

Al7050-T7451 소재의 밀링가공에서 반응표면법에 의한 가공성평가 및 가공안정화를 위한 절삭조건선정

구준영^a, 조문호^a, 김혁^a, 김정석^{b*}

Investigation of Cutting Conditions for Stable Machining and Machinability Evaluation in Milling Process of Al7050-T7451 by Response Surface Methodology

Joon-Young Koo^a, Mun-Ho Cho^a, Hyuk Kim^a, Jeong-Suk Kim^{b*}

^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University San 30, Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Republic of Korea

^b School of Mechanical Engineering / Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University San 30, Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 May 2014
Revised 9 June 2014
Accepted 11 June 2014

Keywords:

Aluminum alloy (Al7050-T7451)
Milling process
Machining evaluation
Response surface methodology

ABSTRACT

Aluminum alloy is a core material for structural parts of aircraft and automobiles to reduce the weight and maintain high specific strength. This study evaluates the machinability and investigates the optimal cutting conditions considering the surface integrity and productivity for Al7050-T7451 milling. The machining variables considered are the feed per tooth, spindle speed, axial depth of the cut, and radial depth of the cut. The machinability evaluation of Al7050-T7451 is conducted by analyzing the cutting force signals, acceleration signals, AE signals, and machined surface conditions. The optimal cutting conditions are determined by analyzing the experimental results using response surface methodology for stable machining considering the productivity and surface integrity.

1. 서론

최근 항공, 자동차, 방위산업을 비롯한 수송용 장비산업분야에서 지구온난화를 포함한 환경문제를 유발하는 탄소가스의 배출을 억제하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 특히, 연료효율성을 증대시킴으로써 탄소가스의 배출을 최소화시키고, 또한 연료비용의 절감을 위한 부품의 경량화가 급속히 이루어지고 있다.^[1]

알루미늄 합금은 비강도가 높은 소재로서 기계구조용 부품의 강도를 유지하면서 경량화할 수 있는 효과적인 소재이다.^[2] 따라서, 항공기 및 자동차의 프레임부품을 경량화시키기 위해 많이 사용되

고 있다. 뿐만 아니라, 휴대폰, 노트북과 같은 휴대용기기의 견고함을 유지하면서 경량특성 때문에 가공의 어려움에도 불구하고 활용되고 있다. 알루미늄 합금을 이용한 여러 구조형상이 가공되고 있으며, 특히 알루미늄합금의 높은 비강도를 활용하기 위해 얇은 벽형상의 가공이 주로 이루어지고 있다.

알루미늄 합금은 가공시 소재에 작용하는 절삭력과 열에 의해 가공변형이 발생할 가능성이 높은 소재로 가공 후 표면층의 잔류응력에 의한 치수정밀도 및 표면건전성이 악화될 수 있다. 따라서, 알루미늄 합금의 가공 품질을 향상시킬 수 있는 적합한 절삭조건 및 가공방법을 선정하는 것은 매우 중요하다.

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

Fax: +82-51-518-7207

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

Sebastien Seguy et al.^[3] 등은 알루미늄합금의 밀링가공시 가공 조건에 따른 표면거칠기의 변화에 대해 연구하였다. Jitender K. Rai et al.^[4] 등은 알루미늄 합금 가공 전용 지그를 통해 가공시 진동을 최소화하기 위한 연구를 수행하였다.

Balkrishna Rao et al.^[5] 등은 Al7075-T6소재에 대한 절삭가공에서 절삭조건에 따른 절삭력, 칩형상, 그리고 가공면품질에 대하여 분석하였다. J.H. Lee et al.^[6] 등은 Al7075소재의 밀링가공에서 가공속도 및 이송속도에 따른 절삭성을 평가하였다. Dimitrios Vakondios et al.^[7] 등은 Al7075-T6소재에 대한 밀링가공에서 밀링방식과 가공조건에 따른 가공면거칠기에 대해 분석하였다.

본 논문에서는 알루미늄 합금 Al7050-T7451의 밀링가공에서 가공조건에 따른 절삭력신호, 진동가속도신호, AE 신호, 그리고 가공표면상태 및 표면거칠기에 대한 분석을 통해 가공성이 양호한 적정가공조건을 도출하고자 한다. 실험조건은 반응표면법(Response Surface Methodology)의 중심합성계획을 이용하여 생성되었으며, 실험에서 변수는 날당이송, 주축회전속도, 축방향절삭깊이, 그리고 반경방향절삭깊이로 정하였다. 실험결과에 대한 분석은 반응표면법을 이용하여 수행하였으며, 생산성을 고려한 효과적인 밀링가공조건을 도출하였다.

2. 실험계획

반응표면법은 독립변수들의 수치변화에 따른 종속변수의 변화를 나타내는 반응표면의 분석을 통해 최적의 조건을 찾고, 통계적 분석을 통해 종속변수에 대한 독립변수의 영향도를 평가할 수 있는 효과적인 실험계획법이다.^[8]

실험조건은 반응표면법의 중심합성계획을 활용하여 생성하였다. 독립변수는 날당이송, 주축회전속도, 축방향절삭깊이, 그리고 반경방향절삭깊이로 정하였으며, x_1, x_2, x_3, x_4 로 표현하였다. 각 독립변수의 수치는 일정한 증분으로 3단계로 나누었다. 독립변수의 값들은 반응표면법에 적용하기 위해 선형변환을 행하였으며, 선형

Table 1 Level of the independent variables

Independent variables	Level		
	-1	0	1
Feed per tooth (mm/tooth)	0.04	0.12	0.20
Spindle speed (rpm)	6,000	10,000	14,000
Axial depth of cut (mm)	3.0	6.0	9.0
Radial depth of cut (mm)	1.5	3.0	4.5

변환식은 식 (1)에 나타내었다:

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_{i0}}{\xi_{i1} - \xi_{i0}} \quad (1)$$

여기서, x_i : 변수의 선형변환값, ξ_i : i단계의 변수값, ξ_{i0} : 0단계의 변수값, ξ_{i1} : +1 단계의 변수값이다.

Table 1에는 각 독립변수의 선형변환값과 실제값을 나타내었다. 이를 이용하여 실험조건을 생성하였으며 보다 정확한 실험결과와의 분석을 위해 실험순서는 무작위로 선정하였다.

3. 밀링가공실험

3.1 실험장치

가공실험은 최고 20,000 rpm의 주축회전속도를 가지는 고속머시닝센터(V55, Makino)를 이용하여 수행되었다. 가공시 발생하는 절삭력 신호를 획득하기 위해 공구동력계(9257b, Kistler)를 머시닝센터의 베드에 장착하였으며, 진동가속도를 측정하기 위해 가속도계(4384, B&K)를 시편에 부착하였다. 또한 Acoustic Emission (AE) 신호를 획득하기 위해 AE센서를 시편에 부착하였다. 신호획득은 DAQ보드(4472b, NI)를 이용하였으며 신호처리 및 저장은 NI사의 Labview V12.0를 이용하였다. 신호의 샘플레이트는 20,480 Hz로 설정하였다. Fig. 1에는 실험장치에 대해 나타내었다.

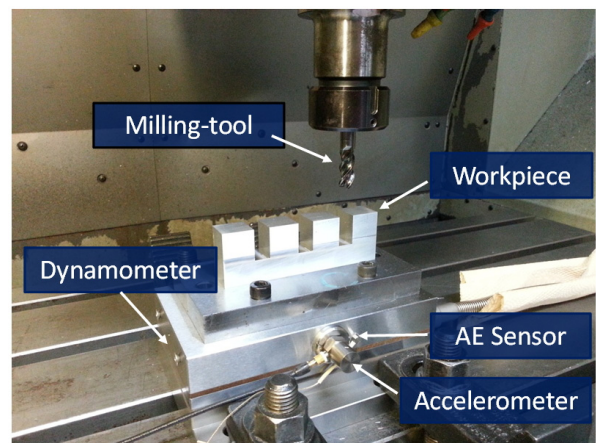


Fig. 1 Experimental setup

Table 2 Material properties of Al7050-T7451^[9]

Density (g/cc)	Young's Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Poisson's ratio	Melting point (°C)
2.83	71.7	469.0	524.0	0.33	488.0

가공시편의 소재는 Al7050-T7451이며, 소재 물성치는 Table 2에 나타내었다. 밀링가공실험은 10 mm의 공구경을 가지는 3날 엔드밀(AZS3100, 유니온툴)을 이용하여 수행하였다.

3.2 실험방법

Fig. 2에는 밀링가공실험의 개략도를 나타내었다. X축방향을 Feed방향으로 하고 중심합성계획을 통해 생성된 가공조건을 이용하여 밀링가공을 수행하면서 절삭력신호, 진동가속도(Acc)신호, AE신호들을 획득한다. 절삭력의 평균과 Acc Root mean square (RMS) 평균, AE RMS평균을 연산하고 Acc신호에 대한 FFT분석을 수행한다.

3.3 실험조건

알루미늄 합금 가공시, 날당이송, 주축회전속도, 축방향절삭깊이, 그리고 반경방향절삭깊이가 절삭신호 및 가공면품질에 미치는 영향을 분석하기 위해 중심합성계획을 이용하여 실험설계하여, Table 3에 실험조건들에 대해 나타내었으며, 가공실험은 건식으로 수행하였다.

Table 3 Experimental conditions

Experimental Number	Feed per tooth (mm)	Spindle speed (rpm)	A.Depth of cut (mm)	R.Depth of cut (mm)
1	0.20	6000	3	1.50
2	0.04	6000	3	4.50
3	0.04	14000	3	1.50
4	0.20	6000	9	1.50
5	0.12	10000	6	1.50
6	0.04	6000	9	4.50
7	0.04	6000	9	1.50
8	0.12	6000	6	3.00
9	0.20	14000	9	4.50
10	0.12	10000	6	3.00
11	0.20	14000	3	4.50
12	0.12	10000	6	3.00
13	0.04	6000	3	1.50
14	0.04	14000	9	4.50
15	0.04	14000	3	4.50
16	0.20	10000	6	3.00
17	0.04	10000	6	3.00
18	0.12	10000	3	3.00
19	0.04	14000	9	1.50
20	0.12	10000	6	3.00
21	0.12	10000	6	4.50
22	0.20	14000	3	1.50
23	0.20	14000	9	1.50
24	0.20	6000	9	4.50
25	0.20	6000	3	4.50
26	0.12	10000	9	3.00
27	0.12	14000	6	3.00

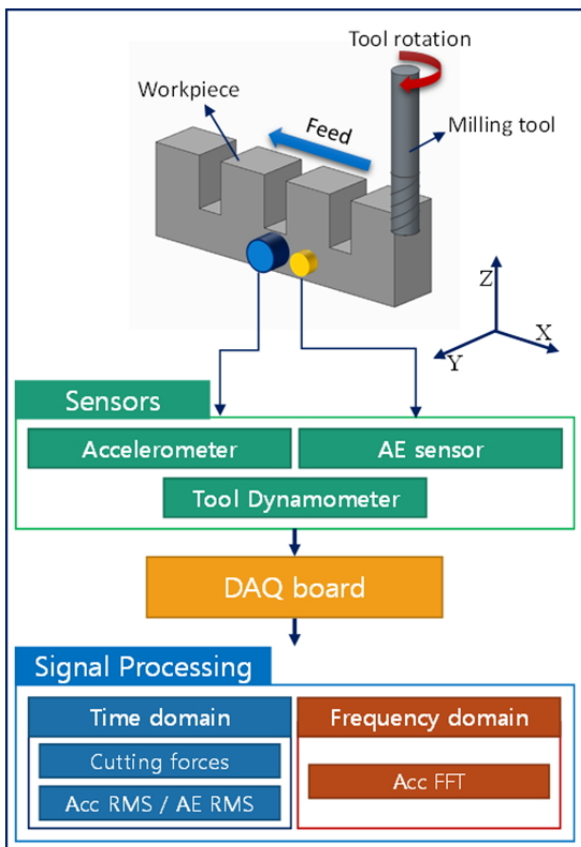


Fig. 2 Scheme of machining experiments

4. 실험결과

4.1 절삭신호

4.1.1 절삭력

Fig. 3에는 실험조건에 따른 평균절삭력을 나타내었다. Fig. 4에는 요인분석을 통해 가공변수에 따른 절삭력 변화를 나타내었다. Fig. 4(a)에서 날당이송이 증가함에 따라 절삭력의 합력이 증가하였으며, Fig. 4(c), (d)에서 축방향절삭깊이와 반경방향절삭깊이가 증가함에 따라 절삭력은 증가하였다. 이러한 현상은 소재제거율 (Material Removal Rate)의 증가에 의한 것으로 판단된다. 주축회전속도의 변화에 따른 절삭력은 유의미한 변화를 나타내지 않았다.

4.1.2 진동가속도 RMS

Fig. 5는 실험조건에 따른 Acc RMS의 평균을 나타내었으며, Fig. 6에는 요인분석을 통한 가공변수에 따른 Acc RMS의 변화에 대해 나타내었다. Fig. 6(a)에서 날당이송이 증가함에 따라 Acc RMS가 증가하였다. 또한 Fig. 6(b)에서 주축회전속도가 증가하면서 Acc RMS가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 절삭속도 증가

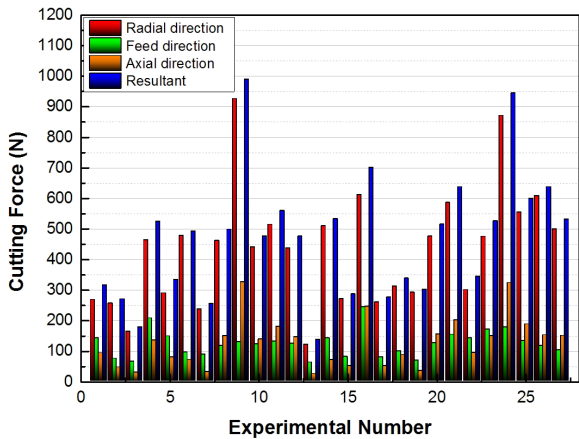


Fig. 3 Cutting forces according to the experimental number

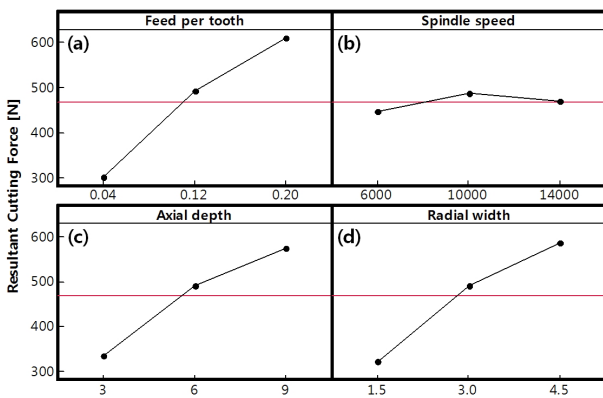


Fig. 4 Changes in resultant cutting force

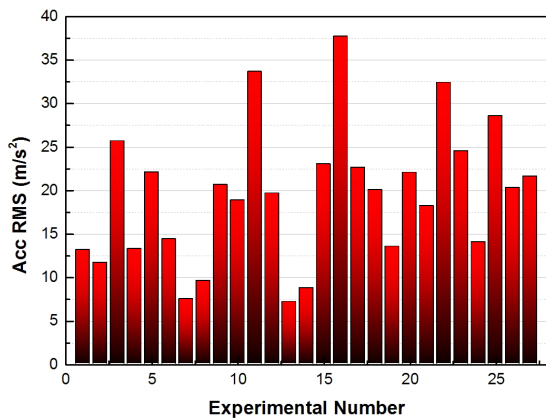


Fig. 5 Acceleration RMS according to the experimental number

로 인한 충격량의 증가에 의한 것으로 사료되며, 절삭속도증가에 따른 열적연화효과가 미미함으로 인해 절삭력의 차이가 거의 없어 주축회전속도 증가에 따라 커진 충격량이 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. Fig. 6(c)에서 주축방향절삭깊이의 증가에 따라 Acc RMS는 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 절삭시 소재와 공구 사이에 작용하는 절삭력의 중심점의 위치에 따른 것으로 사료된다.

4.1.3 AE RMS와 표면거칠기

Fig. 7에는 실험조건에 따른 AE RMS와 가공표면거칠기에 대해 나타내었다. 실험조건에 따른 가공표면거칠기의 변화는 일부조건을 제외하고, AE RMS와 유사한 경향을 나타내었다. 이를 통해 AE RMS값을 이용하여 가공표면거칠기의 상대적인 예측이 가능할 것으로 사료된다.

4.2 가공표면상태

Acc RMS, 가공표면상태, 표면거칠기에 대한 분석에서 Acc RMS가 18 m/s^2 일 때부터 표면상태가 좋지 않으며, 20 m/s^2 이상에서는 가공바닥면에 진동에 의한 격자무늬가 발생하였으며, 표면

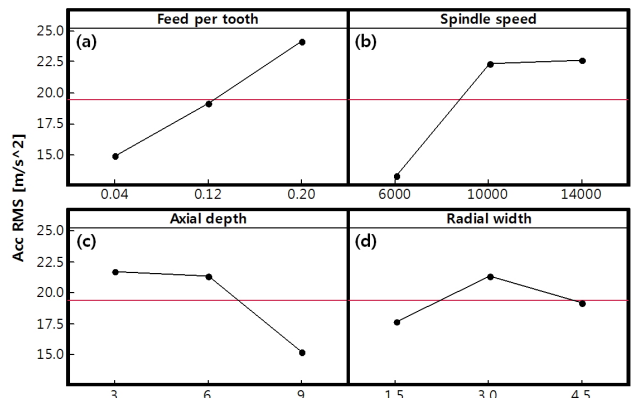


Fig. 6 Changes in acceleration RMS

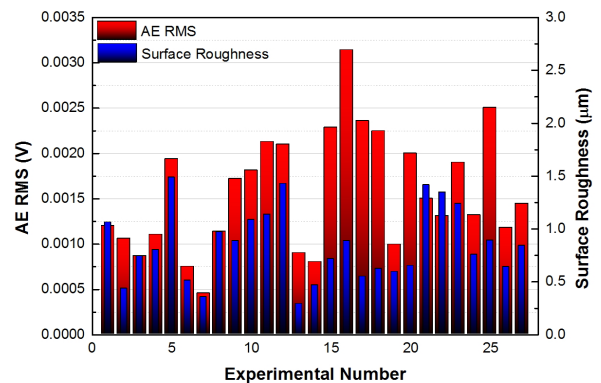
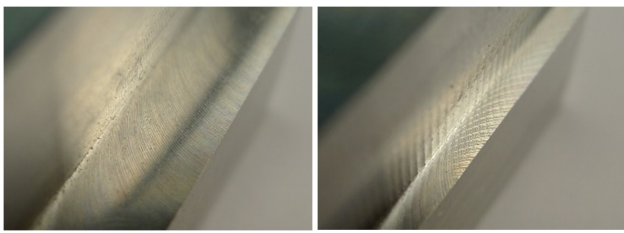


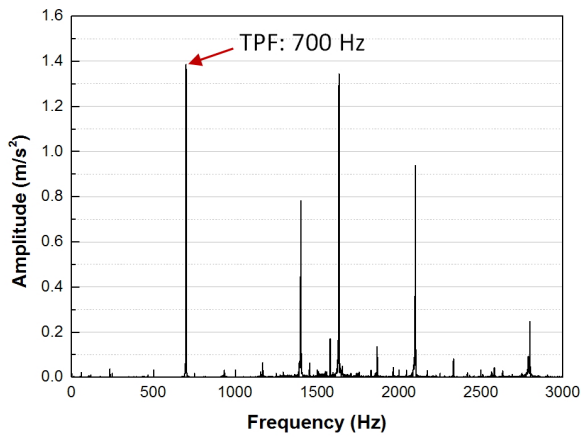
Fig. 7 AE RMS and Surface roughness according to the experimental number

거칠기도 0.84 μ m 이상으로 상대적으로 높게 측정되었다. Fig. 8에는 대표적인 두 가지 가공표면을 나타내었으며, Fig. 9에는 두 가공 표면에 대한 진동가속도신호의 FFT그래프를 각각 나타내었다. 이를 통해 정상적인 가공이 이루어질 경우 공구날 회전주파수(TPF)가 주파수로 나타나지만, 표면에 격자무늬가 생성된 불안정한 가공에서는 TPF의 값보다, TPF의 배수주파수의 값이 더 높게 나타났으며, 이를 통해 밀링가공시 진동이 발생한 것으로 판단된다.

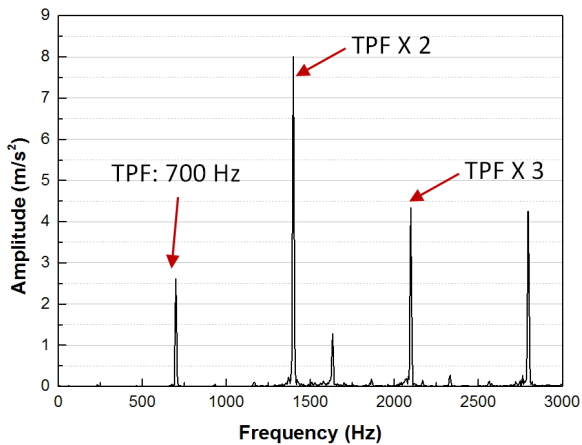


(a) Stable machining (b) Unstable machining

Fig. 8 Machined surface features



(a) Stable machining

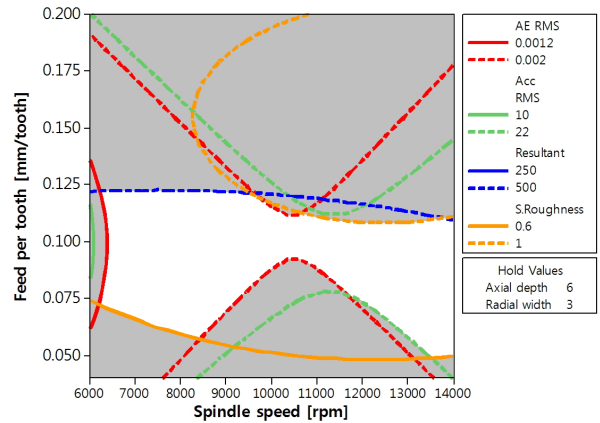


(b) Unstable machining

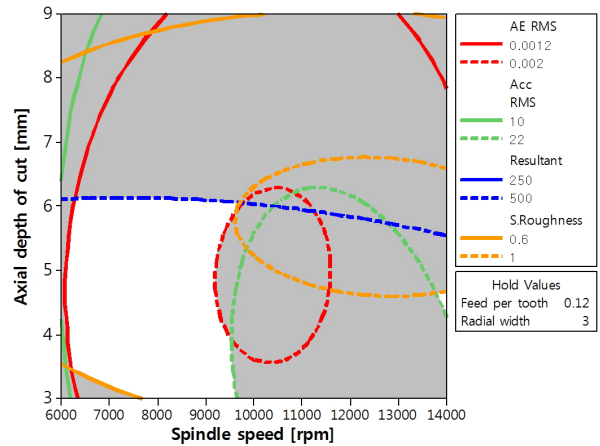
Fig. 9 FFT graphs of acceleration signals

4.3 반응표면분석

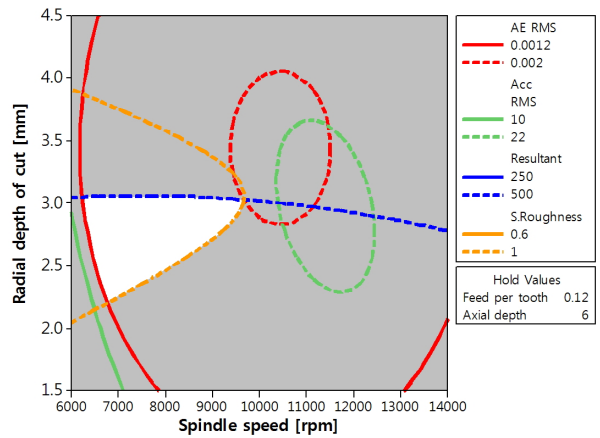
Fig. 10에는 날당이송, 주축회전속도, 주축방향절삭깊이, 그리고 반경방향절삭깊이를 요인으로 하는 절삭력, Acc RMS, AE RMS, 그리고 가공표면거칠기의 반응표면에 대한 등고선을 이용하여 수행한 반응표면분석 결과에 대해 나타내었다. 실험결과를 이용하여



(a) Contour map – feed per tooth vs. spindle speed



(b) Contour map – axial depth of cut vs. spindle speed



(c) Contour map – radial depth of cut vs. spindle speed

Fig. 10 RSM analysis

격자무늬가 생성되지 않는 조건의 절삭합력, Acc RMS, AE RMS, 그리고 가공표면거칠기에 대한 각각의 평균을 기준으로 하여, 절삭합력은 250~500 N, Acc RMS는 10~22 m/s², AE RMS는 1.2~2.0 mV의 범위에 대한 반응표면분석을 통해 정상가공을 위한 가공조건의 범위를 구하였으며 Table 4에 나타내었다.

반응표면을 이용한 최적조건분석은 통계전용프로그램인 Minitab을 이용하여 수행하였으며, 이에 대해 Fig. 11에 나타내었다. 이를 통해 안정적인 가공조건범위 내에서 생산성을 고려한 최적의 가공조건을 도출하였으며 Table 5에 정리하여 나타내었다.

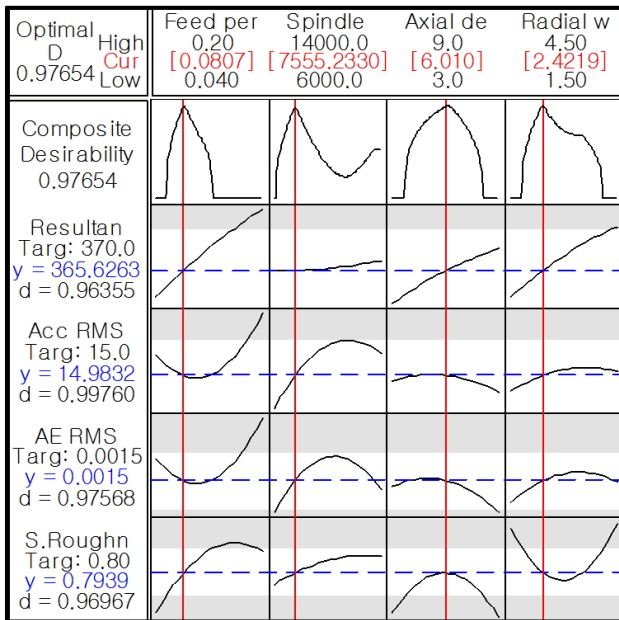


Fig. 11 Analysis of optimal cutting condition considering productivity

Table 4 Ranges of cutting conditions for stable machining

Variable	Range
Feed per tooth (mm/tooth)	0.05 - 0.12
Spindle speed (rpm)	6240 - 9640
Axial depth of cut (mm)	3.0 - 6.1
Radial depth of cut (mm)	2.2 - 3.0

Table 5 Optimal cutting conditions considering productivity

Variable	Value
Feed per tooth (mm/tooth)	0.08
Spindle speed (rpm)	7550
Axial depth of cut (mm)	6.0
Radial depth of cut (mm)	2.4

5. 결론

Al7050-T7451소재의 밀링가공실험을 통해 가공성을 평가하고, 생산성과 가공품질을 고려한 최적의 가공조건을 도출하기 위해 반응표면분석을 수행하였다. 본 논문의 실험결과를 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

날당이송, 축방향절삭깊이, 그리고 반경방향절삭깊이의 증가에 따른 소재제거율의 증가로 인해 절삭합력이 증가하였으며, 특히 날당이송이 증가할수록 Acc RMS도 증가함을 확인하였다. AE RMS와 가공표면거칠기는 유사한 성향을 나타내었으며, 가공중에 가공표면상태에 대한 상대적인 비교 및 예측이 가능할 것으로 판단된다.

가공면상태, 가공면거칠기, 그리고 진동가속도신호의 FFT 분석을 통해 Acc RMS가 20 m/s² 이상으로 증가하면, 가공표면건전성이 악화되며, 주파수영역분석에서 TPF의 진폭보다 다른 주파수의 진폭이 더 커짐을 확인하였다.

또한 실험결과를 활용한 반응표면분석을 이용하여 안정적인 가공이 가능한 가공조건의 범위를 구하였으며, 생산성을 고려한 밀링가공의 최적조건을 도출하였다.

후기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. NRF-2012R1A1A2040824).

References

- [1] Juijerm, P., Altenberger, I., 2000, Alloys, Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.
- [2] Odeshi, A. G., Adesola, A. O., Badmos, A. Y., 2013, Failure of AA 6061 and 2099 aluminum alloys under dynamic shock loading, Engineering Failure Analysis 35 302-314.
- [3] Seguy, S., Dessein, G., Arnaud, L., 2008, Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal Interactions, Int. Journal of Machine Tools and Manuf. 48 261-274.
- [4] Rai, J. K., Xirouchakis, P., 2008, Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components Int. Journal of Machine Tool and Manuf. 48 629-643.
- [5] Ning, H., Zhigang, W., Chengyu, J., Bing, Z., 2001, Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters Int. Journal of Machine Tool and Manuf. 41

- 1763-1781.
- [6] Subramanian, M., Sakthivel, M., Sooryaprakash, K., Sudhakaran, R., 2013, Optimization of Cutting Parameters for Cutting Force in Shoulder Milling of Al7075-T6 Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm, *Procedia Engineering* 64 690–700.
- [7] Vakondios, D., Kyratsis, P., Yaldiz, S., Antoniadis, A., 2012, Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6, *Measurement* 45 1480–1488.
- [8] Park, S. H., 2003, *Design of Experiments*, Minyoung Publishing, Seoul.
- [9] Matweb n.d. <<http://www.matweb.com>>.