

# 마이크로 엔드밀 가공시 가공인자가 표면거칠기 향상에 미치는 영향

조병무\*, 김상진<sup>+</sup>, 박희상<sup>++</sup>, 배명일<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2007. 11. 8, 심사완료일 2008. 1. 4)

## Effects of Machining Conditions for Improvement of Surface Roughness on Micro End-Milling

Byoung-Moo Cho\*, Sang-Jin Kim<sup>+</sup>, Hee-Sang Park<sup>++</sup>, Myung-Il Bae<sup>+++</sup>

### Abstract

Micro end-milling is one of effective technology that is able to do ultra-precision machining while increasing the productivity and has wide application field. But selection of machining condition is very difficult because of complicated machining mechanism. Therefore this study was carried out to select working factors to get the optimum surface roughness. Machining condition are depth of cut, feed rate and spindle revolution. The result of this study showed that Surface roughness was affected, in the other of depth of cut, spindle revolution, feed rate. And this study provided an regression equation relating surface roughness to working factors through Regression Analysis and determination coefficient of regression equation had a satisfactory reliability of 79%.

**Key Words** : Micro end-milling(마이크로 엔드밀 가공), Surface roughness(표면거칠기), Analysis of variance(분산분석), Regression analysis(회귀분석)

## 1. 서론

최근 첨단산업의 급격한 발전에 따라 광학렌즈, 통신, 전자 및 반도체 부품 등의 분야에서 소형화, 정밀화를 요구하는

마이크로 부품의 수요가 급증하고 있다. 이러한 마이크로 부품들은 샌드 블러스팅 방법, 스크린 프린팅과 같은 특수 가공법에 의해 제작되지만 그 공정의 복잡성, 고비용, 저생산성의 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 몰드를 이용하여 성형하는 방법이 개발되어 있다<sup>(1)</sup>.

\* 충남대학교 대학원 기계공학과  
+ 교신저자, 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단 (ksjin@cnu.ac.kr)  
주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220  
++ 한양대학교 대학원 기계설계학과  
+++ 충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스공학부

미세한 형상을 갖는 금형을 제작하기 위해 전기적인 가공 및 화학적인 가공을 사용하는 경우, 생산비용과 생산성 측면에서 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 미세공구의 개발과 고속 스피들의 개발을 통해 생산 효율성이 높은 기계적인 가공방법인 엔드밀링에 의한 제작 방법이 연구되어지고 있다<sup>(2)</sup>.

마이크로 엔드밀링은 일반 엔드밀링에 비해 날 당 이송 대 공구반경의 비가 상당히 크고, 공구강성이 매우 작기 때문에 가공조건의 선정이 매우 어렵다. 가공조건의 부적절한 선정은 공구의 파손 및 제품의 품질에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 또한, 마이크로 엔드밀에 의한 가공의 경우 표면정도를 나타내주는 표면거칠기의 양부는 가공인자의 선정에 따라 결정되기 때문에 마이크로 엔드밀에 의한 가공면의 표면정도를 향상시키기 위한 절삭조건의 선정은 매우 중요하다고 생각된다<sup>(3,4)</sup>. 그러나 최적의 가공조건을 선정하기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요하기 때문에 적절한 실험계획과 통계적인 기법을 이용한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고속 공기베어링 스피들을 이용하여 마이크로 엔드밀 가공조건의 변화에 따른 가공면의 표면정도를 통계적 기법을 통해 정량적인 분석을 하였다. 이를 통해 가공조건의 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1 분산분석과 다구찌 기법

마이크로 엔드밀에 의한 표면가공에서 피삭재의 표면거칠기에는 많은 인자들이 복합적으로 영향을 주게 된다. 하지만 어떤 특정한 인자 하나만의 영향을 조사하기 위해 각 인자의 일원 배치에 의한 실험결과를 분산분석 하였다<sup>(5,6)</sup>.

분산분석(analysis of variance)이란 특성치의 산포를 제곱 합(sum of squares : 변동 또는 자승합)으로 나타내고 이 제곱 합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 인자의 제곱합을 그 인자의 자유도로 나누면 그 인자의 제곱평균이 되며 오차 분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하는 함으로서 어느 원인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이다.

가공에 있어서 각 인자가 표면거칠기에 미치는 영향을 분산분석을 통해 분석하였으며, 또한 다구찌 기법의 손실함수(SN비)를 이용하여 특성치에 대한 망소특성을 조사하였다<sup>(7)</sup>. 망소특성에 관한 손실함수는 식 (1)과 같다.

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

여기서,  $y$ 는 특성값(표면거칠기),  $n$ 은 실험횟수를 나타내고 있다.

### 2.2 중회귀분석

실험 데이터의 분석에 있어서 종속변수의 변화는 일반적으로 두 개 이상의 독립변수에 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 중회귀분석은 고속회전에 의한 마이크로 엔드밀의 가공에 있어서 표면거칠기를 종속변수로 선정하고 가공조건을 독립변수로 선정하여 독립변수와 종속변수의 관계를 통계적으로 분석하고자 하였다<sup>(8)</sup>.

종속변수  $y$ 와  $n$ 개의 독립변수  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 에 대하여  $i$  번째 종속변수  $y_i$ 는 식 (2)와 같이 표현되어진다.

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

여기서 각 인자에 대한 관찰점  $i = 1, 2, \dots, n$ 이며,  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 미지의 모수이다. 그리고  $\epsilon_i$ 는 오차 값이다.

그리고 최소제곱법에 의하여 최소화시키려는 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면 식 (3)으로 표현된다.

$$S = \epsilon' \epsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) = y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta \quad (3)$$

식 (3)을  $\beta$ 로 미분하여 0으로 두면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (4)$$

여기서  $\hat{\beta}$ 은  $\beta$ 의 최소 제곱 추정값의 벡터로서  $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k)$ 을 의미한다. 이것은 식 (5)로 표현되어진다.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \dots & \sum x_{ki} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \dots & \sum x_{1i}x_{ki} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \dots & \sum x_{2i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{ki} & \sum x_{1i}x_{ki} & \dots & \sum x_{ki}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{ki}y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

추정된 회귀방정식의 정도(precision)를 측정하는 방법으

로 본 연구에서는 결정계수  $R^2$ (coefficient of determination)을 이용하여 평가하였다. 중회귀 모형의 분산분석을 통해 총 변동(SST)과 회귀분석에 의한 회귀변동(SSR)을 구하는 방법은 식 (6)과 식 (7)로 표현되어진다. 또한 결정계수  $R^2$ 은 식 (8)로 표현된다.

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 = y'y - n(\bar{y})^2 \quad (6)$$

$$SSR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \hat{y}'y - n(\bar{y})^2 \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (8)$$

식 (8)에 의해 구해지는 결정계수는 0과 1사이의 범위에서 결정되고 그 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 갖게 된다.

### 3. 실험방법 및 장치

마이크로 엔드밀에 의한 절삭실험을 위해 위치결정 및 이송을 위해 NC 밀링을 사용하였으며, 주축으로는 본 연구에서 개발한 공기 정압 베어링 스피들을 지그(zig)를 통해 NC 밀링 주축에 부착하여 사용하였다.

실험에 사용한 공기 정압 베어링 스피들은 최대속도 125,000rpm, 콜렛에서 20mm떨어진 엔드밀 선단의 흔들림은 최대 5 $\mu$ m, 스피들 모터의 최대출력은 0.75kW이다. 또한, 실험에 사용한 NC밀링은 독일 DECKEL사의 FP2NC이다. NC밀링의 최대 절삭이송속도는 40m/min이고, 최소 이송량은 1 $\mu$ m이다.

실험에 사용된 시편의 재질은 난삭재 중 하나인 STS 304를 사용하였으며, 마이크로 평 엔드밀을 이용하여 홈 가공을 실시하였다. 또한 가공면의 특성평가는 바닥면의 표면거칠기로 평가하였다. 실험은 마이크로 엔드밀에 의한 미소절삭이므로 실험 시 절삭 깊이를 일정하게 하기 위하여 시편을 가공 후 평면도가 3 $\mu$ m 이하가 되도록 평면 연마 후 실험하였다.

사용한 마이크로 엔드밀의 치수를 Table 1에 표시하였다. 가공실험은 회전수, 절삭 깊이, 이송속도를 가공인자로 선정하고 각각의 가공인자 수준을 변화시켜가며 실시하였다.

실험조건은 Table 2에 표시하였다. 공구마멸의 영향을 최소화하기 위해 매 실험마다 공구를 교환하였으며, 건식 절삭 방법으로 수행하였다.

가공된 시편의 표면거칠기는 광학계를 이용한 비접촉식 측정기인 surface measurement system NT 2000으로 측정하여 평가하였다. 사용한 표면거칠기 측정기의 주요사양은

Table 1 Specifications of flat end-mill

Number of edge	2ea
Helical angle	30°
Length of total tool	38
Length of cut	0.4mm
Diameter of shank	3mm
Diameter of mill	0.2mm

Table 2 Specifications of cutting conditions

RPM	Depth of cut(mm)	Feed rate(mm/min)
80,000	0.01	30, 60, 90, 120
	0.02	
	0.03	
100,000	0.01	30, 60, 90, 120
	0.02	
	0.03	
120,000	0.01	30, 60, 90, 120
	0.02	
	0.03	

수직 분해능(Vertical resolution) 0.1nm 이하, 최대측정범위는 100mm × 100mm, 수직방향 측정 폭은 0.1nm - 150m, 반복정확도 0.1nm, 자동 초점 이동방식을 사용하는 장비이다. 가공인자의 영향을 분석하기 위해 최대 표면 거칠기인  $R_{max}(\mu m)$ 를 측정하였으며, 측정의 오차를 줄이기 위해 10회를 측정하여 평균을 구해 사용하였다.

### 4. 실험결과

Fig. 1의 (a) ~ (c)는 80,000rpm에서 120,000rpm까지의 각각의 회전수에 대해 절삭 깊이와 이송속도 변화에 따른 가공면의 최대 표면거칠기 분포에 대해 나타낸 것이다.

Fig. 1 (a)의 회전수 80,000rpm으로 가공한 경우를 보면, 절삭 깊이가 0.01mm에서는 이송이 빨라짐에 따라 가공면의 표면거칠기가 일정하게 커지는 것을 알 수 있다. 또한 절삭깊이의 증가에 따라 가공면의 표면거칠기는 일정하게 증가함을 알 수 있다. 하지만, 이송속도가 90mm/min인 경우에는 절삭 깊이가 0.01mm에서 0.02mm로 증가하는 구간에서 표면거칠기는 급격히 증가하는 현상을 보이고 있다. 이는 과도한 절삭조건으로 인해 발생하는 것이며 깊이가 0.03mm인 경우

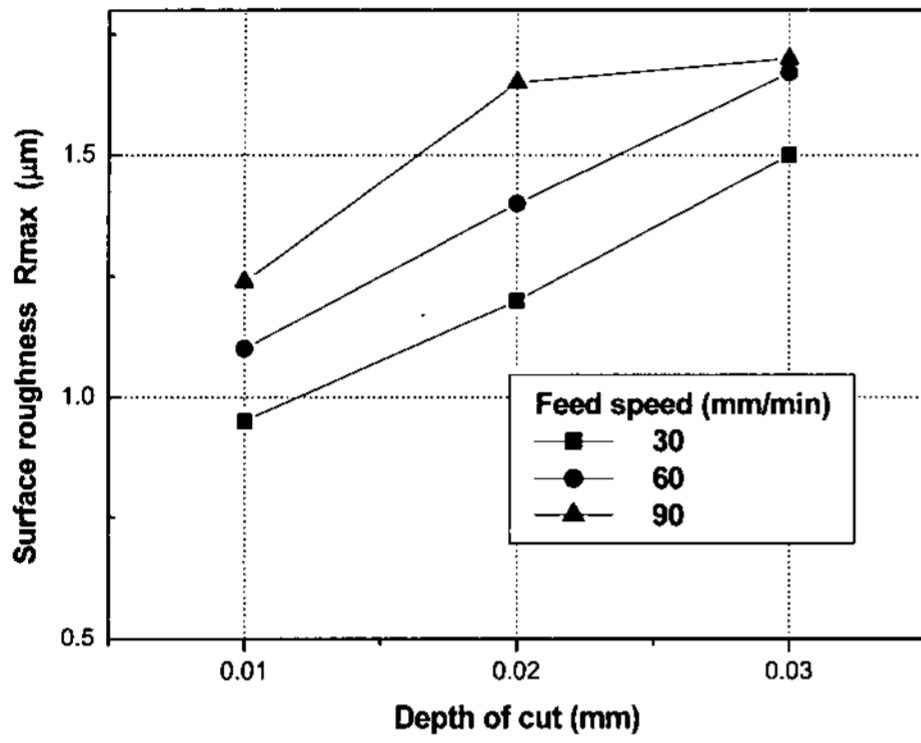
에는 이송속도가 30mm/min과 60mm/min인 경우는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 실험조건에 있는 이송속도가 120mm/min인 경우가 표시되지 않은 이유는 과도한 절삭에 의해 엔드밀의

파괴가 일어났기 때문이다.

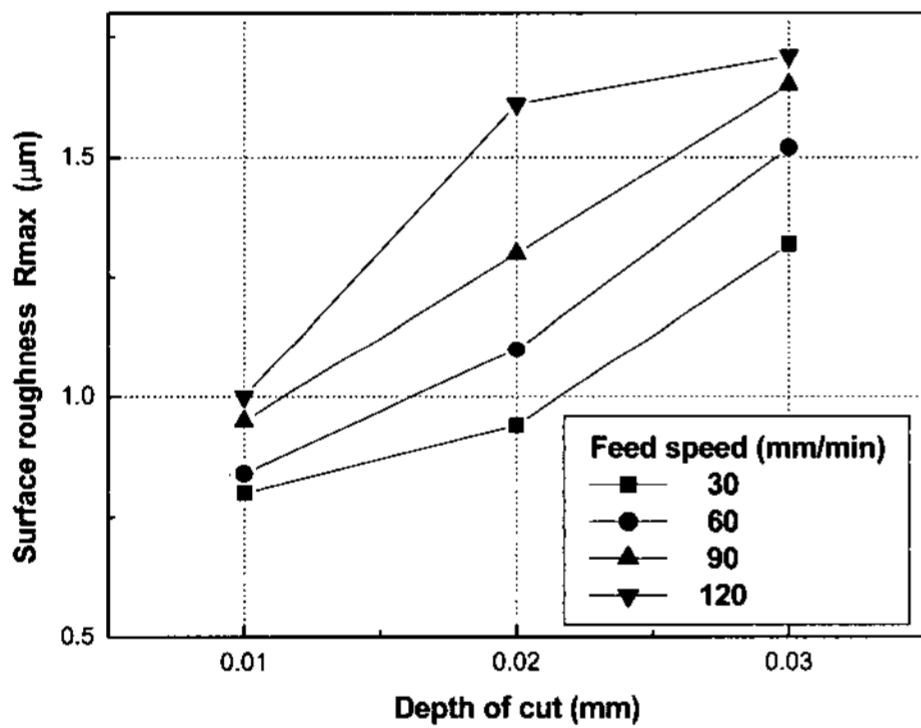
Fig. 1 (b)의 회전수 100,000rpm으로 가공한 경우를 보면 이송속도가 30mm/min과 60mm/min에서는 절삭깊이가 0.01mm에서 서로 비슷한 표면거칠기를 보이거나 이송깊이의 증가에 따라 표면거칠기의 차이가 크게 벌어짐을 보이고 있다. 또한 표면거칠기의 증가가 80,000rpm의 경우보다 완만하게 증가함을 알 수 있다. 이송속도가 90mm/min에서는 (a)의 경우와 비슷하게 절삭깊이에 따라 표면거칠기는 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 이송속도가 120mm/min에서는 절삭깊이가 0.01mm에서 0.02mm로 커짐에 따라 표면거칠기는 급격히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 1 (c)의 회전수 120,000rpm으로 가공한 경우를 보면 가공면의 표면거칠기 분포는 80,000rpm이나 100,000rpm의 표면거칠기보다 안정적으로 분포하고 있으며 표면거칠기가 급격하게 증가하는 구간이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 스피들의 회전수 증가에 따라 절삭속도가 충분히 커져 과도한 절삭이 발생하는 구간이 없음을 보여주고 있다. 또한 절삭 깊이가 0.01mm인 조건에서 이송속도가 30mm/min인 조건보다 60mm/min인 구간에서 표면거칠기가 더 양호하게 나타났으며 이송속도가 30mm/min인 조건에서는 절삭깊이가 0.01mm인 경우나 0.02mm인 경우의 표면거칠기가 거의 유사함을 나타내고 있다. 이는 스피들의 회전수가 높아짐에 따라 이송속도나 절삭깊이의 증가를 통해 공구 1개 날 당 제거체적을 적절하게 증가시켜야 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

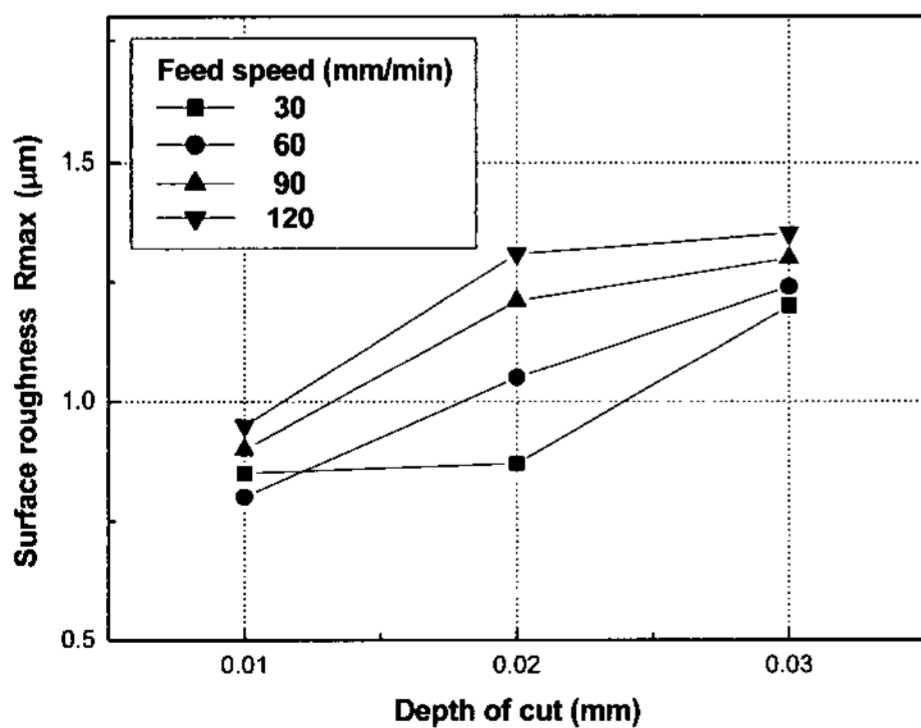
Fig. 2는 각각의 절삭 깊이와 이송속도에서 주축의 회전수의 변화에 따른 가공시편의 표면거칠기를 나타낸 것이다.



(a) 80,000rpm



(b) 100,000rpm



(c) 120,000rpm

Fig. 1 Surface roughness according to depth of cut and feed at various rpm of spindle

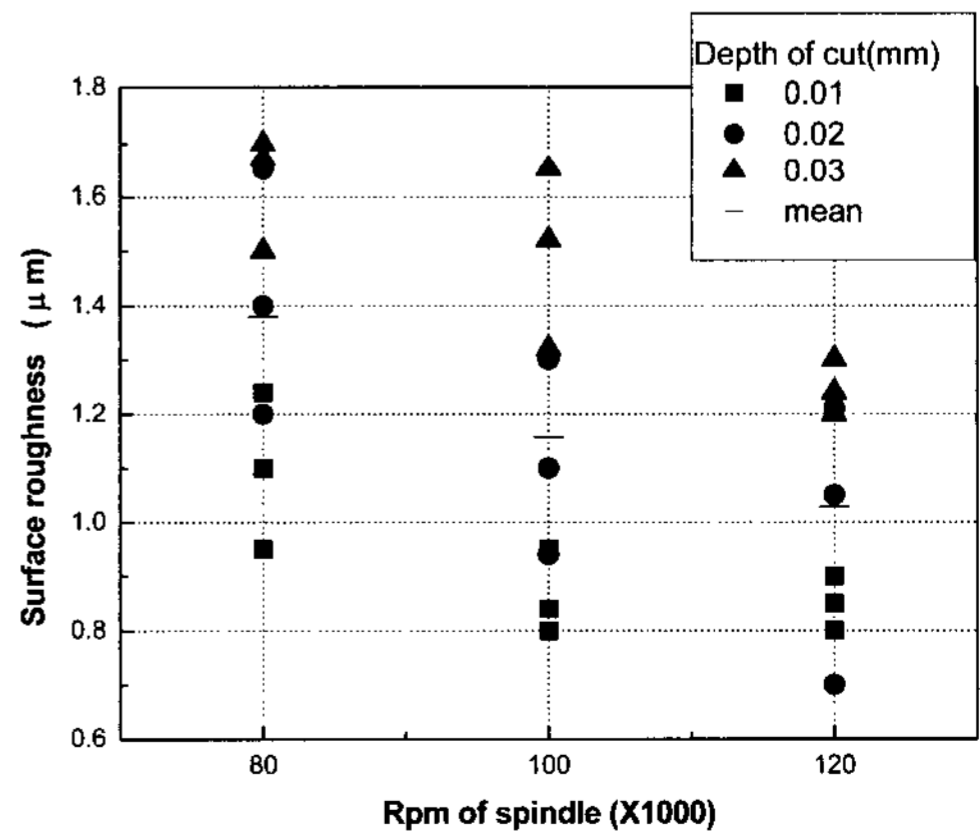


Fig. 2 Effect of rpm on surface roughness

Fig. 2에서 평균(mean)의 표시는 표면거칠기 분포의 평균값을 의미한다. 스피들의 회전수 증가에 따라 표면거칠기 분포의 평균값은 낮게 나타남을 알 수 있다. 스피들 회전수 100,000rpm에서의 분포는 80,000rpm에 비해 표면거칠기의 평균은 양호하지만 분포의 영역은 넓게 나타나고 있다. 하지만 스피들의 회전수가 120,000rpm인 경우에는 평균값과 분포범위가 작게 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 고속의 회전은 가공면의 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있으며 또한 넓은 가공 영역에서 안정적인 절삭이 수행됨을 알 수 있다. 이를 통하여 고속의 회전은 절삭깊이와 이송의 변화를 통해 회전당 소재 제거율을 높여 생산성의 향상에 기여할 수 있음을 보여주고 있다.

Table 3은 일원배치에 의한 분산분석의 결과를 나타낸 것으로 각 가공인자 중에서 어느 특정한 하나의 인자만의 영향을 조사하기 위해 각 인자에 대한 검정을 한 결과이다. 여기에서, S는 요인에 대한 제곱합,  $\phi$ 는 자유도, V는 평균제곱을 의미하며, F0는 평균제곱의 비로서 요인에 대한 평균제곱과 에러에 대한 평균제곱의 비를 의미한다. 검정결과를 보면 요인에 대한 제곱합이 가장 크게 나타나는 절삭 깊이가 표면거칠기에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 두 번째로 영향을 미치는 인자는 스피들의 회전수, 이송속도 순으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Analysis of variance(ANOVA) table for response

Source	S	$\phi$	V	F0
RPM	0.5704	2	0.2852	7.75
Depth of cut	1.9542	2	0.9771	26.55
Feed	0.4466	2	0.2233	6.07
Error	0.2945	8	0.0368	
Total	3.2657	14		

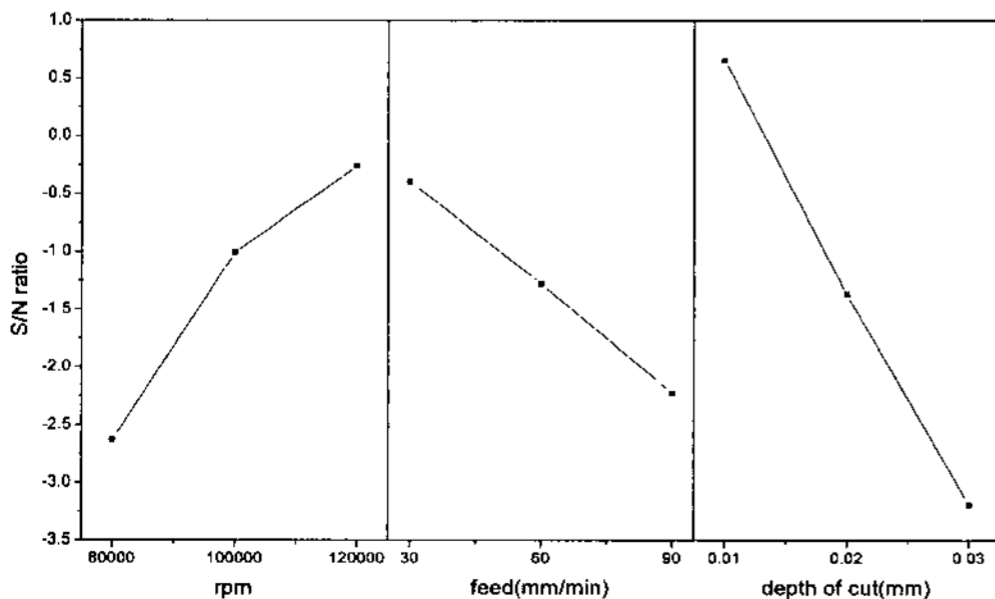


Fig. 3 Relation between S/N ratio and factors

Fig. 3은 다구찌 기법의 망소특성에 의해 각 가공인자의 조건에 따른 S/N비를 나타낸 것이다. 표면거칠기는 절삭 깊이, 스피들의 회전수, 이송속도의 순으로 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 절삭 깊이는 적을수록, 스피들의 회전수는 높을수록, 이송속도는 빠를수록 표면거칠기는 양호해짐을 알 수 있다.

표면 거칠기는 가공조건인 회전 속도와 가공 깊이, 이송 속도를 인자로 추정된 표면거칠기의 회귀방정식은 식 (9)로 표현되어진다.

$$y = 0.727463 - 17.7502 \times 10^{-6} x_1 \times d + 28.3571 x_2 + 4.07351 \times 10^{-3} x_3 \quad (9)$$

여기서,  $x_1$  : 스피들의 회전수(rpm),  
 $x_2$  : 절삭 깊이(mm),  $x_3$  : 이송속도(mm/min).  
 $y$  : 표면거칠기( $\mu\text{m}$ )  $d$  : 공구직경(mm)

위의 식으로부터 스피들의 회전수는 증가할수록 표면거칠기는 양호해지고, 절삭깊이와 이송속도는 증가할수록 깊이가 표면거칠기가 거칠어짐을 알 수 있다. 회전수에 대한 계수가 다른 계수에 비해 작게 나타나는 이유는 회전수가 다른 인자에 비해 수치가 크기 때문이다.

추정된 회귀분석에 대하여 신뢰성을 분석하기 위하여 중회귀 분산분석을 실시하여 Table 4에 나타내었다. 또한 회귀분석의 정도는 결정계수  $R^2$ 을 통하여 회귀방정식에 대한 신뢰성을 나타낼 수 있다.

식 (8)에 의해 결정계수  $R^2$ 을 구해보면 79% 정도를 나타내고 있다. 하지만 잔차의 평균제곱인 MSE가 0.020789로서 대단히 작게 나타나는 것으로 볼 때 데이터의 산포가 매우 작으므로 신뢰성은 양호하다고 판단된다.

따라서 위에서 제시한 식을 이용하면 가공조건에 대한 표면거칠기의 예측과 최적의 가공조건의 선정이 가능하다.

Table 4 ANOVA of multiple linear regression model for factors

Factor	S	$\Phi$	V	F0
Regression	3.040893	3	1.101363	48.7591
Residual error	0.789965	38	0.020789	
total	3.830857	41		

## 5. 결론

본 연구는 마이크로 엔드밀의 가공특성을 평가하기 위해 실시하였다. 이를 평가하기 위해 직경 0.2mm의 평 엔드밀을 이용하여 스테인리스 강(STS 304)의 표면가공을 실시한 후, 바닥면의 표면거칠기를 측정하고, 실험결과를 통계적인 기법을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스피들의 회전수를 80,000rpm에서 120,000rpm으로 증가시킴에 따라 1날당 제거체적을 고려하여 이송속도나 절삭깊이를 일정하게 증가시켜야 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
- (2) 마이크로 엔드밀에 의한 가공 시 회전당 소거제거율을 증가시킬 때 절삭깊이 보다는 이송속도를 증가시키는 것이 더 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
- (3) 마이크로 엔드밀 가공에서 가공인자의 영향은 절삭깊이, 회전수, 이송속도 순으로 표면거칠기에 영향을 미친다.
- (4) 마이크로 엔드밀 가공에서 가공조건에 대한 표면거칠기의 예측과 가공조건 선정에 이용할 수 있는 회귀방정식을 구축하였다.

## 참고 문헌

- (1) Min, S. K., Lee, S. W., Lee, D. J., Lee, E. S., Je, T. J., and Choi, D. S., 2001, "A Study in the Machining Characteristics for Micro Barrier Ribs

By using Micro Endmilling," *Proceedings of the KSMTE Autumn Conference*, pp. 26~31.

- (2) Nakamura, S., 1996, "High-speed Spindles for Machine Tools," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 30, No. 4, pp. 291~294.
- (3) Elbestawi, M. A., Ismail, F. K., and Yuen, M., 1994, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 34, No. 2, pp. 245~255.
- (4) Lim, P., Jang, D. K., Lee, H. K., and Yang, G. E., 2004, "High Speed Machining of Cavity Pattern in Prehardened Mold Using the Small Size Tools," *Journal of KSPE*, Vol. 21, No. 1, pp. 133~139.
- (5) Park, S., 1998, "Experimental Design and Applications," Youngji Press, Republic of Korea, pp. 93~225.
- (6) Lee, S. H. and Lee, S. H., 2001, "Optimization of Experimental Parameters for Burr Minimization," *Journal of KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp. 130~136.
- (7) Chung, W. J., Cho, Y. D., Lee, C. M., Jung, D. W., and Song, T. J., 2006, "A Study on the Reduction of Unclamping Time by Design of Experiments," *Transactions of KSMTE*, Vol. 15, No. 3, pp. 1~7.
- (8) Shim, S. C., Jang, S. M., Maeng, M. J., and Chung, J. K., 2004, "The Cutting Characteristics of Rotary Tools Using Regression Analysis," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 105~110.