

엔드밀 가공시 진동, 표면거칠기, 절삭온도에 미치는 최적가공조건에 관한 연구

The Study on the Optimal Working Condition for Vibration, Surface Roughness and Cutting Temperature in End-milling

홍도관* · 김동영** · 안찬우†

Do Kwan Hong, Dong Young Kim and Chan Woo Ahn

(2004년 8월 16일 접수 : 2004년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Table of Orthogonal Array(직교배열표), ANOVA(Analysis of Variance : 분산분석), Surface Roughness(표면조도), Vibration Acceleration(진동가속도), Cutting Temperature(절삭온도)

ABSTRACT

End-milling has been used widely in industrial system because it is effective to a material manufacturing with various shapes. Recently the end-milling processing is needed the high-precise technique with good surface roughness and rapid time in precision machine part and electronic part. The optimum mechanical vibration of main spindle, surface roughness and cutting temperature have an effect on end-milling condition such as, cutting direction, revolution of spindle, feed rate and depth of cut, etc. Therefore, this study carried to decide the working condition for optimum mechanical vibration of main spindle, surface roughness and cutting temperature using design of experiments, ANOVA and characteristic function. From the results of experimentation, mechanical vibration has an effect on revolution of spindle, radial depth of cut, and axial depth of cut. The surface roughness has an effect on cutting direction, revolution of spindle and depth of cut. And then the optimum condition used design of experiments is upward cutting in cutting direction, 600 rpm in revolution of spindle, 240 mm/min in feed rate, 2 mm in axial depth of cut and 0.25 mm in radial depth of cut. By design of experiments and characteristic function, it is effectively represented shape characteristics of mechanical vibration, surface roughness and cutting temperature in end-milling.

1. 서 론

최근 산업현장에서 널리 사용되는 엔드밀 가공은 다양한 형상을 가진 재료의 가공에 유용하므로 그 수요는 날로 증가하고 있다. 엔드밀은 일반적으로 고속

도강이나 초경재료를 원재료로 사용하고 있으며 코팅 처리된 것을 사용하는 경우도 있다. 엔드밀 가공에 있어서 공구손상과 가공정도에 영향을 미치는 가공조건은 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등이 있으며 가공조건에 따른 공구의 수명 연장을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 엔드밀 가공에 있어서의 가공조건은 현장에서 경험치를 이용하여 가공을 하고 있는 실정이며 가공조건에 영향을 공구 동력계를 이용한 절삭력 측정과 공구형상 설계에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나 이는 가공조건에 유의한 영향을 미치는 인자들에 대한 정량적인 데이터를 제

† 책임저자 : 정희원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : cwahn@daunet.donga.ac.kr
Tel : (051) 200-7643, Fax : (051) 200-7656

* 한국전기연구원 메카트로닉스 연구그룹

** 정희원, 동아대학교 생산기술연구소 특별연구원

시하고 있지 못하고 있는 실정이다.

현재 엔드밀 가공은 고속주축을 탑재한 고속가공기가 보급되고 있으나^(1, 2) 설비투자에 대한 경비문제로 인하여 아직 엔드밀 가공은 10,000 rpm 이하에 대부분 가공이 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 엔드밀 가공은 슬롯, 포켓 및 표면가공 등 다양한 형상의 정삭 가공에 유용하게 사용되어 현재 여러 산업분야에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 그러나 엔드밀 가공공정은 항공산업, 자동차 부품 및 금형가공의 작업에서는 정형(near net shape) 가공기술의 발달에 따라 허용 공차 이내로 표면정도를 유지하고 가공시간을 감소시킬 수 있는 가공조건에 대한 연구가 필요한 실정에 있다.

이처럼 엔드밀 가공에 있어서 제품의 정도에 영향을 미치는 스피들의 진동, 표면거칠기, 공구수명에 영향을 미치는 절삭온도에 대한 최적 절삭조건 선정이 우선되어야 한다.^(3, 4) 그러나, 최적의 절삭조건을 선정하기 위한 각 인자와 수준에 따른 실험은 많은 시간과 비용이 소요되고 현실적인 어려움이 따른다. 그러므로 실험계획법과 스피들의 진동, 표면거칠기, 공구수명에 영향을 미치는 절삭온도 등의 특성에 제한조건을 주고 모든 특성치를 고려한 특성함수를 제안하였다.

따라서 이 연구는 실험계획법과 특성함수를 이용하여 엔드밀 가공시 스피들의 진동, 피삭재의 표면거칠기, 절삭온도에 대한 영향을 모두 고려한 엔드밀 가공의 최적조건을 선정하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

이 실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 현대범용 M/C로서 주축의 회전수는 최고 10,000 rpm, 공구 이송속도는 1,000 mm/min이다. Fig. 1은 수직형 머시닝센터의 사진을 나타내고 있으며, 절삭공구는 $\phi 10$ 의 고속도공구강 엔드밀을 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 재료는 일반 기계구조용 탄소강인 SM45C를 $35 \times 25 \times 25$ mm로 일정하게 가공하여 사용하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다.

엔드밀의 평면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 35 mm를 기준으로 건식 측면 가공하였다. Fig.

2에는 절삭온도 측정 시스템의 개략도를 나타내고 있으며 가공조건에 따른 절삭온도를 비교하기 위하여 절삭단면을 기준으로 0.5 mm의 위치에 K-tape 열전대(thermocouple)를 데이터 레코드(data record)에 연결하여 절삭온도를 PC로 저장하였다. 실험 완료 후 시험편은 표면조도계를 사용하여 가공면의 중심선 평균표면거칠기 R_a 를 측정하였다. 또한 진동측정은 스피들 축에 3축 가속도 센서를 부착하여 FFT로 X, Y, Z축의 진동가속도(rms) 스펙트럼을 측정하였다. 창함수는 hanning을 사용하였으며, 주파수 범위는 0~1.6 kHz, 주파수 분해능은 0.25 Hz로 하였다. 10 Hz이하 1.5 kHz이상의 값은 필터링하였으며, 스펙트럼 평균화는 이송속도를 고려하여 1,000~1,600 번 수행하였다.

2.2 실험계획법

엔드밀 가공에 있어서 특성치인 절삭온도와 표면거칠기 및 진동에 가장 많은 영향을 미치는 가공조건

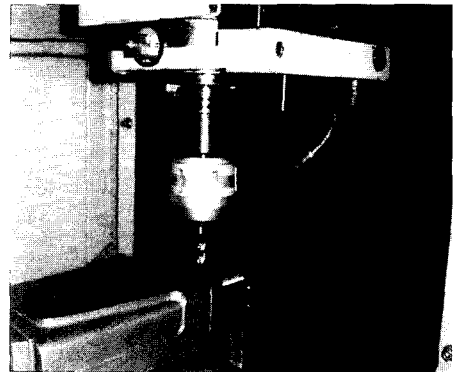


Fig. 1 Photo. of vertical machining center

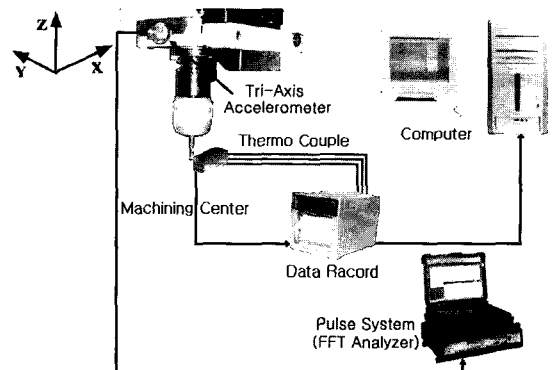


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

즉, 인자를 선정해야 한다. 엔드밀 가공에 있어서 표면거칠기에 미치는 가공인자로는 주축의 회전수, 이송속도, 절삭깊이, 공구 종류 등 여러 가지 인자들이 있다. 따라서 이 연구에서는 주축의 회전수, 이송속도, 절삭방향, 절삭깊이를 인자로 선정하였고, 실험에 사용된 머시닝센터의 가공범위 내에서 각 인자는 4 수준으로 하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다.

실험은 혼합직교배열표 $L_{32}(2^1 \times 4^7)$ 를 이용하여 실험계획을 수립하여 실험을 실시하였다. 엔드밀 가공에 있어서 가공조건에 따른 X, Y, Z 축 진동가속도 및 절삭온도와 표면거칠기 Ra를 특성치로 설정하여 각 조건에 따른 통계적 분석을 위하여 분산분석(ANOVA)⁽⁵⁾과 다구찌 기법⁽⁶⁻⁹⁾을 활용하여 특성치에 대한 유의한 영향을 주는 가공인자와 각 인자에 대한 최적의 가공조건을 분석하였다.⁽¹⁰⁾ 다구찌 기법에서 주효과를 이용하여 특성치에 대한 망소특성을 분석하였다.

2.3 특성함수를 이용한 제한조건의 문제

제한조건이 있는 문제의 경우 제한조건을 고려하기 위하여 벌칙함수 $P(x)$ 를 고려하여 원래 반응치와 제한조건의 위배량을 포함하는 벌칙함수로서 목적함수인 특성함수 $\Omega(x)$ 가 정의된다.⁽¹¹⁾ 직교배열표의 실험으로부터 얻어지는 특성치는 최적설계에 취급되는 제한조건을 포함하고 있지 않다. 절삭가공의 최적설계의 문제를 정식화로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \Omega(Ra, \dots, T) \tag{1}$$

Subject to :

$$\frac{|Ra_{\max}|}{Ra_{at}} - 1 \leq 0 \tag{2}$$

Table 1 Factor and level

Factor \ Level	1	2	3	4
Cutting direction	Up-ward	Down-ward	-	-
Spindle speed(rpm)	300	600	900	1,200
Feed rate(mm/min)	80	160	240	320
Axial depth of cut (mm)	2	4	6	8
Radial depth of cut (mm)	0.25	0.5	0.75	1.0

$$\frac{|a_{x,\max}|}{a_{x,at}} - 1 \leq 0 \tag{3}$$

$$\frac{|a_{y,\max}|}{a_{y,at}} - 1 \leq 0 \tag{4}$$

$$\frac{|a_{z,\max}|}{a_{z,at}} - 1 \leq 0 \tag{5}$$

$$\frac{|T_{\max}|}{T_{at}} - 1 \leq 0 \tag{6}$$

식 (1)의 $\Omega(Ra, \dots, T)$ 는 절삭가공에서 제품의 정도에 영향을 미치는 스피들의 진동, 표면거칠기, 공구수명에 영향을 미치는 절삭온도에 대한 절삭조건들의 조합을 목적함수로 표시하였으며, 식 (2)~(6)의 Ra_{at} , $a_{x,at}$, $a_{y,at}$, $a_{z,at}$, T_{at} 은 허용 표면조도, 허용 X축 가속도, 허용 Y축 가속도, 허용 Z축 가속도, 허용 절삭온도를 나타낸다. 직교배열표의 각 실험에서 제한조건의 유용성(feasibility)이 포함될 수 있도록 특성함수를 정의한다. 먼저 식 (7)~(11)과 같이 제한조건함수의 유용성을 처리할 수 있는 벌칙함수를 정의한다.

$$P_1(Ra, \dots, T) = \alpha \cdot \text{Max} \left[0, \frac{|Ra_{\max}|}{Ra_{at}} - 1 \right] \tag{7}$$

$$P_2(Ra, \dots, T) = \beta \cdot \text{Max} \left[0, \frac{|a_{x,\max}|}{a_{x,at}} - 1 \right] \tag{8}$$

$$P_3(Ra, \dots, T) = \gamma \cdot \text{Max} \left[0, \frac{|a_{y,\max}|}{a_{y,at}} - 1 \right] \tag{9}$$

$$P_4(Ra, \dots, T) = \delta \cdot \text{Max} \left[0, \frac{|a_{z,\max}|}{a_{z,at}} - 1 \right] \tag{10}$$

$$P_5(Ra, \dots, T) = \varepsilon \cdot \text{Max} \left[0, \frac{|T_{\max}|}{T_{at}} - 1 \right] \tag{11}$$

여기서 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ 는 제한조건에 대한 목적함수 및 벌칙함수의 기여도를 조절하는 벌칙계수를 의미한다. 즉, 식 (7)에서 표면조도를 예로 들면, 제한조건을 만족시킬 경우에는 벌칙함수가 최대값인 0을 가지게 되며, 제한조건을 위배할 경우에는 $\alpha(Ra_{\max}/Ra_{at} - 1)$ 만큼의 최대값을 갖게 된다. 이 값이 너무 크게 되면 반응치의 최소화는 의미가 없고, 반대로 너무 작게 되면 구한 최적수준이 불용영역에 있을 확률이 높다. 따라서 원래 목적함수에 비해 벌칙항을 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ 의 계수로 벌칙함수의 영향도를 조절해야하며 이것으로부터 특성함수는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\Omega(Ra, \dots, T) = \sum_{i=1}^5 P_i(Ra, \dots, T) \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 3축의 진동가속도

Table 2는 혼합직교배열표 $L_{32}(2^1 \times 4^7)$ 의 실험순서에 따른 3축 진동가속도, 표면조도, 절삭온도의 특성에 대한 실험결과를 나타낸다.

Table 2 Table of orthogonal array $L_{32}(2^1 \times 4^7)$

Exp. No.	X axis (m/s ²)	Y axis (m/s ²)	Z axis (m/s ²)	Ra (μm)	Temp. (°C)
1	0.477	0.307	0.309	1.248	0.0
2	0.800	0.472	0.548	1.312	0.0
3	1.320	0.626	0.761	1.205	15.2
4	1.800	0.856	1.070	2.901	36.0
5	0.779	0.675	0.612	0.613	9.7
6	0.671	0.604	0.514	0.463	0.9
7	1.730	1.050	1.200	0.601	51.6
8	1.710	0.937	1.060	0.714	27.9
9	1.450	1.240	1.320	0.990	52.5
10	1.730	1.370	1.510	0.547	10.8
11	1.310	0.939	1.010	0.807	15.6
12	1.230	0.871	0.901	1.344	7.2
13	1.710	1.740	1.430	2.623	69.5
14	1.410	1.280	1.090	1.779	45.1
15	1.660	1.620	1.340	0.860	71.3
16	1.450	1.650	1.150	0.930	99.4
17	0.576	0.347	0.342	1.014	41.5
18	0.611	0.387	0.355	2.134	31.9
19	0.762	0.435	0.448	2.766	28.8
20	1.040	0.603	0.576	2.061	14.4
21	1.540	1.070	0.941	1.719	73.1
22	0.755	0.664	0.559	1.653	16.5
23	1.620	1.150	0.914	1.434	31.9
24	0.677	0.822	0.470	2.033	2.4
25	1.610	1.290	1.180	2.760	104.9
26	2.500	2.210	2.030	1.802	74.2
27	0.787	0.733	0.611	1.486	1.7
28	1.400	1.260	0.960	1.252	21.3
29	1.610	2.110	1.390	2.823	175.1
30	2.380	2.760	1.860	2.764	118.4
31	1.190	1.680	1.020	1.550	6.3
32	1.160	1.500	0.936	1.671	0.9

Table 3~5는 가공인자에 대한 X, Y, Z축 방향의 진동가속도(rms)에 대한 분산분석의 결과를 나타내고 있으며 모두 엔드밀 가공에서의 가공인자인 주축의 회전수, 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이가 X, Y, Z축 방향의 진동가속도에 많은 영향을 미치고 있다.

Fig. 3에는 다구찌 기법을 이용하여 엔드밀 가공조건에 따른 특성치인 X축 방향의 진동가속도에 대한 평균의 주효과를 나타내었다. 가공인자의 수준변화에 따른 진동가속도는 반경방향 절삭깊이, 주축의 회전수, 축방향 절삭깊이의 순으로 많은 영향을 미치고 있으며 이들 가공인자는 수준이 증가함에 따른 진동가속도는 증가하고 있다는 것을 볼 수 있다. 그리고 절삭방향과 공구이송속도는 X축 방향의 진동가속도

Table 3 ANOVA for X axis vibration acceleration

Factor	S	ψ	V	F ₀	P
Cutting direction	0.03245	1	0.03245	0.67	0.425
Spindle speed	2.15566	3	0.71855	14.75	0.000
Feed rate	0.07855	3	0.02618	0.45	0.663
Axial depth of cut	1.93545	3	0.64515	13.25	0.000
Radial depth of cut	2.96760	3	0.98920	20.31	0.000
Error	0.87671	18	0.04871		
Total		31			

Table 4 ANOVA for Y axis vibration acceleration

Factor	S	ψ	V	F ₀	P
Cutting direction	0.24256	1	0.24256	4.30	0.053
Spindle speed	7.25182	3	2.41727	42.84	0.000
Feed rate	0.16310	3	0.05437	0.96	0.431
Axial depth of cut	0.71397	3	0.23799	4.22	0.020
Radial depth of cut	1.30003	3	0.43343	7.68	0.002
Error	1.01560	18	0.05642		
Total		31			

Table 5 ANOVA for Z axis vibration acceleration

Factor	S	ψ	V	F ₀	P
Cutting direction	0.04751	1	0.04751	2.00	0.175
Spindle speed	2.81111	3	0.93704	39.38	0.000
Feed rate	0.13385	3	0.04462	1.88	0.170
Axial depth of cut	0.80901	3	0.26967	11.33	0.000
Radial depth of cut	1.53172	3	0.51057	21.46	0.000
Error	0.42829	18	0.02379		
Total		31			

에는 그 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 이는 X축 방향의 진동가속도는 스피ndl의 주분력으로 주축의 회전수와 절삭깊이의 증가에 따른 절삭저항의 증가로 인하여 진동가속도의 변화가 크게 나타나고 있으며, 또한 엔드밀의 가공에 있어서의 공구이송방향 즉, 절삭방향과 일치하고 있으므로 엔드밀의 공구 절삭날과 피삭재와의 접촉저항, 절삭된 칩의 배출에 있어서의 간섭으로 인하여 진동가속도가 크게 나타난다.

Fig. 4에는 특성치인 Y축 방향의 진동가속도에 대

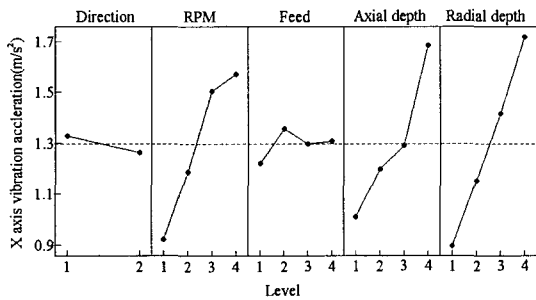


Fig. 3 Illustration of factor effect for X axis vibration acceleration

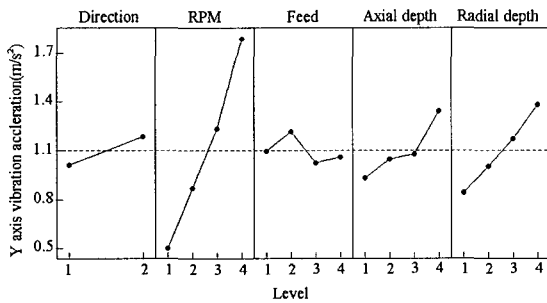


Fig. 4 Illustration of factor effect for Y axis vibration acceleration

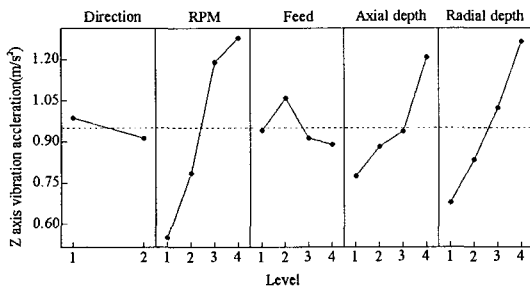


Fig. 5 Illustration of factor effect for Z axis vibration acceleration

한 평균의 주효과를 나타내었으며 가공인자의 수준변화에 따른 진동가속도는 주축의 회전수, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이 순으로 많은 영향을 미치고 있으나 주축의 회전수 변화가 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. Y축은 스피ndl의 배분력으로서 헬리스각에 의한 측면 절삭이 연속적으로 이루어짐에 있어서 주축의 회전수의 증가에 따른 절삭저항은 비례적으로 증가되기 때문이다.

Fig. 5에는 특성치인 Z축 방향의 진동가속도에 대한 평균의 주효과를 나타내었으며 주축의 회전수, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이 순으로 많은 영향을 미치고 있다. 이들 가공인자의 수준이 증가함에 따라 Z축 방향의 진동가속도는 증가하는 경향을 보이며 그 수준간의 차가 나타나고 있다. 그리고 절삭방향과 공구이송속도는 X축과 Y축의 진동가속도의 결과와 마찬가지로 그 영향이 적다는 것을 알 수 있다.

따라서 3축의 진동가속도에 있어서 가공인자인 주축의 회전수, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이 순으로 많은 영향을 미치고 있으며 주축의 회전수가 증가함에 따라 절삭저항의 증가로 인하여 진동가속도는 비례적으로 증가하고 있으며, 절삭깊이의 증가에 따른 진동가속도는 각에 따라 차이는 있으나 공구 1날당 절삭체적의 증가에 따라 비례적으로 증가하고 있다.

3.2 표면거칠기

Table 6은 가공인자에 대한 피삭재의 표면거칠기에 대한 분산분석 결과를 나타내고 있으며 피삭재의 표면거칠기는 가공인자인 절삭방향, 반경방향 절삭깊이, 주축의 회전수에 많은 영향을 받고 있으며, 공구이송속도와 축방향 절삭깊이는 표면거칠기에 미치는

Table 6 ANOVA for surface roughness

Factor	S	ψ	V	F_0	P
Cutting direction	4.4888	1	4.4888	14.39	0.001
Spindle speed	2.9760	3	0.9920	3.18	0.049
Feed rate	0.6292	3	0.2097	0.67	0.580
Axial depth of cut	0.2880	3	0.0960	0.31	0.819
Radial depth of cut	3.1148	3	1.0383	3.33	0.043
Error	5.6142	18	0.3119		
Total	17.1109	31			

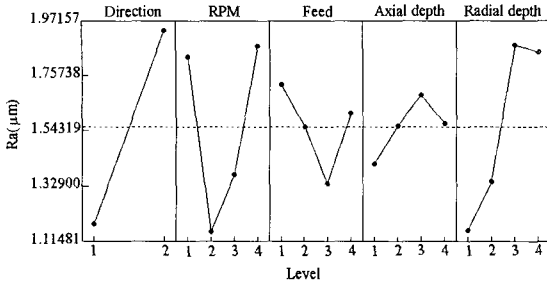


Fig. 6 Illustration of factor effect for surface roughness

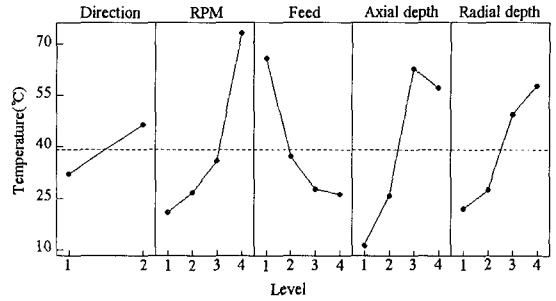


Fig. 7 Illustration of factor effect for temperature

영향이 적은 것으로 나타나고 있다. 따라서 엔드밀 가공에 있어서 피삭재의 양호한 표면거칠기를 위하여 절삭방향, 반경방향 절삭깊이, 주축의 회전수에 대한 적절한 수준을 선택함으로써 보다 나은 표면거칠기를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 엔드밀 가공조건에 따른 특성치인 표면 거칠기에 대한 주효과를 나타낸다. 절삭방향과 절삭 깊이에 있어서 상향가공과 절삭깊이가 적을수록 공구날 1개당 초기절삭체적이 감소되므로 보다 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다. 또한 주축의 회전수가 증가할수록 스피들의 3축 진동가속도는 비례적으로 증가하고 있으나 피삭재의 표면거칠기에 있어서는 600 rpm에서 가장 양호한 표면거칠기를 나타내고 있다. 따라서 주축의 회전수에 있어서는 진동 가속도의 미치는 영향에 비하여 표면거칠기에 보다 많은 영향을 주고 있는 600 rpm이 최적의 가공조건이 된다.

3.3 절삭온도

Table 7은 가공인자에 대한 절삭온도의 분산분석

Table 7 ANOVA for cutting temperature

Factor	S	ψ	V	F_0	P
Cutting direction	1661.8	1	1661.8	3.70	0.070
Spindle speed	13253.0	3	4417.7	9.83	0.000
Feed rate	8080.6	3	2693.5	6.00	0.005
Axial depth of cut	14713.6	3	4904.5	10.92	0.000
Radial depth of cut	7067.0	3	2355.7	5.24	0.009
Error	8086.5	18	449.3		
Total	52862.5	31			

의 결과를 나타내고 있으며 엔드밀 가공에서의 가공 인자인 축방향 절삭깊이, 주축의 회전수, 공구이송속도, 반경방향 절삭깊이는 절삭온도에 많은 영향을 미치고 있으며 절삭방향 또한 무시할 수 없는 인자라 할 수 있다. 따라서 이 실험에서 설정한 모든 가공인자들은 절삭온도에 영향을 미치고 있으며 절삭온도가 상승하게 되면 공구의 수명단축과 표면거칠기에 영향을 미치므로 각 인자의 주효과와 최적의 가공수준 선정함으로써 보다 안정적인 절삭가공이 수행할 수 있을 것이다.

Fig. 7에는 엔드밀 가공조건에 따른 특성치인 절삭온도에 대한 평균의 주효과를 나타내었다. 축방향 절삭깊이, 주축의 회전수, 공구이송속도, 반경방향 절삭깊이, 절삭방향 순으로 많은 영향을 미치고 있으며 주축의 회전수와 축방향 및 반경방향의 절삭깊이는 그 수준이 증가함에 따라 절삭체적이 비례적으로 증가하여 절삭온도는 상승되고 있다. 공구 이송속도에 있어서는 그 수준이 증가함에 따라 공구날 1개당 절삭횟수의 감소로 인하여 절삭온도는 감소하며, 표면 거칠기에 대한 영향을 고려할 때 3수준인 240 mm/min의 이송속도가 최적의 가공조건이다.

3.4 특성함수

제한조건으로 진동 특성치의 경우 X, Y, Z축의 진동가속도 값을 모두 1.5 m/s^2 , 표면조도와 절삭온도 특성치의 경우 2 mm와 80°C 로 설정하였다. 사용자가 원하는 진동가속도와 표면조도 및 절삭온도를 설정하여 원하는 특성치 모두를 고려한 가공조건을 선택할 수 있다.

Table 8은 망소특성인 특성함수에 대한 인자의 효과와 편차(deviation) 및 기여율(percentage contribution)

Table 8 Factors affecting the characteristic function

Factor	Effect			
	1	2	3	4
Direction	0.0140*	0.0474	-	-
RPM	0.0141	0.0052*	0.0302	0.0734
Feed	0.0435	0.0531	0.0115*	0.0148
Axial depth	0.0041*	0.0134	0.0426	0.0628
Radial depth	0.0043*	0.0050	0.0479	0.0657

* : Optimum level

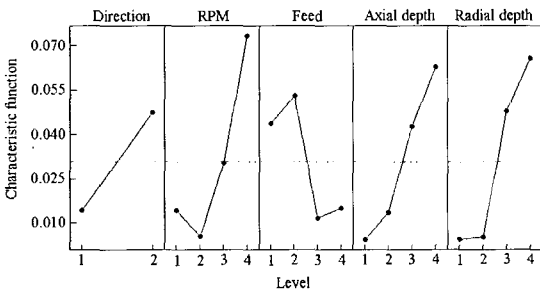


Fig. 8 Illustration of factor effect for the characteristic function

을 나타낸 것이다. 예를 들어 주축의 회전수 인자에 대한 1수준 효과는 1~4, 17~20에 해당되는 특성치의 전체평균으로부터 그 설계변수 수준에 의한 결과의 편차로 평가되며, 동일하게 모든 인자와 수준에 그 효과를 계산할 수 있다. Fig. 8은 통계소프트웨어인 Minitab R13⁽¹²⁾을 이용하여 특성함수에 대한 특성치의 영향도 분석을 한 것이며, 이때 평균은 다른 인자들의 모든 수준에 대해서 균형화된 것이다.

각 인자별 수준수의 효과를 비교하여 최적수준을 조합하면 절삭방향(1 수준 : 상향), 주축의 회전수(2 수준 : 600 rpm), 공구 이송속도(3 수준 : 240 mm/min), 축방향 절삭깊이(1 수준 : 2 mm), 반경방향 절삭깊이(1 수준 : 0.25 mm)이며 Table 5에 *표시로 나타내었다. 이는 수직형 머시닝센터에서 세팅되는 가공조건과 일치하였다.

4. 결 론

고속도강 엔드밀을 이용한 피삭재의 엔드밀 가공에 있어서 스피들의 3축 진동가속도, 피삭재의 표면거칠

기, 절삭온도를 고려한 가공인자의 최적 가공조건을 실험계획법에 의한 분산분석, 다구찌 기법, 특성함수를 이용하여 구하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험계획법을 통한 엔드밀 가공에 있어서 최소의 실험을 통하여 많은 영향을 미치는 가공인자에 대한 통계적 분석이 가능하였다.
- (2) 스피들의 3축 진동가속도에 있어서는 주축의 회전수, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이 순으로 많은 영향을 미치는 가공인자라 할 수 있다.
- (3) 엔드밀 가공시 표면 거칠기는 절삭방향, 반경방향 절삭깊이, 주축의 회전수 순으로 많은 영향을 미치며 절삭온도는 본 연구에서 설정한 모든 가공인자의 영향을 받는다.
- (4) 특성함수를 이용하여 스피들의 3축 진동가속도, 표면 거칠기, 절삭온도 등의 제한조건을 고려한 수직형 머시닝센터의 최적 가공조건을 구하였으며, 그 결과 수직형 머시닝센터에서 세팅되는 가공조건과 일치하였다. 따라서 이러한 방법은 고속가공을 포함한 모든 기계가공에 대한 최적가공조건을 구하는데 유용하게 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Nakamura S., 1996, "High-Speed Spindles for Machine Tools," International Journal Japanese Sociology Precision Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 291~294.
- (2) 嶽岡悦雄, 齊藤博, 桑田收平, 官口弘明, 石川淳, 岩部洋育, 1996, "高硬度材の高速エンドミルに関する研究(第1報)," 精密工學會誌, 第62卷, 第1號, pp. 115~119.
- (3) Elbestawi M. A., Ismail, F., Yuen K. M., 1994, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No. 2, pp. 245~255.
- (4) F. Ismail, M. A. Elbestawi, 1993, "Generation of Milled Surfaces Including Tool Dynamics and Wear," Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry., Vol. 115, pp. 245~252.

- (5) 홍도관, 김동영, 최경호, 안찬우, 2003, "진동을 고려한 원공복합적층판의 최적적층설계," 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 6 호, pp. 423~429.
- (6) 日本規格協會, 1998, 品質評價를 위한 S/N比
- (7) 박성현, 2002, 현대실험계획법, 민영사.
- (8) 이상복, 2001, 알기쉬운 다구찌기법, 창조사.
- (9) 오재응, 조용구, 이규태, 2001, "다구찌법을 이용한 자동차 흡기계의 저소음화에 대한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 2 호, pp. 234~240.
- (10) 김동우, 조명우, 서태일, 이응숙, 2002, "실험계획법에 의한 마이크로 드릴링 공정의 최적 절삭조건 결정," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 993~998.
- (11) 홍도관, 최석창, 안찬우, 2004, "특성함수를 이용한 제한조건이 있는 천장크레인의 강건최적설계," 한국정밀공학회논문집, 제 21 권, 제 2 호, pp. 160~167.
- (12) Minitab User's Guide #2, 2000, Data Analysis and Quality Tool, Minitab Inc.