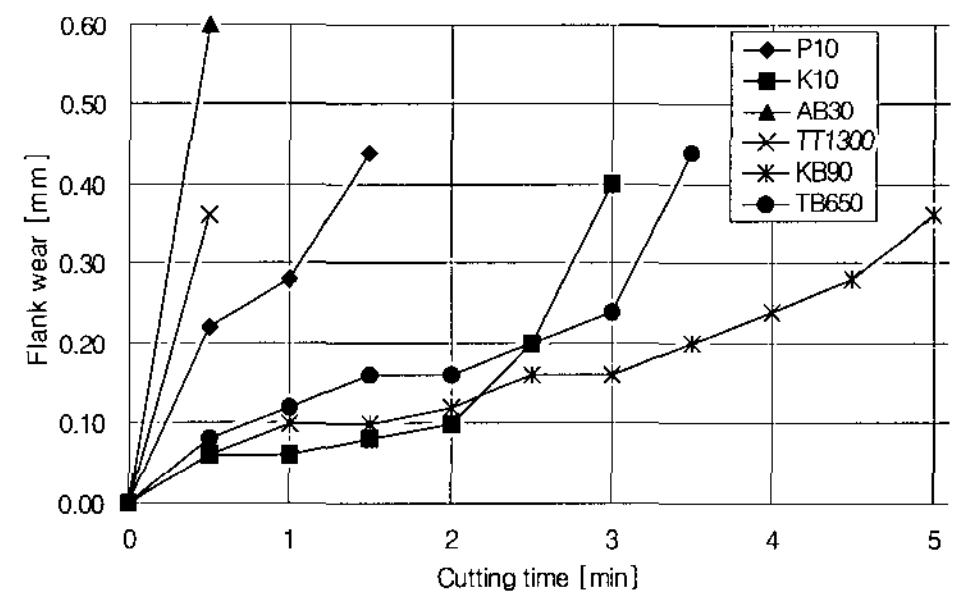
(a) Cutting speed 90[m/min]

Fig. 7은 6가지 공구 재질에 대하여 두 가지의 절삭속도에서 공구의 수명이 다할 때까지의 절삭량(cutting volume)을 비교하여 나타낸 것이다. 6종류의 공구재 각각에 대한 절삭속도에 따른 절삭량의 비교에서 공구수명이 유리한 절삭속도에서 가공할 때 총 절삭량도 증가됨을 알 수 있다. 따라서 공구의 종류에 관계없이 절삭속도를 작게 하는 것이 공구수명 내에 절삭량을 증가시켜 보다 경제적임을 알 수 있다.

6종류의 공구재에 대한 공구수명 실험에서 두 가지의 절삭속도에 관계없이 KB90이 가장 우수한 공구수명을 나타냈다. 초경공구인 K10은 CBN의 공구수명에는 못 미치지만 CBN 공구에 비해 훨씬 저가임을 고려할 때 우수한 생산성을 갖으면서도 높은 경제성을 유지하는 것으로 판명되었다.

3.4 이송속도에 따른 공구마멸특성

Fig. 8은 P10 인서트 팁을 절삭속도를 57m/min로 일정하게 하고, 이송속도를 0.06, 0.12, 0.18mm/rev로 변화를 주면서 가공시간에 따른 여유면 마멸량의 변화를 측정하여 얻은 결과이다.



(b) Cutting speed 110[m/min]

Fig. 6 Flank wears according to cutting speed(f=0.12mm/rev)

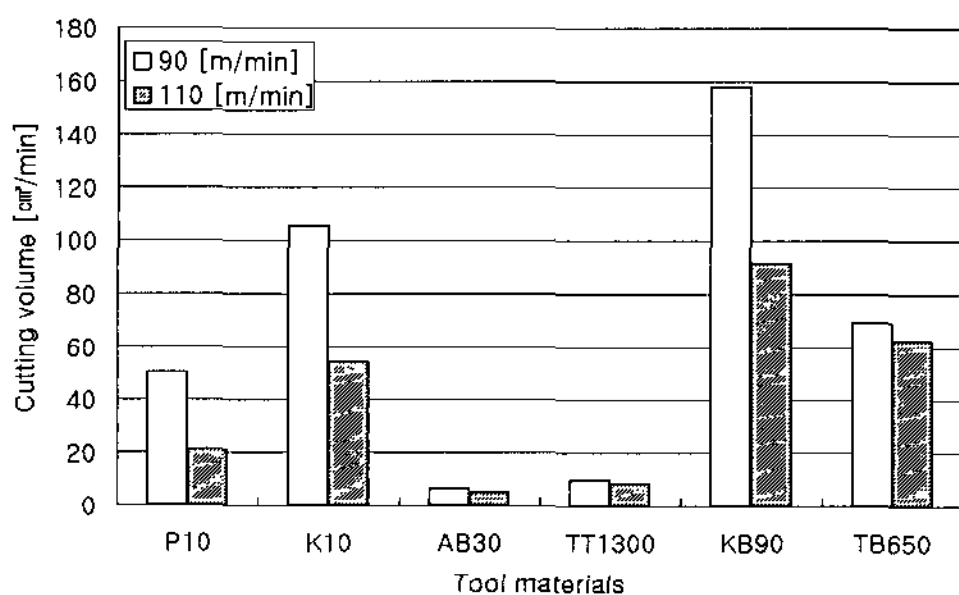


Fig. 7 Total cutting volumes for 6 tool materials during tool lifes(f=0.12mm/rev)

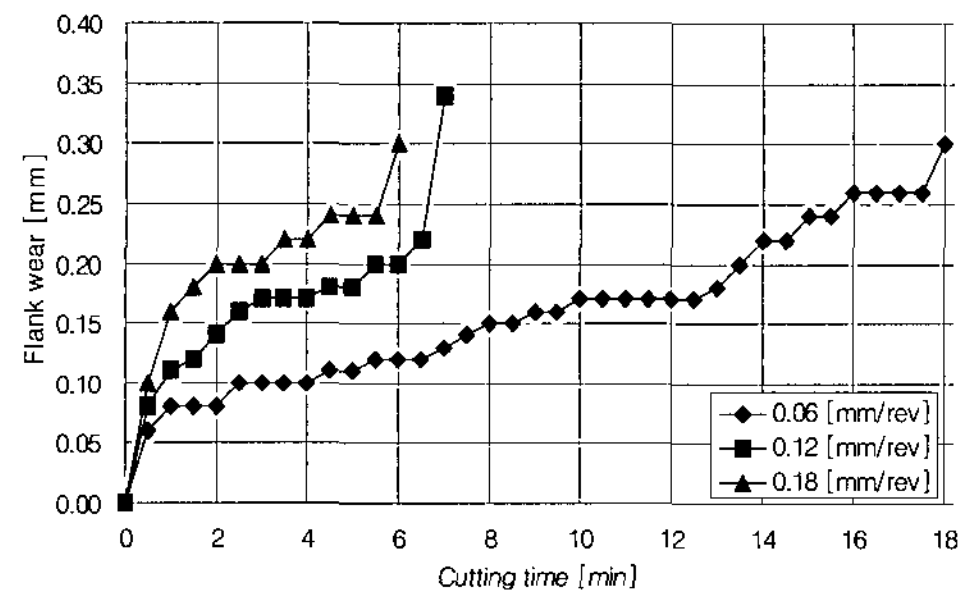


Fig. 8 Flank wears according to feed rate(v=57m/min)

다. 각각의 이송속도에 대하여 매 30초마다 마멸 정도를 측정하였으며, 여유면 평균 마멸랜드 폭이 공구수명 한계치인 0.3mm에 도달할 때까지 진행하였다.

이송속도가 증가함에 따라서 여유면 마멸속도도 급속히 증가하여 공구의 수명이 단축됨을 보여준다. 따라서 티타늄 가공에서는 이송속도를 작게 하는 것이 공구수명에 유리하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 티타늄합금의 절삭가공에서 다양한 공구재와 가공속도, 이송속도에 따른 가공특성을 조사하고자 하였으며, 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 6가지 공구재의 인서트 팁에 대한 절삭력 측정실험에서 K10 재종이 가장 작은 절삭력을 나타내었다.
- (2) 인서트 팁의 재질과 절입깊이의 변화는 가공면의 표면거칠기에 거의 영향을 미치지 않았으며, 일반절삭의 경우와 같이 이송이 작을수록 우수한 표면거칠기를 보여주었다.
- (3) 공구마멸실험을 통하여 CBN 공구인 KB90이 티타늄합금의 가공에 가장 긴 수명을 보여 주었으나, 생산성과 경제성을 고려하였을 때 공구수명에 큰 차이가 없는 WC 공구계열의 K10이 티타늄 절삭에 가장 우수한 공구로 판명되었다.
- (4) 같은 절삭속도에서 이송속도가 증가 할수록 공구마멸이 급속히 증가됨을 알 수 있었다. 따라서 이송속도를 감소시키는 것이 공구수명에 유리하다는 것을 알 수 있었으며, 일반강재 가공에서 이송속도가 공구수명에 주는 영향이 작은 경우와는 어느 정도 다른 결과가 얻어졌다.

후 기

본 연구는 순천대학교 산학협력중심대학 및 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Lee, Y. T., Kim, S. E., Hyun, Y. T., and Jeong, H. W., 2001, *Advanced Materials of the Dream Titanium*, The Korea Metal Journal, Korea, pp. 11~30.
- (2) Lee, Y. T. and Lee, J. H., 2006, *Machining Technology Titanium*, The Korea Metal Journal, Korea, pp. 45~65.
- (3) Kim, N. Y., Ko, J. B., and Lee, D. J., 2002, "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.
- (4) Lee, S. C., 2005, "Study on the Cutting Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy Using TiAlN(PAD) Coated Tool," Master Dissertation, Chosun University, Republic of Korea
- (5) Wang, Z. G., Wong, Y. S. and Rahman, M., 2005, "High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 105~114.
- (6) Ezugwu, E. O., "Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 1353~1367.
- (7) Taegutec, 2006, Catalogue(Turning Applications), Republic of Korea.
- (8) KS, 2003, *Tool-life testing with single-point turning tool.*, KS B ISO 3685, Republic of Korea.
- (9) Kim, N. Y., Ko, J. B., and Lee, D. J., 2003, "A Study on the Machining Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 20~28.
- (10) Hong H. P., Oh, S. H., and Seo, N. S., 1989, "A study on the Machinability of Titanium," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 45~51.
- (11) Hong, W. P., 2000, "A Study on the Machining Characteristics in Turning of Titanium Ti-6Al-4V Alloy," Doctoral Dissertation, Chungnam National University, Republic of Korea.