

요인 실험계획법 및 회귀분석을 이용한 소경 엔드밀의 공구수명에 대한 연구

임표*(전북대 대학원 기계공학과), 박상윤(전북대 대학원 기계공학과), 양균의(전북대
기계항공시스템공학과)

A Study on tool life in the high speed machining of small-size end mill by factorial design of experiments and regression model

P. Lim(Mech. Eng. Dept., CBNU), S. Y. Park(Mech. Eng. Dept., CBNU), G. E. Yang(Mech. & Aero. Eng.
Dept., CBNU)

ABSTRACT

High speed machining(HSM) technique is widely used in the appliance, automobile part and mold industries, which has many advantages such as good quality, low cost and rapid machining time. but it also has problems like tool break, smooth tool path, and so on. In particular, small size end mill is easy to break, so it must be changed before interrupting operation. Generally, the tool life of small size end mill is effected by the milling conditions whose evaluated parameters are spindle, feedrate, and width of cut. The experiments are carried out by full factorial design of experiments using an orthogonal array.

This paper shows optimal combination and mathematical model for tool life, and the analysis of variance(ANOVA) is employed to analyze the main effects and the interactions of these milling parameters and the second-order polynomial regression model with three independent variables is estimated to predict tool life by multiple regression analysis.

Key Words : High speed machining (고속 가공), Small size end mill (소경 엔드밀 공구), Tool life (공구 수명), Factorial design(요인배치법), ANOVA(분산 분석), Regression model(회귀모델)

1. 서론

현대 산업 사회에서 세련된 디자인과 고정밀도를 요구하는 제품의 필요성은 자동차, 전자 부품 및 금형 산업 전반에 걸쳐 크게 증가하고 있다. 이에 기존 가공 방식에 비해 주축 회전수 및 이송 속도의 고속화와 가공기의 정밀 제어 기술을 결합시킨 고속 가공(High Speed Machining) 기술이 각광받고 있다. 이 기술은 제품의 가공시간의 감소와 미려한 가공 표면을 얻을 수 있으며, 초경 및 코팅 공구 기술의 발전과 맞물려 공구 선택의 다양화와 소형화를 가능하게 하였다. 하지만 고속 가공에서 소경 공구의 사용은 중·대경의 일반 공구와는 달리 공구 마모 및 절삭량이 공구 파단과 직접적으로 연관성이 있으며, 적

용 분야의 특성상 제품 생산성에 민감하기 때문에 공구 수명에 영향을 끼치는 인자의 파악 및 인자간의 상호 작용에 대한 평가를 통하여 공구 수명을 예측하여 원활한 공구 교환이 가능하게 하는 것이 필요하다. 또한, 소경 공구의 특성상 중·대경 공구에 비해 절삭 깊이에 대한 제한이 크고, 마모에 대한 판단뿐만 아니라 파절삭에 의한 파단이 공구 수명에 미치는 영향을 가지는 것을 고려하여 가공조건이 선정되어야 한다.

기존의 연구를 살펴보면, 절삭 과정이 될 복잡한 절삭이나 드릴 가공에 대하여 공구 마모나 절삭력 변동이 공구 수명에 끼치는 영향을 파악했다. 가공 특성이 복잡한 엔드밀 공구의 경우에는 절삭날의 평균 마모 및 임계 마모를 파악하여 공구수명을 예측

하고자 하였지만, 대부분의 연구는 중·대형 공구에 편중되어져 있다.

이에, 본 연구에서는 소경 볼 엔드밀에 의한 최종 형상 가공을 수행하는데 있어서 고속 가공을 적용하였으며, 공구 파단 전에 적절한 공구 교환을 가능하게 하기 위하여 공구 수명에 영향을 끼치는 주요 인자를 파악 및 이를 바탕으로 공구 수명을 예측할 수 있는 모델식을 추정하고자 하였다. 주요 가공인자로는 주축회전수(Spindle), 이송속도(feed), 절삭폭(width of cut)을 선정하였으며, 실험은 완전 요인배치법에 의하여 3수준계로 설계되었다. 공구 수명에 영향을 끼치는 주요 인자와 인자간의 상호 관계는 분산분석(ANOVA)을 실시하여 파악하였으며, 최적의 수준조합 및 보편값 추정에 의한 그때의 결과값을 예측하여 실험값과 비교 및 유의성을 검증하였다. 또한 회귀 분석 모델에 의한 다차의 공구 수명식을 예측하여 효율적인 공구 교환이 가능하도록 하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험계획법 및 회귀분석

2.1 요인 실험계획법

보통 K^n 요인 배치법(K^n factorial design)은 인자의 수가 n 이고, 각 인자의 수준수가 K 인 실험 계획법으로 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어진다.

이때 어떤 특성치에 영향을 미치는 3개의 인자가 모두 기술적으로 의미가 있는 모수 인자이고 반복이 되지 않는 경우일 때, 인자의 수준이 각각 l, m, n 이고, $\epsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_{\epsilon}^2)$ 이 서로 독립이면 데이터 구조식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$x_{ijk} = \mu + a + b + c + (ab)_{ij} + (ac)_{jk} + (bc)_{ik} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

요인의 영향력을 알아보기 위해서는 특성치의 산포를 제곱합(Sum of Squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 각 요인의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 얼마나 유의한 인자인지를 찾는 분산 분석(ANOVA; Analysis of Variance)을 수행한다. 식(2)는 임의의 인자 X 에 대한 영향의 기각 여부를 판단하기 위하여 분산비와 기각치를 비교한 것이다.

$$F_0 = \frac{V_X}{V_E} > F(\Phi_X, \Phi_E; \alpha) \quad (2)$$

2.1 회귀분석

회귀분석은 반응변수(response variable)가 영향을 끼치는 독립변수(independent variable)에 의해 어떻게

설명되는지 알아보기 위하여 실험 데이터를 통하여 수학적 모델을 가정하여 추정하는 통계적 방법을 말한다. 이때 반응변수의 변화가 두 개 이상의 독립 변수에 의하여 설명되면 이를 선형 다중 회귀모형(multiple linear regression model)이라고 한다. 실험 데이터를 n 개의 관찰점으로 한데 묶어서 행렬을 사용하여 나타내면 식(3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & \dots & x_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

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

각 독립함수에 대한 추정값을 바탕으로 회귀분석에 의한 회귀선의 유의성 검증을 분산분석에 의하여 하며, 회귀방정식의 정도는 결정계수(coefficient of determination : R^2)를 사용한다. 하지만 이러한 일차 다항회귀 모형(first-order polynomial regression model)은 교호작용 등을 나타낼 수 없기 때문에, 교호작용이 유의한 경우에는 독립변수가 k 개인 이차모형을 사용하며, 이를 위해 식(5)을 사용하고자 한다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5)$$

여기에는 x_i 와 x_j 가 겹쳐져 있는 교호작용항(interaction term) $x_i x_j$ 이 있으며, β_{ij} 를 교호작용 효과계수(coefficient of interaction effect)라고 부른다.

3. 실험 장치 및 설계

3.1 실험 장치

실험에 사용된 장비로 수직형 머시닝 센터이며, 고속 증속기를 장착시켜 주축 회전수를 50,000rpm까지 증가시켰다. 사용된 가공재는 사출 금형 제작에 주로 사용되는 고경도강인 경변용 KP4M이며, 공구는 $\Phi 1$ 의 소경 엔드밀 공구를 사용하였다.

3.2 실험 방법

Table 1 Factors and levels of experiments for tool life

Factor & sign		Level		
		1	2	3
Spindle(rpm)	A	22,000	25,000	28,000
Feed(m/min)	B	600	800	1000
width of cut(mm)	C	0.13	0.21	0.29

특정적인 공구 수명에 영향을 끼치는 인자는 주축 회전수(A), 이송속도(B), 절삭폭(C)을 선정하였다. 실험은 적교배일표에 의하여 랜덤하게 총 27번의 조합으로 이루어졌으며, Table 1은 가공 조건으로 선정된 인자와 수준을 보여주고 있다.

4. 실험 결과 및 분석

Table 2는 3인자 3수준의 요인 실험을 통하여 얻어진 공구수명에 대한 실험 결과값을 보여주고 있다.

Table 2 Orthogonal array table for factorial design

No. experiment	Factor			Tool life (minutes)
	A	B	C	
1	1	1	1	115
2	1	1	2	66
3	1	1	3	28
4	1	2	1	105
5	1	2	2	38
6	1	2	3	22
7	1	3	1	101
8	1	3	2	26
9	1	3	3	9
10	2	1	1	138
11	2	1	2	75
12	2	1	3	49
13	2	2	1	128
14	2	2	2	51
15	2	2	3	38
16	2	3	1	108
17	2	3	2	24
18	2	3	3	23
19	3	1	1	110
20	3	1	2	57
21	3	1	3	28
22	3	2	1	110
23	3	2	2	67
24	3	2	3	33
25	3	3	1	139
26	3	3	2	31
27	3	3	3	11

Table 3 Analysis of variance table for tool life

	S	ϕ	V	F	P
A	868.7	2	434.4	5.18	0.024
B	2130.1	2	1065.0	12.71	0.001
C	40065.4	2	20032.7	239.06	0.000
A×B	835.0	4	208.8	2.49	0.099
B×C	1005.0	4	251.3	3.00	0.063
e	1005.6	12	83.8		
Total	45909.9	26			

첫 번째 분산분석 후 인자와 교호 작용 중에서

가장 유의하지 않은 것으로 여겨지는 A×C를 오차항으로 풀링(Pooling)시켜 F-검정을 실시한 최종 결과는 Table 3과 같다.

각 인자의 주효과는 모두 95% 유의 수준에서 유의하다고 판단되며, 특히 절삭폭이 공구 수명에 영향을 끼치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 교호작용은 A×B와 B×C가 모두 유의수준 90%에서 만족한다. 각 인자에 대한 최적의 수준을 알아보기 위하여 인자와 주효과와 교호작용을 살펴보면 Fig. 1과 2와 같다.

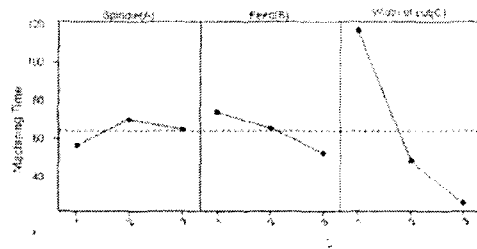


Fig. 1 Main effect of factors for tool life

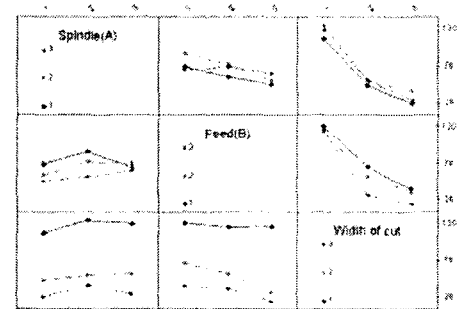


Fig. 2 Interaction effect of factors for tool life

Fig. 1은 공구 수명에 대한 각 요인의 수준별 주효과를 보여주는 그래프이다. 주축회전수(A)는 2수준(28,000rpm), 이송속도(B)와 절삭폭(C)은 각각 1수준(600m/min, 0.13mm)일 때 공구 수명이 가장 길었다. Fig. 2는 공구 수명에 대한 요인간의 교호 작용을 보여주는 그래프이다. 교호 작용은 분산분석의 결과와 같이 A×C는 유의하지 않은 것으로 나타나며, A×B와 B×C는 영향이 있는 것으로 보여진다.

이를 바탕으로 이 최적 수준 조합에 대한 모평균을 추정하여 최적의 가공 조건을 찾으면, $A_2B_1C_1$ 이며 이것은 실제 실험결과 거의 일치한다.

이것을 토대로 최적 수준 조합 $A_2B_1C_1$ 에 대한 모평균에 대한 추정값은 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다. 이에, $\hat{\mu}(A_2B_1C_1) = 134.89$ 를 얻을 수 있으며, 이 조건의 모평균에 대한 신뢰구간을 구하는 식은 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{\mu}(A_2B_1C_1) &= \overline{\mu+a_i+b_j+c_k+(ab)_{ij}+(bc)_{jk}} \\ &= \overline{\mu+a_i+b_j+(ab)_{ij}+\mu+b_j+c_k+bc_{jk}} - \widehat{\mu+b_j} \\ &= \overline{x_{2k}+x_{1k}} - \overline{x_{1k}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\widehat{\mu}(A_2B_1C_1) \pm t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_E}{n}} \quad (7)$$

Table 4는 모평균의 90% 신뢰구간을 구한 값이며, 실험값은 모평균 $\widehat{\mu}(A_2B_1C_1)$ 의 범위에 있다. 이처럼 공구 수명에 대한 공구 교환의 시기를 결정할 때에는 모평균의 추정값을 고려할 수 있다.

Table 4 confidence interval of population average

	lower value	upper value
$\widehat{\mu}(A_2B_1C_1)$	122.73	147.05

5. 회귀 분석에 의한 공구 수명의 예측

식(8)은 실험 데이터를 기반으로 하여 중회귀분석에 의한 각 변수들의 추정값과 회귀식을 구한 것이다. 여기에서, x_1 는 스핀들, x_2 는 피드, x_3 는 절삭폭을 가르킨다.

$$y=4.22x_1-10.78x_2-45.17x_3+167.52 \quad (8)$$

Table 5는 추정된 중회귀식에 대한 분산분석을 실시하여 유의성을 검증한 결과이다.

Table 5 ANOVA of multiple linear regression model

	S	ϕ	V	F	P
Model	39132	3	13044	44.27	0.000
e	6778	23	295		
Total	45910	26			

추정식으로부터 스핀들이 감소하고, 피드와 절삭폭에 증가함에 따라 공구수명이 감소됨을 알 수 있다. P값을 통하여 유의수준 99%내에서 추정된 모델식은 유의하며, 결정계수 R^2 는 85.2%이다. 하지만, 이 추정식은 교호작용은 고려되지 않았다. 이에, 독립변수가 3개인 이차 모형을 고려하였다. 식 (9)는 교호작용항에 대한 계수를 추정한 이차 다항 회귀모형식이다.

$$\begin{aligned} y &= -5.6x_1 - 12.78x_2 - 37.33x_3 + 4.92x_1x_2 \\ &\quad - 3.92x_2x_3 + 171.52 \end{aligned} \quad (9)$$

Table 6은 추정된 이차다항회귀모델에 대한 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시한 결과이다.

Table 6 ANOVA of second-order regression model

	S	ϕ	V	F	P
Model	39606	5	7921	26.39	0.000
e	6303	21	300		
Total	45910	26			

추정식은 유의수준 99%내에서 유의하다고 판단되며, 결정계수 R^2 가 86.3%이기 때문에 일반적인 중회귀 모델식보다 실험결과를 더욱 잘 설명한다.

4. 결론

본 논문에서는 소경 엔드밀 공구를 고속 가공하는데 있어서 공구 수명에 끼치는 인자를 실험계획법을 이용하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 완전요인 실험계획법에 의하여 주요 가공 변수인 스핀들, 피드, 절삭폭의 변화가 소경 공구의 수명에 영향을 끼치는 주효과와 교호작용을 파악하였으며, 이에 따른 유의성을 검증하였다.
2. 공구수명에 대한 최적 수준조합에 예측하였고, 이에 대한 모평균과 모평균에 대한 신뢰구간을 추정하여, 결과값에 대한 유의성을 검증하였다.
3. 공구파단에 앞서 공구 교환을 가능하게 하기 위하여 중회귀 분석에 의한 추정식에 이용하여 공구 수명을 예측하였고, 회귀식의 정도를 높이기 위하여 교호작용항의 영향을 포함하는 이차 다항회귀모형을 적용하였다.

참고문헌

1. 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.
2. Bac, H. J., "Analysis of Working factors for improvement of surface Roughness on high speed end-milling" Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp52-59, 2000.
3. Choudhury, I. A., El-Baradie, M. A., "Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290BHN)", Journal of Materials Processing Technology, No. 77 pp. 319-326, 1998.
4. Park, S. H., "Morden Design of Experiments", Minyongsa, pp. 305-329, 2001.