

진동가속도와 표면조도를 이용한 측벽 엔드밀 최적가공조건

Optimal Manufacturing condition of side wall End Milling

Using Vibration acceleration and surface Roughness

*최재기, 박진우¹, 홍도관², 안찬우³

*J. G. Choi, J. W. Park¹, D. K. Hong², C. W. Ahn(cwahn@dau.ac.kr)³

¹ 동아대학교 기계공학부 일반대학원, ²한국전기연구원 진동력연구그룹, ³동아대학교 기계공학부

Key words : Response Surface Methodology, Side Wall End Milling, Vibration acceleration level, Surface roughness

1. 서론

산업현장에서 엔드밀 가공은 널리 사용되고 있으며 다양한 형상을 가진 모델을 가공하기 위한 다양한 툴이 개발되고 있다.

최근 효과적인 최적화 방법으로 주목 받고 있는 반응표면법(Response Surface Methodology : RSM)⁽¹⁾은 통계적인 근사 기법으로써 여러 설계변수가 복합적인 작용을 하여 어떤 시스템의 응답을 생성할 때 이들의 관계를 근사 다항식의 형태로 만든 뒤 이를 이용하여 최적화를 수행하는 방법이다. 또한 이 근사 다항식은 설계변수의 함수로써 설계공간내의 시스템 응답을 쉽게 예측할 수 있게 해줄 뿐만 아니라 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있어 최적화 수행에 필요한 계산 시간도 많이 단축할 수 있게 해준다.

Kline⁽²⁾ 등이 엔드밀링의 표면 정밀도 예측에 대한 연구를 하였으며, Hong⁽³⁾ 등은 엔드밀 가공에 있어서 제품의 정도에 영향을 미치는 스피들의 3축 진동, 표면조도, 공구수명에 영향을 미치는 절삭온도를 반응치로 하여 제한조건을 고려한 특성함수를 제안하여 최적절삭조건 선정에 관한 연구를 수행하였다. 따라서 본 논문에서는 Hong의 논문을 배경으로 가공 진행방향의 진동가속도를 이용하여 주축의 회전수, 테이블 이송속도, 측방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이를 설계변수로 선정하고 반응표면법을 이용하여 설계변수와 진동가속도레벨(Vibration Acceleration Level : VAL), 표면조도에 대한 관측 자료로부터 근사 다항식을 만들어서 실질적인 목적함수를 제시하였다. Hong의 논문에서 나온 최적가공조건일 때의 최적값 보다 더 개선된 최적가공조건을 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

이 실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 주축의 회전수는 최고 3,600 rpm, 공구 이송속도는 5,000 mm/min이다. 절삭공구는 $\phi 10$ 의 고속도공구강 4날 엔드밀을 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 재료는 일반 기계구조용 탄소강인 SM45C를 40×30×30 mm로 일정하게 가공하여 사용하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다.

엔드밀의 평면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 30 mm를 기준으로 습식 측면 가공하였다. Fig. 1에는 머시닝센터의 스피들축에 3축 가속도센서를 부착하여 가공 시 발생하는 진동을 측정하는 개략도를 나타내고 있으며 머시닝 센터의 스피들 축에 가속도센서를 부착하여 FFT로 , 축의 진동가속도(rms) 스펙트럼을 측정하였고 주파수 범위는 1.6 kHz, 주파수 분해능은 0.25 Hz로 하였다. 그리고 실험 완료 후 시험편은 표면조도계를 사용하여 평균표면거칠기 Ra를 측정하였다.

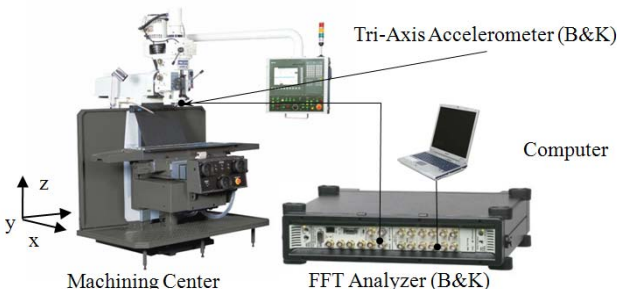


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

3. 반응표면법

3.1 반응표면법의 개념

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 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 즉, 임의의 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 실제 응답과 k 개의 설계변수들 사이의 인과관계를 규명하게 된다. k 개의 설계변수에 대한 실제응답 η 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = F(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1)$$

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 있다. 따라서 실제 응답함수 F 와 2차 근사함수의 관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

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

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

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

여기서 y 는 설계변수의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차 벡터이다. 한편 식 (3)에서 회귀계수 벡터는 임의의 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소사승법을 이용하여 추정한다. 최소사승 함수는 식 (4)와 같다.

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon^2 = \epsilon' \epsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (4)$$

추정된 벡터 b 는 식 (5)를 만족해야 하며, 그 값은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 또한 추정된 벡터 b 에 의하여 추정된 근사함수 \hat{y} 은 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = -2X'y + 2X'Xb = 0 \quad (5)$$

$$b = (X'X)^{-1}X'y \quad (6)$$

$$\hat{y} = Xb \quad (7)$$

여기서 행렬 X' 은 행렬 X 의 전치행렬이다.

3.2 설계변수 및 중심합성법

Fig. 2는 설계변수인 측벽 엔드밀 가공 시 스피들 축의 회전수, 이송속도, 측방향, 반경방향 절삭깊이를 나타내었다. 주어진 설계영역 안에서 설계변수와 반응값 사이의 관계식을 구하기 위한 실험계획법으로 3수준의 혼합직교배열표를 사용하여 보다 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정할 수 있다. 가공방향은 상향절삭을 기본으로 하였고 습식절삭을 하였다. Table 1과 Table 2는

설계변수의 수준 값과 혼합직교배열표를 나타내고 있다.

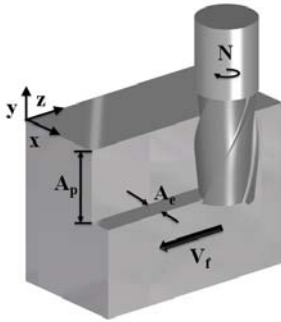


Fig. 2 Design variable

Table 1 Design variable and level

Factor	level	1	2	3
Radial depth of cut(mm,)		0.25	0.625	1
Axial depth of cut(mm,)		2	6	8
Spindle speed(rpm, N)		300	750	1200
Feed rate(mm/min, f)		80	200	320

Table 2 Table of mixed orthogonal array L₁₈ (2¹×3⁷)

	A _e mm	A _p mm	N rpm	V _f mm min	VAL _X d	VAL _Y d	VAL _Z d	urf mm
1	0.25	2	300	80	103	108	107	0.270
2	0.25	5	750	200	106	108	110	0.260
3	0.25	8	1200	320	108	110	116	0.400
4	0.63	2	300	200	104	109	112	0.290
5	0.63	5	750	320	105	109	116	0.380
6	0.63	8	1200	80	107	110	117	0.430
7	1	2	750	80	104	109	111	0.312
8	1	5	1200	200	107	112	121	0.480
9	1	8	300	320	109	112	118	0.600
10	0.25	2	1200	320	106	109	111	0.460
11	0.25	5	300	80	106	109	107	0.330
12	0.25	8	750	200	105	108	110	0.290
13	0.63	2	750	320	105	110	114	0.420
14	0.63	5	1200	80	107	109	115	0.280
15	0.63	8	300	200	106	108	113	0.380
16	1	2	1200	200	107	111	117	0.332
17	1	5	300	320	109	112	119	0.540
18	1	8	750	80	108	108	114	0.413

4. 결과 및 고찰

실험계획법을 통해 얻은 결과를 바탕으로 , , 의 결과를 통해서 Table 2에서 보는 것과 같이 축은 축보다 작다는 것을 알 수 있다. 그 결과를 바탕으로 축의 실험값을 가지고, 식 (3)~(7)의 과정을 거쳐 구한 축 진동가속도레벨과 표면조도를 나타내는 2차 근사 다항식은 식 (8), (9)과 같다.

$$VAL_Z = 105 + 11A_e + 0.59A_p - 1.39E-2N + 1.17E-2V_f - 6.94A_e^2 - 0.11A_p^2 + 8.14E-6N^2 - 5.08E-6A_eA_p + 0.33A_eA_p + 4.00E-3AN + 1.13E-2A_pV_f + 8.01E-4A_pN + 7.90E-4A_pV_f$$

$$Surf = 0.424 - 0.33A_e + 1.86E-2A_p - 4.30E-4N - 5.19E-4V_f + 0.31A_e^2 + 2.79E-7N^2 + 3.75E-6V_f^2 + 1.82E-2A_eA_p - 9.01E-5A_pV_f$$

이 근사 다항식들이 얼마만큼의 정확성을 가지는지를 분석하기 위해서 실험을 통해서 얻어진 값과 근사 다항식을 통해 얻어지는 값 사이에 어느 정도의 근사 오차의 정도를 확인하는 방법에는 F-test, t-test, R²(결정계수), adjust R²를 나타내면 각각 식 (10), (11)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{10}$$

$$adjust R^2 = 1 - \frac{SSE/(N-k)}{SST/(N-1)} \tag{11}$$

여기서, N은 총 실험 횟수, k는 설계변수의 개수를 나타내며, SST와 SSR 그리고 SSE는 다음과 같다.

$$SST = \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y})^2, SSR = \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y})^2, SSE = \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2 \tag{12}$$

여기서 y는 실제 반응값, \bar{y} 는 실제 반응값들의 평균, \hat{y} 은 근사 다항식에 의한 추정된 반응값이다. R²와 adjust R²는 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 근사화가 잘 되었음을 의미한다. Z축값의 adjust R²는 98 %로 나타났고 표면조도는 84.2 %로 나타났다. 위의 식을 이용하여 최적설계를 수행하기 위해 설계변수와 축 방향의 진동가속도레벨을 나타내는 2차 근사 다항식을 목적함수로 정의하고 각 변수들의 상한과 하한을 다음과 같이 제한하였다.

Minimize :

$$F_Z(x) = VAL_Z \leq 109.60, F_S(x) = Surf \leq 0.26$$

$$0.25 \leq A_e \leq 1, 2 \leq A_p \leq 8$$

$$300 \leq N \leq 1200, 80 \leq V_f \leq 320 \tag{13}$$

Table 3 Optimum solution comparison of reference and optimum model

Factor	Model	Reference	Optimum
Radial depth of cut(mm,)		0.25	0.25
Axial depth of cut(mm,)		2	2
Spindle speed(rpm, N)		600	755
Feed rate(mm/min, f)		240	80
Z-axis VAL(dB,)		109.60	107.53
Surface roughness(μm, S f)		0.26	0.19

식 (13)에서 목적함수의 제한 값과 Table 3의 reference는 Hong의 논문에서의 최적조건을 확인 실험한 결과이다. 본 연구를 통해서 구한 각 인자별 최적수준은 반경방향 절삭깊이(A_e) 0.25 mm, 축방향 절삭깊이(A_p) 2 mm, 회전수(N) 755 rpm, 이송속도(V_f) 80 m/s로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 고속도강 엔드밀을 이용한 피삭재의 엔드밀 가공에 있어서 스피들의 가공 진행방향의 진동가속도레벨을 이용하여 주축의 회전수, 이송속도, 축방향, 반경방향 절삭깊이를 설계변수로 선정하고 반응표면법을 이용하여 설계변수와 진동가속도레벨 응답에 대한 관측 자료로부터 근사 다항식을 만들어서 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 제시하였다. 그리고 최적설계 문제로 정식화하여 Hong의 논문의 최적가공조건보다 개선된 최적가공조건을 구하였다. 각 인자별 최적수준은 반경방향 절삭깊이(0.25 mm), 축방향 절삭깊이(2 mm), 회전수(760 rpm), 이송속도(80 m/s)로 나타났다. 최적가공조건에 대한 축 값, 표면조도가 기존연구결과에 비하여 각각 2, 27 % 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

1. D. K. Hong, B. C. Woo, and D. H. Kang, "Optimal Geometric Design of Transverse Flux Linear Motor Using Response Surface Methodology," Trans. KIEE, Vol. 55B, No. 10, pp. 498-503, 2006.
2. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Shareef, I. A., "The prediction of Surface Accuracy in End Milling," Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
3. D. K. Hong, D. Y. Kim, and C. W. Ahn, "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.