

티타늄 황삭가공에 있어서 절삭공구의 마모 특성에 관한 연구

배명환^{*1)} · 정화²⁾ · 박형렬²⁾

경상대학교 기계설계학과 공학연구원^{*1)} · 한국폴리텍대학 진주캠퍼스 컴퓨터응용기계과

A Study on Wear Characteristics of Cutting Tools in a Titanium Roughing Cut Machining

Myung-whan Bae^{*1)} · Hwa Jung²⁾ · Hyeong-yeol Park²⁾

¹⁾Engineering Research Institute, Department of Mechanical Engineering for Production, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea

²⁾Department of Computer Applied Mechanical, Jinju Campus of Korea Polytechnic, Gyeongnam 52828, Korea
(Received 24 August 2015 / Revised 20 November 2015 / Accepted 26 November 2015)

Abstract : The application of titanium has been gradually rising because the utilizing ranges for low weight and high strength are rapidly increased by the need for improving the fuel economy in production industries such as the aviation and automotive in recent. The purpose in this study is to investigate the appropriate cutting conditions on the life of flat and round end mills by measuring the maximum cutting temperature relative to the machining time, and calculating the wear rates of cutting tool with the spindle speed and feed rate of vertical machining center as a parameter in the titanium roughing cut machining which is widely used in critical parts of aircraft, cars, etc. When the wetted roughing cut machining of titanium with a soluble cutting oil is conducted by the flat and round end mills, the maximum cutting temperatures for a variety of spindle speed and feed rate are measured at ten-minute intervals during 60 minutes by an infrared thermometer, and the wear rates of cutting tool are calculated by the weight ratios based on tool wear before and after the experiment. It is found that the maximum cutting temperature and the wear rates of cutting tool are raised as the cutting amount per tool edge is increased with the rise of feed rate, in this experimental range, and as the frictional area due to the rise of contacting friction numbers between tool and specimen is increased with the rises of cutting time and spindle speed. In addition, the increasing rate of maximum cutting temperature in the flat and round end mills are the highest for the cutting time from 50 to 60 minutes, and the wear rate of cutting tool in the flat end mill is 1.14 to 1.55 times higher than that in the round end mill for all experimental conditions.

Key words : Titanium roughing cut machining(티타늄 황삭가공), Flat and round end mills(평면 및 라운드 엔드 밀), Vertical machining center(수직 머시닝센터), Maximum cutting temperature(최대 절삭온도), Wear rates of cutting tool(절삭공구 마모율), Spindle speed(주축회전속도), Feed rate(이송속도)

1. 서론

티타늄은 내열성, 내식성 및 내마모성이 우수할 뿐만 아니라, 강에 비해 비중이 작고, 탄성이 2배 이상 높지만, 재료의 단가가 높고 열전도율과 전기전

도계수가 다른 금속에 비하여 낮기 때문에, 가공 시에 공구의 온도가 높아지고 공구의 마모가 빠르게 진행되어 공구파손이 쉽게 발생된다. 따라서 티타늄은 항공우주 구조물, 첨단무기류, 터빈부품 등에 제한적으로 사용되어 왔다. 그런데 최근 항공 및 자동차 산업에서는 연비 향상의 필요성 때문에, 저중

*Corresponding author, E-mail: mwbae@gnu.ac.kr

량, 고강도 제품의 사용범위가 급격하게 증가되어 티타늄의 사용비율도 점점 증가하고 있다.

한편, 고강도의 재료특성으로 인해 티타늄은 절삭가공 시에 공구날 끝의 절삭저항이 커서 절삭칩이 날에 용착하는 현상이 발생하여 날 주위에서 발생된 절삭열의 확산이 늦어진다. 이 때문에 공구의 고온화가 빨라져 마멸진행도 빠르게 촉진되어 절삭공구의 수명이 단축된다. 또한, 강도가 높기 때문에 생산성이 낮을 뿐만 아니라, 가공된 부품의 표면 거칠기가 좋지 않아 난삭재로 분류된다.

Zlatin 등^{1,2)}은 신소재 및 티타늄의 가공을 이용해 티타늄 합금의 기계적 성질과 가공성에 대한 연구를 하였고, Komanduri 등^{3,4)}은 난삭재인 티타늄 합금의 가공을 통해 칩형성 과정을 연구하였다. Mcquillan 등⁵⁾과 Kahles 등⁶⁾은 기계가공에 있어서 티타늄 합금의 선삭, 연삭, 드릴링 등 공구의 절삭성능에 대하여 각각 연구를 하였다.

국내에서는 강재의 절삭가공에 대한 연구가 많이 수행되어 왔지만, 항공기 및 자동차 중요부품에 널리 사용되고 있는 난삭재인 티타늄의 절삭조건에 대한 연구는 아직 미미한 상태이다.^{7,8)} 최근 국내 산업현장에서는 생산성을 향상시키기 위해 기존에 사용해온 볼 엔드밀과 평면 엔드밀의 장점을 이용한 라운드 엔드밀을 황삭 절삭가공에 사용하고 있다.^{9,10)}

본 연구에서는 최근 항공기, 자동차 등의 중요부품에 많이 사용되고 있는 티타늄의 황삭 절삭가공에 있어서 라운드 및 평면 엔드밀의 공구형상에 따른 수명을 조사하기 위해 수직 머시닝센터의 주축회전 속도와 이송속도를 파라미터로 하여 절삭시간에 대한 최대 절삭온도를 측정하고, 절삭실험 전후의 공구마모량을 측정해 공구마모율을 계산하여 적정 절삭의 조건을 비교하여 고찰하는 것이 목적이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 수직 머시닝센터는 국내 W사에서 제작한 3축 수직형의 중속 절삭용으로 설계하여 제작된 장비로 최대 주축회전속도가 8,000 rpm이고, X축과 Y축의 최대 이송속도는 500 mm/min이다.

주요제원을 Table 1에 나타내고 있다.

절삭실험에 사용된 국내 T사 제작의 $\phi 18$ mm, 날 각도 30°, 평면 4날 공구는 TiAN으로 코팅된 초경합금 평면 엔드밀(HES 4180T TT9030)과 이러한 초경합금 평면 엔드밀의 모서리에 R 3 mm로 연삭한 라운드 엔드밀인데, Fig. 1과 Table 2와 3에 엔드밀의 형상과 제원을 나타내고 있다.

본 실험에 사용된 티타늄은 비중이 철보다 작고, 강도가 탄소강과 같아 항공기 주요부품의 주재료로 사용되고 있는 반면, 고온에서 쉽게 산화되고 고가이며 절삭가공이 어려운 것이 단점이다. 시편의 크기는 400 mm × 400 mm × 400 mm로 제작하였고, 60분 동안 연속 절삭을 위해 CATIA 프로그램에서 수직 머시닝센터 NC 코드를 만들어 절삭실험을 하였다. Table 4와 5에는 시편의 화학적 성분과 기계적

Table 1 Specifications of vertical machining center

Items	Specifications	
Type	VX-500	
Maximum spindle speed (rpm)	8,000	
Maximum feed rate	X axis (mm/min)	500
	Y axis (mm/min)	500
	Z axis (mm/min)	450
Maximum stroke	X axis (mm)	1,060
	Y axis (mm)	510
	Z axis (mm)	635
Table size (mm)	1,200 × 500	
Controller	FANUC 0imc	
Tool No.	40	

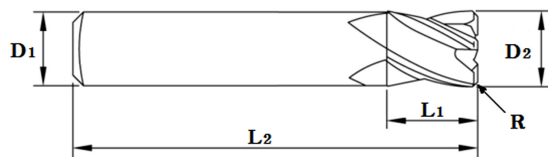


Fig. 1 Shape of endmill

Table 2 Dimensions of flat endmill

D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	R(mm)
18	18	40	88	0

Table 3 Dimensions of round endmill

D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	R(mm)
18	18	40	88	3

Table 4 Chemical compositions of titanium (wt%)

Ti	Al	V	Fe	O2	C	N ₂	H	Y
89.13	6.2	4.19	0.2	0.17	0.027	0.023	0.016	0.001

Table 5 Mechanical properties of titanium

Tensile strength, Ultimate (MPa)	1,012.19
Tensile strength, Yield (MPa)	935.65
Elongation, Break (%)	20.8
Hardness (HRC)	36

특성을 나타내고 있다.

이전 연구¹¹⁻¹³⁾에서는 비수용성 절삭유가 표면 거칠기에 가장 우수하였지만, 본 연구에서는 티타늄 절삭 중에 발생하는 고온의 칩이 비수용성 절삭유를 발화시킬 수 있는 위험성이 있기 때문에, 수용성 절삭유를 사용하였다. 절삭가공 중 시험편과 공구 냉각에 적용된 수용성 절삭유는 국내 K사의 비철 금속용으로 본 연구에서는 물과 원액을 1:1로 혼합하여 사용하였고, 물성값은 Table 6과 7에 나타내고 있다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 깊이 5 mm, 공구 경로간격 12.6 mm(전부하 70%)인 시험편 절삭조건 상태에서 수직 머시닝센터의 엔드밀에 의해 절삭실험을 하였으며, 절삭 시에 시험편의 떨림이 발생하지 않도록 유

Table 6 Chemical compositions of soluble cutting oil

Properties	CAS No.	Mixed rate (%)
Deionized water	7732-18-5	20 ~ 30
Mineral oil	64742-65-0	5 ~ 20
Carboxylic acid	142-22-0	5 ~ 15
Alkanolamine	693-23-2	20 ~ 30
Fatty amide	102-71-6	5 ~ 15
PEG oleate	68155-20-4	4 ~ 10

Table 7 Physical properties of soluble cutting oil

Specific gravity @15/4°C	1.0002 (ASTM D 1298)
Color	Bluish green (ASTM D 1500)
Surface tension (dyne/cm)	35.4 (KS M 2525)
Non-volatile content (%)	53.6 (KS M 2525)
Ph (3.3% solution)	9.19 (KS M 0011)
Foaming	0.0 (KS M 2525)
Corrosion	Pass (KS M 2525)

압적으로 견고하게 고정하였다.

주축회전속도는 1,000에서 1,600 rpm까지 200 rpm 간격으로, 이송속도는 60에서 120 mm/min까지 20 mm/min의 간격으로 60분 동안 각 공구에 의해 습식 절삭 실험을 하였는데, Table 8에는 절삭조건을 나타내고 있다.

절삭가공 중, 시험편과 공구에 발생하는 열을 측정하기 위해 휴대용 적외선 온도측정기를 마그네틱에 장착하여 수직 머시닝센터 주축에 부착하였다. 휴대용 적외선 온도측정기의 초점은 엔드밀 날 끝 부분으로부터 300 mm 떨어진 지점에 조준하였다. 휴대용 적외선 온도 측정기의 주요제원은 Table 9에 나타내고 있다.

절삭공구의 마모율은 절삭가공 전에 엔드밀을 알코올로 세척한 후, 전자저울로 중량을 측정하고, 실험조건에 따라 60분 동안 절삭가공을 한 후 절삭전과 동일한 방법으로 절삭공구를 알코올로 다시 세척한 후 중량을 측정하여 계산하였다. 전자저울의 주요제원은 Table 10에 나타내고 있다.

Table 11에는 광학현미경의 주요제원을 나타내고 있다. 절삭공구 날 부분의 마모를 관찰하기 위해 광학현미경에 부착된 CCD 카메라로 형상을 컴퓨터의 측정프로그램(XT-measure)에 의해 이미지로 저장하였다. 이 때, 각 절삭공구 마모형상을 대물렌즈

Table 8 Cutting conditions

Cutting tool type	Round end mill, flat end mill
Spindle speed (rpm)	1000, 1200, 1400, 1600
Feed rate (mm/min)	60, 80, 100, 120
Depth of cutting (mm)	5
Tool path distance (mm)	12.6
Cutting time (min)	60
Cooling method	Water soluble cutting oil

Table 9 Specifications of infrared thermometer

Items	Specifications
Type	FLUKE 568
Temperature range (°C)	- 40 ~ 650
Accuracy (°C)	±1.0
Spectral response (µm)	8 ~ 14
Response time (s)	below 0.5
Minimum spot size (mm)	19
Communication	USB 2.0

Table 10 Specifications of precision electronic scale

Items	Specifications
Type	XT 1220M
Weighing range (g)	220
Taring range subtractive (g)	220
Linearity (mg)	± 1.5
Calibration system (SCS)	built-in
Balance pan (mm)	135

5배율과 대안렌즈 1배율의 총 5배율로 측정하여 관찰하였다.

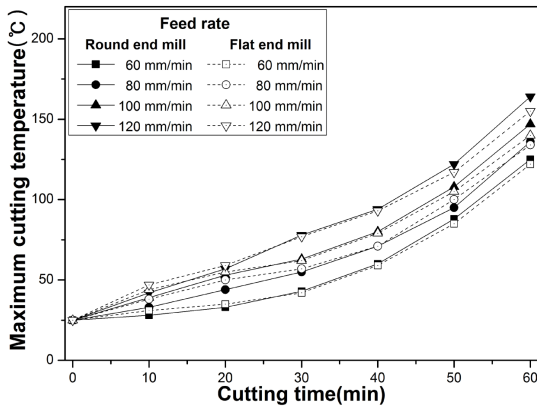
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 최대 절삭온도 특성

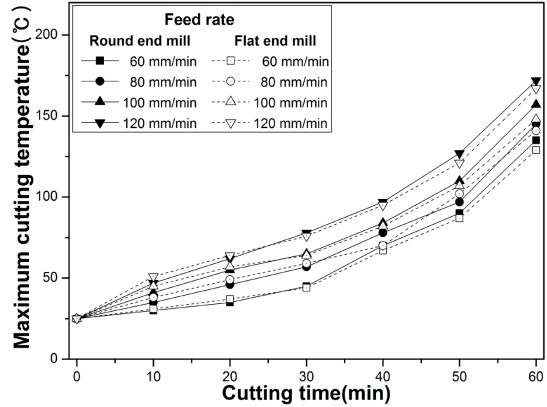
Fig. 2에서는 라운드 및 평면 엔드밀의 이송속도

Table 11 Specifications of optical microscope

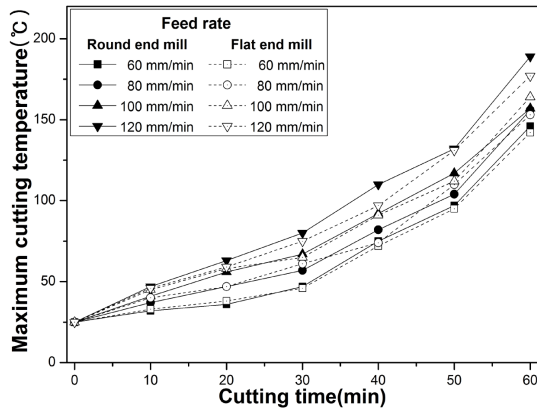
Item	Specifications
Model	Mitutoyo TF-510F
Travel of X and Y table (mm)	50, 50
Digital X, Y counter resolution (mm)	0.001, 0.005
Measuring accuracy (μm , @20°C)	3 + 0.02L (L = measuring length: mm)
Focusing distance (mm)	150
Surface illuminator lamp (No.)	2
Eyepiece magnification	× 10, × 15, × 20
Objective lens magnification	× 1, × 3, × 5, × 10, × 20, × 50, × 100
Resolution of magnification (μm)	9.2(× 1), 3.9(× 3), 2.5(× 5), 1.5(× 10), 0.7(× 20), 0.5(× 50), 0.7(× 100)



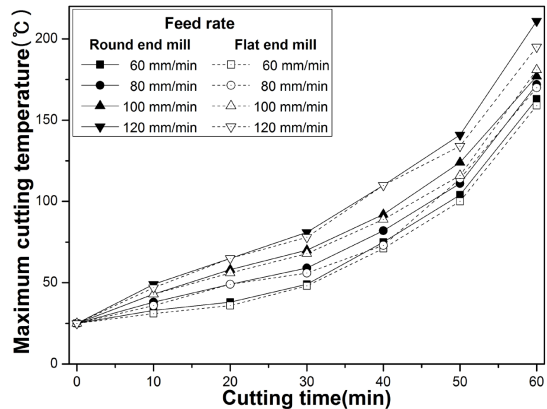
(a) 1,000 rpm



(b) 1,200 rpm



(c) 1,400 rpm



(d) 1,600 rpm

Fig. 2 Effect of cutting time on the maximum cutting temperature of round and flat end mills for the respective spindle speed as a parameter of feed rate in the cutting depth of 5 mm and tool path distance of 12.6 mm

와 주축회전속도를 변화시키면서 60분의 절삭시간 동안 10분 간격으로 시험편의 절삭면과 엔드밀 절삭부분에서 발생하는 최대 절삭온도의 측정값을 나타내고 있다. 정확한 온도측정을 위해 절삭실험은 주변 및 절삭유 온도를 25°C로 유지한 상태에서 실시하였다.

그림으로부터 본 연구의 실험범위에서는 절삭시간, 주축회전속도 및 이송속도가 증가될수록 최대 절삭온도 측정값이 상승되었다. 이것은 이송속도를 증가시키면 절삭공구의 날 당 절삭량이 증가되고, 절삭시간 및 주축회전속도를 증가시키면 엔드밀과 시험편의 마찰횟수가 증가하여 마찰면적이 증가하기 때문이다.

최대 절삭온도 측정값은 절삭가공시간이 증가됨에 따라 상승되고 있는데, 30분을 초과하면서 상승 기울기가 커져서 본 실험의 절삭시간 50분에서 60분 사이에 라운드 및 평면 엔드밀의 최대 절삭온도 증가율이 가장 높게 나타났다. 이것은 장시간의 절삭가공에 따라 공구에 열이 축적되어 절삭날이 변형되었고, 마모되었을 뿐만 아니라, 파손 및 칩핑이 발생되었기 때문이다. 이러한 사실들은 절삭시간 50분에서 60분 사이에 티타늄 칩이 일부 산화되어 배출되는 것을 육안으로 확인함으로써 판단할 수 있었다. 또한, 절삭 중에 발생하는 소음을 측정기로 측정하지는 않았지만, 이 절삭시간 동안에 소음이 가장 크게 나타남도 확인할 수 있었다. 따라서 60분 이상의 절삭가공은 공구마모 등에서 바람직하지 않다고 판단된다.

3.2 절삭공구 마모율 특성

Fig. 3에서는 라운드 및 평면 엔드밀의 이송속도를 파라미터로 하여 주축회전속도에 따른 공구 마모율을 나타내고 있다. 여기서 공구 마모율은 절삭가공 전의 엔드밀 중량과 60분 동안 절삭가공 실험을 한 후의 중량을 측정한 다음, 마모량을 계산하여 백분율로 나타내었다.

Fig. 3에서 주축회전속도 및 이송속도가 증가하게 되면 절삭공구 마모율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 고찰한 최대 절삭온도 특성과 동일한 것으로 이송속도를 증가시키면 절삭공구 날

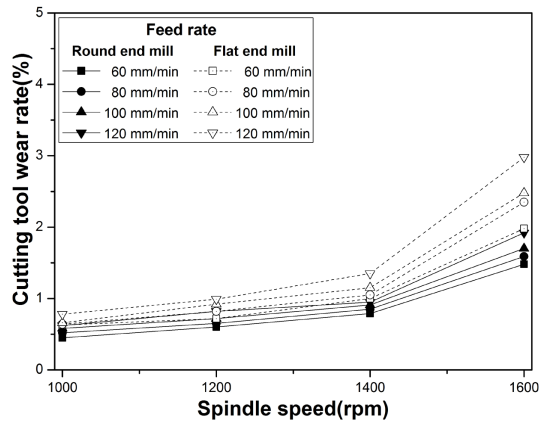


Fig. 3 Effect of spindle speed on the wear rate of cutting tool for round and flat end mills as a parameter of feed rate in the cutting depth of 5 mm and tool path distance of 12.6 mm

당의 절삭량이 증가되고, 주축회전속도를 증가시키면 엔드밀과 시험편의 마찰횟수가 증가하여 마찰면적이 증가하기 때문이다.

그림에서 본 실험의 모든 실험조건에 대한 평면 엔드밀의 절삭공구 마모율은 라운드 엔드밀의 마모율보다 최대 1.55배에서 최소 1.14배로 높게 나타났다. 특히, 동일조건에서 절삭가공 후의 평면 엔드밀의 마모율이 라운드 엔드밀의 마모율보다 높게 나타났는데, 이것은 절삭시 발생하는 응력이 평면 엔드밀의 날 끝부분에 집중되어 날 끝 변형, 파괴 및 마모가 라운드 엔드밀보다 크게 발생되었음을 의미한다.

그림에서 주축회전속도가 1,400 rpm를 초과하면 공구 마모율의 상승기울기가 커짐을 알 수 있다. 본 실험의 주축회전속도와 이송속도에 대한 적정범위를 파악하기 위해 Fig. 4와 같이 CATIA V5 툴 메이커 프로그램에 절삭에 필요한 주축회전속도와 이송속도의 이론식을 사용하여 계산한 결과, 최대 주축회전속도는 1,461 rpm이, 최대 이송속도는 120 mm/min의 값이 산출되었다.

이러한 산출값에 의해 본 실험에서 주축회전속도가 1,400 rpm를 초과할 때 공구 마모율의 상승기울기가 커져 마모율이 급상승하고, 1,400 rpm 이하의 절삭조건에서는 상승기울기가 완만하여 마모율도 크지 않게 가공이 이루어진 것으로 판단할 수 있다.



Fig. 4 Maximum spindle speed and feed rate of vertical machining center calculated by CATIA V5 tool maker

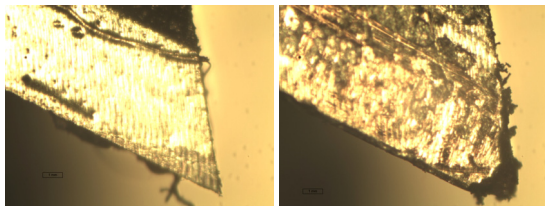
Fig. 5와 6에는 평면 및 라운드 엔드밀을 사용하여 절삭가공을 하기 전과 60분 동안 사용을 한 후의 절삭공구에 대한 날 끝부분을 광학현미경에 의해 관찰한 표면 미세구조의 형상을 나타내고 있다. 그림에서 주된 절삭이 이루어지는 절삭공구의 측면 날 끝부분이 심하게 마모된 것을 볼 수 있다. 특

히, 평면 엔드밀은 절삭과정 중 날 끝부분에 응력이 집중되어 날 끝이 심하게 파괴되었고, 라운드 엔드밀은 라운드부분의 날이 심하게 파괴된 것을 볼 수 있다.

4. 결론

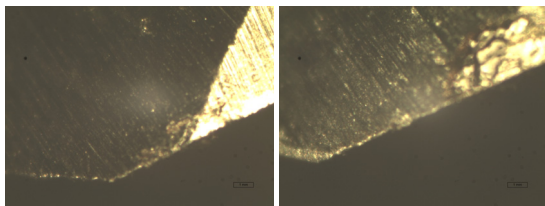
본 연구에서는 티타늄의 황삭가공 시 라운드 및 평면 엔드밀을 사용하여 절삭 깊이 5 mm, 공구경로 간격 12.6 mm, 주축회전속도 1,000 ~ 1,600 rpm 및 이송속도 50 ~ 200 mm/min의 절삭가공 조건에서 60분 동안 절삭실험을 하여 과정 중에 발생하는 최대 절삭온도 측정 및 절삭공구 마모율 계산에 의해 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

- 1) 본 연구의 실험범위에서는 이송속도가 증가하면 절삭공구의 날 당 절삭량이 증가하고, 절삭가공시간 및 주축회전속도가 증가하면 공구와 시험편의 마찰횟수가 증가하여 마찰면적이 커지기 때문에 최대 절삭온도 및 공구 마모율이 증가되었다.
- 2) 절삭가공 시간 50분에서 60분 사이에 라운드 및 평면 엔드밀의 최대 절삭온도의 증가율이 가장 높았다.



(a) Before cutting (b) After cutting of 60 minutes

Fig. 5 Microstructure of surface on a flat end mill



(a) Before cutting (b) After cutting of 60 minutes

Fig. 6 Microstructure of surface on a round end mill

- 3) 평면 엔드밀의 공구 마모율은 모든 실험조건에서 라운드 엔드밀보다 최대 1.55배에서 최소 1.14배 높았다.
- 4) CATIA V5 툴 메이커 프로그램의 이론식에 의해 산출된 최대 주축회전속도 1,461 rpm 및 최대 이송속도 120 mm/min의 값에 의해 본 실험에서 주축회전속도가 1,400 rpm를 초과할 때 공구 마모율의 상승기울기가 커져 마모율도 급상승되었다.

후 기

본 연구는 2단계 BK21사업 첨단기계항공고급인력양성사업단의 지원과 2015년도 경상대학교 발전기금재단 재원을 받아 수행되었기에 도움을 준 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) N. Zlatin, J. D. Christopher and J. T. Commentt, "Machining of New Materials," USAF Technical Report AFML-TR-73-165, 1973.
- 2) N. Zlatin, "Machining of Titanium," Process Symposium on Machining and Grinding Titanium, Watertown Arsenal, Watertown, Ma. March 31, U. S. Army Ordnance Corps, p.36, 1953.
- 3) R. Komanduri and B. F. Von Turkovich, "New Observations on the Mechanism of Chip Formation When Machining Titanium Alloys," Wear, Vol.69, pp.179-188, 1981.
- 4) R. Komanduri, "Some Clarifications on the Mechanics of Chip Formation When Machining Titanium Alloys," Wear, Vol.76, pp.15-34, 1982.
- 5) A. D. Mcquillan and M. K. Ecquillan, "Titanium," Journal of the Franklin Institute. Vol.261, p.574, 1956.
- 6) J. E. Kahles, M. Field, D. Eylon and F. H. Froes, "Machining of Titanium Alloys," Journal of Metals, Vol.37, No.4, pp.27-34, 1985.
- 7) G. J. Cho, J. N. Park and S. C. Lee, "A Study on the Cutting Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy Using TiAlN(PVD) Coated Tool," The Autumn Conference Proceeding of the Korea Society of Manufacturing Process Engineers, pp.78-81, 2004.
- 8) H. C. Lee, H. J. Kim and N. K. Kim, "Tapping Machining Characteristics of Titanium Hard-to-Cut Material," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.10, No.1, pp.80-86, 2011.
- 9) M. W. Bae, H. Y. Park, H. Jung and J. S. Song, "Investigation of Cutting Conditions on Surface Roughness Characteristics in Titanium Machining," Proceedings of International Symposium on Green Manufacturing and Applications, p. 1 (Electronic Form), 2013.
- 10) M. W. Bae, H. Jung, S. S. Park, H. Y. Park and L. Syaiful, "Effect of Cutting Conditions on Tool Wear Rates in Titanium Rough Machining," Proceedings of International Symposium on Green Manufacturing and Applications, p.1(Electronic Form), 2014.
- 11) H. Y. Park, M. W. Bae, H. Jung, M. S. Kang, "Effect of Cooling Method on Surface Roughness in High-speed Machining," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2679-2684, 2010.
- 12) H. Y. Park, M. W. Bae and H. Jung, "Effect of Cutting Depth on Surface Roughness of Al Alloy 7075 in High-speed Machining," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2442-2446, 2011.
- 13) M. W. Bae, H. Y. Park and H. Jung, "A Study on the Optimal Cutting Depth upon Surface Roughness of Al Alloy 7075 in High-speed Machining," Transactions of KSAE, Vol.21, No.5, pp.74-81, 2013.