

엔드밀 고속 가공시 표면정도 향상을 위한 가공인자의 영향 분석

배효준*, 박홍식#

Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling

Hyo Jun Bae*, Heung Sik Park#

ABSTRACT

Recently the high speed end-milling processing is demanded the high-precise technique with good surface roughness and rapid time in aircraft, automobile part and molding industry. The working factors of high speed end-milling has an effect on surface roughness of cutting surface. Therefore this study was carried out to analyze the working factors to get the optimum surface roughness by design of experiment. From this study, surface roughness have an much effect according to priority on distance of cut, feed rate, revolution of spindle and depth of cut. By design of experiment, it is effectively represented shape characteristics of surface roughness in high speed end-milling. And determination(R^2) coefficient of regression equation had a satisfactory reliability of 76.3% and regression equation of surface roughness is made by regression analysis.

Key Words : High speed End-milling(고속 엔드밀 가공), Design of experiment(실험계획법), Coefficient of determination(결정계수), Regression analysis(회귀분석)

기호설명

1. 서론

S ; Variation
 ϕ ; degree of freedom
 V ; variance
 F_0 ; statistic of testing
 SSR ; regression sum of squares ($\beta X'y - n(\bar{y})^2$)
 SSE ; residual sum of squares ($y'y - \beta X'y$)
 SST ; total sum of squares ($y'y - n(\bar{y})^2$)
 MSR ; regression mean square (SST/k)
 MSE ; residual mean square ($SSE/(n - k - 1)$)

최근 산업현장에서 널리 사용되는 고속가공기는 다양한 형상을 가진 재료의 가공에서 가공속도가 빠르기 때문에 가공시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라 인건비의 절감으로 인한 생산성의 향상과 일반의 범용 공작기계로 가공할 수 없는 가공물을 고정도로 가공할 수 있는 장점을 가지고 있어 생산 분야에 빠르게 이용되고 있다. 현재 고속가공기는 고속주축의 개발로 주축의 회전수가 10,000rpm에서

접수일: 2003년 10월 29일; 게재승인일: 2004년 3월 12일
 * 동아대학교 대학원 기계공학과
 # 교신저자: 동아대학교 기계산업시스템공학부
 E-mail: parkhs@daunet.donga.ac.kr, Tel. (051) 200-7653

50,000rpm의 고속주축을 탑재한 고속가공기가 널리 보급되고 있다.^{1,2} 이 중에서 평면 엔드밀에 의한 고속가공은 슬롯, 포켓 및 표면가공 등 다양한 형상의 정삭 가공에 유용하게 사용되고 있다.

특히 금형가공에 있어서는 그것을 구성하는 각종 요소기술의 개발이나 코팅한 초경합금 공구 등의 성능이 향상됨으로서 종래에 방전가공이나 연삭가공에 의존하고 있었던 자동차 부품용의 주조나 단조 등에 이르기까지 공정집약, 고효율가공에 유용한 고속가공기의 사용빈도가 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 이에 따라 정형가공 기술의 발달로 인하여 허용공차 이내로 표면정도를 유지하면서 가공시간을 감소시킬 수 있는 고정도의 가공기술이 필요한 실정에 있다.

이처럼 엔드밀에 의한 고속가공의 경우 표면정도를 나타내주는 표면거칠기의 양부는 가공인자의 선정에 따라 결정되기 때문에 엔드밀에 의한 고속가공은 가공면의 표면정도를 향상시키기 위한 절삭조건^{3,4}의 선정이 우선되어야 한다고 생각된다. 그러나 최적의 표면정도를 위한 각 가공인자와 수준(lever)에 따른 실험은 많은 시간과 비용의 소요로 현실적 어려움이 따르므로 실험계획에 의한 통계적 기법의 도입이 필요하다.

실험계획법에 의한 통계적 기법은 가공조건에 따른 표면정도의 데이터를 분석하여 최소의 실험으로 최적의 가공조건에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 고속 엔드밀 가공에 있어서 특성치인 표면정도에 가장 많은 영향을 미치는 가공인자는 주축의 회전수, 이송속도, 절삭깊이, 공구의 형상 및 종류 등 여러 가지 인자들이 있지만,⁵ 이들 인자들이 엔드밀 가공에 어느 정도 상호 영향을 미치는 지에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구는 고속가공기를 이용하여 엔드밀 고속 가공조건 즉, 가공인자와 수준의 변화에 따른 표면정도를 통계적인 기법을 이용하여 정량적 분석을 행함으로써 고속 엔드밀 가공시 가공인자의 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험계획법의 기초이론

2.1 분산분석과 다구찌 기법

고속 평면 엔드밀 가공에서 피삭재의 표면거칠기는 많은 인자들이 영향을 주고 있다고 인정되지

만 어떤 특정한 하나의 인자만의 영향을 조사하기 위하여 각 인자의 일원 배치법에 의한 실험결과를 분산분석하였다.

Table 1에는 일원배치의 분산분석표를 나타낸 것이며, 이를 통하여 각 인자가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하고 최적의 가공조건을 조사하기 위하여 다구찌 기법의 손실함수(SN비)를 이용하여

Table 1 ANOVA table by one-way factorial design.

Factor	S	ϕ	$V=S/\phi$	F_0	P
A	S_A	$l-1$	V_A	V_A/V_e	P_A
e	S_e	$l(m-1)$	V_e		
T	S_T	$lm-1$			

특성치에 대한 망소특성을 조사하였다. 망소특성에 관한 손실함수는 식(1)과 같다.

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (1)$$

여기서 y 는 특성값(반응값), n 는 실험횟수를 나타내고 있다.

2.2 중회귀분석

어떤 종속변수(반응변수)의 변화는 두 개 이상의 독립변수(설명변수)에 의하여 영향을 받으며, 독립변수 k 를 여러 개 선택하여 이들의 함수로서 종속변수가 변화하는 특성은 단순회귀에 비하여 보다 좋은 예측을 할 수 있다. 본 연구에서 이용하고자 하는 중회귀분석^{11,12}은 열간 금형용강의 평면 엔드밀 가공에 있어서 표면거칠기를 종속변수로 잡고 여기에 영향을 주고 있는 독립변수(주축의 회전수, 공구이송속도, 절삭깊이)를 선택하여 독립변수와 종속변수간의 관련성을 규명하려는 통계적 분석방법으로, 이를 이용하여 가공인자간의 정량적인 함수관계를 구하였다. 이처럼 종속변수 y 와 n 개의 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_n 에 대하여 i 번째 종속변수 y_i 는 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i \quad (2)$$

여기서 각 인자에 대한 관찰점 $i = 1, 2, \dots, n$ 이며, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 미지의 모수이다. 그리고 ϵ_i 는 오차값이며, 관찰점을 벡터로 표시하면

$$y_i = (1, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \epsilon_i \quad (3)$$

이며, n 개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬 표현식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix},$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

이다. 그리고 최소제곱법에 의하여 최소화시키려는 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면

$$S = \epsilon' \epsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) \\ = y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta \quad (6)$$

가 되며, 이를 β 로 미분하여 0 으로 두면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\mathcal{B} = (X'X) - 1X'y \quad (7)$$

여기서 \mathcal{B} 은 β 의 최소 제곱추정값의 벡터로서 $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k)$ 을 의미한다. 따라서

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \dots & \sum x_{ki} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \dots & \sum x_{1i}x_{ki} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 & \dots & \sum x_{2i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{ki} & \sum x_{1i}x_{ki} & \sum x_{2i}x_{ki} & \dots & \sum x_{ki}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{ki}y_i \end{bmatrix}$$

Table 2 ANOVA for multiple linear regression model

Factor	S	ϕ	V	F_0	P
Regression	SSR	k	MSR	MSR/MSE	P_R
Residual Error	SSE	$n-k-1$	MSE	-	-
Total	SST	$n-1$	-	-	-

이 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 의 최소 제곱추정값들이 된다. 회귀분석을 통한 회귀선은 그 적합성을 검증하기 위하여 분산분석의 작성이 필요하다. 여기서 추정된 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 측도(measure)는 Table 2와 같으며 F_0 의 값이 크면, 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 말할 수 있다. 그리고 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 사용되는 것은 결정계수(coefficient of determination)로서 R^2 으로 나타내고

$$R^2 = SSR/SST \quad (8)$$

이 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 갖는다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 실험재료

본 실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 일본 OKADA사의 고속가공기로서 주축의 회전수는 최고 30,000 rpm, 공구 이송속도는 40,000mm/min이다. Fig. 1은 주축 스피indle에 공구가 장착된 수직형 머시닝센터의 사진을 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 절삭공구는 고속용 초경 엔드밀로서 TiAlN 코팅처리된 것으로서, 이의 형상은 Fig. 2에, 그리고 이의 치수는 Table 3에 나타내었다.

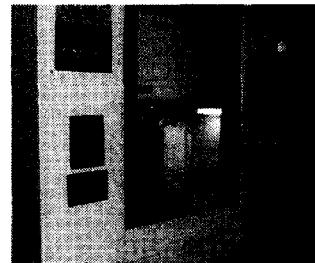


Fig. 1 Photo of vertical machining center

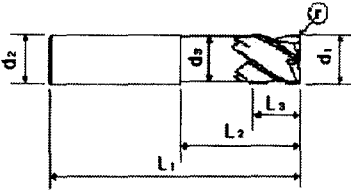


Fig. 2 Dimension of high speed flat End-mill

Table 3 Dimension of tool

d_1	d_2	d_3	L_1	L_2	L_3	r
12	12	11	83	12	37	3.0

본 실험에 사용한 실험재료는 열간 금형용강 STD61를 30×20×20mm로 일정하게 가공하여 사용하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마한 후 사용하였다. 엔드밀의 고속 평면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 30mm를 기준으로 하여 가공인자의 수준을 변화시켜 가공하였으며 이에 대한 영향을 분석하기 위하여 특성치(Response)인 중심선 평균거칠기 $Ra(\mu m)$ 를 측정하였다.

3.2 실험방법

고속 평면 엔드밀 가공에 있어서는 정삭 가공이 대부분이므로 본 실험에서는 Table 4에서와 같이 절삭거리, 실험재료의 경도, 주축회전수, 이송속도 및 절삭깊이를 가공인자로 선정하고 각 인자는 3 수준(Level)으로 선정하였다.

실험은 $L_{27}(3^5)$ 직교배열표를 이용하여 실험을 실시하였으며, 여기서 가공면의 편평도 오차를 최소화하기 위하여 절삭깊이 0.01mm의 초기 평면 엔드밀 가공 후 본 실험에서 설정한 절삭깊이에 따라

Table 4 Experimental conditions

Factors		Level		
		1	2	3
A	Distance of cutting (mm)	540	1080	2160
B	Hardness(H _{RC})	30	40	50
C	Spindle speed(rpm)	8,000	16,000	24,000
D	Feed(mm/min)	2,000	4,000	6,000
E	Depth of cut(mm)	0.1	0.2	0.3

평면 엔드밀 가공실험을 하였다. 또한 가공인자인 절삭거리는 실험의 순서에 따라 3구간으로 설정하여 오차를 줄이기 위한 초기절삭을 포함한 9번의 가공 후까지의 거리로 나타내었다.

그리고 가공시 냉각방식은 절삭유와 공기를 혼합한 오일 미스트 스프레이 방식(oil mist spray)을 사용하였으며, 실험 후 특성치로서 가공면의 표면 거칠기에 대하여 일원 배치 분산분석^{6,7,8}과 다구찌 기법^{9,10}을 통하여 특성치에 대한 가공인자의 영향과 최적조건을 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공인자의 영향

Table 5는 $L_{27}(3^5)$ 직교배열표에 의한 실험결과를 나타낸 것으로, 이것은 각 가공인자와 수준을 표시하고 있다. 여기서 수준에서 1, 2 및 3은 Table 4의 가공조건을 나타낸다. 이 표는 엔드밀 가공 후 표면거칠기에 대한 결과로서 실험번호 22, 23, 24번 일 때의 인자와 수준이 다른 인자와 수준에 비하여 표면거칠기가 높게 나타나고 있다는 것을 볼 수 있다. 이것은 가공인자와 수준의 조합에 있어서 다른 인자와 수준에 비하여 주축회전수는 낮고 이송속도는 증가하여 공구 1 개 날당 절삭체적이 증가되었기 때문이라 생각된다.

Table 6은 일원배치에 의한 분산분석의 결과를 나타낸 것으로 각 가공인자 중에서 어느 특정한 하나의 인자만의 영향을 조사하기 위하여 각 인자에 대해서 P-검정(Table 3)한 결과이다. 여기에서 절삭거리, 주축 회전수 및 이송속도는 특성치인 표면거칠기에 많은 영향을 미치고 있지만 피삭재 경도와 절삭깊이는 그 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 그리고 고경도 재료인 STD61의 평면엔드밀 가공에 있어서 절삭횟수, 즉 절삭거리가 증가함에 따라 공구 날끝의 마멸로 인하여 피삭재의 표면거칠기는 증가하고 있다고 생각된다. 따라서 고속 평면 엔드밀 가공에서 가공인자인 절삭거리, 주축회전수와 이송속도가 피삭재의 표면거칠기에 영향을 주는 주 인자라고 생각된다.

Fig. 3은 각 가공인자에 대한 일원배치에 의한 박스그래프로서 표면거칠기인 특성치를 제 1분위수와 제 3분위수를 기준으로 나타내고, 이에 대한 평균값을 표시하였다. 그림에서 박스의 세로 연결선은 위의 연결선인 제 3분위수와 아래의 연결선인

Table 5 Result of experiment on table of orthogonal array $L_{27}(3^5)$

Exp. No.	Factors					Responses
	A	B	C	D	E	Ra(μm)
1	1	1	1	1	1	0.42
2	1	1	1	1	2	0.45
3	1	1	1	1	3	0.47
4	1	2	2	2	1	0.30
5	1	2	2	2	2	0.40
6	1	2	2	2	3	0.39
7	1	3	3	3	1	0.38
8	1	3	3	3	2	0.82
9	1	3	3	3	3	0.56
10	2	1	2	3	1	0.70
11	2	1	2	3	2	1.00
12	2	1	2	3	3	0.58
13	2	2	3	1	1	0.26
14	2	2	3	1	2	0.53
15	2	2	3	1	3	0.49
16	2	3	1	2	1	0.69
17	2	3	1	2	2	1.49
18	2	3	1	2	3	1.35
19	3	1	3	2	1	0.77
20	3	1	3	2	2	1.19
21	3	1	3	2	3	1.08
22	3	2	1	3	1	1.66
23	3	2	1	3	2	2.30
24	3	2	1	3	3	2.40
25	3	3	2	1	1	0.51
26	3	3	2	1	2	0.64
27	3	3	2	1	3	0.56

제1분위수의 차에 해당되는 값을 의미하며 평균 표준편차의 2배 이상 벗어난 값은 이상치로서 별표 (*)로 표시하고 있다. (a)에서 절삭거리와 (d)에서 이송속도가 증가함에 따라 표면거칠기와 그 분포범위는 증가하고 있다. 그리고 (b)에서 재료경도의 변화에 있어서는 HRC30과 HRC50에서, (c)에서 주축회전수에 있어서는 16,000rpm에서, (e)에서 절삭깊이에 있어서는 0.1mm에서 표면거칠기는 가장 양호하며 그 분포범위도 안정적인 것을 볼 수 있다. 한편 (a)에서 절삭거리와 (e)에서 절삭깊이에서 이상치가 발생하고 이외 (b), (c) 및 (d)에서 가공인자에 있어서는 분포범위가 크게 발생되고 있는 것은 주축회전수가 8,000rpm, 이송속도가 6,000mm/min일 때에 발생된다는 것을 알 수 있다.

Table 6 One-way ANOVA for response

Source	S	ϕ	V	F_0	P
Distance of cut	2.684	2	1.342	5.57	0.010
Error	5.780	24	0.241		
Total	8.463	26			
Hardness	0.274	2	0.137	0.40	0.674
Error	8.189	24	0.341		
Total	8.463	26			
rpm	2.420	2	1.210	4.81	0.018
Error	6.043	24	0.252		
Total	8.463	26			
feed	2.053	2	1.027	3.84	0.036
Error	6.410	24	0.267		
Total	8.463	26			
depth of cut	0.573	2	0.287	0.87	0.431
Error	7.890	24	0.329		
Total	8.463	26			

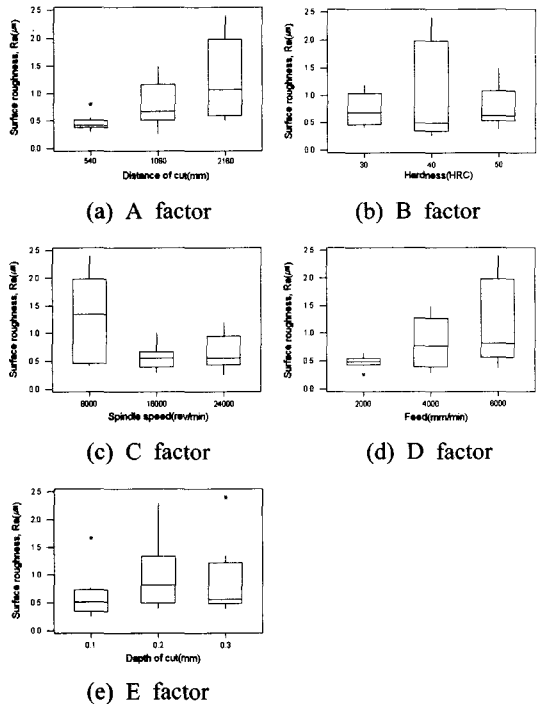


Fig. 3 Surface roughness for each working factors.

Fig. 4는 각 이송속도에서 주축회전수의 변화에 따른 표면거칠기(Ra)를 나타내고 있으며 그림에서

mean의 표시는 분포범위의 평균값을 의미한다. 주축회전수가 8,000rpm에서는 다른 두 수준의 rpm에 비하여 표면거칠기의 분포범위가 넓고, 이송속도는 감소할수록 양호한 표면거칠기를 나타낸다. 그리고 16,000rpm에서는 가장 안정적인 분포상태를 나타내

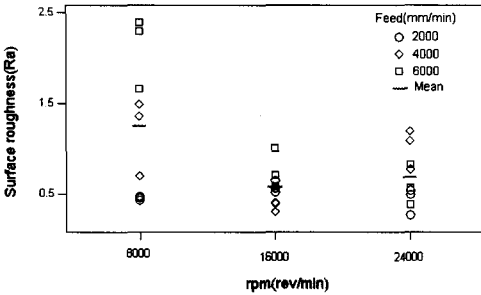


Fig. 4 Effect of rpm on surface roughness

며, 이송속도가 4,000mm/min일 때 가장 낮은 표면 거칠기를 나타낸다. 또한 주축회전수가 24,000rpm에서의 분포상태는 16,000rpm 보다 다소 넓게 분포하고 있으며, 이송속도가 2,000mm/min일 때의 표면거칠기는 양호한 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서 주축회전수가 24,000rpm, 이송속도 2,000 mm/min일 때 sparking 현상이 발생하였다. 이것은 주축의 고속회전에 비하여 이송속도가 저속의 경우에 공구 1 개 날 당 반경방향 절삭체적이 적어짐으로서 일반적으로 연삭가공에서 나타나는 sparking 현상이 발생되었다고 생각된다.

따라서 열간금형용강의 고속 엔드밀 가공에 있어서 주축회전수가 증가할수록 이송속도를 일정하게 증가시켜야 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 다구찌 기법에 의한 최적 절삭조건

Fig. 5는 다구찌 기법의 망소특성 식 (4)에 의하여 각 가공인자와 수준에 따른 S/N비를 나타낸 것이다. 표면거칠기는 절삭거리, 이송속도, 주축회전수, 절삭깊이 순으로 많은 영향을 미치고 있지만, 재료경도 변화에 따른 영향은 적다는 것을 볼 수 있다. 그리고 절삭거리에 있어서는 절삭거리가 적을수록, 이송속도가 감소할수록 표면거칠기는 비례적으로 감소하며, 주축회전수 16,000rpm, 절삭깊이 0.1mm일 때가 표면거칠기는 가장 양호하다는 것을

알 수 있다. 그러나 가공인자인 재료의 경도는 표면거칠기에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 가공인자들간의 표면거칠기를 등고선도로 나타낸 것으로, (a)는 주축회전수와 이송속도의 관계를, (b)는 절삭거리와 절삭깊이의 관계를 나타낸다. 그림 (a)에서 주축회전수가 16,000rpm과 이송속도가 4,000mm/min일 때가 가장 낮은 표면거칠기의 분포상태를 나타내고 있으며, (b)의 그림에서 절삭거리는 적을수록, 절삭깊이는 0.1mm일 때 가장 양호한 표면거칠기를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

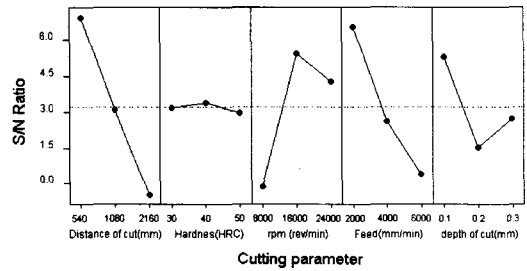
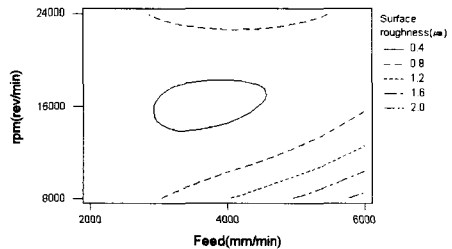
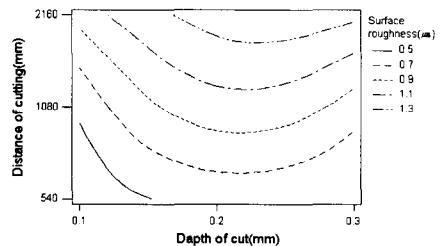


Fig. 5 Relation between S/N ratio and factors



(a) Feed vs. rpm



(b) Depth of cut vs. distance of cutting

Fig. 6 Contour line of each working factors

따라서 STD61의 고속 평면 엔드밀 가공에 있어서 주축회전수 16,000rpm, 이송속도 4,000mm/min, 절삭깊이가 0.1mm일 때와 절삭거리는 적을수록 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있는 최적의 절삭 조건이라 생각된다.

4.3 수학적 모형 추정

Fig. 7는 특성치인 표면거칠기에 대한 각 가공 인자의 수준의 평균에 대한 차를 잔차로 나타낸 것으로, (a)에서 잔차에 대한 정규성을, (b)에서 잔차에 대한 히스토그램이다. 이를 통하여 회귀분석을 위한 정규성과 실험의 오류를 확인할 수 있다. 그림 (a)에서 잔차는 일직선에 가까운 정규성을 나타내고 있으며, (b)의 히스토그램에서는 종 모양으로 좌우가 대칭적으로 분포하고 있다는 것에서 회귀분석을 위한 특성치는 정규분포하고 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구의 결과로부터 전술한 식 (2), (4), (5) 및 (7)로부터 추정된 Ra의 회귀방정식은 다음 식 (9)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 x_1 은 절삭거리, x_2 는 재료경도, x_3 는 주축회전수, x_4 는 이송속도, x_5 를 절삭깊이이다.

$$Ra = -0.361 + 0.384x_1 + 0.00189x_2 - 0.000036x_3 + 0.000169x_4 + 1.22x_5 \quad (9)$$

Table 7 ANOVA of multiple linear regression model for factors

Factor	S	ϕ	V	F_0	P
Regression	6.4536	5	1.2907	13.49	0.000
Residual Error	2.0095	21	0.0957	-	-
Total	8.4632	26	-	-	-

이 식으로부터 주축회전수(x_3)가 증가함에 표면 거칠기는 감소하는 경향을 나타내고, 그 외의 가공 인자의 경우 수준이 증가됨에 따라 표면거칠기도 증가한다는 것을 알 수 있다.

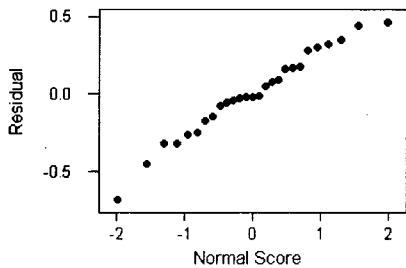
Table 7은 추정된 회귀방정식 (9)의 신뢰성을 알기 위하여 중회귀의 분산분석을 한 것으로, 식 (8)의 결정계수 R^2 을 통하여 회귀식의 신뢰성을 나타낼 수 있다. 즉, 고속 엔드밀 가공에 있어서 추정된 회귀방정식 (9)는 P-검정을 통하여 각 가공인자와 수준에 대하여 충분히 수렴한다는 것을 나타내 주고 있다. 또한 결정계수 R^2 은 76.3%의 정도를 나타내고, MSE가 0.0957으로 데이터의 산포가 작으므로 신뢰성이 양호하다고 생각된다.

따라서 엔드밀 고속 가공에 있어서의 가공인자, 즉, 절삭거리, 재료의 경도, 주축회전수, 이송속도 및 절삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기는 회귀방정식으로 나타낼 수 있으며, 이 결과를 적용하게 되면 가공조건의 변화에 따른 표면거칠기에 대한 예측과 최적의 가공조건의 선정이 가능할 것으로 생각된다.

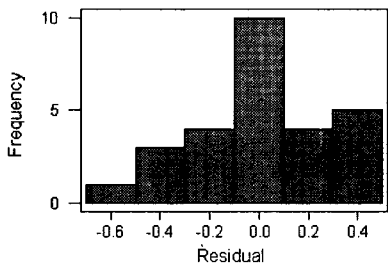
5. 결론

열간금형용강(STD61)의 엔드밀 고속 가공에 있어서 가공인자가 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향을 실험계획법에 의하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험계획법을 통한 고속 평면 엔드밀링의 가공 인자에 대한 통계적 분석이 가능하였다.
- (2) 고속 엔드밀 가공시 주축의 회전수가 증가할 수록 이송속도가 일정하게 증가되어야 양호한 표



(a) Residuals vs. normal score



(b) Residuals vs. frequency

Fig. 7 Diagnostics for residual model

- 면거칠기를 얻을 수 있다.
- (3) 엔드밀 가공에서 가공인자의 영향은 절삭거리, 이송속도, 주축회전수, 절삭깊이 순으로 표면거칠기에 영향을 미친다.
 - (4) STD61의 고속 엔드밀링은 주축회전수 16,000 rpm, 이송속도 4,000mm/min, 절삭깊이 0.1mm 일 때와 절삭거리는 적을수록 양호한 표면거칠기를 나타낸다.
 - (5) 본 연구를 통하여 가공인자에 대한 회귀방정식의 모형을 구축하였다.

9. Park, S. H., "Modern Design of Experiment," Minyung Co. pp. 67-109, 2002.
10. Lee, S. B., "Easy to Underst, of Taguchi Technique," Sangcho Co., pp. 125-213, 2001.
11. Brown, C. C., "On a Goodness of Fit Test for the Logistic Model Based on Score Statistics," Communications in Statistics, Vol. 11, pp. 1087-1105, 1982.
12. Bhargava, A., "Missing Observations , the Use of the Durbin-Watson Statistic," Biometrika 76, Vol. 4, pp. 828-831, 1989.

참고문헌

1. Nakamura, S., "High-Speed Spindles for Machine Tools," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. Vol. 30, No. 4, pp. 291-294, 1996.
2. Dewes, R. C., Apinwall, D. K., Wise, M. L. H., "High Speed Machining Cutting Tools, Machine Requirements," Proceedings of the 31st Int. MATADOR Conf. Manchester, UK, pp. 455-461, 1995.
3. Elbestawi, M. A., Ismail, F. K. M., Yuen, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 34, No. 2, pp. 245-255, 1994.
4. Lim, p., Jang, D. K., Lee, H. K., Yang, G. E., "High speed machining of cavity pattern in prehardened mold using the small size tool," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 133-139, 2004.
5. Bechhofer, R. E., Dunnett, C. W., "Percentage points of multivariate Student distributions," American Mathematical Society, Vol. 11, 1988.
6. Ullman, N. R., "The Analysis of Means (ANOM) for Signal and Noise," Journal of Quality Technology, Vol. 21, pp. 111-127, 1989.
7. Harter, H. L., "Order Statistics , Their Uses in Testing , Estimation," U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., Vol. 1, 1970.
8. Hayter, A. J., "A proof of the conjecture that the Tukey-Kramer multiple comparisons procedure is conservative," Annals of Statistics, Vol. 12, pp. 61-75. 1984.