

# Al 2024 합금의 측벽 엔드밀 가공 시 최적 가공조건

홍도관\*, 안찬우#, 박진우\*\*, 백황순\*\*

## Optimum Working Condition of Al 2024 Alloy in Side Wall End Milling

Do-Kwan Hong\*, Chan-Woo Ahn#, Jin-Woo Park\*\*, Hwang-Soon Baek\*\*

### ABSTRACT

Working condition is one of the most important factors in precision working. In this study, we optimized the vibration acceleration level (VAL) of Al 2024 alloy to select optimum working condition of side wall end-milling using RSM (Response Surface Methodology). RSM was well adapted to make analytic model for minimizing vibration acceleration, created the objective function and saved a great deal of computational time. Therefore, it is expected that the proposed optimization procedure using RSM can be easily utilized to solve the optimization problem of working condition. The experimental results of the surface roughness and VAL showed the validity of the proposed working condition of side wall end-milling as it can be observed.

**Key Words :** SResponse Surface Methodology(반응표면법), Side Wall End Mill(측벽엔드밀), Optimum Design(최적설계), Vibration Acceleration Level(진동가속도레벨)

### 1. 서 론

오늘날 산업현장에서 엔드밀 가공은 기계, 금속 산업의 비약적인 발전과 더불어 널리 사용되어지고 있으며, 고정밀도, 고효율성을 위한 절삭공정으로 자동차산업, 우주항공산업 및 금형산업 등을 비롯한 정밀 기계 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 각종 정밀 기계의 부품이나 전자기기 등에 비중이 작고 내식성이 양호할 뿐만 아니라 합금 방법에 따라 내마멸성이 뛰어난 알루미늄 합금의 사용이 날로 증가하고 있다.

이러한 알루미늄 합금을 소재로 한 기계부품 및 전자부품의 가공은 다양한 형상의 가공에 유용한 엔드밀 가공이 주를 이루고 있다. 엔드밀은 일반적으로 고속도강이나 초경을 사용하고 있지만 각종 코팅을 행하여 사용하는 경우도 있다. 일반적으로 엔드밀에 의한 가공은 공구손상과 가공정도에 영향을 미치는 가공조건으로 절삭량, 절삭깊이, 절삭속도 및 이송속도 및 절삭깊이 등이 있으며, 가공조건에 따른 공구수명 연장을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 엔드밀 가공에 있어서 가공조건은 현장경험을 이용하여 가공을 하고 있는 실정이며 공구 동력계를 이용한 절삭력 측정과 공구형상 설계에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 가공 조건에 주요한 영향을 미치는 인자들에 대한 정량적인 데이터를 제시하고

\* 한국전기연구원 전동력연구센터

# 교신저자 : 동아대학교 기계공학부

E-mail : cwahn@dau.ac.kr

\*\* 동아대학교 기계공학부 일반대학원

있지 못하는 실정이다.

절삭가공에서 발생하는 채터진동은 절삭가공면의 정밀도, 동작기계 및 공구의 수명, 가공공정의 생산성에 영향을 미친다.<sup>(1)</sup> 채터진동을 방지하려면 동작기계의 정·동강성을 향상시켜야 하지만<sup>(2)</sup>, 동일 동작기계에서는 단지 절삭조건이나 공구형상의 적절한 변화로 가공 중에 발생하는 채터진동을 감소 또는 없앨 수 있다고 알려져 있다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 알루미늄 20계열 중에 가장 강도가 높고 절삭성이 양호하며 주로 항공기 외관, 구조재 부품, 단조재에 사용되는 Al 2024 합금 소재에 대한 가공정밀도가 최고가 되는 가공조건을 분석하고자 하였다. 머시닝 센터의 스핀들축에 3축 진동가속도계를 부착하고 가공 시 발생하는 진동을 측정 및 분석하여 최적의 가공조건을 선정하고자 하였다. 일반적으로 최적가공조건을 표면조도를 이용하여 분석하는 방법을 많이 이용하고 있다. 그러나 스핀들축의 진동이 개선되면 표면조도도 좋아지는 상호연관성이 존재하기 때문에 진동계측을 통하여 최적가공조건을 탐색하는 방법을 적용하고자 하였다. 3축 진동가속도 레벨의 개선으로 인한 신뢰성을 확보하기 위해서 표면조도로 확인실험을 수행하였다. 고속도강 엔드밀을 이용한 피삭재의 엔드밀 가공에 있어서 효과적인 최적화 방법<sup>(4)~(6)</sup>인 반응표면법(Response Surface Methodology : RSM)을 이용하였으며 여기서 얻어진 근사 다항식으로 최적화를 수행하였다. 주로 이산적인 설계공간에서 설계변수들에 대한 수준의 조합을 선택하는 문제는 설계변수의 수준을 좁혀가면서 최적해를 찾아야하는 어려움이 있고, 이러한 가공실험의 경우에는 실험비용이 상승하게 된다. 그러나 연속 설계공간에서 적은 실험으로 2차 근사 다항식을 구성하여 설계변수의 수준 내에서 최적해를 구해 반응치를 예측하는 방법은 보다 효율적인 방법이 된다. 예측된 최적 설계값을 검증을 위하여 최적가공조건에 대한 확인실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 논문의 가공실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 스핀들축의 회전수는 최고 12,000 rpm, 테이블 이

송속도는 30 m/min이다. Fig. 1은 수직형 머시닝센터의 스핀들축에 3축 가속도센서를 부착한 사진이며, 3축 가속도센서를 이용하여 가공 시 발생하는 진동을 측정하는 개략도를 나타내고 있다. 절삭공구는  $\phi 10$ 의 초경 공구강 3날 엔드밀을 사용하였다. 가공실험에 사용한 재료는 알루미늄 합금인 Al 2024를  $30 \times 40 \times 100$  mm로 일정하게 가공하여 실험하였으며, 절삭 깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다. 엔드밀의 평면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 30 mm를 기준으로 습식 측면 가공하였다. 측정방법은 머시닝 센터의 스핀들축에 3축 가속도센서를 부착하고 가공 시 발생하는 X, Y, Z축의 3축 진동가속도(rms) 신호를 FFT에 입력하고 주파수 스펙트럼으로 변환하여 진동가속도 값을 측정하였다. 주파수 범위는 1.6 kHz, 주파수 분해능은 0.5 Hz로 하였다. Table 1은 사용된 Al 2024 합금소재의 화학적 성질을 나타낸다.

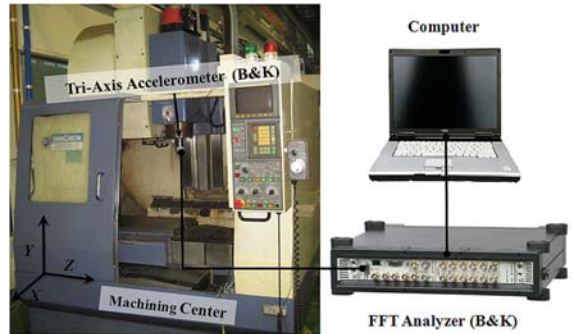


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

Table 1 Chemical composition of Al 2024 alloy(%)

Cu	Mg	Zn	Fe	Si	Mn	Cr
3.8	1.5	0.25	0.5	0.5	0.6	0.1

기계가공에 있어서 가공면의 표면정도는 KS-B01 61에서 일반적으로 표면거칠기(surface roughness)를 나타내는 여러 가지 종류가 있지만 본 연구에서 사용한 표면거칠기는 산술 평균 거칠기  $R_a$ 로 거칠기 곡선으로부터 그 평균 선의 방향에 기준 길이만큼 뽑아내어, 그 표본 부분의 평균 선 방향에 X축으로 하고 세로 배율 방향에 Y축으로 하여 거칠기 곡선을  $f(x)$ 로

나타내었을 때 식 (1)에 따라 구해진다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

여기서  $l$ 은 기준 길이이다. 엔드밀 가공에서의 기준 길이는 기하학적인 1날의 날 형상에 따른 날 궤적에 의해서 결정된다. 본 연구에 사용된 표면조도계는 HOMMEL사의 T1000이다.

### 3. 최적가공조건

#### 3.1 반응표면법

반응표면법은 여러 개의 설계변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 가 복합적인 작용을 하여 어떤 반응변수  $\eta$ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다.  $k$ 개의 설계변수에 대한 실제응답  $\eta$ 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = F(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (2)$$

실제로, 식 (2)와 같은 반응함수  $F$ 는 미지의 함수로 취급되며 알려져 있다 하더라도 매우 복잡한 함수의 형태로 표현되거나 나타내기가 매우 어려워진다. 따라서 반응함수로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면모형은  $k$ 개의 설계변수에 대한 중회귀모형 (Multiple Regression Model)으로 나타내며, 이 가정은 실험자가 흥미를 가지고 있는 설계영역에서만 만족하면 된다. 대부분의 경우에 실제 응답함수  $F$ 의 근사함수인  $y$ 는 Taylor 급수 전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차의 다항식 모형으로 나타낼 수 있게 된다. 여기서 2차 다항식 모델은 다양한 함수의 모양을 표현할 수 있을 뿐만 아니라 근사 다항식의 계수를 쉽게 구할 수 있으며, 상당히 많은 연구에 의하여 그 유효성이 검증되어 있다. 따라서 실제 응답함수  $F$ 와 2차 근사함수의 관계는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j^2 + \sum_{i=j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

여기서 변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 는 설계변수,  $\beta$ 는 회귀계수,  $\epsilon$ 은 응답의 통계적인 오차항으로 평균이 0이고 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 식 (3)의 근사함수로부터  $n$ 개의 실제 관측한 자료에서 추정된 출력값  $y$ 는 행렬의 형태로써 식 (4)와 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (4)$$

여기서  $X$ 는 설계변수의 행렬,  $\beta$ 는 회귀계수의 벡터,  $\epsilon$ 은 임의의 오차 벡터이다.

한편 식 (4)에서 회귀계수 벡터는 임의의 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법을 이용하여 추정한다. 추정된 벡터  $\hat{\beta}$ 는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 또한 추정된 벡터  $\hat{\beta}$ 에 의하여 추정된 근사함수  $\hat{y}$ 는 식 (6)과 같다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \quad (5)$$

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (6)$$

여기서 행렬  $X'$ 은 행렬  $X$ 의 전치행렬이다.

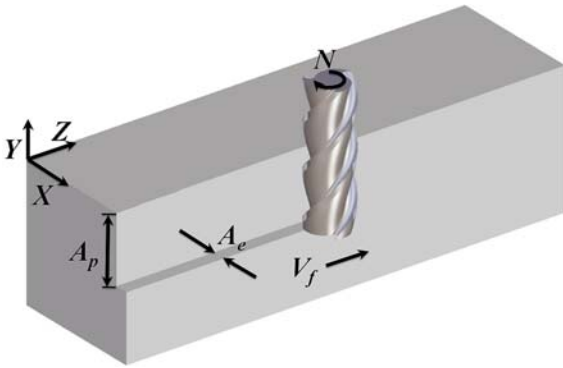
#### 3.2 설계변수 및 직교배열표

주어진 설계영역 안에서 설계변수와 반응값 사이의 관계식을 구하기 위하여 3수준의 혼합직교배열표를 이용하여 보다 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정할 수 있다. Fig. 2는 엔드밀 가공에 있어서 인자인 설계변수를 나타낸다. 축방향 절삭깊이( $A_p$ ), 반지름 방향 절삭깊이( $A_e$ ), 스피ndl축의 회전수( $N$ ) 및 이송속도( $V_f$ )를 설계변수로 선정하고 상향절삭과 습식절삭을 하였다. Table 2는 엔드밀 가공에서의 설계변수와 각 설계변수에서의 수준 값을 나타내었다. 각 수준의 경우 재료의 소재와 절삭공구에 따라서 달라지며 본 연구에서 수준의 값은 산업현장에서 주로 많이 사용하는 범위로 설정하였으며 Table 3은 혼합직교배열표( $L_{18}2^1 \times 3^7$ )를 나타낸다. Table 4는 각 실험조건에서 가공 시 발생하는 스피ndl의 진동가속도를 측정하여 식 (7)를 이용하여 진동가속도레벨인 데시벨로 환산하여 나타내었다. 식 (7)에서  $a$ ,  $a_0$ 는 측정가속도 값과 ISO 기준가속도 값( $10^{-6} \text{ m/s}^2$ )을 나타낸다.

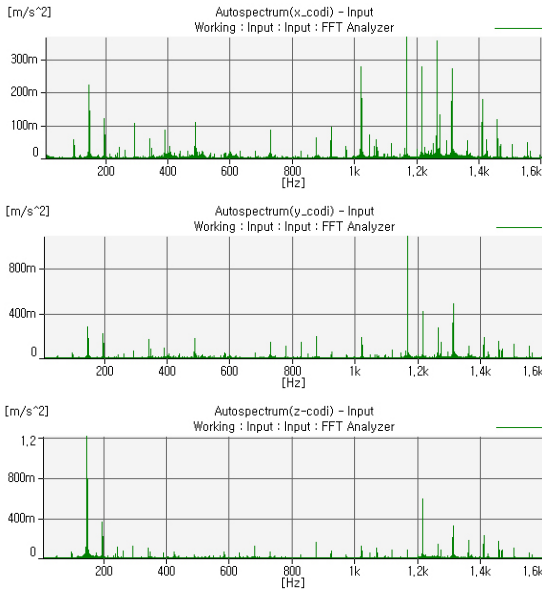
$$VAL = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

**Table 2 Design variables and levels**

Design variable	Level		
	1	2	3
Radial depth of cut (mm, $A_e$ )	0.4	0.8	1.2
Axial depth of cut (mm, $A_p$ )	3	7	11
Spindle speed (rpm, $N$ )	2,915	4,770	6,625
Feed rate (mm/min, $V_f$ )	852.5	1,395	1,938



**Fig. 2 Design variable**



**Fig. 3 Tri-Axis vibration acceleration autospectrum of 1st experiment**

Fig. 3은 혼합직교배열표의 첫번째 실험조건에 대한 진동가속도 신호를 주파수 분석한 autostpectrum 신호를 나타내고 있다.

**Table 3 Table of mixed orthogonal array ( $L_{18}2^1 \times 3^7$ )**

	$A_e$ (mm)	$A_p$ (mm)	$N$ (rpm)	$V_f$ (mm/min)
1	0.4	3	2,915	852.5
2	0.4	7	4,770	1,395
3	0.4	11	6,625	1,938
4	0.8	3	2,915	1,395
5	0.8	7	4,770	1,938
6	0.8	11	6,625	852.5
7	1.2	3	4,770	852.5
8	1.2	7	6,625	1,395
9	1.2	11	2,915	1,938
10	0.4	3	6,625	1,938
11	0.4	7	2,915	852.5
12	0.4	11	4,770	1,395
13	0.8	3	4,770	1,938
14	0.8	7	6,625	852.5
15	0.8	11	2,915	1,395
16	1.2	3	6,625	1,395
17	1.2	7	2,915	1,938
18	1.2	11	4,770	852.5

**Table 4 Experimental result of tri-axis VAL**

	Tri-axis Vibration Level Acceleration (dB)			Surface roughness ( $\mu\text{m}$ )
	$VAL_x$	$VAL_y$	$VAL_z$	
1	120.749	124.761	126.888	0.13
2	123.522	128.399	128.595	0.14
3	126.021	130.021	125.756	0.15
4	125.933	129.686	135.461	0.14
5	128.943	136.069	132.889	0.15
6	123.918	128.097	124.19	0.14
7	129.036	137.219	134.066	0.14
8	135.89	139.991	134.807	0.15
9	124.082	128.881	128.974	0.15
10	127.458	133.405	129.6	0.15
11	123.637	128.266	129.855	0.14
12	117.685	124.19	121.938	0.14
13	130.021	139.209	135.792	0.13
14	131.246	135.446	131.434	0.14
15	119.046	122.86	122.798	0.13
16	129.036	135.133	131.102	0.14
17	133.497	138.137	141.584	0.12
18	122.411	130.881	126.966	0.12

가공 시 발생하는 진동가속도의 경우 고주파 성분이 많이 발생하며, 본 연구에 적용한 동일한 기법을 이용하여 저주파 성분이 지배적인 진동속도와 진동변위에 대한 분석도 동일한 결과가 됨을 검증하였다. 또한 Fig. 3의 피크값은 스피들축의 회전수를 60으로 나누는 주파수 값에 엔드밀의 날수를 곱한 값이 기본주파수가 되며, 이 기본주파수의 배수에 해당하는 조화 성분에서 각 피크가 검출되었다. 이러한 사실은 18회의 전체실험에서 확인 검토하였다. Table 4는 Table 3의 혼합직교배열표에 의한 측정실험 결과로 3축 진동가속도레벨과 표면조도( $R_a$ )를 나타내었다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 분산분석

분산분석을 통해서 측벽 엔드밀 가공 시 발생하는 3축의 진동가속도레벨에 대한 설계변수가 유효함을 알 수 있다. Table 5는 가공면에 수직인 방향인 X축 방향의 진동가속도레벨에 대한 설계변수의 분산분석 결과를 나타내며, 축방향 절삭깊이, 반지름 방향 절삭깊이, 스피들축의 회전수, 이송속도의 순으로 신뢰수준 95%를 모두 만족하고 있다. 모든 설계변수들이 가공 진행방향의 진동가속도레벨에 유효함을 알 수 있다. 가공면에 평행한 방향인 Y축 방향의 진동가속도레벨에 대한 설계변수의 분산분석 결과도 X축과 거의 동일하게 나타났다. Table 6은 공구 이송방향인 Z축 방향의 진동가속도레벨에 대한 설계변수의 분산분석 결과를 나타내며, 축방향 절삭깊이, 반지름 방향 절삭깊이, 이송속도, 스피들축의 회전수의 순으로 나타났으며 축방향 절삭깊이, 반지름 방향 절삭깊이는 신뢰수준 95%를 만족하고 있으며 이송속도는 신뢰수준 95%를 만족한다. 그러나 스피들축의 회전수는 유의하지 않는 인자로 나타났다.

### 4.2 평균분석

Fig. 4에는 특성치인 3축 진동가속도레벨에 대한 평균의 주효과를 나타내었다. X축은 엔드밀 공구에 작용하는 절삭저항 중에 가공면에 수직인 방향으로 작용하는 주분력에 해당되며 헬리스각에 의한 측면

절삭이 연속적으로 이루어진다. 반경 방향 절삭깊이( $A_e$ ), 스피들축의 회전수( $N$ )와 이송속도( $V_f$ )는 1수준에서 X축의 진동가속도레벨이 최소가 되며 축방향 절삭깊이( $A_p$ )는 3수준에서 최소가 됨을 알 수 있다. 반지름 방향 절삭깊이( $A_e$ )와 스피들축의 회전수( $N$ )는 1수준에서 Y축의 진동가속도레벨이 최소가 되며 축방향 절삭깊이( $A_p$ )는 3수준에서 최소가 되며 이송속도( $V_f$ )는 2수준에서 최소가 된다. Y축은 엔드밀 공구에 작용하는 절삭저항 중에 가공면에 평행한 방향으로 작용하는 배분력에 해당된다.

Table 5 ANOVA for X axis VAL

Design variable	S	$\Psi$	V	$F_0$	P
Radial depth of cut (mm, $A_e$ )	102.143	2	51.072	15.27	0.001
Axial depth of cut (mm, $A_p$ )	164.101	2	82.051	24.54	0.000
Spindle speed (rpm, $N$ )	67.360	2	33.680	10.07	0.005
Feed rate (mm/min, $V_f$ )	39.981	2	19.991	5.98	0.022
Error	30.092	9	3.344		
Total	404.184	17			

Table 6 ANOVA for Z axis VAL

Design variable	S	$\Psi$	V	$F_0$	P
Radial depth of cut (mm, $A_e$ )	101.998	2	50.999	8.95	0.007
Axial depth of cut (mm, $A_p$ )	232.419	2	116.210	20.39	0.000
Spindle speed (rpm, $N$ )	6.370	2	3.185	0.56	0.591
Feed rate (mm/min, $V_f$ )	47.037	2	23.518	4.13	0.053
Error	51.304	9	5.700		
Total	439.128	17			

이송속도( $V_f$ )는 X, Z축의 진동가속도레벨에서는 수준이 클수록 증가하였다. Z축의 진동가속도레벨은 절삭저항 중에 이송분력에 해당되며 반지름 방향 절삭깊이( $A_e$ )와 이송속도( $V_f$ )는 수준이 클수록 절삭저항의 증가로 인하여 진동가속도레벨의 변화가 크게 나타나고 있다. 축방향 절삭깊이( $A_p$ ), 스피들축의 회전수( $N$ )는 3수준에서 진동가속도레벨이 최소가 된다. X, Y축의 진동가속도레벨에서는 스피들축의 회전수( $N$ )

2,915 rpm에서 최소가 되었지만, Z축의 진동가속도레벨은 수준이 클수록 감소하였다. 하지만 분산분석에서 Z축의 진동가속도레벨에서 스핀들축의 회전수는 민감도가 낮은 설계변수로서 스핀들축의 회전수의 변화에 따라서 진동가속도레벨은 크게 차이가 없음을 알 수 있다. Z축의 경우 가공방향이 공구 이송방향과 일치하고 있으므로 엔드밀의 공구 절삭날과 피삭재와의 접촉저항, 절삭된 칩의 배출에 있어서의 간섭으로 인하여 진동가속도레벨이 X축에 비하여 크게 나타나며 Y축과 비슷한 크기로 나타난다.

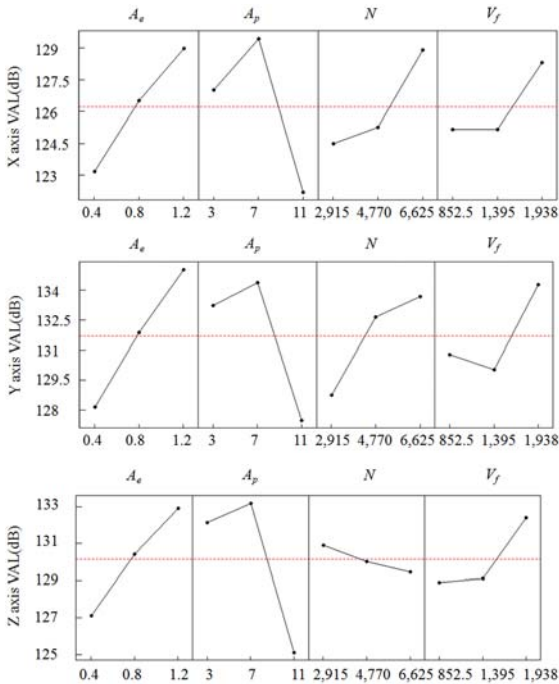


Fig. 4 Main effect for tri-axis VAL

### 4.3 반응표면법

식 (4)~(6)을 적용하여 3축의 진동가속도레벨을 근사화하는 2차 근사 다항식을 식 (8)~(10)에 나타내었다. 근사 다항식들의 정확성을 분석하기 위해서 실험을 통해서 얻어진 값과 근사 다항식을 통해 얻어지는 값 사이에 근사 오차의 정도를 나타내는  $R^2$ (결정계수)와  $\text{adjust } R^2$ (수정결정계수)가 있으며  $R^2$ 와  $\text{adjust } R^2$ 는 0과 1사이의 값을 가지고, 1에 가까울수록 근

사화가 잘 되었음을 의미한다.  $VAL_X$ ,  $VAL_Y$ ,  $VAL_Z$ 의  $\text{adjust } R^2$ 는 각각 84.6%, 84.2%, 91.6%로 나타났다. 3축 진동가속도레벨의 2차 근사 다항식 중에 가공 진행방향인 Z축, X축, Y축의 순으로 신뢰도가 높게 나타났다. 절삭저항 중에 Z축에 해당되는 이송분력에 비해 주분력과 배분력에 해당되는 X축, Y축의 신뢰도가 낮게 나타났다.

$$VAL_X = 122.303 + 15.35A_e + 3.61A_p - 0.006N - 0.0075V_f + 0.289A_e^2 - 0.326A_p^2 + 0.59E-6N^2 + 0.521E-5V_f^2 - 0.63E-4A_eN - 0.406A_eA_p - 0.33E-2A_eV_f + 0.18E-3A_pN - 0.14E-3A_pV_f \quad (8)$$

$$VAL_Y = 120.628 + 11.726A_e + 3.754A_p + 0.0005N - 0.019V_f + 2.49A_e^2 - 0.271A_p^2 - 0.13E-6N^2 + 0.107E-4V_f^2 + 0.91E-3A_eN - 0.67A_eA_p - 0.0045A_eV_f + 0.11E-3A_pN - 0.45E-3A_pV_f \quad (9)$$

$$VAL_Z = 121.483 + 16.174A_e + 3.712A_p - 0.0039N - 0.0001V_f + 5.351A_e^2 - 0.315A_p^2 + 0.28E-6N^2 + 0.313E-5V_f^2 - 0.002A_eN - 0.76A_eA_p - 0.11E-2A_eV_f + 0.28E-3A_pN - 0.7E-3A_pV_f \quad (10)$$

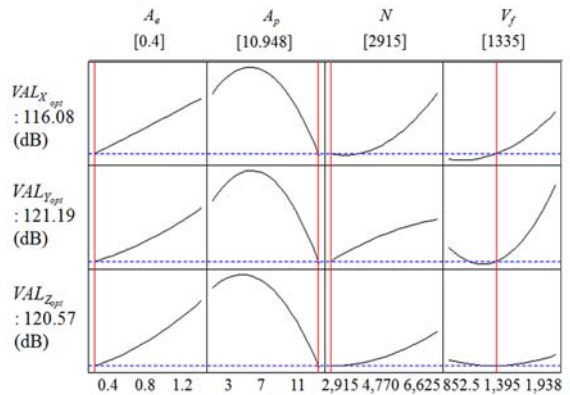


Fig. 7 Result of response optimizer

**Table 7 Optimum solution and result**

Design variable	Model	Optimum (predict)	Experiment (Validation)
Radial depth of cut(mm, $A_e$ )			0.4
Axial depth of cut(mm, $A_p$ )			10.95
Spindle speed(rpm, $N$ )			2,915
Feed rate(mm/min, $V_f$ )			1,335
X-axis VAL(dB, $VAL_{X_{opt}}$ )		116.079	116.79
Y-axis VAL(dB, $VAL_{Y_{opt}}$ )		121.191	121.14
Z-axis VAL(dB, $VAL_{Z_{opt}}$ )		120.572	120.26
Surface roughness( $\mu m$ )			0.12

반응최적설계를 통해 구한 최적결과는 반지름 방향 절삭깊이( $A_e$ ) 0.4 mm, 축방향 절삭깊이( $A_p$ ) 10.95 mm, 스피들축의 회전수( $N$ ) 2,915 rpm, 이송속도( $V_f$ ) 1,335 mm/min로 나타났다. 이때 X, Y, Z축의 진동가속도레벨은 116.08 dB, 121.19 dB, 120.57 dB로 예측되었다. 반응최적설계의 결과는 예측결과이므로 최적값을 검증하기위해서 최적조건으로 확인실험을 수행하였다. Table 7에서와 같이 반응최적을 통한 예측값과 실험값이 잘 일치함을 알 수 있었다. 표면조도의 값이 Table 3의 모든 실험결과와 비교하여 개선된 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초경 엔드밀을 이용한 AI 2024 피삭재의 엔드밀 가공에 있어서 최적화 방법인 반응표면법으로 최적가공조건에 대한 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 스피들축에서 측정된 3축 진동가속도를 이용하여 스피들축의 회전수, 이송속도, 축방향, 반지름 방향 절삭깊이를 설계변수로 하여 분산분석과 평균분석을 수행하였으며, 설계변수 모두가 3축 진동가속도의 반응값에 주요한 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.
2. 예측된 최적설계 해에 대한 검증을 위하여 최적가공조건에 대한 확인실험을 수행하였으며, 그 결과 반응최적설계에 의한 예측값은 실험결과와 잘 일치

함을 알 수 있었다.

3. 본 연구를 통하여 AI 2024 합금에 초경 공구장 3날 엔드밀을 사용하여 정상조건에서 최적가공조건을 반응표면법을 이용하여 얻을 수 있었다.
4. 향후 이러한 방법을 통해서 난삭재와 고속가공을 포함한 모든 기계가공에 대한 최적가공조건을 구하는데 유용하게 적용할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

1. Merritt, H. E., "Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter," Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 87, pp. 447-454, 1965.
2. Elbestawi, M. A., Papazafiriou, T. A. and Du, R. X., "In-process Monitoring of Tool Wear in Milling using Cutting Force Signature," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 31, No. 1, pp. 55-73, 1991.
3. Tobias, S. A. and Fishwick, W., "The Chatter of Lathe Tools under Orthogonal Cutting Conditions," Trans. of the ASME, Vol. 80, pp. 1079-1088, 1958.
4. Hong, D. K., Kim, D. Y. and Ahn, C. W., "The Study on the Optimal Working Condition for Vibration, Surface Roughness and Cutting Temperature in End Milling," Trans. KSNVE, Vol. 14, No. 12, pp. 1322-1329, 2004.
5. Hong, D. K. and Kim, J. M., "Optimum Design of Maglev Lift System's Electromagnet for Weight Reduction using Response Surface Methodology," International Journal of COMPEL, Vol. 27, No. 4, pp. 797-805, 2008.
6. P. Lim and G. E. Yang, "Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-Axis Machine by Response Surface Method," Trans. KSME, Vol. 31A, No. 9, pp. 924-933, 2007.