

실험계획법을 이용한 엔드밀 가공시 주축 진동에 대한 정량적 분석 및 수학적 모형

박흥식[#], 이상재^{*}, 배효준^{*}, 진동규^{**}, 김영희^{***}

Quantitative Analysis and Mathematical Model for Spindle Vibration of the End-Milling by Design of Experiment

Heung-Sik Park[#], Sang-Jae Lee^{*}, Hyo-Jun Bae^{*}, Dong-Kyu Jin^{**}, Young-Hee Kim^{***}

ABSTRACT

End-milling have been widely used in aircraft, automobile part and moulding industry. However, various working factors such as spindle speed, feed rate and depth of cut in end-milling have an effect on spindle vibration. There it is demanded the quantitative analysis of spindle vibration in order to get the optimum surface roughness. This study was carried out to analyze an influence of working factors on spindle vibration by design of Experiment. The results are shown that mathematical model of regression equation for an influence of working factors on vibration acceleration of spindle in end-milling by regression analysis is presented.

Key Words : End-Milling(엔드밀링), Spindle Vibration(주축진동), Design of Experiment(실험계획법), Regression Equation(회귀방정식), Regression Analysis(회귀 분석)

1. 서 론

최근 항공기, 전자, 원자력, 자동차 및 조선산업에 사용되고 있는 재료는 고속, 고정밀, 고안정성을 요구되고 있으며 스테인레스강 및 Ti 합금 등의 사용빈도가 점점 증가하고 경량화를 위해서는 알루미늄 합금 사용이 또한 증가하고 있는 실정에 있다. 그러나 이들 재료들은 난삭재로 알려져 있기 때문에 이들을

사용하여 초정밀 부품으로 절삭가공 할 경우 다른 금속재료에 비하여 절삭력, 공구마멸 및 표면정도 등의 많은 문제점을 가지고 있다.

이들 중 특히 스테인레스강은 Cr을 다량 함유한 내식강이므로 절삭가공시 가공경화가 일어나 공구마멸이 빠르게 진행되며, 구성인선(built-up edge)이 많이 발생되어 절삭가공면을 거칠게 한다. 이로 인하여 치수정밀도를 얻기 어려우며 부적절한 가공조건의 선정으로 인하여 공구의 이상마멸과 후처리 공정을 수반하게 됨으로써 생산성과 경제성에 커다란 문제점을 가지고 있다. 현재 이들 난삭재의 형상 및 정밀 가공에는 엔드밀 가공이 주를 이루고 있다. 엔드밀 가공은 최근 전자 및 정밀기계 산업의 급속한 발전에

교신저자 : 동아대학교 기계공학부
E-mail : parkhs@daunet.donga.ac.kr

* 동아대학교 기계공학부

** 부산정보대학 자동차기계학부

*** 동아대학교 신소재공학과

따라 정삭가공에 대한 고정도화, 고능률화 및 공구의 수명연장 등이 한층 요구되고 있다^{1,2)}. 엔드밀 정삭가공은 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이의 변화에 따라 칩 형태와 공구마멸, 공구의 진동특성, 공구와 피삭재 사이의 상대운동에 따라 표면정도에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 이들 난삭재의 정삭가공에서 공구수명 연장과 가공정도에 영향을 미치는 최적 가공조건 선정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다³⁻⁵⁾.

이상과 같이 난삭재의 엔드밀 정삭가공에 관한 이들의 연구는 최적의 가공조건을 위하여 설정한 가공범위 내에서 칩 형상과 공구동력계를 이용한 절삭저항의 측정 및 모델제시 또한 표면정도에 미치는 공구형상 설계 및 공구진동의 영향에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다⁶⁾. 그러나 현재까지는 난삭재의 엔드밀 정삭가공시 피삭재와 공구사이에 상호간의 운동으로 발생하는 주축의 진동은 외부로부터의 진동과 절삭계 내부에서 일어나는 진동이 동시에 발생되므로 가공인자의 변화에 따른 주축의 3축 진동가속도의 분석을 통한 주축의 진동에 관한 구체적인 연구는 미흡한 실정에 있다.

따라서 다양한 가공인자들이 엔드밀 정삭 가공시 주축의 진동에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써 절삭저항을 고려한 최적의 절삭조건을 선정이 가능하게 될 것으로 생각된다. 이를 위하여 본 연구에서는 실험계획법을 적용하여 가공인자를 분석하고 회귀 분석을 통한 다양한 절삭조건에 대한 절삭인자들의 상호관계를 수학적 모형을 수립⁷⁻⁹⁾하여 엔드밀 가공시 최적 절삭조건을 선정하는 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 머시닝센터는 현대 AJV18 수직형 머시닝 센터로서 주축의 회전수는 최고 10,000 rpm, 공구 이송속도는 1,000mm/min이다. Fig. 1에는 실험장치의 개요도를 나타내었다. 절삭공구는 TiC 코팅처리된 $\phi 10$, 4날의 초경 엔드밀을 사용하였으며 가공시 주축에 3-Axis sensor(Type 4506, B&K)를 부착하여 주파수 분석기(FFT-Type WE7000 YOKOG- AWA)

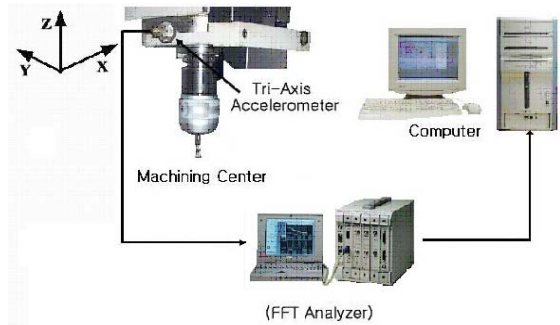


Fig. 1 Schematic of vertical machining center

Table 1 Chemical compositions of specimen

Cr	Ni	Si	P	S	C
18	8.5	1.0	0.04	0.03	0.08

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
720	60	7

를 통하여 진동가속도(RMS)를 측정하여 특성치로 설정하여 주축의 진동을 분석하였다. 그리고 실험에 사용한 재료는 STS 304를 사용하였으며, STS 304의 화학적 성질은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 실험을 위한 시험편의 치수는 35mm×25mm×25mm 로 일정하게 가공하여 사용하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다.

2.2 실험계획법

실험계획법에 의한 실험순서는 Fig 2와 같다. 여러 가지 통계적 방법으로 가공조건에 따른 표면 거칠기에 대한 통계적 분석을 통하여 최소의 실험횟수로 최적의 가공조건에 대한 정보를 얻을 수 있는 것이 실험계획법이라 할 수 있다. 우선 엔드밀 가공에 있어서 특성치라 할 수 있는 주축진동에 가장 많은 영향을 미치는 절삭조건 또는 가공인자를 선정해야 한다. 따라서 엔드밀 가공에 있어서 주축진동에 미치는 가

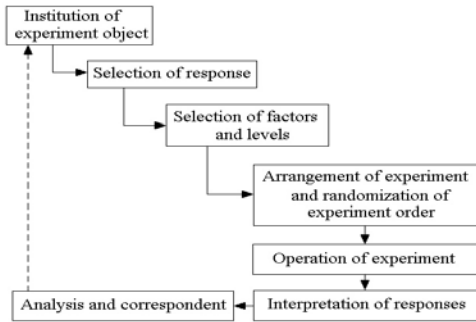


Fig. 2 Flow chart for design of experiment

Table 3 Experimental conditions

Factor	Level		
	1	2	3
Spindle speed (rpm)	2,000	4,000	6,000
Feed rate (mm/min)	300	600	900
depth of cut (mm)	0.05	0.10	0.15

공인자로는 주축의 회전수, 이송속도, 절삭깊이, 공구 종류 등 여러 가지 인자(factor)들이 있다.

본 실험에서의 엔드밀 가공에 있어서는 정삭가공에 대한 주축의 회전수, 이송속도, 절삭깊이를 인자로 선정하였고, 실험에 사용된 머시닝센터의 가공 범위 내에서 각 인자는 Table 3과 같이 3 수준(level)으로 하였으며, 삼원배치법(three-way factorial design)을 이용하여 실험계획을 수립하여 실험을 실시하였다. 그리고 각 조건에 따른 실험 완료 후 절삭조건에 따라 주축에 진동센서를 부착하여 진동가속도(RMS)를 측정하였으며, 이것을 특성치로 설정하고 어느 가공인자가 특성치에 가장 많은 영향을 미치고 있는지를 분산분석을 통하여 분석하고 각 인자들간의 함수적 관련성을 규명하고 수학적 모형을 추정하기 위하여 중회귀분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주축에 영향을 주는 가공인자

Table 4는 STS304의 엔드밀 정삭가공에 있어서는

특성치인 주축의 3축 진동가속도에 대한 각 가공인자와 인자간의 상호작용을 분산분석한 결과를 나타내고 있으며, P 값의 검정 결과 엔드밀 정삭가공에서의 주분력의 진동인 Y축에 대한 절삭깊이의 영향을 제외한 본 연구에 설정한 가공인자인 주축회전수, 공구이송속도와 절삭깊이가 모두가 주축의 진동가속도에 많은 영향을 미치고 있으며 각 인자간의 상호작용에 있어서는 그 영향이 적은 것으로 나타나고 있다. 이는 주축의 회전수, 공구이송속도와 절삭깊이가 증가함에 따라 공구 1개 날당 절삭체적이 증가하여 절삭저항이 증가되기 때문이라고 생각된다.

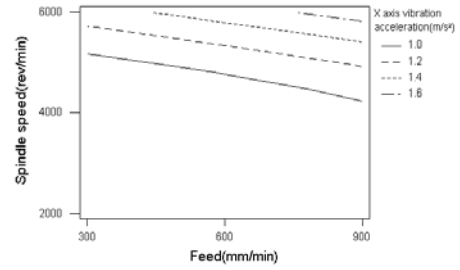
Fig. 3은 분산분석의 결과 가장 많은 영향을 미치는 가공인자인 주축의 회전수와 공구이송속도의 수준 변화에 따른 주축의 3축의 진동가속도의 분포상태를 등고선도로 나타내었다. 그림 (a)의 이송분력의 진동인 X축의 경우 주축의 회전수가 증가함에 따라 진동가속도는 증가하고 있으며 주축의 회전수가 4000rpm이하에서 X축의 진동이 낮게 분포하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 (b)의 Y축의 경우 주축의 회전수가 2000rpm에서 6000rpm까지 공구이송속도가 300mm/min에서 600mm/min까지에서 Y축의 진동가속도는 낮게 분포하고 있으며 2000rpm과 6000rpm에서는 공구이송속도가 다소 증가하여도 낮은 진동가속도를 나타내고 있다는 것을 볼 수 있다. 그림 (c)의 축분력의 진동인 Z축의 경우 주축회전수와 공구 이송속도는 낮을수록 Z축의 진동가속도는 낮게 분포한다는 것을 알 수 있으며 주축의 회전수와 공구이송속도가 감소할수록 진동가속도는 낮게 분포하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 STS304의 엔드밀 정삭가공시 각 가공인자와 수준에 따른 주축의 3축 진동가속도는 주축회전수, 공구이송속도와 절삭깊이가 증가할수록 진동가속도는 증가하고 있다. X축과 Z축의 경우 주축회전수, 공구 이송속도, 절삭깊이 순으로 진동가속도에 많은 영향을 미치고 있으며, Y축의 경우 공구이송속도, 주축회전수, 절삭깊이 순으로 진동가속도에 많은 영향을 미치고 있다는 것을 볼 수 있다. 가공인자인 주축회전수에 있어서 4000rpm까지는 Y축의 진동가속도가 가장 크게 발생하고 6000rpm에서는 X축의 진동가속도가 가장 크게 발생하고 있는 것은 주축의 회전수가 증가함에 따라 공구와 피삭재의 접촉횟수의 증가에

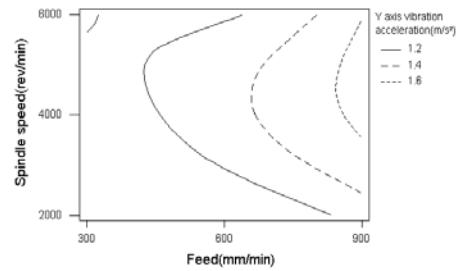
Table 4 ANOVA of 3-axial vibration acceleration for experiment condition

Axis	Factors	S	ϕ	V	F_0	P
X	Spindle speed	2.92405	2	1.46202	375.18	0.000
	Feed	0.47192	2	0.23596	60.55	0.000
	Depth of cut	0.05678	2	0.02839	7.29	0.016
	Spindle speed \times Feed	0.01477	4	0.00369	0.95	0.484
	Spindle speed \times Depth of cut	0.00996	4	0.00249	0.64	0.649
	Feed \times Depth of cut	0.02490	4	0.00622	1.60	0.265
	Error	0.03118	8	0.00390		
Total	3.53356	26				
Y	Spindle speed	0.60197	2	0.30098	5.92	0.026
	Feed	1.09410	2	0.54705	10.76	0.005
	Depth of cut	0.27025	2	0.13513	2.66	0.130
	Spindle speed \times Feed	0.08280	4	0.02070	0.41	0.799
	Spindle speed \times Depth of cut	0.08346	4	0.02086	0.41	0.797
	Feed \times Depth of cut	0.14649	4	0.03662	0.72	0.602
	Error	0.40668	8	0.05084		
Total	2.68574	26				
Z	Spindle speed	0.490040	2	0.245020	54.58	0.000
	Feed	0.118419	2	0.059209	13.19	0.003
	Depth of cut	0.040574	2	0.020287	4.52	0.049
	Spindle speed \times Feed	0.018221	4	0.004555	1.01	0.455
	Spindle speed \times Depth of cut	0.009871	4	0.002468	0.55	0.705
	Feed \times Depth of cut	0.015787	4	0.003947	0.88	0.517
	Error	0.035917	8	0.004490		
Total	0.728829	26				

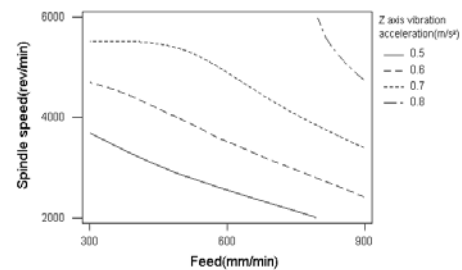
따른 절삭열의 증가로 인한 절삭저항이 비례적으로 증가되었기 때문이라 생각된다. 그리고 공구이송속도와 절삭깊이에 있어서는 Y축의 진동가속도가 가장 크게 발생하고 있는 것은 절삭체적에 있어서 공구이송속도의 증가와 절삭깊이의 증가에 따른 공구의 반지름 방향 절삭깊이의 증가로 인하여 절삭저항이 증가되었기 때문이라 생각된다. 따라서 STS304의 평면 엔드밀 정삭가공시 주축의 3축 진동에 있어서 Y축 방향의 진동가속도가 X축과 Z축에 비하여 크게 발생하고 있으며 주축회전수와 공구이송속도가 많은 영향을 주고 있는 가공인자라 할 수 있다.



(a) X-axis



(b) Y-axis



(c) Z-axis

Fig. 3 Contour plot of vibration acceleration between spindle speed and feed

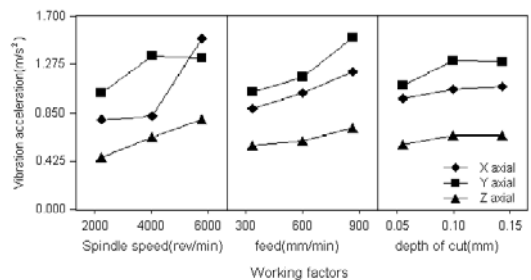
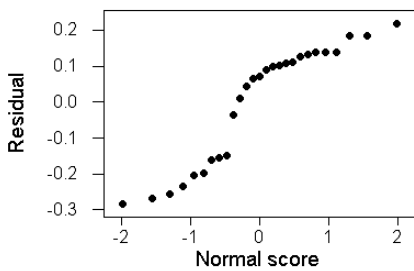


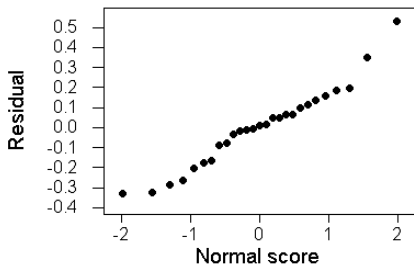
Fig. 4 Variation of vibration acceleration with working factors

3.2 회귀분석을 통한 수학적모형

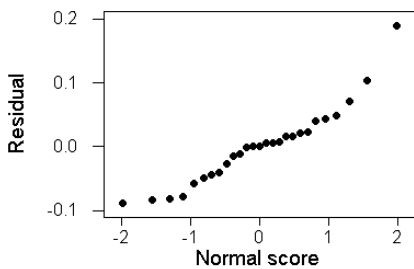
Fig. 5는 STS304의 엔드밀 정삭가공시 주축의 X, Y, Z축의 진동가속도에 대한 잔차분석을 나타내고 있으며 잔차의 분포상태에 있어서 X축은 비정규적이고 균일하지 못한 변동을 나타내고 있으며 Y, Z축은 정규분포상태를 나타내고 있다는 것을 볼 수 있다. 이는 X축의 진동가속도에 있어서는 주축회전수가 6000 rpm에서 급격히 증가됨에 따라 잔차의 비정규적인 분포가 발생되고 있다고 생각되며 이는 중회귀 분석을 통하여 알 수 있다.



(a) X axis



(b) Y axis



(c) Z axis

Fig. 5 Residual model diagnostics for 3 axis vibration acceleration

STS304의 정삭가공시 발생하는 주축의 3축 진동가속도를 중회귀분석을 통하여 다음과 같은 수학적 모형을 얻었다. 여기서 x_1 은 주축회전수, x_2 는 공구이송속도, x_3 는 절삭깊이를 나타내고 있다.

$$X = -0.109 + 0.000179x_1 + 0.000538x_2 + 1.08x_3 \quad (1)$$

$$Y = 0.243 + 0.000077x_1 + 0.000794x_2 + 2.04x_3 \quad (2)$$

$$Z = 0.0578 + 0.000082x_1 + 0.000262x_2 + 0.830x_3 \quad (3)$$

Table 5는 STS304의 정삭가공시 주축의 X, Y, Z축의 진동가속도의 수학적 모형에 대한 분산분석을 나타내었다. 추정된 회귀방정식 (1), (2), (3)은 P-검정결과 가공조건에 따라서 발생하는 주축의 3축 진동가속도를 충분히 설명할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 진동가속도에 대한 결정계수는 X축의 경우 R^2 은 80.0%, Y축의 경우 R^2 은 60.8% 그리고 Z축의 경우에는 R^2 은 86.5%의 정도를 나타내고 있으며 MSE는 X, Y, Z축은 각각 0.03080, 0.04575, 0.00428로 데이터의 산포가 작으므로 신뢰성이 양호하다고 할 수 있으며 X축의 진동가속도에 있어서는 잔차분석에서의 이상원인에 대해 충분히 설명할 수 있다.

따라서 STS 304의 평면 엔드밀 고속가공에 있어서의 가공인자, 즉 주축회전수, 이송속도 및 절삭깊이의 변화에 따른 주축에 발생하는 3축 진동가속도에 대한 회귀방정식을 나타낼 수 있으며, 이 결과를 이용하여 엔드밀 절삭가공에 있어서의 주축에서 발생하는 진동과 가공인자의 변화에 따른 진동가속도를 예측함으로써 주축의 안정적인 진동발생을 위한 가공조건의 선정이 가능할 것으로 생각된다.

Table 5 ANOVA of multiple linear regression model for X axis vibration acceleration

Axis	Factors	S	ϕ	V	F_0	P
X	Regression	2.82509	3	0.94170	30.57	0.000
	Residual Error	0.70847	23	0.03080		
	Total	3.53356	26			
Y	Regression	1.63350	3	0.54450	11.90	0.000
	Residual Error	1.05224	23	0.04575		
	Total	2.68574	26			
Z	Regression	0.63046	2	0.21015	49.14	0.000
	Residual Error	0.09836	23	0.00428		
	Total	0.72883	26			

4. 결 론

실험계획법을 적용하여 난삭재인 스테인레스강(STS304)의 평면 엔드밀 고속 정삭가공에 있어서 가공인자인 주축회전수, 공구이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 주축의 진동가속도를 분석하였다. 그리고 분산분석과 회귀분석을 통하여 가공인자에 대한 영향을 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험계획법을 통한 난삭재의 가공에 있어서 주축의 진동에 많은 영향을 미치고 있는 가공인자에 대한 정량적인 통계적 분석이 가능하였다.
2. STS304의 엔드밀링에 있어서 주축의 회전수 6000rpm에서 진동가속도는 급격히 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.
3. 엔드밀링 정삭가공시 주축의 진동에 있어서 Y축의 진동가속도가 X축과 Z축에 비하여 크며 가공인자는 주축회전수와 공구이송속도가 많은 영향을 미친다.
4. 회귀분석을 통하여 엔드밀 가공시 주축의 진동가속도에 대한 수학적 모형인 회귀방정식을 구축하였다.

참고문헌

1. Sakuma, K., Tguchi, K., Kinjo, S., "A Study on Deep Hole Drilling with Solid Boring Tools, The Effect of Tool Material on the Cutting Performance," JSME, Vol. 21, No. 153, pp. 532-539, 1978.

2. 윤재웅, "선삭가공에 절삭력을 이용한 공구마멸의 감지," 한국공작기계학회지, 제10권, 제2호, pp. 1-9, 2001.
3. Draper, N. R. and Smith, "Applied Regression Analysis," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
4. Seber, G. A. F., "Linear Regression Analysis," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.
5. 강구봉, 황영동, "절삭공구와 가공기술," 기전연구사, 1994.
6. Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Ohmori, G., "An Atomistic Analysys of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-work Interaction in Diamond Turning," Annals of CIRP, Vol. 40, Jan., pp. 551-554, 1991.
7. Johnson, N. L. and Leone, F. C., "Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences," John Wildy & Sons, New York, Volumes 1 and 2, 1964.
8. Kempthorne, O., "The Design and Analysis of Experiments," John Wiley & Sons, New York, 1952.
9. Taguchi, G., "System of Experiemntal Design," Vol. 1 and Vol. 2, UNIPUB Kraus International Publications, New York, 1987.