

## 티타늄 합금의 밀링가공에서 평 엔드밀의 헬릭스각과 경사각의 영향 분석

예동희<sup>a</sup>, 구준영<sup>a</sup>, 박영군<sup>b</sup>, 김정석<sup>c\*</sup>**Analysis on the Effects of Tool Rake Angle and Helix Angle of a Flat End-mill in the Milling of Ti-alloy**Dong-Hee Ye<sup>a</sup>, Joon-Young Koo<sup>a</sup>, Young-Koon Park<sup>b</sup>, Jeong-Suk Kim<sup>c\*</sup><sup>a</sup> School of Mechanical Engineering, Pusan National University,  
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea<sup>b</sup> YG-1 Co., Ltd, Research and Development Center,  
120, Gaetbeol-ro, Yeonsu-Gu, Incheon 21999, Korea<sup>c</sup> School of Mechanical Engineering/Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University,  
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	21	July	2015
Revised	31	August	2015
Accepted	23	September	2015

*Keywords:*

Milling process  
Hard to cut material  
Tool shape parameter  
Finite element analysis  
Machining evaluation

**ABSTRACT**

In this study, the effect of the helix angle and rake angle of a flat end-mill in the milling of titanium alloy was investigated. Tool shape parameters such as helix angle and rake angle affect the cutting force, cutting zone temperature, vibration, and chip flow mechanism, which in turn determine tool life, surface integrity, and dimensional accuracy of the milling process. To investigate the effect of the helix and rake angles, a certain range of parameters was selected, and three-dimensional tool models were generated for finite element analysis (FEA) for each case. The cutting force and pressure on the tool flank face and rake face were investigated by FEA. Further, several tool models were proposed for machining tests. The cutting force characteristics were investigated by the machining tests.

**1. 서론**

티타늄 합금은 높은 비강도와 고온강도, 내부식성을 가지며 우주 항공, 의료기기, 자동차, 가스터빈 등 다양한 산업영역에서 널리 사용되는 소재로 티타늄 합금의 가공에 대한 필요성과 수요가 증가하고 있다. 티타늄 합금의 우수한 기계적 특성에서 기인하는 높은 절삭저항과 낮은 열전도율로 인해 가공영역에서 많은 열이 발생하고 발생한 열이 쉽게 배출되지 않기 때문에 절삭가공 시 가공영역의 온도가 높아지는 대표적인 난삭재로 분류된다. 고온영역에서 티타

늄 합금은 화학적 친화성에 의해 모재로부터 탈락된 소제가 공구면에 쉽게 응착되고, 소재의 응착과 탈락이 반복되면서 치핑이나 절삭저항 증가에 의한 마멸이 가속화된다<sup>[1,2]</sup>. 공구 마멸은 공구수명을 현저히 감소시키며, 가공물의 표면상태와 치수정밀도의 저하를 야기하여 생산 비용 및 시간의 증가로 이어진다.

난삭재의 가공성 향상을 위한 방법으로 고속가공 기술에 대한 연구, 가공조건을 최적화 하는 방법, 극저온 냉각을 이용한 가공에 대한 연구, 레이저 보조 가공에 대한 연구 등 다양한 연구가 진행되었다<sup>[2-5]</sup>. 또한 밀링가공에서 엔드밀 공구의 헬릭스 각, 경사각 등

\* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2334

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong-Suk Kim).

형상변수는 절삭력, 절삭분력의 비, 절삭영역의 온도, 가공 시 발생하는 진동, 전단특성 및 칩 흐름에 영향을 준다<sup>6,8)</sup>. 적절한 형상변수를 가지는 공구를 사용하여 생산성 향상에 기여하고 생산비용을 줄이는 효과를 얻을 수 있다.

공구 마멸이나 파단은 공구와 소재의 충격으로 인해 공구 끝단에서 발생하기 때문에 진동이 작은 공구가 공구 수명 측면에서 유리하다. 또한 가공 중 공구에서 발생하는 진동은 가공물의 표면조도, 치수정밀도에도 영향을 미치며 기계장비의 수명이나 작업장의 환경에도 영향을 미치기 때문에 반드시 고려해야 한다<sup>4)</sup>.

본 논문에서는 난삭성 소재인 티타늄 합금 중 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금에 대하여 공구형상에 따른 가공성 평가를 수행하고자 한다. 엔드밀 공구의 주요 형상변수인 헬릭스 각과 경사각 따른 가공특성을 파악하기 위해 각 형상 변수에 따라 모델링된 공구를 이용하여 유한요소해석을 수행하였고, 실제 공구를 제작하여 이를 이용한 가공성 평가를 수행하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석조건

유한요소해석에는 절삭가공 전용해석 프로그램인 Third Wave사의 AdvantEdge를 사용하였으며, 해석에 적용된 소재 및 가공조건을 Table 1에 나타내었다. 피삭재는 해석프로그램 상에서 표준 모델로 지원하는 Ti-6Al-4V로 적용하였으며, 일반적인 물성치를

Table 1 Cutting condition

Material	Ti-6Al-4V
Tool diameter	10.0 mm
Number of flute	4
Cutting direction	Down milling
Spindle speed	2,228 RPM
Feed rate	0.05 mm/tooth
Radial depth of cut	5.0 mm
Axial depth of cut	5.0 mm
Cooling condition	Dry cutting

Table 2 Material property of Ti-6Al-4V<sup>19)</sup>

Density	4.43 g/cc
Modulus of elasticity	114 GPa
Yield strength	1,100 MPa
Ultimate strength	1,170 MPa
Poisson's ratio	0.33
Thermal conductivity	6.70 W/m · K
Melting point	1,604-1,660°C

Table 2에 나타내었다. 헬릭스 각과 경사각을 형상변수로 하여 플랫 엔드밀 공구 형상을 3차원 모델링 하였으며, 정확한 해석을 위해 Fig. 1에 보인바와 같이 공구 모델의 요소 크기를 조정하였다. 소재와 접촉하는 공구 날의 끝단의 요소 크기를 0.04 mm, 가공 중 칩, 소재와 접촉하는 경사면과 여유면의 요소크기를 0.08 mm로 적용하였고, 소재에도 별도의 요소 크기 조건을 부여하였다. 가

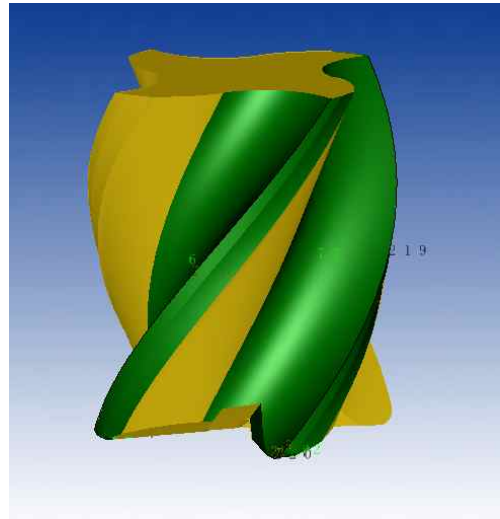


Fig. 1 Mesh generation of end mill tool

Table 3 Tool shape parameter for FEA

Experiment No.	Rake angle	Helix angle
1	2	35
2		40
3		45
4	5	35
5		40
6		45
7	10	35
8		40
9		45

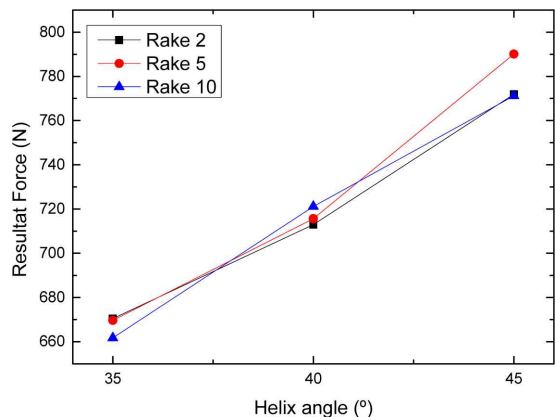


Fig. 2 Resultant cutting force characteristics depending on tool shape by FEA

공환경은 건식으로 적용하였다. 헬릭스 각과 경사각의 조건별 변수는 Table 3에 나타내었다.

각각의 공구 모델에 대해 같은 요소 크기조건, 절삭조건을 적용하여 해석을 수행한 뒤 절삭력, 공구 여유면과 경사면의 압력분포를 분석하였다. 공구와 소재가 접촉된 상태에서 이송과 함께 90° 회전하는 동안 각 축방향 절삭분력의 데이터를 획득하였고, 절삭력 합력과 RMS 평균 값을 계산하여 대푯값으로 선정하였다. 티타늄 합금의 가공에서 여유면과 소재의 좁은 접촉면적에서의 마찰이 공

구마멸의 주요 원인이므로 공구마멸에 대해 고려하기 위해 공구 경사면과 여유면상의 압력분포를 같은 시점과 위치에서 각 모델별로 비교하였다<sup>[3,5]</sup>.

### 2.2 유한요소해석결과

공구의 형상변수에 따른 절삭력 합력의 변화를 Fig.2에 나타내었다. 절삭력 합력의 경우 헬릭스 각의 증가에 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가 폭은 헬릭스 각 35°와 45°간의 절삭력 차이가 100 N 이상으로 나타났다. 해석조건인 경사각 2°~10° 범위에서 절삭력의 변화는 거의 나타나지 않았다.

각각의 경사각 조건에서 헬릭스 각에 따른 반경방향, 이송방향, 축방향 분력의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 경사각 2°, 5° 조건에서 공통적으로 헬릭스 각의 증가에 따라 절삭력이 증가하며, 반경방향, 축방향 절삭분력이 증가하였다. 이송방향 분력은 헬릭스 각에 큰 영향을 받지 않았다. 경사각이 2°인 조건에서는 헬릭스 각 35°에서 축방향 분력이 이송방향 분력보다 작았으나 헬릭스 각의 증가에 따라 축방향 분력이 증가하여 이송방향 분력보다 커졌다. 즉 절삭력

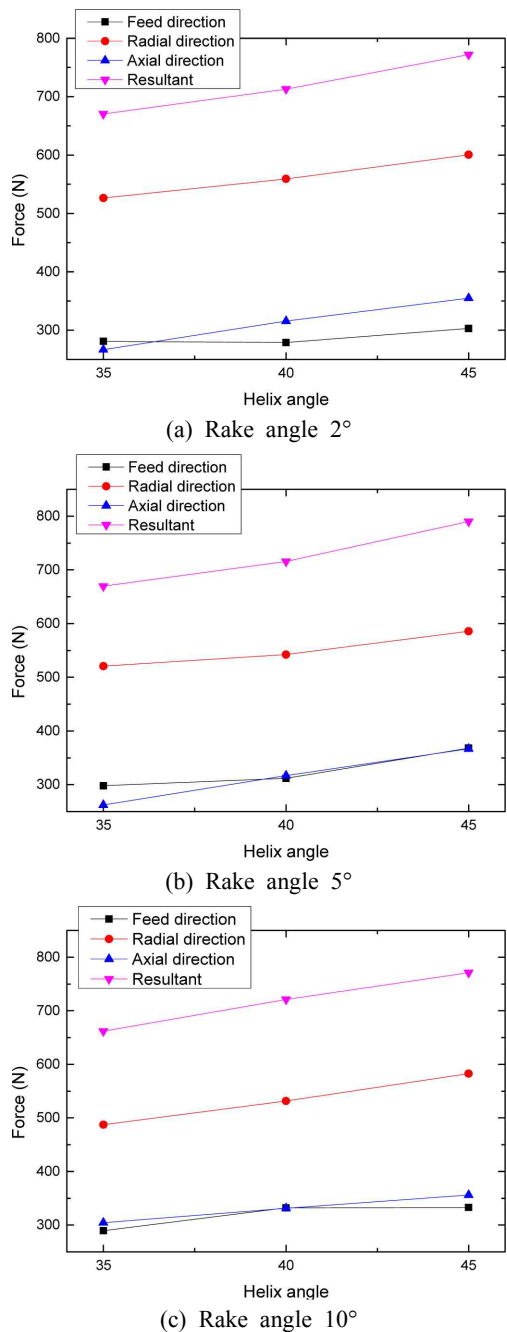


Fig. 3 Directional cutting force characteristics depending on tool shape by FEA

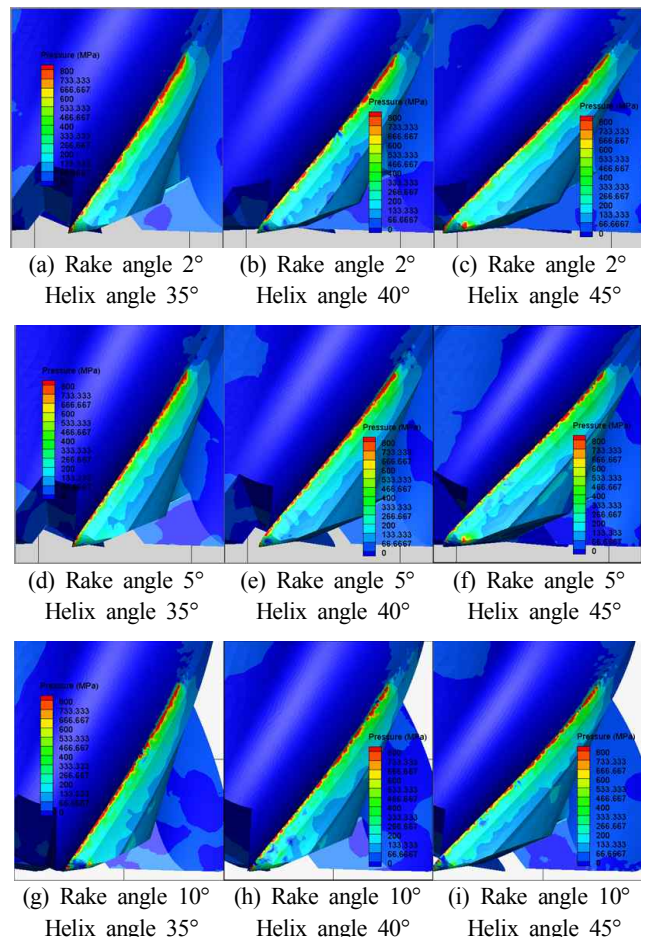


Fig. 4 Pressure distribution on tool flank face depending on tool shape by FEA

은 경사각보다 헬릭스 각에 더 민감한 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에는 해석결과에서 공구 여유면상의 압력분포를 나타내었다. 압력분포는 소재에 접촉하는 날 끝단에 집중되며 헬릭스 각이 커짐에 따라 압력의 크기는 작고 범위는 넓게 나타난다. 이는 헬릭스 각이 클 때 경사면과 가공 후 표면의 접촉 면적이 넓어지기 때문이다. 헬릭스 각이 작은 경우 좁은 범위에서 큰 압력이 발생하는 것으로 확인되며 경사각이 클수록 여유면상에서 발생하는 압력의 크기가 더 작은 것으로 나타났다.

Fig. 5에는 공구 경사면상의 압력분포를 나타내었다. 경사면의 압력은 생성된 칩과의 접촉으로 인해 발생한다. 헬릭스 각이 큰 경우 압력이 작으며, 경사각에 따라서는 유의미한 차이를 보이지 않았다.

경사면과 여유면에서 나타난 압력분포와 비교하였을 때, 여유면의 고압 영역이 더 넓게 나타나 압력으로 인한 공구마멸은 주로 플랭크 마멸의 형태로 나타날 것으로 판단된다. 여유면의 압력은 피삭재의 가공면과 공구의 접촉특성과 관계되며 압력이 큰 경우 마찰이나 응착에 의한 여유면 마멸의 가능성이 높아진다. 공구면에

소재의 응착은 가공표면 품위 저하나 절삭저항 증가로 인한 절삭력과 절삭영역 온도 증가를 야기한다. Fig. 4, Fig. 5의 압력분포를 바탕으로 공구마멸을 고려할 때 Fig. 4, Fig. 5(i)에 해당하는 헬릭스 각 45°, 경사각 10° 조건이 유리할 것으로 판단된다.

### 3. 밀링가공실험

#### 3.1 실험장치

가공실험을 위한 실험장치 구성을 Fig. 6에 나타내었다. 수직형 3축 고속 머시닝센터 Makino V55를 사용하였으며 가공시 발생하는 절삭력 신호 획득을 위해 공구동력계(Kistler, 9257B)를 머시닝센터 베드에 장착하였다. 절삭력 신호획득은 DAQ 보드(NI, 4472B)를 이용하였고 신호의 샘플링레이트는 51,200 Hz로 설정하였다.

#### 3.2 실험방법

Fig. 7에 가공실험의 개략도를 나타내었다. 12.5 mm 길이의 돌

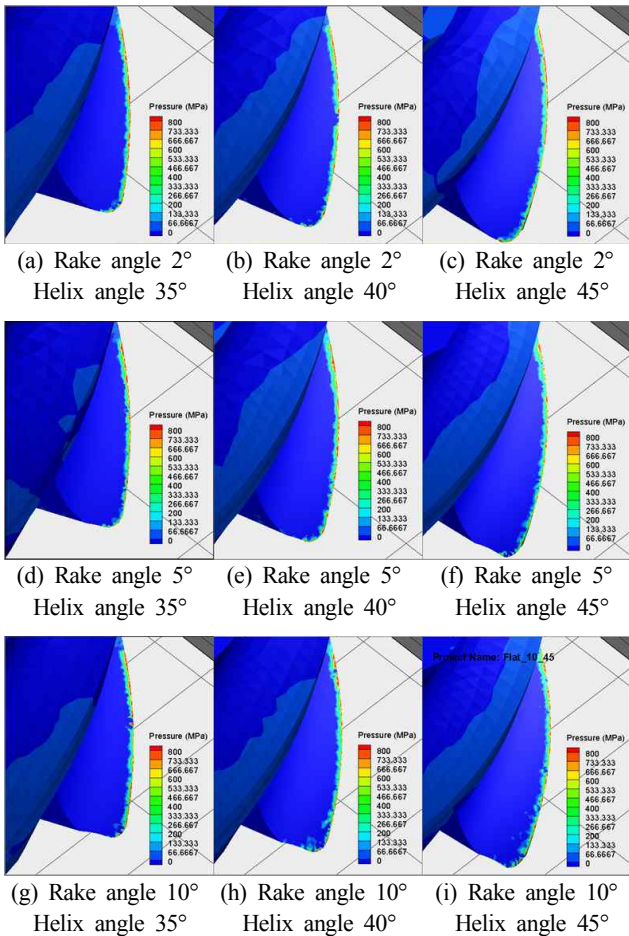


Fig. 5 Pressure distribution on tool rake face depending on tool shape by FEA

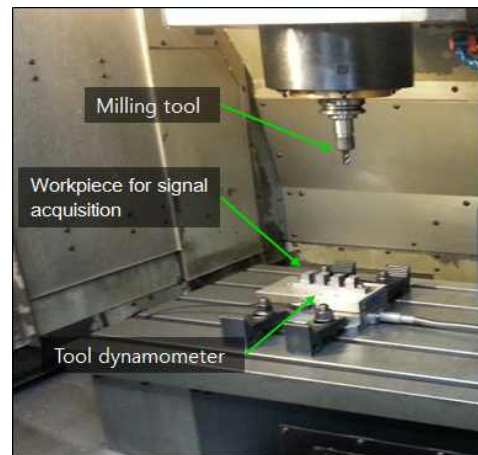


Fig. 6 Experimental setup

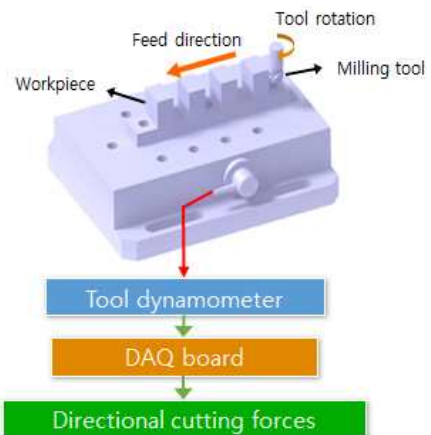


Fig. 7 Scheme of machining experiments



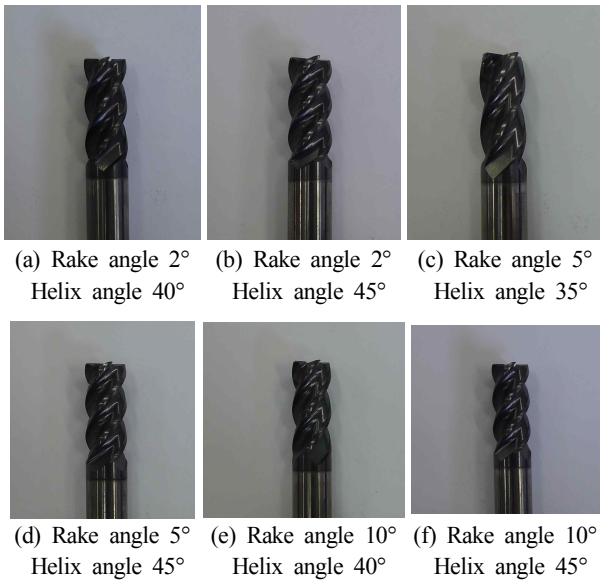


Fig. 8 Milling tools for machining experiments

Table 4 Tool shape parameter for machining experiments

Experiment No.	Rake angle	Helix angle
1	2	40
2		45
3	5	35
4		45
5	10	40
6		45

출부를 갖는 티타늄 시편에 각 조건에 맞게 제작된 공구를 사용하여 밀링가공을 수행하였다. 가공 중 획득한 각 축 방향 절삭력 데이터로부터 합력을 계산하였고, 각 분력과 합력의 RMS 값을 계산하여 각 조건에 대한 대푯값을 계산하였다.

절삭속도, 절삭 깊이 등 가공에 적용된 절삭조건은 Table 1에 나타낸 유한요소해석의 가공조건과 동일하게 설정하였다. 유한요소해석에 적용한 공구 모델 중 Table 4의 형상변수를 갖는 공구를 제작하여 가공실험을 수행하였으며, 공구형상을 Fig. 8에 나타내었다.

### 3.3 실험결과

가공실험에서 측정된 절삭력 합력을 Fig. 9에 나타내었다. 경사각에 따른 절삭력을 비교했을 때 경사각 10° 조건에서 가장 작게 측정되었다. 헬릭스각 45° 조건에서 경사각에 따른 절삭력을 Fig. 10에 나타내었다. 경사각이 증가할수록 절삭력이 작은 것을 확인할 수 있으며 경사각에 따른 절삭력의 변화는 반경방향 분력의 감소에 의한 결과이다. 이는 공구형상에 의한 현상으로 경사각의 크기가 클수록 절삭력은 줄어들지만 공구 날의 강도가 저하되고 칩핑

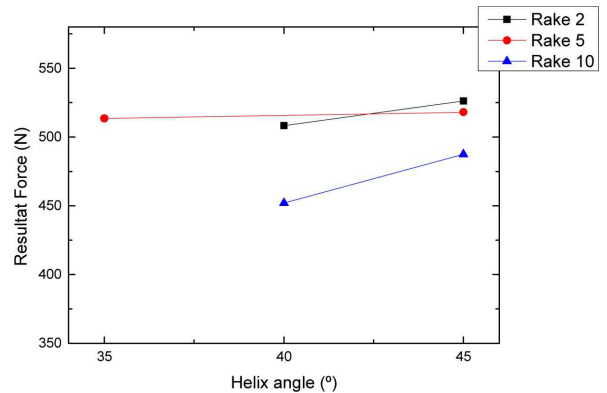


Fig. 9 Resultant cutting force depending on tool shape by machining experiments

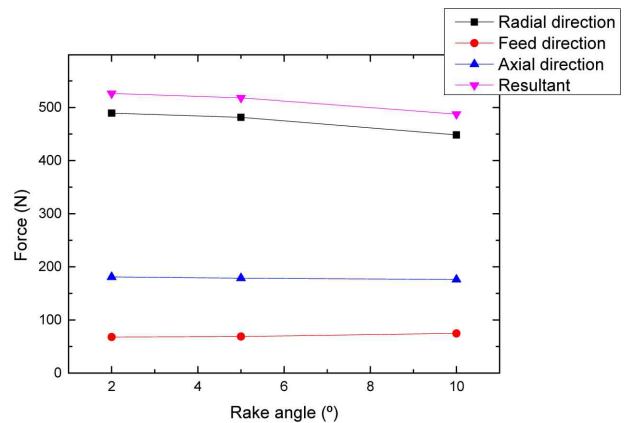


Fig. 10 Directional cutting force depending on rake angle by machining experiments

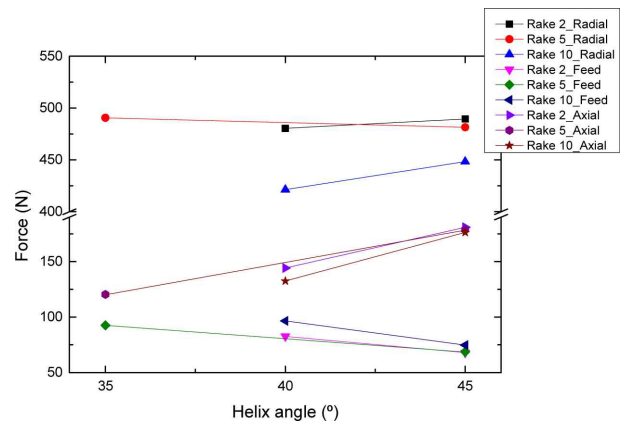


Fig. 11 Directional cutting force depending on tool shape by machining experiments

의 발생 가능성이 높아지는 문제가 있다.

Fig. 11에 각 분력방향 절삭력의 변화를 나타내었다. 헬릭스각의 증가에 따라 절삭력이 증가하였고, 반경방향과 축방향 분력의 증가에 의한 것임을 확인하였다. 유한요소해석 결과와 비교할 때, 반경방향 분력과 축방향 분력의 증가로 인한 절삭력의 증가 경향은 일치하였다. 그러나 실험결과로 측정된 절삭력 합력이 해석결과

**Table 5 Surface roughness depending on tool shape**

Rake angle	Helix angle	Ra ( $\mu\text{m}$ )
2	40	0.535
	45	0.460
5	35	0.491
	45	0.416
10	40	0.575
	45	0.436

절삭력 합력보다 작았으며 각 분력별 특성으로부터 실험에서 측정된 축방향 분력과 이송방향 분력의 크기가 더 작음을 확인하였다. 이러한 해석결과와 실험값의 차이의 원인은 실험에 적용된 공구 피복면의 마찰특성이 유한요소해석 조건보다 양호하여 경사면의 칩 흐름이 원활하였고, 해석과 실험에 사용된 피삭재의 기계적 물성에 차이가 있었기 때문으로 사료된다.

축방향 분력의 증가는 헬릭스 각이 증가함에 따라 칩 배출시 공구 접촉면 상에서 축방향으로 작용하는 힘이 커졌기 때문으로 사료되며, 헬릭스 각의 변화에 따른 절삭력의 증가는 경사각 10° 조건에서 가장 크게 나타난다.

Table 5에는 가공실험 후 시편의 표면거칠기(Ra) 측정값을 나타내었다. 동일한 절삭조건에서 공구형상에 따라서 표면거칠기 값에 차이가 발생하였다. 헬릭스 각이 큰 조건에서 표면거칠기 값이 양호하였으며, 경사각에 따른 두드러진 차이는 나타나지 않았다.

#### 4. 결론

플랫엔드밀을 이용한 티타늄 합금의 가공에서 엔드밀의 대표적인 형상변수인 헬릭스 각과 경사각의 변화에 따른 가공성을 평가하기 위해 유한요소해석과 가공실험을 수행하였다.

유한요소해석결과 절삭력은 헬릭스 각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 각 분력별로는 반경방향 분력과 축방향 분력의 증가 경향이 두드러졌다. 헬릭스 각과 경사각이 큰 경우 공구 여유 면상에 낮고 넓은 범위의 압력분포를 나타내었고, 헬릭스 각과 경사각이 작은 경우 공구여유면상에 높고 좁은 범위의 압력분포를 보였다. 경사면에 나타난 압력분포는 헬릭스 각이 큰 경우에 작게 나타났다.

가공실험 결과 절삭력의 합력은 헬릭스 각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 경사각이 큰 경우 절삭력이 감소하였다. 해석결과와 실험결과에서 절삭력 합력에 차이가 있었으며 축방향 분력과 이송방향 분력에 의한 것임을 알 수 있었다.

공구 형상에 따른 표면거칠기 측정값은 헬릭스 각이 큰 조건에서

양호하였으며 경사각에 따른 두드러진 차이는 나타나지 않았다.

본 연구에서 수행한 공구 형상변수에 따른 가공성 평가 결과를 엔드밀 공구 설계에 적용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 논문은 산업통상자원부 지원 World Class 300 프로젝트 R&D -산업기술혁신사업(과제번호: 10046966)로 수행된 연구결과임.

#### References

- [1] Umbrello, D., 2008, Finite Element Simulation of Conventional and High Speed Machining of Ti6Al4V Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 196:1-3 79-87.
- [2] Dandekar, C. R., Shin, Y. C., Barnes, J., 2010, Machinability Improvement of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and Hybrid Machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50:2 174-182.
- [3] Sun, F., Qu, S., Pan, Y., Li, X., Yang, C., 2014, Machining Performance of a Grooved Tool in Dry Machining Ti-6Al-4V, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73:5 613-622.
- [4] Dolinšek, S., Šuštaršič, B., Kopač, J., 2001, Wear Mechanisms of Cutting Tools in High-speed Cutting Processes, *Wear*, 250:1-12 349-356.
- [5] Venugopal, K. A., Paul, S., Chattopadhyay, A. B., 2007, Growth of Tool wear in Turning of Ti-6Al-4V Alloy under Cryogenic Cooling, *Wear*, 262:9-10 1071-1078.
- [6] Ji, W., Liu, X., Wang, L., Sun, S., 2015, Experimental Evaluation of Polycrystalline Diamond (PCD) Tool Geometries at High Feed Rate in Milling of Titanium Alloy TC11, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77:9 1549-1555.
- [7] Thepsonthi, T., Özel, T., 2015, 3-D Finite Element Process Simulation of Micro-End Milling Ti-6Al-4V Titanium Alloy: Experimental Validations on Chip Flow and Tool Wear, *Journal of Materials Processing Technology*, 221 128-145.
- [8] Cho, C. Y., Ryu, S. H., 2014, Cutting Characteristics of Ball-end Mill with Different Helix Angle, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 31:5 395-401.
- [9] Matweb, n.d. viewed 16 July 2015, <<http://www.matweb.com/surh/DataSheet.aspx?MatGUID=b350a789eda946c6b86a3e4d3c577b39>>