

실험계획법을 이용한 엔드밀 가공 시 최대가공온도와 표면조도에 미치는 가공조건에 관한 연구

홍도관*, 안찬우#, 백황순**, 최석창***, 박일수****

A Study on the Working Condition Effecting on the Maximum Working Temperature and Surface Roughness in Side Wall End Milling Using Design of Experiment

Do-Kwan Hong*, Chan-Woo Ahn#, Hwang-Soon Baek**, Seok Chang Choi***, Il-Soo Park****
(Received 10 June 2009; received in revised form 16 September 2009; accepted 22 September 2009)

ABSTRACT

To find the working condition is one of the important factors in precision machining. In this study, we analyzed maximum working temperature by infra-red camera and surface roughness in side wall end milling using design of experiment (DOE); RSM(response surface methodology), ANOM(analysis of means) and ANOVA(analysis of variance) by table of orthogonal array. ANOM and ANOVA are well adapted to select sensitivity of design variables for maximum working temperature and surface roughness. The effective design variables and their levels should be determined using ANOM, ANOVA. RSM is presented 2nd order approximation polynomial of maximum working temperature and surface roughness is composed with design variables. Therefore, it is expected that the proposed procedure using design of experiment ; table of orthogonal array, ANOM, ANOVA and RSM can be easily utilized to solve the problem of working condition.

Key Words : Side Wall End Mill(측벽 엔드밀), Table of Orthogonal Array(직교배열표), ANOM(평균분석), ANOVA(분산분석), Response Surface Methodology(반응표면법), Design of Experiment(실험계획법), Infra-red camera(적외선 열화상)

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. 그리

* 한국전기연구원 전동력연구센터

교신저자 : 동아대학교 기계공학부

E-mail : cwahn@dau.ac.kr

** 동아대학교 기계공학부 일반대학원

*** 창원전문대학 자동차기계학부 기계설계과

**** 동명대학교 냉동공조공학과

고 다양한 형상을 가진 모델을 가공하기 위한 다양한 방법이 개발되고 있으며 그 수요는 날로 증가하고 있다. 엔드밀은 일반적으로 고속도강이나 초경재료를 원재료로 사용하고 있으며, 코팅 처리된 것을 사용하는 경우도 있다. 엔드밀 가공에 있어서 공구 손상과 가공정도에 영향을 미치는 가공조건은 절삭량, 절삭깊이, 절삭속도, 이송속도 등이 있으며, 가공조건에 따른 공구의 수명 연장을 위한 연구가 진행되고 있다.

Altintas^[1]는 알루미늄합금 절삭 시 칩 두께와 유동에 대한 절삭형태와 경사각, 마찰, 압력에 있어서의 절삭력과 관계를 연구하였고, Martellotti^[2]는 엔드밀을 사용한 알루미늄 합금 작업 시의 기하학적인 해석, 공구경로, 칩 두께 등을 연구하여 비절삭저항과 평균 비변형 칩 두께의 사이에 일정한 관계식이 성립되는 것을 밝혔다. 竹山秀彦 등^[3]은 알루미늄합금 가공 시 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이 등이 표면조도에 영향을 미친다고 기술하였다.

본 논문에서는 주축의 회전수, 테이블의 이송속도, 축방향 절삭깊이, 반지름방향 절삭깊이를 설계변수로 선정하고 설계변수의 변화에 따라 엔드밀 측벽절삭가공 시 절삭공구에서 발생하는 최대온도와 Al 7075 시편의 표면조도의 경향을 파악하기 위하여 혼합직교배열표를 이용하여 설계변수의 조합이 총 18회의 실험을 수행하였다.^[4] 가공에 사용된 시편의 재료는 Al 7075(Al-Zn-Mg-Cu)로 알루미늄 합금 중에 기계적 성질이 뛰어나고 초두랄루민계로 항공기 등에 사용되는 T6 열처리를 하면 알루미늄 합금 중 최고의 인장강도를 갖는 재료를 시편으로 사용하였으며, 절삭공구는 3날 엔드밀을 사용하였다. 일반적으로 이산적인 조건에서 가공 실험을 하고 가공 후 시편의 표면조도를 이용하여 가공조건에 대한 평가를 주로 다루는데 본 논문은 설정된 가공범위 이내의 모든 조건을 다 고려하여 최대가공온도와 표면조도에 유의한 영향을 미치는 설계변수들에 대한 정량적인 데이터를 제시하기 위해 실험계획법을 이용하였다. 가공조건에 따라서 엔드밀 측벽절삭 가공을 수행할 때 적외선 열화상 카메라를 이용하여 각 실험 조건마다 시편과 절삭공구에서 발생하는 최대온도를 계측하였다. 설계변수의 변화에 따라서 가공 시 발생하는 최대가공온도와 표면조도와의 관계를 분석하

고자 평균분석 및 분산분석을 수행하였으며, 반응표면법을 이용하여 최대온도와 표면조도에 대한 근사 2차함수를 생성하여 가공조건에 따라서 발생온도와 표면조도를 예측해볼 수 있도록 실용식을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 알루미늄 재료와 가공공구 및 가공조건을 고려한 공구 이송속도는 30,000 mm/min, 주축의 회전수는 최고 12,000 rpm급 장비를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 수직형 머시닝센터를 나타내며 절삭공구는 $\phi 10$ 의 초경 공구강 3날 엔드밀을 사용하였다. 실험에 사용한 재료는 알루미늄 합금으로 가장 많이 사용하는 Al 7075로 하였으며 시편의 크기를 100×40×30 mm로 일정하게 가공하여 실험하였다.



Fig. 1 Schematic diagram of experiment

절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다. 엔드밀의 평면가공에서 가공방향은 시편편의 가로방향 30 mm를 기준으로 건식 측면 가공하였다. 기계가공에 있어서 가공면의 표면정도는 KS-B0161에서 일반적으로 표면거칠기(surface roughness)를 나타내는 여러 가지가 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 X축을, 세로 배율 방향에 Y축을 잡고, 거칠기 곡선을 $y=f(x)$ 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 날의 날 형상에 따른 날 궤적에 의해서 결정된다. 본 연구에 사용된 표면조도계는 Kosaka Lab. Ltd.의 Surfcomer(SE1700 α)이다. 조도 측정방법으로는 Fig. 2의 측방향 절삭깊이(A_p)의 25%, 50%, 75% 되는 위치에 이송속도(V_f)의 반대방향으로 5회 반복 측정하여 평균하였으며 cutoff는 8 mm이다.

3. 최적가공조건

3.1 반응표면법 이론

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. k 개의 설계변수에 대한 실제응답 η 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.^[5-7]

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

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.

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

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 형태로써 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} 은 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.

근사 다항식들의 정확성을 분석하기 위해서 실험을 통해서 얻어진 값과 근사 다항식을 통해 얻어지는 값 사이에 어느 정도의 근사 오차의 정도를 나타내는 R^2 (결정계수), $adjust R^2$ (수정결정계수)는 식 (7), (8)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (7)$$

$$adjust R^2 = 1 - \frac{SSE/(N_i - k)}{SST/(N_i - 1)} \quad (8)$$

여기서, N_i 은 총 실험 횟수, k 는 설계변수의 개수를 나타내며, 총 편차의 제곱합(Sum of squared total : SST), 회귀 제곱합(Sum of squared regression : SSR)와 회귀선에 의하여 설명되지 않는 잔차 제곱합(Sum of squared error : SSE)는 다음과 같다.

$$SST = \sum_{u=1}^{N_i} (y_u - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$SSR = \sum_{u=1}^{N_i} (\hat{y}_u - \bar{y})^2 \quad (10)$$

$$SSE = \sum_{u=1}^{N_i} (y_u - \hat{y}_u)^2 \quad (11)$$

여기서 y 는 실제 반응값, \bar{y} 는 실제 반응값들의 평균, \hat{y} 은 근사 다항식에 의한 추정된 반응값이다. R^2

와 $adjust R^2$ 는 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 근사화가 잘 되었음을 의미한다.

3.2 설계변수 및 직교배열표

설계변수 영역 안에서 가공 시 절삭공구에서 발생하는 가공 발생온도의 반응값과의 영향을 분석하기 위해서 3수준의 혼합직교배열표를 이용하여 보다 적은 횟수의 실험으로 2차 근사다항식으로 추정하였다. Fig. 2는 엔드밀 가공에 있어서 설계변수를 나타낸다. 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p), 스핀들 축의 회전수(N) 및 이송속도(V_f)를 설계변수로 선정하고 상향절삭과 건식절삭을 하였다.

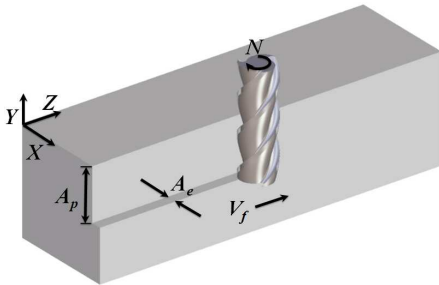


Fig. 2 Design variable

Table 1 Design variable and level

Design variable	Level		
	1	2	3
Radial depth of cut(mm, A_e)	0.49	0.7	0.91
Axial depth of cut(mm, A_p)	5.6	8	10.4
Spindle speed(rpm, N)	3,339	4,770	6,201
Feed rate(mm/min, V_f)	976.5	1,395	1,814

Table 1은 설계변수와 각 설계변수에서의 수준 값을 나타낸다. 설계변수는 시편의 재질과 절삭공구에서 제시하는 가공조건으로 하였으며 각 수준간의 값의 차이는 가공조건에서 $\pm 30\%$ 의 변화로 범위를 설정하였으며 각 변수간의 민감도를 파악하기 위하여 모든 설계변수에 동일한 조건으로 적용하였다. Table 1에 나타난 설계변수가 총 4개에 각 설계변수의 수준이 3수준이며 설계변수의 전조합 총 실험횟수가 81회를 수행해야 가장 좋은 최적조건을 찾을 수 있게 된다. 그러나 본 논문의 Table 2의 혼합직교배열

표를 이용하게 되면 18회 실험으로 81회 전조합 실험과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있다.

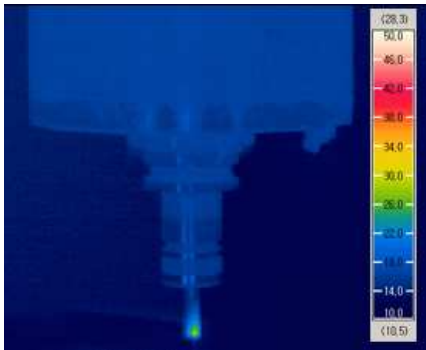
Table 2 Table of mixed orthogonal array

Exp.	A_e (mm)	A_p (mm)	N (rpm)	V_f (mm/min)
1	0.49	5.6	3,339	976.5
2	0.49	8	4,770	1,395
3	0.49	10.4	6,201	1,814
4	0.7	5.6	3,339	1,395
5	0.7	8	4,770	1,814
6	0.7	10.4	6,201	976.5
7	0.91	5.6	4,770	976.5
8	0.91	8	6,201	1,395
9	0.91	10.4	3,339	1,814
10	0.49	5.6	6,201	1,814
11	0.49	8	3,339	976.5
12	0.49	10.4	4,770	1,395
13	0.7	5.6	4,770	1,814
14	0.7	8	6,201	976.5
15	0.7	10.4	3,339	1,395
16	0.91	5.6	6,201	1,395
17	0.91	8	3,339	1,814
18	0.91	10.4	4,770	976.5

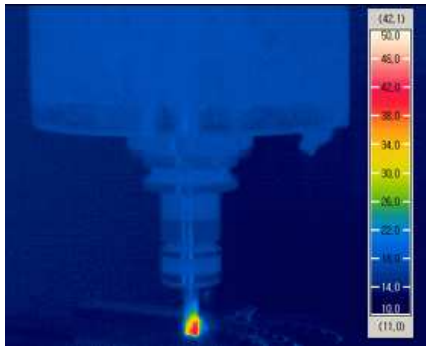
Table 3 Temperature and Surface roughness result

Exp.	Max. temperature($^{\circ}C$)	Surface roughness(μm)
1	27.2	0.9225
2	28.3	1.228
3	33.9	1.352
4	30.9	1.552
5	36	1.623
6	39	1.034
7	34.9	1.369
8	41.3	1.156
9	46.4	2.543
10	30	1.248
11	31	1.319
12	36.1	1.232
13	30.9	1.775
14	34.6	1.016
15	43.2	1.836
16	41	1.107
17	45.8	2.912
18	42.1	0.9681

Table 3은 각 실험조건에서 가공 시 발생하는 절삭공구에서 발생하는 가공 시 최대발생온도를 적외선 열화상카메라로 측정된 값과 각 조건에서 발생한 표면조도를 나타낸다. 가공 시 발생하는 절삭공구의 열측정에 사용된 적외선 열화상카메라는 측정범위 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이며 온도 분해능은 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이고, 정확도는 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 또는 측정범위의 $\pm 2\%$ 이다.



(a) 1st



(b) 17th

Fig. 3 Temperature images of 1st, 17th experiment

Fig. 3의 (a)는 혼합직교배열표의 1st 실험조건인 반지름방향 절삭깊이(A_e)가 0.49 mm , 축방향 절삭깊이(A_p)가 5.6 mm , 스피들 축의 회전수(N)가 $3,339\text{ rpm}$ 및 이송속도(V_f)가 976.5 mm/min 조건일 때, 즉 가장 부하가 작게 작용하는 조건일 때 가공 시 발생하는 온도의 경향을 열화상 카메라를 이용하여 계측하였으며, 발생하는 온도가 $27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 18회 실험 조건 중 가장 작게 발생하였다. Fig. 3의 (b)는 17th 실험조건인 반지름방향 절삭깊이(A_e)가 0.91 mm , 축

방향 절삭깊이(A_p)가 8 mm , 스피들 축의 회전수(N)가 $3,339\text{ rpm}$ 및 이송속도(V_f)가 $1,814\text{ mm/min}$ 조건일 때 가공 시 발생하는 온도의 경향을 열화상 카메라를 이용하여 계측하였으며, 발생하는 온도가 $45.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 18회 실험 조건 중 가장 크게 발생하였다.

3.3 평균분석

3.3.1 최대가공온도

Table 1의 설계변수에 따른 수준과 Table 2의 설계변수의 조합에 따른 혼합직교배열표를 이용하여 가공실험을 수행하였다.

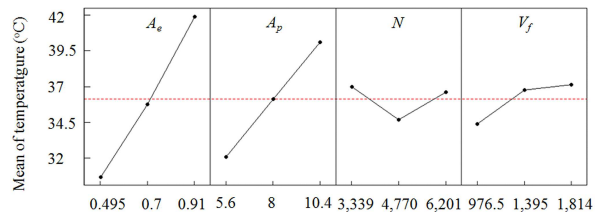


Fig. 4 Main effect of temperature

망소특성을 가지는 절삭공구로부터 발생하는 최대가공온도를 목적함수로 하고 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p), 스피들 축의 회전수(N) 및 이송속도(V_f)의 설계변수가 목적함수에 미치는 영향을 알아보기 위해서 측정 데이터로부터 각 설계변수의 수준에 대한 영향을 파악하기 위하여 평균분석을 수행하였다. 평균분석은 각 실험과 수준별로 평균을 내어 수준별로 표면조도와 최대발생온도가 어느 수준에서 평균값이 어떻게 되는지를 나타낸다. Fig. 4는 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도에 대한 주효과를 나타내며, 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p)와 이송속도(V_f)는 1수준에서 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도가 최소가 됨을 알 수 있다. 그러나, 스피들 축의 회전수(N)는 2수준에서 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도가 최소가 됨을 알 수 있다. Fig. 4의 주효과에 민감한 설계변수는 기울기가 급격한 반지름방향 절삭깊이(A_e)와 축방향 절삭깊이(A_p)가 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도에 대한 민감도가 가장 크다고 할 수 있다.

3.3.2 표면조도

망소특성을 가지는 표면조도를 목적함수로 하고 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p), 스펀들 축의 회전수(N) 및 이송속도(V_f)의 설계변수가 목적함수에 미치는 영향을 알아보기 위해서 측정 데이터로부터 각 설계변수의 수준에 대한 영향을 파악하기 위하여 평균분석을 수행하였다. Fig. 5는 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도에 대한 주효과를 나타내며, 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p)와 이송속도(V_f)는 1수준에서 표면조도가 최소가 됨을 알 수 있다. 그러나, 스펀들 축의 회전수(N)는 3수준에서 표면조도가 최소가 됨을 알 수 있다. Fig. 5의 주효과에 민감한 설계변수는 기울기가 급격한 이송속도(V_f), 스펀들 축의 회전수(N), 반지름방향 절삭깊이(A_e)와 축방향 절삭깊이(A_p)의 순으로 표면조도에 대한 민감하다는 것을 알 수 있다.

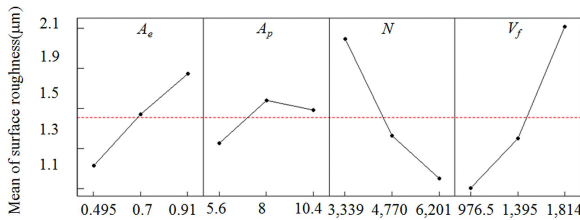


Fig. 5 Main effect of surface roughness

3.4 분산분석

3.4.1 최대가공온도

Table 4 Analysis of Variance for temperature

Source	S	ϕ	V	F	P
A_e	379.701	2	189.851	40.91	0.000
A_p	193.621	2	96.811	20.86	0.000
N	18.221	2	9.111	1.96	0.196
V_f	27.098	2	13.549	2.92	0.105
Error	41.770	9	4.641		
Total	660.411	17			

이산설계공간에서는 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축

방향 절삭깊이(A_p)와 이송속도(V_f)는 1수준과 스펀들 축의 회전수(N)는 2수준으로 조합하게 되면 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도가 최소가 됨을 알 수 있다. Table 4는 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도에 가장 기여도가 높은 설계변수를 알아보기 위한 분산분석 결과를 나타내고 있다. 분산분석은 각 실험을 통해서 가공조건인 설계변수의 수준변화에 의해서 표면조도와 최대발생온도가 가장 많이 변화된 민감한 설계변수를 분석할 수 있는 방법이다. Table 4에서 반지름방향 절삭깊이(A_e)와 축방향 절삭깊이(A_p)에 가장 민감한 변수로 나타났으며 이송속도(V_f)와 스펀들 축의 회전수(N)의 순으로 나타났다. 이송속도(V_f)는 신뢰구간 90%에 거의 만족하며 스펀들 축의 회전수(N)는 신뢰구간 80%에 거의 만족하였다.

3.4.2 표면조도

Table 5는 표면조도에 가장 기여도가 높은 설계변수를 알아보기 위한 분산분석 결과를 나타내고 있다.

Table 5 Analysis of Variance for surface roughness

Source	S	ϕ	V	F	P
A_e	0.6346	2	0.3173	5.38	0.029
A_p	0.1504	2	0.0752	1.27	0.326
N	1.5219	2	0.7609	12.90	0.002
V_f	2.0356	2	1.0178	17.25	0.001
Error	0.5310	9	0.0590		
Total	4.8735	17			

Table 5에서 이송속도(V_f), 스펀들 축의 회전수(N)와 반지름방향 절삭깊이(A_e)의 순으로 가장 민감한 변수로 나타났으며 축방향 절삭깊이(A_p)는 그렇게 민감하지 않은 변수로 나타났으며, 이는 앞의 평균 분석에서 주효과의 결과와 동일하게 나타났다.

3.5 반응표면법 결과

Table 2의 혼합직교배열표의 행렬실험을 통해서 얻은 결과에서 식 (4)~(6)을 적용하여 가공된 시편의 절삭면에 대한 표면조도를 근사화하는 2차 근사

Table 6 Approximation 2nd order polynomial of responses

Approximation 2nd order polynomial	Coefficient parameter	Polynomial	Coefficient of polynomial	
			R_a	T
		Const	-3.2255759163	17.7207794378
$R_a = const + \beta_1 A_e + \beta_2 A_p$ $+ \beta_3 N + \beta_4 V_f + \beta_5 A_e^2$ $+ \beta_6 A_p^2 + \beta_7 N^2 + \beta_8 V_f^2$ $+ \beta_9 A_e A_p + \beta_{10} A_e N$ $+ \beta_{11} A_e V_f + \beta_{12} A_p N$ $+ \beta_{13} A_p V_f$	β_1	A_e	6.1990235443	0.2556327627
	β_2	A_p	0.7564584402	4.959394772
	β_3	N	0.0003002509	-0.0082424948
	β_4	V_f	-0.0021234514	0.0002601895
	β_5	A_e^2	-0.0261209608	19.91572343
	β_6	A_p^2	-0.0185329861	0.1041666667
	β_7	N^2	0.0000000449	0.000001171
$T = const + \beta_1 A_e + \beta_2 A_p$ $+ \beta_3 N + \beta_4 V_f + \beta_5 A_e^2$ $+ \beta_6 A_p^2 + \beta_7 N^2 + \beta_8 V_f^2$ $+ \beta_9 A_e A_p + \beta_{10} A_e N$ $+ \beta_{11} A_e V_f + \beta_{12} A_p N$ $+ \beta_{13} A_p V_f$	β_8	V_f^2	0.0000005343	0.0000008523
	β_9	$A_e A_p$	-0.3919720397	-2.3782371853
	β_{10}	$A_e N$	-0.0011582548	0.0000751696
	β_{11}	$A_e V_f$	0.0025256602	0.0104851597
	β_{12}	$A_p N$	-0.00001644	-0.0004146371
	β_{13}	$A_p V_f$	0.0000781031	-0.0009969303

다항식과 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도를 근사화하는 2차 근사 다항식을 각각 Table 6에 나타내었다. 혼합직교배열표를 통해서 얻어진 각 실험값을 실험샘플로 하여 반응표면법을 이용하여 2차 근사다항식의 각 항에 있는 계수값을 얻을 수 있다. 반응표면법은 설계변수에 따른 반응표면을 그릴 수 있으며, 목적에 따라 반응함수를 최소화 또는 최대화 되는 최적해를 찾을 수 있는 방법이다.

Table 6은 가공된 시편의 절삭면에 대한 표면조도와 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도를 2차 근사다항식으로 나타낸 것으로 상수항, 1차항, 2차항 및 교차항 등의 계수값을 나타내었다. 2차 근사 다항식의 신뢰성을 확인하기 위하여 Table 7에 실험에 의한 값과 2차 근사 다항식에서 얻어진 값과의 오차를 비교하였다. Table 7은 Table 2와 Table 3에서 9번째 실험과 10번째 실험을 예로 비교하였으며 이 경우 오차는 표면조도의 경우 최대 0.7% 발생하였으며 최대가공온도의 경우 최대 3.3% 발생하였다. Table 2와 Table 3의 총 18회 실험의 경우 모두를 고려한다면 표면조도의 경우 최대 8% 이내로 발생하였으며 최대가공온도의 경우 5% 이내로 발생하였다.

2차 근사다항식의 식이 실험 결과를 잘 반영하는 것으로 판단할 수 있다. Table 1에 제시된 가공조건에 해당되는 설계변수의 수준범위 이내에 있는 값을 넣으면 표면 조도와 절삭공구에서 발생하는 최대가공온도를 예측할 수 있다.

Table 7 Comparison exp. and Approximation 2nd order polynomial

	R_a		T	
	9	10	9	10
Experiment number	9	10	9	10
Experiment	2.543	1.248	46.4	30
Approximation 2nd order polynomial	2.562	1.241	47.9	29.36
Error (%)	-0.74	0.56	-3.28	2.15

근사 다항식의 정확성을 분석하기 위해서 실험을 통해서 얻어진 값과 근사 다항식을 통해 얻어지는 값 사이에 근사 오차의 정도를 나타내는 R^2 (결정계수)와 adjust R^2 (수정결정계수)는 식 (7)~(11)를 이

용하였으며 표면조도(R_a)와 최대가공온도(T)의 수정 결정계수 $\text{adjust } R^2$ 는 93.5 %와 87.2 %로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 AI 7075 소재를 측벽엔드밀 가공 시 주축의 회전수, 테이블의 이송속도, 축방향 절삭 깊이, 반지름방향 절삭깊이를 설계변수로 선정하고 실험계획법의 직교배열표와 평균분석 및 분산분석을 통해서 측벽 엔드밀 가공 시 절삭공구에 발생하는 금속의 마찰에 의한 온도를 적외선 열화상 카메라로 측정하여 가공조건에 따라 절삭공구에 발생하는 온도의 특성을 파악하였다. 또한 각 시편에서 표면조도를 취득하여 표면조도와 절삭공구에 발생하는 온도의 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 평균분석을 통해서 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p) 및 이송속도(V_f)는 3수준 중에서 가장 부하가 적은 1수준에서 절삭공구에 발생하는 최대가공온도가 최소가 됨을 알 수 있다. 그러나, 스피들 축의 회전수(N)는 2수준에서 절삭공구에 발생하는 최대가공온도가 최소가 됨을 알 수 있다.

2) 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p) 및 이송속도(V_f)는 부하가 가장 적은 1수준에서 표면조도가 최소가 됨을 알 수 있다. 그러나, 스피들 축의 회전수(N)는 3수준에서 표면조도가 최소가 됨을 알 수 있다. 따라서 최대가공온도와 표면조도는 반지름방향 절삭깊이(A_e), 축방향 절삭깊이(A_p) 및 이송속도(V_f)는 모두 1수준에서 최대가공온도와 표면조도가 우수한 최적조건이 되지만, 스피들 축의 회전수(N)는 최대가공온도는 2수준에서 최소가 되며 표면조도는 3수준에서 최소가 됨을 알 수 있다.

3) 반응표면법을 이용하여 설계변수의 범위에서 최대가공온도와 표면조도를 예측할 수 있는 근사 2차 다항식의 값을 제시하였다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Y. Altintas, I. Yellowley, 1989, "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Force Models," Trans. of ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 111, pp. 149-157.
2. M. E. Martellotti, 1941, "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 63, pp. 677-700.
3. 竹山秀彦, 伊藤 鎮, 1969, "具磨耗と 切削仕上面 あらさ," 精密機械, 第35卷, 第10号, pp. 629-633.
4. 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," Trans. of KSNVE, Vol. 14, No. 12, pp. 1322-1329.
5. D. K. Hong, B. C. Woo, and D. H. Kang, 2006, "Optimal Geometric Design of Transverse Flux Linear Motor Using Response Surface Methodology," Trans. KIEE, Vol. 55B, No. 10, pp. 498-503.
6. P. Lim, and G. E. Yang, 2007, "Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-Axis Machine by Response Surface Method," Trans. KSME, Vol. 31A, No. 9, pp. 924-933.
7. D. K. Hong, D. Y. Kim, and C. W. Ahn, 2004, "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.