

측벽 엔드밀 가공 시 반응표면법을 이용한 최적 가공조건 Optimum Working Condition of Side Wall End Milling Using Response Surface Methodology

홍도관* · 최재기** · 박진우*** · 백황순*** · 안찬우†
Do-Kwan Hong, Jae-Gi Choi, Jin-Woo Park, Hwang-Soon Baek
and Chan-Woo Ahn

(2008년 4월 15일 접수 ; 2008년 10월 29일 심사완료)

Key Words : Response Surface Methodology(반응표면법), Table of Orthogonal Array(직교배열표), Side Wall End Mill(측벽 엔드밀), Vibration Acceleration(진동가속도), Optimum Design(최적설계)

ABSTRACT

Working condition is one of the most important factors in precision working. In this study, we optimized the vibration acceleration of working progress direction using RSM(response surface methodology) by table of orthogonal array. 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 vibration acceleration showed the validity of the proposed working condition of side wall end-milling as it can be observed.

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 정밀기계 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 그리고 다양한 형상을 가진 모델을 가공하기 위한 여러 방법들이 개발되고 있으며 그 수요는 날로 증가하고 있다. 엔드밀은 일반적으로 고속도강이나 초경재료를 원재료로 사용하고 있으며, 코팅 처리된 것을 사

용하는 경우도 있다. 엔드밀 가공에 있어서 공구손상과 가공정도에 영향을 미치는 가공조건은 절삭량, 절삭깊이, 절삭속도, 이송속도 등이 있으며, 가공조건에 따른 공구의 수명 연장을 위한 연구가 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, 가공조건에 주요한 영향을 미치는 인자들에 대한 정량적인 데이터를 제시하고 있지 못하는 실정이다.

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

† 교신저자: 정희원, 동아대학교 기계공학부

E-mail : cwahn@dau.ac.kr

Tel : (051) 200-7643, Fax : (051) 200-7659

* 정희원, 한국전기연구원 전동력연구센터

** 정희원, (주)한국단자공업 중앙연구소 선행연구팀

*** 동아대학교 일반대학원 기계공학과

이 연구에서는 스핀들축에 3축 진동가속도계를 이용하여 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 진동가속도의 개선으로 인한 신뢰성을 확보하기 위해서 표면조도로 확인실험을 수행하였다. 고속도강 엔드밀을 이용한 피삭재의 엔드밀 가공에 있어서 통계적인 기법을 이용한 효과적인 최적화 방법⁽⁴⁻⁸⁾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 연속설계공간에서 적은 실험으로 2차 근사 다항식을 구성하여 설계변수의 수준 내에서 최적해를 구해 반응치를 예측하는 방법은 보다 효율적인 방법이 된다. 예측된 최적 설계값을 검증 위하여 최적가공조건에 대한 확인실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

이 논문의 가공실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 스핀들축의 회전수는 최고 3600 rpm, 공구 이송속도는 5000 mm/min이다. Fig. 1은 수직형 머시닝센터의 스핀들축에 3축 가속도센서를 부착한 사진이며, 절삭공구는 $\phi 10$ 의 고속도 공구강 4날 엔드밀을 사용하였다. 실험에 사용한 재료는 일반 기계 구조용 탄소강인 SM45C를 40×30×30 mm로 일정하게 가공하여 실험하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다. 엔드밀의 평면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 30 mm를 기준으로 습식 측면 가공하였다. Fig. 2에는 3축 가속도센서를 이용하여 가공 시 발생하는 진동을 측정하는 개략도를 나타내고 있다. 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.

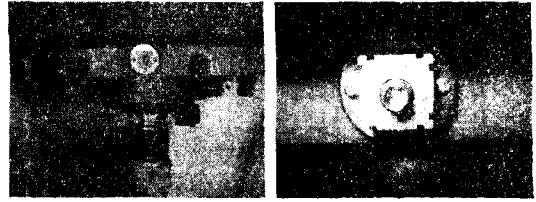


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

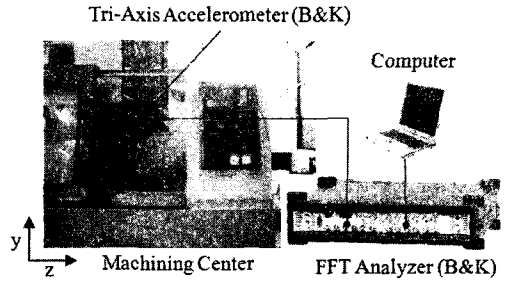


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

주파수 범위는 1.6 kHz, 주파수 분해능은 0.25 Hz로 하였다.

기계가공에 있어서 가공면의 표면정도는 KS-B01 61에서 일반적으로 표면거칠기(surface roughness)를 나타내는 여러 가지가 있지만 이 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. 이 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 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표

면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. k 개의 설계 변수에 대한 실제응답 η 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 모형은 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.

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

여기서 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 설계변수, β 는 회귀 계수, ϵ 은 응답의 통계적인 오차항으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 식(3)의 근사함수로부터 n 개의 실제 관측한 자료에서 추정된 출력값 y 는 행렬의 형태로서 식(4)와 같이 정리된다.

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

여기서 X 는 설계변수의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 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 실험

주어진 설계영역 안에서 설계변수와 반응값 사이의 관계식을 구하기 위하여 3수준의 혼합직교배열표를 이용하여 보다 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정할 수 있다. Fig. 3은 엔드밀 가공에 있어서 인자인 설계변수를 나타낸다. 축방향 절삭깊이(A_p), 반지름 방향 절삭깊이(A_e), 스핀들축의 회전수(N) 및 이송속도(V_f)를 설계변수로 선정하고 상향절삭과 습식절삭을 하였다. Table 1은 엔드밀 가공에서의 설계변수와 각 설계변수에서의 수준 값을 나타내었다. 각 수준의 경우 재료의 소재와 절삭공구에 따라서 달라지며 이 연구에서 수준의 값은 산업현장에서 주로 많이 사용하는 범위로 설정하였으며 Table 2는 혼합직교배열표($L_{18}2^1 \times 3^7$)를 나타낸다. Table 3은 Table 2의 혼합직교배열표에 의한 측정실험 결과로

Table 1 Design variables and levels

Design variable \ Level	1	2	3
Radial depth of cut(mm, A_e)	0.25	0.625	1
Axial depth of cut(mm, A_p)	2	5	8
Spindle speed(rpm, N)	300	750	1200
Feed rate(mm/min, V_f)	80	200	320

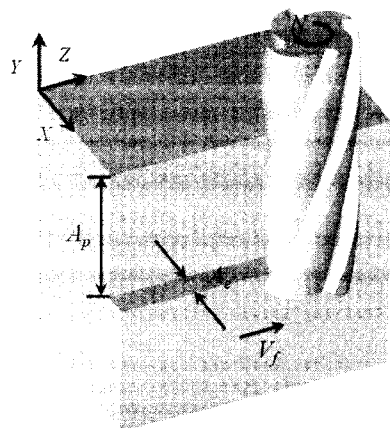


Fig. 3 Design variable

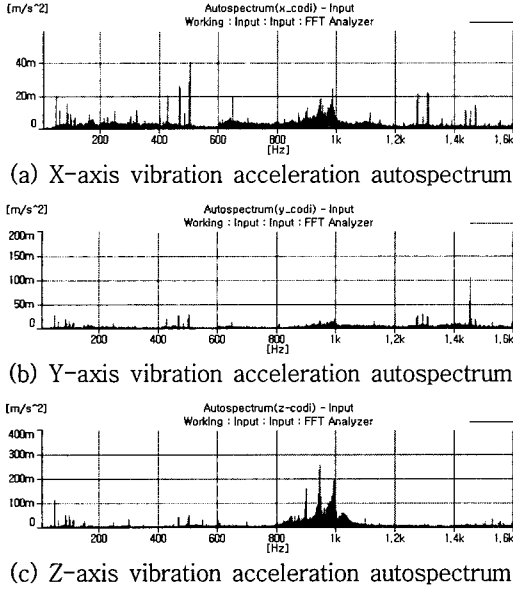


Fig. 4 Vibration acceleration autospectrum of 18th experiment

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

	A_x (mm)	A_y (mm)	N (rpm)	V_f (mm/min)
1	0.25	2	300	80
2	0.25	5	750	200
3	0.25	8	1200	320
4	0.625	2	300	200
5	0.625	5	750	320
6	0.625	8	1200	80
7	1	2	750	80
8	1	5	1200	200
9	1	8	300	320
10	0.25	2	1200	320
11	0.25	5	300	80
12	0.25	8	750	200
13	0.625	2	750	320
14	0.625	5	1200	80
15	0.625	8	300	200
16	1	2	1200	200
17	1	5	300	320
18	1	8	750	80

3축 진동가속도와 표면조도(R_a)를 나타내었다. Fig. 4는 혼합직교배열표의 18번째 실험조건에 대한 진

Table 3 Experimental result of 3 axis vibration acceleration

	Tri-axis vibration acceleration(mm/s ²)			Surf (μ m)
	A_x	A_y	A_z	
1	138	254	352	0.16
2	180	211	641	0.18
3	243	267	1290	0.19
4	155	224	495	0.16
5	211	282	1090	0.17
6	218	294	1280	0.18
7	175	249	540	0.16
8	241	349	1810	0.18
9	334	410	1520	0.18
10	233	313	871	0.16
11	142	236	295	0.18
12	212	254	887	0.18
13	195	256	787	0.17
14	194	255	1030	0.19
15	199	248	860	0.19
16	201	292	1100	0.16
17	334	456	1560	0.17
18	225	298	1420	0.15

동가속도 신호를 주파수 분석한 autostpectrum 신호를 나타내고 있다. 가공 시 발생하는 진동가속도의 경우 고주파 성분이 많이 발생하며, 이 연구에 적용한 동일한 기법을 이용하여 저주파 성분이 지배적인 진동속도와 진동변위에 대한 분석도 동일한 결과가 나타남을 검증하였다.

또한 Fig. 4의 피크값은 스피들축의 회전수를 60으로 나눈 주파수 값에 엔드밀의 날수를 곱한 값이 기본주파수가 되며, 이 기본주파수의 배수에 해당하는 조화성분에서 각 피크가 검출되었다. 이러한 사실은 18회의 전체실험에서 확인 검토하였다.

4. 최적설계결과 및 검증실험

4.1 분산분석

분산분석을 통해서 측벽 엔드밀 가공 시 발생하는 3축의 진동가속도에 대한 설계변수의 유의함을 알 수 있다. 이들 중에 Table 4는 가공 진행방향인 Z축 방향의 진동가속도에 대한 설계변수의 분산분석 결과를 나타내며, 반지름 방향 절삭깊이, 축방향 절삭

Table 4 ANOVA for Z axis vibration acceleration

Design variable	S	Ψ	V	F_0	P
Radial depth of cut (mm, A_c)	1,128,550	2	564,275	18.40	0.001
Axial depth of cut (mm, A_p)	865,448	2	432,724	14.11	0.002
Spindle speed (rpm, N)	523,875	2	261,937	8.54	0.008
Feed rate (mm/min, V_f)	409,300	2	204,650	6.67	0.017
Error	275,998	9	30,666		
Total	3,203,170	17			

깊이, 스핀들축의 회전수, 이송속도의 순으로 신뢰 수준 95%를 모두 만족하고 있다. 모든 인자들이 가공 진행방향의 진동가속도에 유의한 인자임을 알 수 있다.

4.2 평균분석

Fig. 5에는 특성치인 3축 진동가속도에 대한 평균의 주효과를 나타내었다. X축은 엔드밀 공구에 작용하는 절삭저항 중에 가공면에 수직인 방향으로 작용하는 주분력에 해당되며 헬리스각에 의한 측면 절삭이 연속적으로 이루어진다.

축방향 절삭깊이(A_p), 반지름 방향 절삭깊이(A_c)와 이송속도(V_f)는 1수준에서 X축의 진동가속도가 최소가 되며 스핀들축의 회전수(N)는 2수준에서 최소가 됨을 알 수 있다. 반지름 방향 절삭깊이(A_c)와 축방향 절삭깊이(A_p)는 1수준에서 Y축의 진동가속도가 최소가 되며 스핀들축의 회전수(N)와 이송속도(V_f)는 2수준에서 최소가 됨을 알 수 있다. 이송속도(V_f)는 X, Z축의 진동가속도에서는 수준이 클수록 증가하였다. Z축의 진동가속도는 절삭저항 중에 이송분력에 해당되며 반지름 방향 절삭깊이(A_c), 축방향 절삭깊이(A_p), 스핀들축의 회전수(N)와 이송속도(V_f)는 수준이 클수록 절삭저항의 증가로 인하여 진동가속도의 변화가 크게 나타나고 있다. X, Y축의 진동가속도에서는 스핀들축의 회전수(N) 750 rpm에서 최소가 되었지만, Z축의 진동가속도는 수준이 클수록 증가하였다. 또한 가공방향이 공구 이송방향과 일치하고 있으므로 엔드밀의 공구 절삭날과 피삭재와의 접촉저항, 절삭된 칩의 배출에 있어서의 간섭으로 인하여 진동가속도가 X, Y축에 비하여 크게 나타난다.

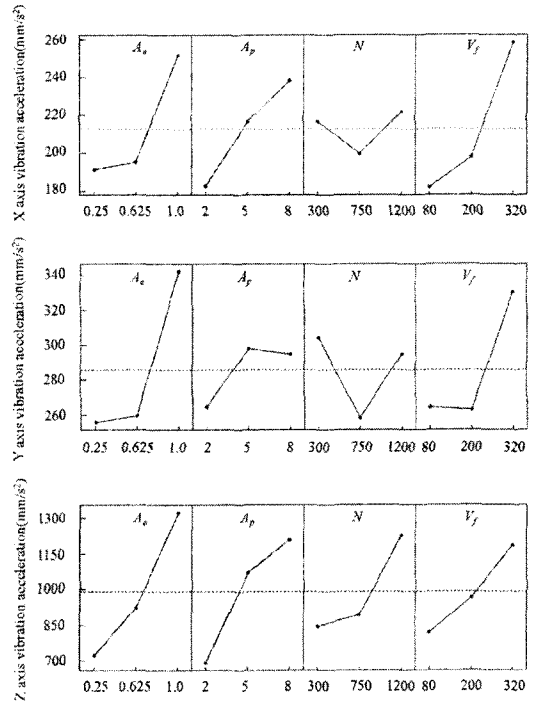


Fig. 5 Illustration of factor effect for tri-axis vibration acceleration

4.3 반응표면법

Table 3의 혼합적교배열표의 행렬실험을 통해서 얻은 결과에서 X, Y, Z축의 3축 진동가속도 중에 X, Y축의 진동가속도 값은 Z축 가공 진행방향의 값보다 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (4)~(6)을 적용하여 3축의 진동가속도를 근사화하는 2차 근사 다항식을 식 (7)~(9)에 나타내었다.

$$A_x = 112.765 - 164.144A_c + 5.74A_p + 0.191N - 0.247V_f + 202.688A_c^2 + 4.447A_cA_p - 0.238A_cN + 0.739A_cV_f - 0.0129A_pV_f \quad (7)$$

$$A_y = 284.61 - 126.31A_c + 13.476A_p + 0.174N - 1.645V_f + 181.857A_c^2 - 0.428A_cN + 1.985A_cV_f - 0.0527A_pV_f + 0.000858NV_f \quad (8)$$

$$A_z = 266.799 - 1491.67A_c - 4.308A_p + 0.128N + 2.434V_f + 955.794A_c^2 - 7.397A_p^2 - 0.00532V_f^2 + 141.811A_cA_p + 2.412A_cV_f + 0.1015A_pN \quad (9)$$

근사 다항식들의 정확성을 분석하기 위해서 실험

을 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 근사화가 잘 되었음을 의미한다.

A_x, A_y, A_z 의 $\text{adjust } R^2$ 는 각각 96.9%, 85.8%, 93.3%로 나타났다. 3축 진동가속도의 2차 근사 다항식 중에 가공 진행방향인 X축, Z축, Y축의 순으로 신뢰도가 높게 나타났다. 절삭저항 중에 축분력에 해당되는 Z축의 신뢰도가 낮게 나타났다. Fig. 6은 스펀들축의 회전수(N)에 따른 반지름 방향 절삭깊이(A_e)와 이송속도(V_f)의 변화에 따른 3축 진동가속도의 3개의 반응값에 대한 중첩등고선도를 나타낸

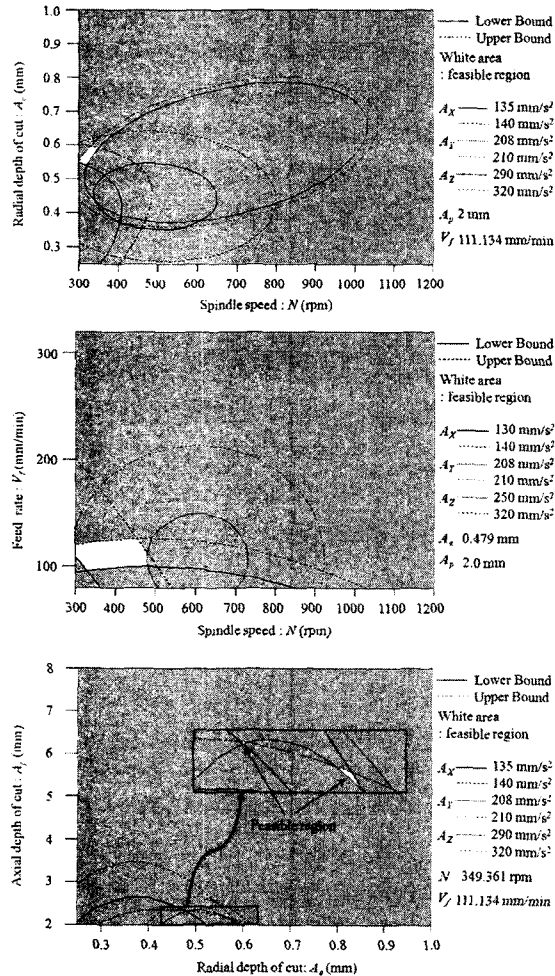


Fig. 6 Overlaid contour plot of X, Y, Z axis vibration acceleration(A_x, A_y, A_z)

다. 또한 반지름 방향 절삭깊이(A_e)와 축방향 절삭깊이(A_p)에 대한 중첩등고선도도 나타내었다. 반응함수가 곡선형태를 나타내는 설계변수들과 비교를 하였다. 중첩등고선도는 반응값이 다수인 경우 각 반응값의 규격을 동시에 만족시켜주는 인자들의 범위를 나타내며 규격 상·하한값은 그림에 나타내었다. Fig. 6에 의하면 흰색 영역이 설계 가능한 영역으로 반지름 방향 절삭깊이(A_e)는 0.5 mm 이내이며 축방향 절삭깊이(A_p)는 경계영역인 2 mm로 나타났다. 또한 이송속도(V_f)는 100~130 mm/min 이내 영역이며, 스펀들축의 회전수(N)는 300~470 rpm의 영역으로 나타났다.

변곡점이 존재하는 3개의 3축 진동가속도의 반응값을 동시에 만족시켜주는 중첩영역 내에서 최적설계점을 찾기 위하여 반응최적설계를 수행하였으며 Fig. 7에 나타내었다. 3축 진동가속도의 2차 근사 다

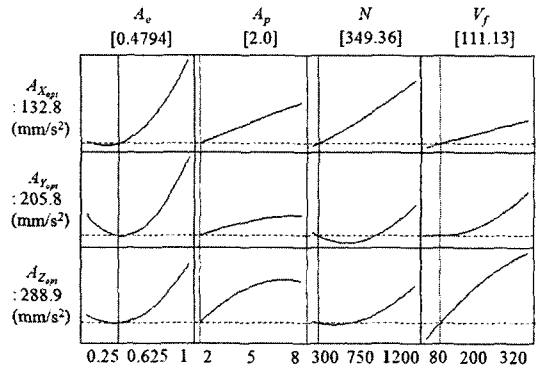


Fig. 7 Result of response optimizer

Table 5 Optimum solution and result

Design variable	Model	Optimum (predict)	Experiment (validation)
Radial depth of cut(mm, A_e)		0.479	
Axial depth of cut(mm, A_p)		2.0	
Spindle speed(rpm, N)		349.361	
Feed rate(mm/min, V_f)		111.134	
X-axis vibration acceleration (mm/s ² , $A_{x_{opt}}$)		132.8	121
Y-axis vibration acceleration (mm/s ² , $A_{y_{opt}}$)		205.8	198
Z-axis vibration acceleration (mm/s ² , $A_{z_{opt}}$)		288.9	311
Surface roughness(mm, $Surf$)		0.14	

항식을 목적함수로 정의하고 목적함수의 값은 Table 3의 행렬실험에서의 최소값보다 작게 되도록 설정하였으며 절삭가공의 최적설계 문제를 정식화로 표시하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize : } & A_{X_{opt}} \leq \min(L_{18}2^1 \times 3^7(A_X)) \\ & A_{Y_{opt}} \leq \min(L_{18}2^1 \times 3^7(A_Y)) \\ & A_{Z_{opt}} \leq \min(L_{18}2^1 \times 3^7(A_Z)) \quad (10) \\ \text{Subject to } & 0.25 \leq A_e \leq 1, 2 \leq A_p \leq 8 \\ & 300 \leq N \leq 1200, 80 \leq V_f \leq 320 \end{aligned}$$

반응최적설계를 통해 구한 최적결과는 반지름 방향 절삭깊이(A_e) 0.479 mm, 축방향 절삭깊이(A_p) 2.0 mm, 스피들축의 회전수(N) 349.361 rpm, 이송속도(V_f) 111.134 mm/min로 나타났다. 이때 X, Y, Z축의 진동가속도는 132.8 mm/s², 205.8 mm/s², 288.9 mm/s²로 예측되었다. 반응최적설계의 결과는 예측결과이므로 최적값을 검증하기위해서 최적조건으로 확인실험을 수행하였다. Table 5에서와 같이 반응최적을 통한 예측값과 실험값이 잘 일치함을 알 수 있었다.

진동가속도의 경우 X축, Y축은 개선되었으며 Z축의 값이 다소 변동이 있으나 표면조도의 값이 Table 3의 모든 실험결과와 비교하여 개선된 것을 확인하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 고속도강 엔드밀을 이용한 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 평균 분석을 수행하였으며 설계변수 모두가 3축 진동가속도의 반응값에 주요한 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.

(2) 최적화 단계에서 반응표면법에 의한 실험 및 분석결과 최적가공조건은 반지름 방향 절삭깊이(0.479 mm), 축방향 절삭깊이(2.0 mm), 스피들축의 회전수(349.361 rpm), 이송속도(111.134 mm/min)로

나타났다. 이 경우 반응최적설계를 통한 X, Y, Z축의 3축 진동가속도는 132.8 mm/s², 205.8 mm/s², 288.9 mm/s²로 나타났다.

(3) 예측된 최적설계 해에 대한 검증을 위하여 최적가공조건에 대한 확인실험을 수행하였으며, 그 결과 반응최적설계에 의한 예측값은 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

(4) 이 연구를 통하여 일반 기계 구조용 탄소강인 SM45C에 고속도 공구강 4날 엔드밀을 사용하여 정삭조건에서 최적가공조건을 반응표면법을 이용하여 얻을 수 있었다.

(5) 향후 이러한 방법을 통해서 난삭재와 고속가공을 포함한 모든 기계가공에 대한 최적가공조건을 구하는데 유용하게 적용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2007학년도 동아대학교 학술연구비(공과과제)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Merritt, H. E., 1965, "Theory of Self-excited Machine-tool Chatter", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Industry, Vol. 87, pp. 447~454.
- (2) Elbestawi, M. A., Papazafiriou, T. A. and Du, R. X., 1991, "In-process Monitoring of Tool Wear in Milling Using Cutting Force Signature", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 31, No. 1, pp. 55~73.
- (3) Tobias, S. A. and Fishwick, W., 1958, "The Chatter of Lathe Tools under Orthogonal Cutting Conditions", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 80, pp. 1079~1088.
- (4) Bae, C. H., Choi, K. H. and Lee, S. H., 2002, "Determination of Optimal Excimer Laser Ablation Conditions using Genetic Algorithm", Journal of the Koran Society for Precision Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 17~23.
- (5) Hong, D. K., Woo, B. C. and Kang, D. H., 2006, "Optimal Geometric Design of Transverse

Flux Linear Motor Using Response Surface Methodology”, Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineerins, Vol. 55B, No. 10, pp. 498~503.

(6) Lim, P. and Yang, G. E., 2007, “Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-axis Machine by Response Surface Method”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 31A, No. 9, pp. 924~933.

(7) Park, C. K., Kim, Y. G., Bae, D. S. and Park, T. W., 2002, “Efficient Optimization of the Suspen-

sion Characteristics Using Response Surface Model for Korean High Speed Train”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 461~468.

(8) Hong, D. K., Kim, D. Y. and Ahn, C. W., 2004, “The Study on the Optimal Working Condition for Vibration, Surface Roughness and Cutting Temperature in End Milling”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1322~1329.