

Ti-6Al-4V 합금의 가공에서 공구 수명 향상을 위한 엔드밀 형상의 선정에 관한 연구

김도혁*, 정윤교*, 조영태*.#

*창원대학교 기계공학전공

Study on the Selection of End Mill Shape to Improve Tool Life in End Mill Process of Ti-6Al-4V Alloy

Do Hyeog Kim*, Yoon Gyo Jung*, Young Tae Cho*.#

*Department of Mechanical Engineering, Changwon UNIV.

(Received 10 August 2019; received in revised form 19 August 2019; accepted 26 September 2019)

ABSTRACT

This study aims to find the shapes of an end-mill with low cutting temperature during the end-mill process of Ti-6Al-4V alloy. Such α - β titanium alloys are increasingly more used for their high tensile strength and high corrosion resistance. The cutting characteristics of Ti-6Al-4V alloy were studied using an analytical method validated by comparing the estimated cutting resistance with that from experiments. The end-mill shape was analyzed using an experimental method. The end-mill shape with low cutting resistance and low cutting temperature was confirmed by analyzing the signal-to-noise ratios for various conditions. Then, the factors with significance factor of 95% or more were determined in the variance analysis. Finally, an end-mill shape that can ensure a low cutting temperature was proposed.

Key Words : End-mill Shape(엔드밀형상), Design of Experiment(실험계획법), Cutting Temperature(절삭온도), Finite Element Analysis(유한요소해석), Titanium Alloy(티타늄 합금)

1. 서 론

티타늄 합금은 뛰어난 기계적 특성을 바탕으로 우주항공 분야의 항공기 동체 등 첨단 산업에서 사용량이 계속해서 증가하고 있다. 이에 티타늄 합금의 가공 기술에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 티타늄 합금의 낮은 열전도율에 의해 절삭시 발생하는 온도가 칩으로 빠져나가지 못하고

공구 끝단에 전달되어 공구의 수명을 저해한다^[1-2].

이러한 티타늄 합금의 엔드밀 가공에서 가공 성능의 고능률화를 위해서 절적한 공구의 설계가 필요하다. 선행 연구를 보면, 코팅 종류의 따라서 엔드밀의 마모를 비교하였고, 절삭속도에 따른 절삭력과 절삭온도, 응력분포를 비교하여 공구의 성능을 평가하였다^[3]. 절삭조건 및 헬릭스각(Helix angle)에 따른 절삭저항의 실험값과 이론값을 비교하였고^[4], 절입량과 날당 이송량의 변화에 따른 절삭저항과 표면 거칠기를 측정하는 연구가 이루어졌다^[5]. 또한 절삭 해석 전용 소프트웨어를 사용

Corresponding Author : ytcho@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3608, Fax: +82-55-275-0101

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하여 이송속도와 절입량에 따른 절삭 특성에 관한 연구와 플랫엔드밀(Flat end mill)의 경사각과 헬릭스각의 변화가 절삭 특성에 미치는 영향에 관한 연구가 수행되었다⁶⁻⁸⁾. 현재 선행된 연구에서 티타늄합금에 대한 엔드밀(End mill) 가공에서 공구의 코팅, 가공조건 개선, 형상 개선에 관한 연구가 진행되었으나 엔드밀의 구체적 형상에 대한 최적화 연구의 결과는 명확하지 않다. 축방향, 반경방향 여유각의 변화와 날 반경, 랜드부 폭과 같은 인자에 대한 절삭저항과 절삭온도 거동을 파악하여 엔드밀의 형상이 절삭특성에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구가 필요하다. 실제 절삭실험을 통해 난삭재에 대한 절삭공구의 형상이나 절삭특성을 연구하는 방법은 공구제작과 시편에 대해 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에 시뮬레이션을 이용한 접근이 이루어지고 있다⁹⁻¹⁰⁾.

절삭저항과 절삭온도는 공구수명을 결정하는 중요한자이며, 수명 향상을 위해서는 절삭저항과 절삭온도를 최소화 시킬 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 가공에서 공구의 수명 향상을 위해 낮은 절삭저항과 절삭온도를 발생시키는 엔드밀 형상을 해석적인 방법을 이용하여 선정하고자 한다.

시뮬레이션을 하기 위해 먼저 실제 절삭시험을 이용해 절삭저항을 측정하고 해석결과와의 비교를 실시하여 유한요소방법(FEM)의 신뢰성 검증을 수행하였다. 신뢰성 검증 이후 다구찌 실험계획법을 적용하여 엔드밀의 형상인자가 절삭저항과 절삭온도에 미치는 영향을 파악하고 절삭온도가 낮은 엔드밀의 형상을 제시하였다.

2. 해석적 방법의 유효성 검증

해석적인 방법을 이용하기 위해서는 먼저 해석의 유효성을 검증하는 것이 필요하다. 이를 위해 실험을 통한 절삭저항을 측정하고 동일한 조건으로 해석하여 실험값과 해석결과의 비교를 통해 유효성 검증을 진행하였다.

2.1 실험을 통한 절삭저항 측정

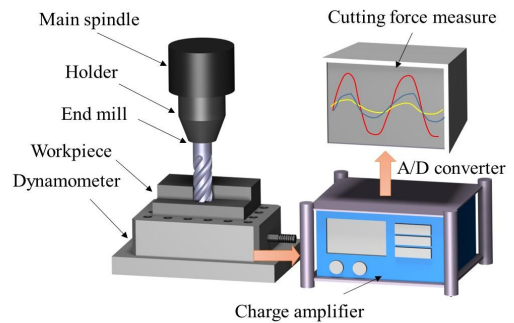


Fig. 1 Experimental set-up of cutting force measure system

실험에 사용된 장비는 화천 기계의 SIRIUS-2 장비를 사용하였고, 절삭저항을 측정하기 위해서 Kistler 社의 공구동력계(Multi component dynamometer 9257B) 사용하였다. 실험에 사용된 엔드밀은 YG-1 社의 SEME36250을 사용하였고, 절삭저항을 측정하기 위하여 Fig. 1와 같이 실험 장치를 구성하고, 절입깊이(Depth of cut) 5mm, 절삭폭(Radial width of cut) 2mm, 스피들 회전속도(Spindle speed) 640RPM, 이송속도(Feed) 180, 200, 220, 240mm/min, 하향절삭, 건식조건으로 하여 실험을 수행하였다. 공구동력계에서 얻은 데이터를 전하증폭기와 A/D변환기를 통하여 컴퓨터로 절삭저항을 측정하였다.

2.2 해석적 방법을 이용한 절삭저항 계산

해석적 방법을 통한 절삭저항 측정을 위하여 Third wave systems 社의 절삭 전용 소프트웨어인 AdvantEdge FEM을 사용하였다.

Table 1 Analysis conditions for AdvantEdge FEM

Parameters	Value
Initial temperature(°C)	20
Min. element size(mm)	0.01
Max. element size(mm)	0.1
Min. edge element size(mm)	0.037
Min. chip element size(mm)	0.028
Min. workpiece element size(mm)	0.01
Angle of rotation(deg)	360

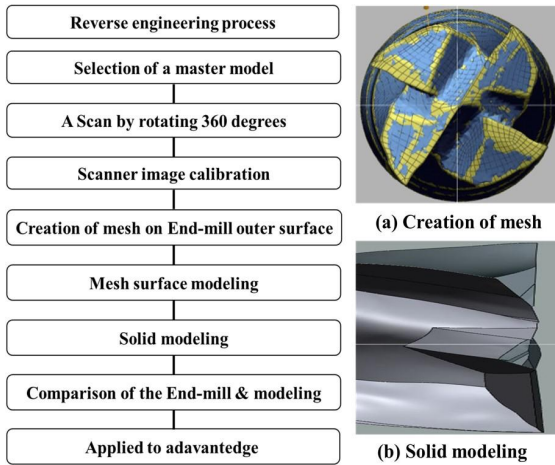


Fig. 2 Tool shape modeling in end mill process to compare experiment and simulation

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

Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Poisson's Ratio
950	828	18	0.34

프로그램 상에서 주어지는 인터페이스를 이용하면 실험에 사용한 엔드밀과 동일한 형태로 정의하기 어렵다. 따라서 해석적 방법에서 절삭저항의 값과 실험에서 측정된 절삭저항의 값을 비교하여 유효성을 검증하기 위해서는 실제 사용된 엔드밀을 모델링할 필요성이 있다. 이를 위해 실제 실험에 사용된 엔드밀을 COMET L3D 8M 장비를 사용하여 Fig.2 과 같이 스캔하여 Design-X 프로그램을 이용하여 모델링 하였다.

모델링 된 엔드밀을 절삭전용 소프트웨어에 적용시켜 실험을 통한 절삭저항 측정 방법과 동일 실험조건으로 해석을 수행하였다. Table 1과 같이 해석조건을 주고 해석을 수행하여 정확도를 높이고, 해석시간을 줄이기 위해 절삭에 관여하지 않는 부분은 Mesh 크기를 0.1mm로 주어 해석의 시간을 고려하였다. 해석에 사용된 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

2.3 유효성 확인

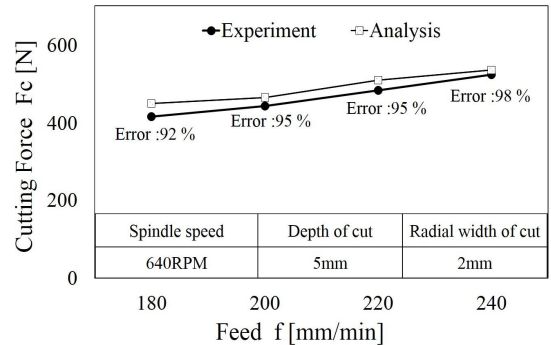


Fig. 3 Comparison result of cutting force to verify the accuracy of simulation in end mill process

엔드밀 공정에서는 공구의 회전마다 각 절삭날의 진출입이 반복되는 복잡한 메커니즘을 가지고 있어 정확한 절삭저항을 예측하기 어렵다. 절삭저항을 분석함에 있어서 해석에서 1회전의 해석결과가 엔드밀 공정에서 절삭구간 전체를 대표함으로 가정하고 절삭구간의 최대 절삭저항값과 Ti-6Al-4V 합금의 절삭 시 발생하는 절삭저항값을 Fig. 3에 비교 그래프로 나타내었다. 이를 통해 해석적 방법을 통해서도 충분히 Ti-6Al-4V 합금의 엔드밀 공정의 절삭저항 값과 절삭온도를 예측 할 수 있음을 확인 하였고, 엔드밀의 형상에 따른 절삭저항과 절삭온도의 변화에 대해 신뢰 할 수 있다.

3. 실험계획법을 이용한 엔드밀 공구 형상 제시

다구찌 실험계획법은 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 방법보다 훨씬 적은 노력으로 최적화를 위한 체계적이고 효율적인 방법론을 제시한다^[11]. 다구찌 실험계획법에 기초로 하여 본 논문은 해석을 수행하고 S/N비 분석과 분산분석(ANOVA)를 통해 절삭저항과 절삭온도가 낮은 엔드밀의 형상을 선정하는 연구를 수행하였다.

3.1 직교배열표 적용

절삭저항과 절삭온도에 영향을 미치는 엔드밀

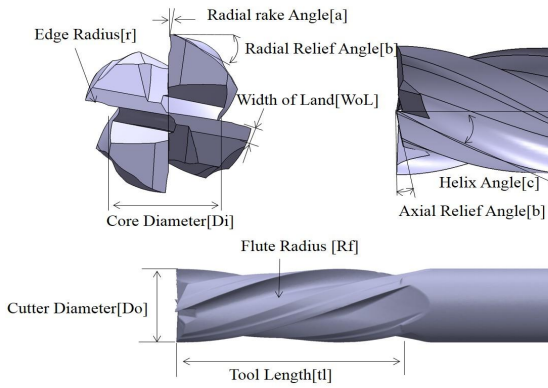


Fig. 4 End mill shape definition and selection of influencing parameters

의 형상에 맞추어 완전 요인 실험법으로 실험을 수행하면 정확한 해석 결과가 도출이 되지만 많은 시간이 걸리게 된다. 따라서 본 실험에서 선정한 엔드밀의 8개 인자를 형상이 간섭되지 않는 해석 가능한 범위 내에서 최대와 최소 비율로 선정하여 실험계획법을 적용하였다. 다구찌 실험계획법을 적용하여 직교배열표를 작성하고, S/N 비 및 인자 별 영향도 분석을 통해 최적의 엔드밀 형상을 선정하기 위한 해석을 수행하였다.

엔드밀의 형상은 Fig. 4와 같이 매우 복잡한 절삭 공구로 공구경사각(Rake angle)은 절삭 시 전단각을 결정하는 인자로 가공시 충격으로 인해 절삭날의 크랙(Crack)이나 칩핑(Chipping)이 발생하기 쉬워 음의 경사각을 가지도록 제작된다. 공구의 여유각(Relief angle)은 소재와 날이 접촉하는 면적을 결정하는 요소로 여유각의 감소는 공구의 여유면과 피삭재의 마찰면적을 증가시켜 절삭저항이 증가한다. 여유각의 증가는 여유면의 마찰면적을 감소시켜 절삭저항을 감소시키지만 인선부가 악화된다. 엣지 반경(Edge radius)는 공구 날 끝의 형상을 결정하여 절삭성에 영향을 미치는 요소로 엣지 반경이 작을수록 절삭성은 우수하나 파손(Damage) 및 칩핑이 일어날 가능성이 크다. 플루트 반경(Flute radius)는 엔드밀 홈 사이의 곡면, 랜드부의 폭(Width of land)은 절삭날의 폭, 헬릭스각은 공구의 비틀림 정도를 결정한다^[12].

엔드밀 공정에서 엔드밀의 형상이 절삭 시 발

Table 3 Selection of control factor and level for design of experiment

Control factor	Symbol	Level	
		1	2
Core Diameter (mm)	Di	5.5	6.5
Radial Rake Angle (°)	a	-10	15
Helix Angle (°)	c	25	35
Radial Relief Angle (°)	b	20	30
Axial Relief Angle (°)	Ar	5	15
Edge Radius (mm)	R	0.03	0.05
Flute Radius (mm)	Rf	0.1	0.3
Width of Land (mm)	WoL	1.2	1.8

생하는 절삭저항과 절삭 온도에 영향을 미친다고 판단되는 형상인자 8가지 인자를 기존 공구의 형상을 기준(코어직경(Core Diameter) 6mm, 공구경사각(Radial rake angle) -10°, 헬릭스각 30°, 공구여유각(Radial relief angle) 25°, 공구축 여유각(Axial relief angle) 7°, 엣지반경 0.03mm, 플루트 반경 0.1mm, 랜드부의 폭 1.6mm)으로 하고, 엔드밀 형상을 변화시킬 수 있는 범위를 최소와 최대로 하여 수준을 Table 3와 같이 선정하였다.

3.2 S/N비 분석

다구찌 실험계획법에 의해 8인자 2수준의 직교배열표와 해석에서 도출된 최대절삭저항과 공구 선단에 발생하는 최대 절삭온도를 Table 4에 나타내었다. S/N비는 신호 대 잡음을 뜻하며, 이는 잡음에 대한 제어 인자의 영향력 정도를 나타내고 S/N비가 클수록 해석결과에 대한 잡음인자의 영향이 작아 실험자가 제어하는 인자가 영향을 많이 미치는 것을 의미한다. 해석결과 S/N비가 더 큰 수준을 최적 형상이라 판단한다. 절삭저항과 절삭 온도가 낮을수록 공구 수명이 증가하므로 S/N비는 망소 특성으로 분석하였다. 망소 특성시 특성치의 S/N비 계산식은 식(1)과 같다.

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (1)$$

식(1)에서 n 은 잡음인자에 대한 실험의 총 횟수를 의미하며, y_i 는 i 번째 잡음인자에 대한 특성치값을 의미한다.

해석결과의 S/N비는 Fig. 5, Fig. 6 과 같이 해석되었다. 절삭저항의 관점에서 코어직경 5.5mm, 공구경사각 15°, 헬릭스각 35°, 공구여유각 30°, 공구축 여유각 5°, 엣지반경 0.03mm, 플루트 반경 0.3mm, 랜드부의 폭 1.2mm 일 때 절삭저항이 적게 발생하였고, 절삭온도의 관점에서 코어직경 6.5mm, 공구경사각 -10°, 헬릭스각 25°, 공구여유각 20°, 공구축 여유각 5°, 엣지 반경 0.03mm,

Table 4 Orthogonal array of $L_{12}(2^8)$ and simulation results of cutting force and temperature

No	Factor								Cutting Force	Cutting Temp.
	Di	a	c	b	Ar	R	Rf	Wol		
1	5.5	-10	25	20	5	0.03	0.1	1.2	1230	402
2	5.5	-10	25	20	5	0.06	0.3	1.8	1356	420
3	5.5	-10	35	30	15	0.03	0.1	1.2	1129	409
4	5.5	15	25	30	15	0.03	0.3	1.8	1146	420
5	5.5	15	35	20	15	0.06	0.3	1.8	1545	510
6	5.5	15	35	30	5	0.06	0.1	1.2	1193	449
7	6.5	-10	35	30	5	0.03	0.3	1.8	1207	454
8	6.5	-10	35	20	15	0.06	0.3	1.2	1256	413
9	6.5	-10	25	30	15	0.06	0.1	1.8	1419	444
10	6.5	15	35	20	5	0.03	0.1	1.8	1144	370
11	6.5	15	25	30	5	0.06	0.1	1.2	1402	461
12	6.5	15	25	20	15	0.03	0.3	1.2	1188	400

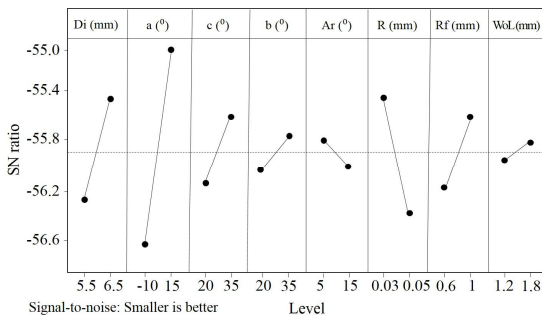


Fig. 5 Main effects plot for S/N ratio of cutting force

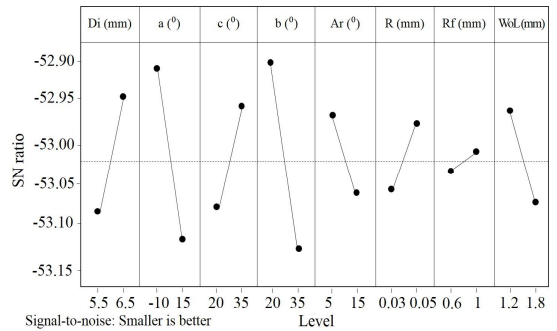


Fig. 6 Main effects plot for S/N ratio of cutting temperature

플루트 반경 0.3mm, 랜드부의 폭 1.2mm 일 때 절삭온도가 낮게 발생하였다. 엔드밀의 형상 변수에서 공구경사각은 절삭시 전단각을 결정하기 때문에 절삭저항을 향상시키기 위해서는 음의 경사각으로 선정하지만 음의 경사각을 가지거나 랜드부의 폭이 커지게 되면 칩(Chip)의 배출을 방해하고, 이는 절삭온도의 상승을 불러일으킨다. 또한, 공구여유각은 커지거나, 엣지반경이 작아지면 공구의 형상이 날카로워져서 절삭저항은 줄어들게 되지만 공구선단에 절삭온도가 집중적으로 분포하게 되어 공구의 마모를 촉진하게 된다.

3.3 분산 분석(ANOVA)

절삭저항과 절삭온도에 대해 유의한 영향을 미치는 인자를 확인하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석은 측정 데이터 전체의 분산을 몇 개의 요인효과에 대응하는 분산과 나머지 오차 분산으로 나누어 검정 혹은 추정을 실시하는 것이다. 유의수준을 선정하고 유의수준과 유의확률 (Significance probability) P값을 비교하여 S/N비 해석의 결과 중 수준을 변경하더라도 결과에 영향을 미치지 않는 인자를 색출 할 수 있다. 이 때 P값을 이용한 해석에서 P값의 설정 값보다 작으면 기준에 정립된 기무가설을 기각한다고 가정하고 실험결과에 유의한 영향을 미치는 인자로 판별할 수 있다.

본 연구에서는 P값이 0.05보다 작거나 같게 되면 해당인자가 실험 결과에 많은 영향을 미친다는

Table 5 Analysis result of significance probability using ANOVA on cutting force

Control factor	Significance probability(%)	
	1 st Pooling	2 nd Pooling
Core Diameter (mm)	-	-
Radial Rake Angle (°)	-	-
Helix Angle (°)	62.4	-
Radial Relief Angle (°)	54.5	-
Axial Relief Angle (°)	-	-
Edge Radius (mm)	99.3	99.7
Flute Radius (mm)	89.0	91.0
Width of Land (mm)	81.6	83.9

Table 6 Analysis result of significance probability using ANOVA on cutting temperature

Control factor	Significance probability(%)	
	1 st Pooling	2 nd Pooling
Core Diameter (mm)	-	-
Radial Rake Angle (°)	-	-
Helix Angle (°)	-	-
Radial Relief Angle (°)	69.7	71.0
Axial Relief Angle (°)	-	-
Edge Radius (mm)	94.1	95.0
Flute Radius (mm)	-	-
Width of Land (mm)	54.2	-

귀무가설을 세우고, 95%의 유의확률보다 큰 확률을 나타내는 인자가 영향도가 크다는 것으로 가정한다. 따라서 Table 4을 토대로 분산분석을 수행한 결과 Table 5과 6에 절삭저항과 절삭온도에 대한 유의확률을 나타내었다.

해석결과 절삭저항에 대한 유의인자는 옛지반경과 플루트 반경, 랜드부의 폭임을 확인하였고, 절삭온도에 대한 유의인자는 옛지반경, 공구여유각의 인자를 확인하였지만 95% 이상 되는 인자는 옛지 반경만 유의인자 임을 확인하였다.

3.4 엔드밀 형상 제시

절삭저항과 절삭온도에 영향을 주는 인자와 수준을 파악하고 영향도 분석을 통해서 옛지 반경이 가장 많은 영향을 미치는 인자임을 확인하였다. S/N비 분석을 통해서 절삭저항이 낮게 나타나는 인자와 절삭온도가 낮게 나타나는 인자를 파악하였고, Ti-6Al-4V 합금을 가공할 때 절삭온도에 의해 가공성이 저하되기^[13] 때문에 절삭온도가 낮은 형태의 엔드밀 형상을 제시하고자 한다.

따라서 엔드밀의 형상은 코어직경 6.5mm, 공구경사각 -10°, 헬릭스각 25°, 공구여유각 20°, 공구축 여유각 5°, 옛지 반경 0.05mm, 플루트 반경 0.3mm, 랜드부의 폭 1.2mm 일 때 기존의 공구보다 절삭온도가 낮게 나타남을 해석적으로 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 최근 항공기 부품의 소재로 사용이 늘어나고 있는 Ti-6Al-4V 합금을 대상으로 엔드밀 공정에서 절삭저항과 절삭온도가 낮게 발생하는 엔드밀의 형상을 찾는 것을 목적으로 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

먼저 실험적 방법과 해석적 방법의 절삭저항 비교를 통하여 해석적 방법으로도 Ti-6Al-4V 합금의 절삭특성에 관한 연구를 수행 할 수 있음을 확인하였다. 그 다음 실험계획법을 적용하여 엔드밀의 형상을 8인자 2수준으로 해석을 수행하였고, 해석결과 S/N비 분석을 통하여 절삭저항과 절삭온도가 낮게 나타나는 엔드밀의 형상을 확인하였다. 마지막으로 분산분석을 실시하여 유의확률이 95%이상인 유의인자 옛지 반경을 찾았고 최종적으로 절삭온도가 낮게 발생하는 엔드밀의 형상 코어직경 6.5mm, 공구경사각 -10°, 헬릭스각 25°, 공구여유각 20°, 공구축 여유각 5°, 옛지 반경 0.05mm, 플루트 반경 0.3mm, 랜드부의 폭 1.2mm 를 제안하였다.

후 기

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술

진흥센터의 Grand ICT연구센터지원사업의 연구결과
로 수행되었음” (IITP-2019-2016-0-00318)

REFERENCES

1. Umbrello, D., “Finite Element Simulation of Conventional and High Speed Machining of Ti6Al4V Alloy,” *Journal of materials processing technology*, Vol.196, pp.79-87, 2008.
2. Dandekar, C. R., Shin, Y. C., Barnes, J., “Machinability Improvement of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and Hybrid Machining,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, pp. 174-182, 2010.
3. Wang, C. Y. et al., “Wear and breakage of TiAlN-and TiSiN-coated Carbide Tools During High-speed Milling of Hardened Steel,” *Wear*, Vol. 336-337, pp. 29-42, 2015.
4. Sheu, J.-J., Xu, D.-M., and Liu, C.-W., “Cutting Force and Tool Deflection Predictions for High Speed Machining of Hard to Cut Material,” *Advanced Materials Research*, Vol. 154-155, pp. 1157-1164, 2011.
5. Mhamdi, M. B., Boujelbene, M., Bayraktar, E., Zghal, A., “Surface Integrity of Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Ball end Milling,” *Physics Procedia* Vol. 25, pp. 355-362, 2012.
6. Mamedov, A., Lazoglu, I., “Thermal Analysis of Micro Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 299, pp.659-667, 2016.
7. Ye, D. H., Koo, H. Y., Park, T. K., Kim, J. S., “Analysis on the Effects of Tool Rake Angle and Helix Angle of a Flat End-mill in the Milling of Ti-alloy,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 24, No. 5, pp. 508-513, 2015.
8. Fowler, G., Pashby, I. R., Shipway, P. H., “The Effect of Particle Hardness and Shape When Abrasive Water Jet Milling Titanium alloy Ti6Al4V,” *Wear*, Vol. 266, pp. 613-620, 2009.
9. Sutter, G., List, G., “Very High Speed Cutting of Ti-6Al-4V Titanium Alloy - Change in Morphology and Mechanism of Chip Formation,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 66, pp. 37-43, 2013.
10. Karpat, T., “Temperature Dependent Flow Softening of Titanium Alloy Ti-6Al-4V : An Investigation Using Finite Element Simulation of Machining,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 737-749, 2011.
11. Bae, H. J., Park, H. S., “Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 52-59, 2004.
12. Kang, M. C., Kim, J. S., Lee, D. W., Kim, K. H., Ha, D. G., “Machinability Evaluation According to Variation of End mill Shape for High Speed Machining,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 19, No. 5 pp. 133-138, 2002.
13. Kim, G. H., “A Study on Characteristics of Cutting by Cutting Conditions in Titanium Machining,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp.84-89, 2013.