

반응표면법을 활용한 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 밀링 가공조건 최적화에 관한 연구

김종민*, 구준영**, 김정석***, 전차수****, #

*경상대학교 대학원, 한국치공구공업(주), **대구기계부품연구원, ***부산대학교 기계공학부,
****경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

Optimization of Machining Conditions in Milling of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Using the Response Surface Method

Jong-Min Kim*, Joon-Young Koo**, Jeong-Suk Kim***, Cha-Soo Jun****, #

*Graduate School, Gyeongsang National Univ., and KJF, **DMI,

***School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National Univ.,

****Department of Industrial and Systems Engineering & Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

(Received 25 July 2019; received in revised form 30 July 2019; accepted 22 August 2019)

ABSTRACT

Recently, lightweight materials such as Ti alloys have been used increasingly in the aerospace and high-tech industries for weight loss and fuel efficiency. Because of built-up edges and workpiece deflection due to low stiffness, the Ti alloys have poor machinability. In our study, systematic experiments were conducted to investigate the milling characteristics of the Ti alloy (Ti-6Al-4V) with endmills. The independent variables in the experiment were spindle speed, feed per tooth, and axial depth. Cutting force, acceleration RMS, and surface roughness were measured. Using the response surface method, the optimal cutting conditions were analyzed to improve machining quality and productivity.

Key Words : Ti-6Al-4V(티타늄 합금), End Milling(엔드밀 가공), Cutting Force(절삭력), Acceleration RMS(가속도 RMS), Surface Roughness(표면 거칠기), Response Surface Method(반응표면법)

1. 서 론

최근 항공우주 분야에서 고속 기동성이 최우선적으로 요구되는 전투기뿐만 아니라 경제성이 중요시되는 민간 항공기에도 부품 경량화를 통한 중

량 감소가 화두이다. 근래 개발된 AIRBUS사 A350XWB와 BOEING사 B787 Dreamliner 등은 기존 주력 기종인 A320, B737 보다 Ti 재료 사용이 약 100% 이상 늘어나고 있는데 가벼우면서 고강도를 가진 티타늄 합금 사용이 증가하고 있는 추세는 계속될 것으로 보인다.

그러나 티타늄은 대표적인 난삭재로 다른 금속 재료보다 열전도율이 낮아 절삭 가공 시 구성인선

Corresponding Author : csjun@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1693, Fax: +82-55-772-1699

(Built-up edge) 현상이 발생하여 공구수명을 단축시키고 공작물의 요구 표면조도 및 가공정도를 얻는데 어려움이 있다. 또한, 탄성계수가 일반강의 1/2 정도(110GPa)로 낮아서 절삭 가공 시 공구의 저항에 제품이 밀려나 정밀도 관리에 어려움이 많고 두께가 얇은 재료일 경우에는 탄성 변형으로 인해 정밀한 가공이 힘들다고 알려져 있다^[1].

티타늄 합금의 절삭가공 연구 동향을 보면 일찍이 1950년대부터 기계가공에 대한 연구^[2]가 시작되었고 신소재로서 티타늄 합금의 기계적 성질과 가공성에 대한 연구^[3], 티타늄 합금의 가공 시 칩형성 과정의 메카니즘^[4], 항공기 부품의 얇은 바닥 밀링작업 시 절삭 깊이와 회전수에 따라 진동발생에 관한 연구^[5] 등과 절삭 공구에 특수 코팅을 하여 선삭가공 시 티타늄 합금의 공구 마멸 특성에 대한 연구^[6] 있고, 절삭 깊이와 절삭 시간에 따라 절삭 가공 중에 발생하는 절삭 열 및 공구 마모량에 대한 연구^[7] 및 티타늄 합금의 밀링 가공에서 평 엔드밀의 헬릭스각과 경사각이 절삭력, 절삭 영역의 온도, 진동 및 칩 배출에 영향을 끼쳐 공작물의 표면 건전성과 치수 정확도에 대한 연구^[8] 등이 있다.

본 논문에서는 Airbus사 A320계열 항공기 날개 부품 제작용으로 인증 받은 티타늄합금(Ti-6Al-4V) 소재를 활용하여 밀링가공 최적 조건을 알아보고자 한다. Ti-6Al-4V 합금은 저온부터 중온(500°C) 구간까지 강도가 높고, 백금에 버금가는 내식성과 용접성이 우수한 기계적 특성 때문에 비행체의 경량화가 가능하여 항공기의 구조용 재료로 많이 사용된다.

2. 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 밀링 가공성평가

2.1 실험조건 선정

본 논문에서는 대표적인 실험계획법의 하나인 반응표면법을 활용하고, 중심합성계획을 이용하여 밀링가공 실험조건을 설계하였다.

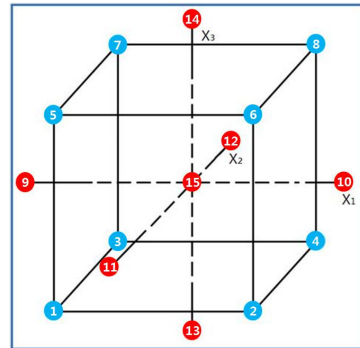


Fig. 1 Central composite design

Table 1 Level of independent variables

Independent variables		Levels				
		-2	-1	0	+1	+2
N	rotation speed (rpm)	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
	f_t	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
a_d	axial depth of cut (mm)	1	2	3	4	5

Table 2 Cutting conditions by central composite design (RDOC:0.5mm)

Experiment number	Linear transformed variables			N (rpm)	f_t (mm/tooth)	a_d (mm)
	x_1	x_2	x_3			
1	-1	-1	-1	2,000	0.04	2
2	1	-1	-1	4,000	0.04	2
3	-1	1	-1	2,000	0.08	2
4	1	1	-1	4,000	0.08	2
5	-1	-1	1	2,000	0.04	4
6	1	-1	1	4,000	0.04	4
7	-1	1	1	2,000	0.08	4
8	1	1	1	4,000	0.08	4
9	-2	0	0	1,000	0.06	3
10	2	0	0	5,000	0.06	3
11	0	-2	0	3,000	0.02	3
12	0	2	0	3,000	0.10	3
13	0	0	-2	3,000	0.06	1
14	0	0	2	3,000	0.06	5
15	0	0	0	3,000	0.06	3

가공실험조건의 독립변수는 주축회전속도(N), 날당이송(ft), 축방향깊이(ad) 3가지로, 각 변수당 5 수준으로 나눈 뒤 중심합성계획을 이용한 총 15개의 실험조건을 설계하였다. 각 조건들은 정육면체의 8개의 꼭짓점과 하나의 중심점을 포함하며 Fig. 1에 중심합성계획에 대해 나타내었고 Table 1에 각 독립변수의 선형 변환값에 따른 실제값을, Table 2에는 중심합성법을 활용하여 설계한 실험조건을 나타내었다.

2.2 실험장치 구성 및 실험방법

실험은 Makino사의 V55 3축 고속머시닝센터 베드에 공구동력계를 설치하고 상판에 시편을 장착한 후 Taegutec사의 Tungsten-Carbide 직경 10mm 4날 엔드밀공구로 가공하였다

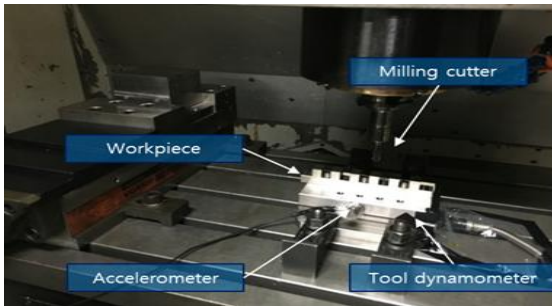


Fig. 2 Overview of experimental setup

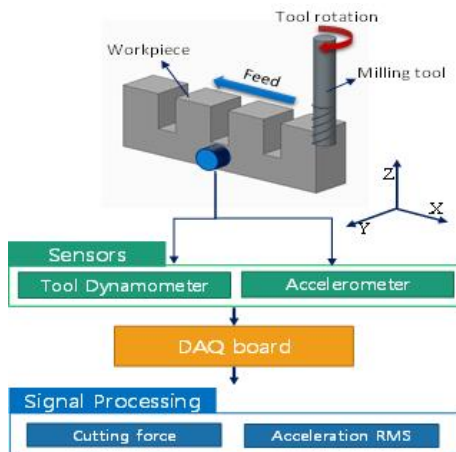


Fig. 3 Schematic diagram of experimental method

Table 3 Experimental Equipment

Equipments	Models & makers
Machine tool	TV55, Makino
Dynamometer	Type 9257B, Kistler
Accelerometer	Type 4372, B&K
Amplifier	Type 5019B, Kistler
DAQ board	PCI-4472B, NI

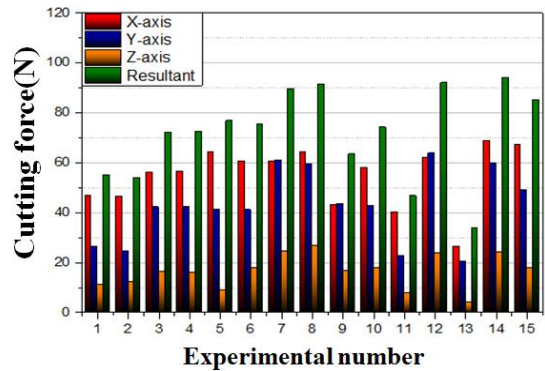


Fig. 4 Cutting forces along the axes

이 때, 가공조건에 따른 절삭력 변화 분석을 위해 공구동력계(Type 9257b, Kistler)를 장착하여 전하증폭기(Type 5019a, Kistler)로 신호증폭된 절삭력신호를 획득하였고, 그 전면부에 부착된 가속도계(Type 4372, B&K)로 가속도신호를 얻었다.

절삭력신호와 가속도신호는 데이터획득보드(PCI-4472B, NI)를 이용하여 동시에 획득하였으며, 신호획득 및 저장, 그리고 신호특성추출을 위한 신호처리를 위해 LabView(Ver. 2012, NI)를 활용하였다. 그리고 가속도계의 주파수응답특성을 고려하고 앨리어싱(aliasing) 현상을 방지하기 위해 샘플링주파수는 51.2 kHz로 설정하였다.

Fig. 2에 실험장치 및 구성을, Fig. 3에 실험 방법과 신호 획득 체계를, Table 3에 실험 장비 목록을 나타내었다.

2.3 실험결과 및 고찰

2.3.1 절삭력 및 가속도 RMS 신호분석

(1) 절삭력(Cutting forces)

절삭력 합력은 주축회전속도가 증가함에 따라

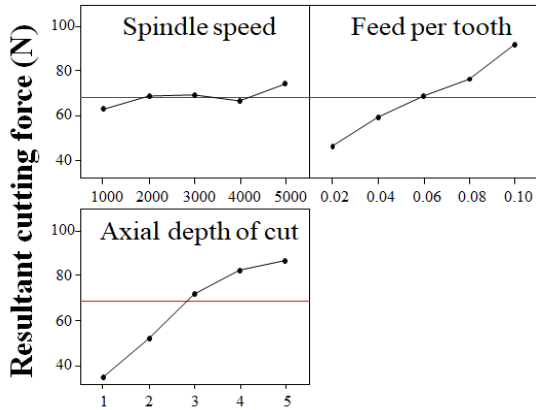


Fig. 5 Cutting force analysed according to cutting conditions

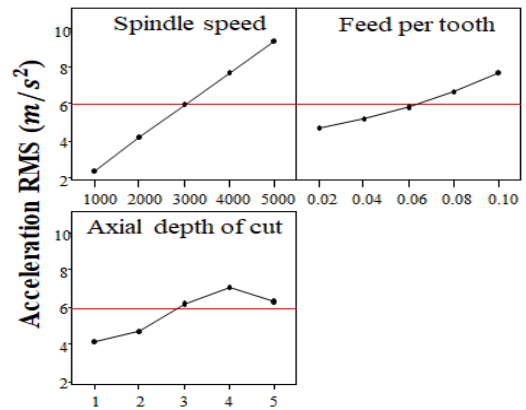


Fig. 7 Acceleration RMS analysed according to cutting conditions

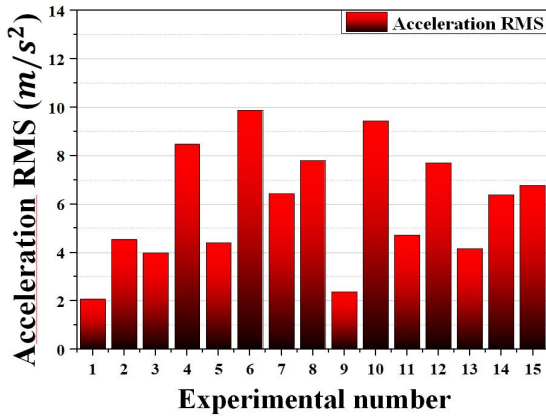


Fig. 6 Acceleration RMS of the experiments

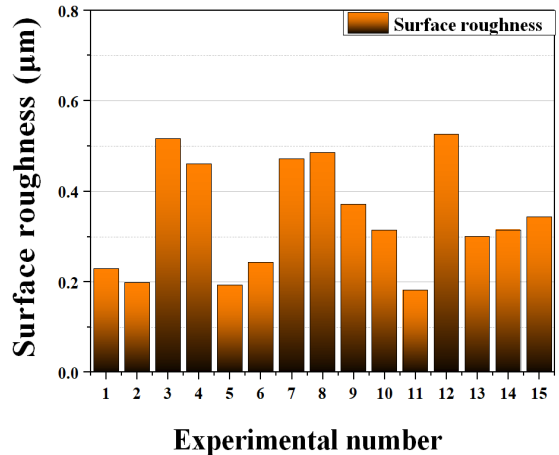


Fig. 8 Surface roughness of the experiments

대체적으로 증가하는 경향을 나타내지만 최소 63.3 N에서 최대 74.0 N으로 변화하며 그 변화폭은 크지 않음을 알 수 있다(Fig. 4). 날당이송과 축방향 절삭 깊이가 증가함에 따라 절삭력이 같이 증가하는 경향을 나타내며, 이는 소재제거율(MRR)이 증가함에 따라 전단변형면적도 같이 증가하는 영향으로 판단된다. 주효과도 분석(main effect analysis)을 통해 절삭력은 날당이송과 축방향 절삭깊이의 영향이 크며, 주축회전속도는 상대적으로 영향이 적은 것으로 알 수 있다(Fig. 5).

(2) 가속도 RMS

가속도 RMS는 주축회전속도가 증가함에 따라 선형적인 형태로 증가하는 경향을 보이며, 이는 주축회전 속도의 증가에 따른 충격량 증가에 의한 것이다. 날당이송과 축방향 절삭 깊이가 증가함에 따라 가속도 RMS가 증가하는 것은 절삭력의 증가에 의한 것으로 판단되며(Fig. 6), 주효과도 분석 결과 주축회전속도가 가속도 RMS에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 7).

2.3.2 표면 거칠기 분석

주축회전속도가 증가함에 따라 표면 거칠기는

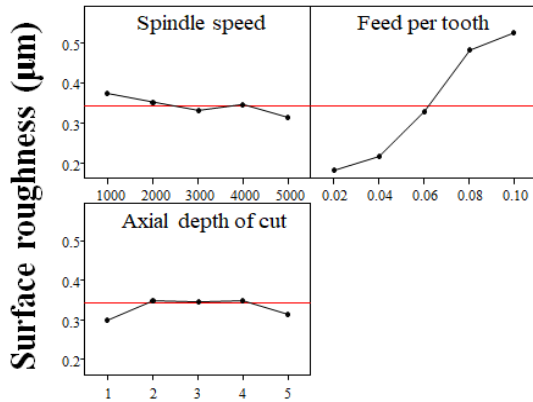


Fig. 9 Surface roughness analysed according to cutting conditions

미소하게 감소하는 경향을 나타내며, 이는 절삭속도증가에 따른 열적연화현상에 의해 절삭영역에서의 소재유동이 원활해지고 소재 인장강도의 감소에 의한 것으로 사료된다(Fig. 8).

날당이송이 증가함에 따라 표면 거칠기는 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 표면 거칠기에 대한 절삭변수의 주효과도 분석을 통해 날당이송이 가장 큰 영향을 미치며, 주축회전속도와 축방향절삭 깊이는 상대적으로 그 영향도가 적음을 확인하였다(Fig. 9).

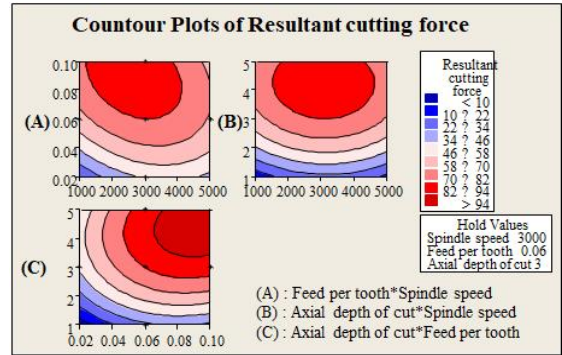
2.3.3 반응표면(Response Surface Method) 분석

앞선 실험결과를 활용하여 표면품질과 생산성을 고려한 최적가공조건을 도출하기 위해 반응표면 분석을 수행하였다. 절삭력, 가속도 RMS, 표면 거칠기를 반응값으로 가지는 반응표면을 등고선 형태로 표현하였으며 Fig. 10에 나타내었다.

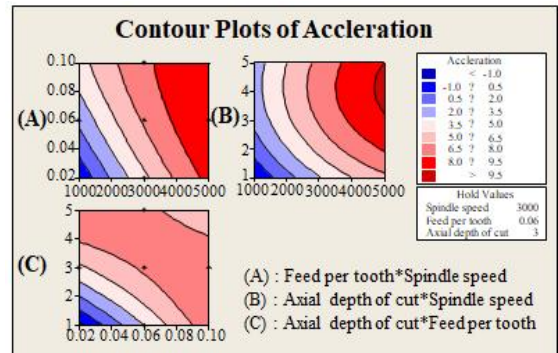
또, 티타늄 합금의 효과적인 가공을 위한 가공 조건의 범위를 파악하기 위해 반응표면 등고선도를 활용하였다. 절삭력 합력은 40~70 N, 가속도 RMS는 3~7 m/s², 그리고 표면거칠기는 0.2~0.4 µm의 값을 가지도록 변수의 범위를 설정하고 등고선도가 겹치는 영역에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 11에 반응표면 분석 결과에 대해 나타내었으며, 이를 이용하여 도출한 절삭조건 범위는 Table 4와 같다. 반응표면법을 이용한 최적조건

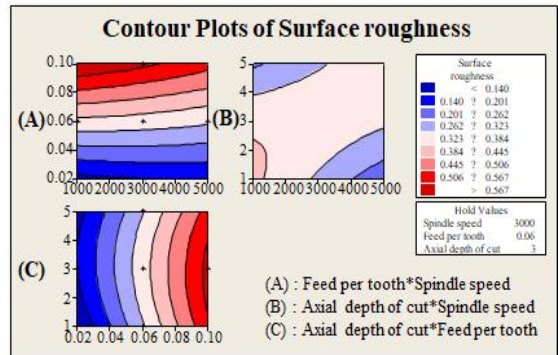
분석은 통계전용프로그램인 미니탭(Minitab)을 이용하였으며 Fig. 12에 나타내었다. 이를 통해 표면 품질과 생산성을 고려한 티타늄합금의 최적가공조건을 도출하였으며 Table 5에 나타내었다.



(a) Cutting force

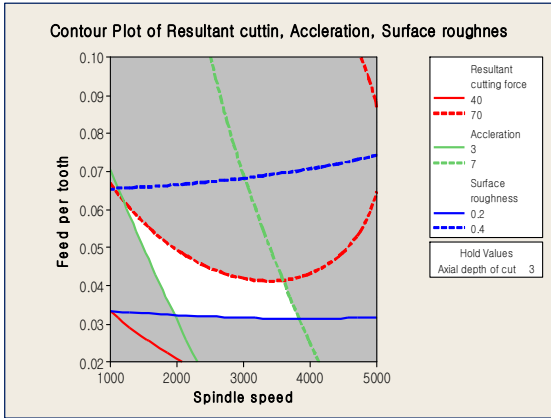


(b) Acceleration RMS

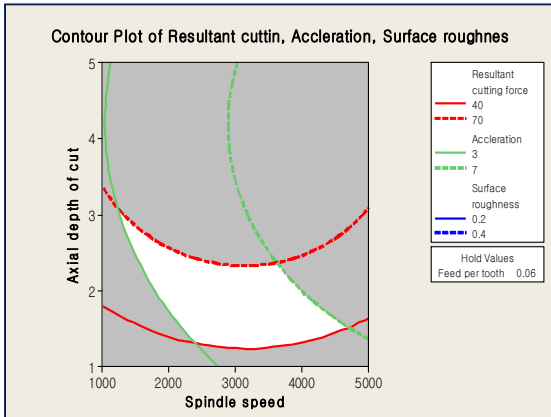


(c) Surface roughness

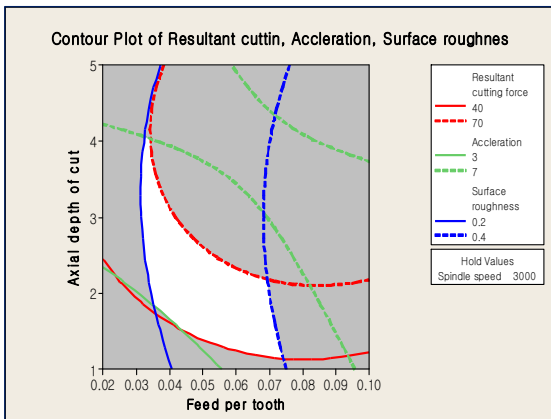
Fig. 10 Contour maps of response surfaces



(a) Feed per tooth vs. spindle speed



(b) Axial depth of cut vs. spindle speed



(c) Axial depth of cut vs. feed per tooth

Fig. 11 RSM analysis

Table 4 Ranges of cutting conditions for stable machining

Variable	Range
Spindle speed (rpm)	2,000 ~ 4,000
Feed per tooth (mm/tooth)	0.03 ~ 0.05
Axial depth of cut (mm)	1.5 ~ 3.0

Table 5 Optimal cutting conditions

Variable	Value
Spindle speed (rpm)	3,600
Feed per tooth (mm/tooth)	0.0375
Axial depth of cut (mm)	2.5

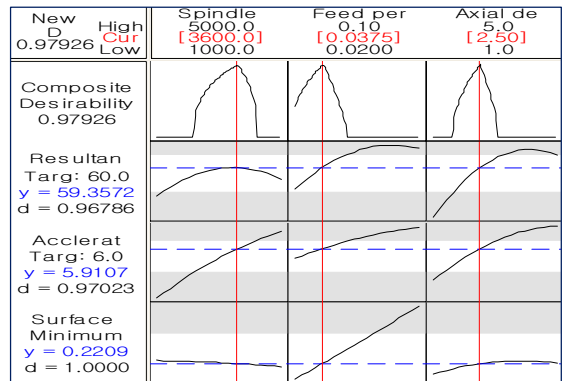


Fig. 12 Cutting condition optimization

2.3.4 최적 가공조건에 의한 공구 마멸 실험 및 분석

반응표면분석을 통해 도출된 최적가공조건을 적용하여 동일한 실험조건으로 공구 마멸실험을 수행하였다. 실험장치에 대해 Fig. 13에 나타내었고, Fig. 14에 공구마멸실험에서 가공거리에 따른 절삭력의 변화와 다항식 피팅 곡선을 나타내었다.

공구수명곡선은 3차 곡선의 형태를 가지며, 초기마멸단계(Stage-I), 일정마멸단계(Stage-II), 급속마멸단계(Stage-III)의 3단계로 구분 된다. Stage-I에서 절삭력은 급격히 증가하며, Stage-II에서는 가공거리가 증가함에 따라 절삭력이 서서히 증가하였다.

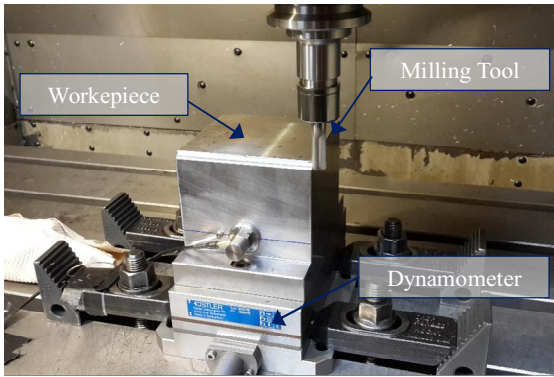


Fig. 13 Overview of Cutting Tool wear test

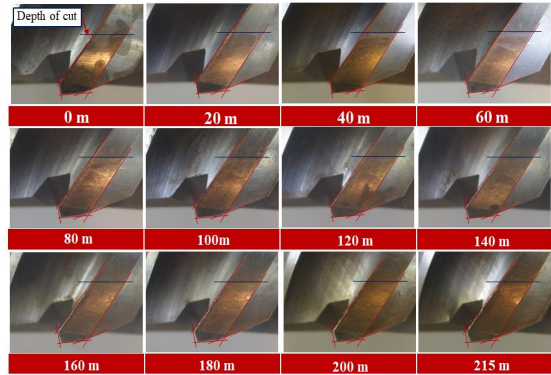


Fig. 16 Detailed cutting edge wear of flute 1

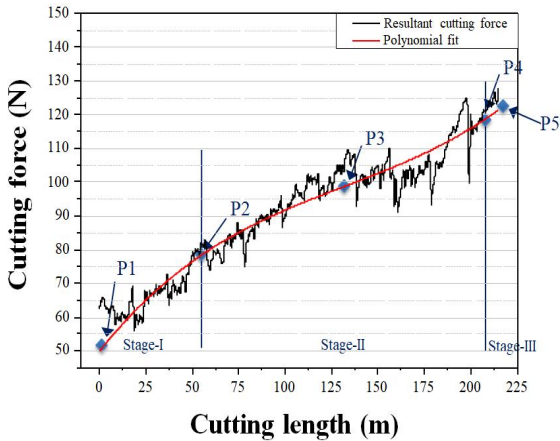


Fig. 14 Variation of cutting force according to cutting length

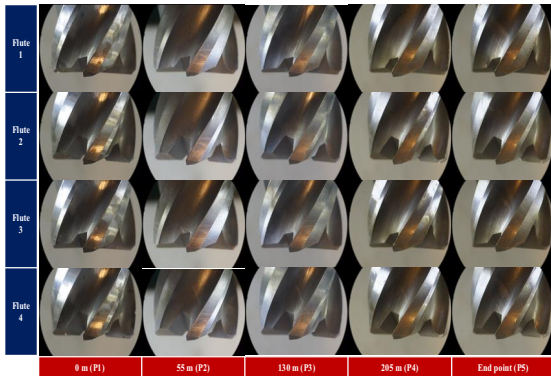


Fig. 15 Cutting edge wear of each flute according to cutting length

Stage-III에서는 Stage-I과 마찬가지로 절삭력이 급격히 증가하였다. 이러한 현상은 Stage-I에서 날카로운 절삭날이 초기에 급격히 무너지기 시작하다 그 형태가 안정화되면서 공구마멸속도 및 절삭력의 증가 기울기가 완만해지는 Stage-II로 진행되기 때문에 사료된다. Stage-III에서는 가공거리가 증가함에 따라 소재와의 마찰과 열에 의해 공구모재를 보호하는 코팅막이 손상되어 모재가 급격히 마멸되고 절삭력도 증가되는 것으로 판단된다. Fig. 14에 공구마멸실험에서 가공 거리에 따른 절삭력의 변화와 다항식 피팅곡선을 나타내었다.

Fig. 15에는 각 마멸단계의 시작점을 포함하여 총 5개 지점에 대한 공구마멸상태를 나타내었으며, Fig. 16에는 가공 거리에 따른 첫 번째 절삭날(flute)의 마모상태를 보여주고 있다. 가공 거리가 증가할수록 소재와 공구의 접촉면 마찰과 열, 소재의 응착과 탈락으로 인해 공구마멸이 진행되고 특히 공구마멸 한계인 Stage-III에 접어들면서는 공구선단부의 마멸이 급격히 증가함을 확인할 수 있다.

3. 결론

연구에서는 티타늄합금(Ti-6Al-4V)의 밀링가공에서 반응표면법의 중심합성계획을 이용하여 실험조건을 도출하고, 티타늄합금에 대한 밀링가공실험을 수행하였으며, 실험결과로부터 가공성 분석을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 티타늄합금의 밀링가공에서 절삭력은 날당이송과 축방향깊이에 큰 영향을 받으며, 주축회전속도에는 상대적으로 그 영향을 적게 받는다.
2. 가속도 RMS는 주축회전속도, 날당이송, 축방향깊이에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 주축회전속도의 영향이 크게 나타난다.
3. 표면거칠기는 주축회전속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 날당이송의 영향이 크게 나타난다.
4. 절삭신호와 표면거칠기에 대한 반응표면분석을 통해 가공품질과 생산성을 고려하여 효과적인 가공범위는 주축회전속도 2,000~4,000 rpm, 날당이송 0.03~0.05 mm/tooth, 축방향깊이 1.5~3.0 mm이며, 최적 값은 3600 rpm, 0.0375 mm/tooth, 2.5 mm이다.

본 연구 결과로 도출된 최적 가공조건으로 NC 밀링에서 티타늄 합금(Ti-6Al-14V) 가공 시 가공변형과 진동을 최소화하여 불량률감소로 품질 및 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Lee, Y. T., Titanium(in Korean), Iron and Steel News, 2016.
2. Shaw, M. C., Dirke, S. O., Smith, P. A., Cook, N. H., Loewen, E. G., and Yang, C. T., Technical Report: Machining Titanium, Massachusetts Institute of Technology, 1954.
3. Kahles, J. F., Field, M., Eylon, D., & Froes, F. H., "Machining of Titanium Alloys", The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 37, No. 4, pp. 27-35, 1985.
4. Komanduri, R., and Von Turkovich, B. F. "New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys," Wear, Vol. 69, No. 2, pp.179-188, 1981.
5. Campa, F. J., López de Lacalle, L., Lamikiz, N. A., Sánchez, J. A., "Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, pp. 279-282, 2007.
6. Bhaumik, S. K., Divakar, C., & Singh, A. K. "Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool," Materials & Design, Vol. 16, pp.221-226, 1995.
7. Bae, M. W., Jung, H., Park, H. Y., "A Study on Wear Characteristics of Cutting Tools in a Titanium Roughing Cut Machining," Transactions of the Korean Society of Automotive, Vol. 24, No. 1, pp.67-73, 2016.
8. Ye, D. H., Koo, J. Y., Park, Y. 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. 508-5138-513, 2015.