

요인 실험계획법 및 회귀분석을 이용한 소경 엔드밀의 공구수명에 대한 연구

임 표*, 박상윤*, 양균의#

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

Pyo Lim*, Sang Yoon Park* and Gyun Eui Yang#

ABSTRACT

High speed machining(HSM) technique is widely used in the appliance, automobile part and mold industries, because it has many advantages such as good quality, low cost and rapid machining time. But it also has problems such as tool breakage, 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 affected by the milling conditions whose selected parameters are spindle speed, feedrate, and width of cut. The experiments were carried out by full factorial design of experiments using an orthogonal array.

This paper shows optimal combination and mathematical model for tool life, Therefore, 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 요하는 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.^{1,2} 이 기술은 제품의 가공시간의 감소와 미려한 가공 표면을 얻을 수 있으며, 초경 및 코팅 공구 기술의 발전과 맞물려 공구 선택의 다양화와 소형화를 가능하게 하였다.^{3,4,5,6} 하지만 고속 가공에서 소경 공구의 사용은 중-대경의 일반 공구와는 달리 공구 마모 및 절삭량이 공구 파단과 직접적으로

*** 접수일: 2005년 6월 30일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

* 전북대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 전북대학교 기계항공시스템공학과

E-mail geyang@moak.chounbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2322

연관성이 있으며, 적용 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 가능하도록 하는 것이 필요하다.⁷

일반적으로, 특정 변수에 영향을 끼치는 인자간의 상호 작용을 파악하기 위해 주로 통계적 데이터 분석 방법이 사용된다. 데이터의 효율적인 분석을 위해서는 얻고자 하는 특성치의 정도를 고려하여 실험을 설계하여야 하며, 소경 공구의 경우에는 중·대경 공구에 비해 절삭 깊이에 대한 제한이 크고, 마모에 대한 파단 뿐만 아니라 과절삭에 의한 파단이 공구 수명에 밀접한 영향을 가지는 것을 고려하여 가공조건이 선정되어야 한다.

기존의 대부분의 연구는 중·대경 공구에 편중되어 있으며, 절삭 과정이 덜 복잡한 선삭 등에 대하여 공구 마모 등이 공구 수명에 끼치는 영향을 파악하였으며,^{8,9} 가공 특성이 복잡한 엔드밀 공구의 경우에는 절삭날의 평균 마모 및 임계 마모를 파악하여 공구 수명을 예측하였다.^{10,11} 하지만, Taylor 식 및 통계적 방법에 의한 log 함수에 의한 공구 수명식은 복잡하며, 공구마모에 대한 예측식이기 때문에, 공구 파단의 요소가 강하게 내포하고 있는 소경 공구의 현장에 적용하기에는 무리가 따른다고 보여진다.¹²

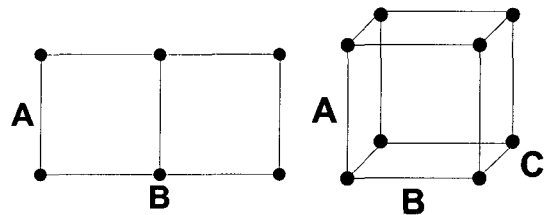
이에, 본 연구에서는 동일한 패턴형상을 지닌 사출금형을 생산하는 공정에서 소경 볼 엔드밀에 의한 최종 형상 가공을 수행하는데 있어서,⁷ 공구 파단 전에 적절한 공구 교환을 가능하게 하기 위하여 공구 수명에 영향을 끼치는 주요 인자를 파악 및 이를 바탕으로 공구 수명을 예측할 수 있는 모델식을 추정하고자 하였다.^{13,14} 가공인자와 수준은 현장에서 주로 사용되는 데이터를 기준으로 하여 마모에 주로 영향을 끼치는 절삭속도와 절삭량을 결정하는 주축회전수(Spindle speed), 이송속도(feedrate), 절삭폭(width of cut)으로 선정하였다. 공구 수명에 영향을 끼치는 주요인자와 인자간의 상호 관계는 분산분석(ANOVA)을 실시하여 파악하였으며, 최적의 수준조합 및 모평균 추정에 의한 결과값을 예측하여 실험값과 비교 및 유의성을 검증하였다. 또한 다항 회귀분석 모델에 의한 다차의 공구 수명식으로 보다 정확한 공구 교환이 가능한 시스템 구축을 위한 방법론을 제시하고자 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.

K^n 개의 실험은 반복되지 않게 실시되어야만 하는데, 이를 요인 배치 실험(factorial experiment)이라고 한다. 완전 요인 설계 실험의 수행은 Fig. 1과 같은 방법으로 이루어지며 점의 수가 실험의 수를 의미한다. 이 방법은 모든 요인의 효과를 추정할 수 있는 특징이 있다.



(a) A: 2 level, B: 3 level (b) A, B C: 2 level
Fig. 1 Full factorial design of experiments

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

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

여기에서, A, B, C 인자의 3인자 교호작용인 $(abc)_{ijk}$ 는 오차항과 교락되어 있으므로, F-검정을 수행하기 위하여 구하지 않는다.

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(Analysis of Variance)을 수행한다. 총 6개인 인자의 주효과 및 교호 작용의 유의성 판단은 영향이 없다는 귀무가설의 기각 여부에 따라 결정된다.

식(2)는 임의의 인자 X에 대한 영향의 기각 여

부를 판단하기 위하여 분산비와 기각치를 비교한 것이다.

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

여기에서, V_X, V_E 는 요인 X의 제곱 평균과 오차 분산을 말하며, ϕ_X, ϕ_E, α 는 요인 X와 오차의 자유도와 유의수준을 나타낸다.

2.2 회귀분석

회귀 분석이란 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) 또는 중 회귀모형이라고 하며, 단순회귀에 비하여 높은 정도의 예측을 할 수 있다. 실험 데이터를 n개의 관찰점으로 한데 묶어서 행렬을 사용하여 중 회귀모형을 나타내면 식(3)과 같이 정의하며, 간단하게 식(4)와 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

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

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

여기에서, y는 종속변수, X는 독립변수, β 는 미지의 모수, ϵ 는 오차값을 나타낸다. 식(3)과 (4)로부터 얻어진 오차제곱의 합을 최소화시키기 위하여 최소제곱법을 이용하며, β 를 미분하여 0으로 정의하면, β 의 추정값 b는 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$(X'X)b = X'y \quad (5)$$

또한, 각 독립함수에 대한 추정값을 바탕으로 회귀분석에 의한 회귀선의 유의성 검증을 분산분석에 의하여 할 수 있으며, 이러한 회귀방정식의 정

도를 측정하기 위하여 결정계수(coefficient of determination : R^2)를 사용한다.

하지만 이러한 일차 다항 회귀 모형(first-order polynomial regression model)은 교호작용 등을 나타낼 수 없기 때문에, 교호작용이 유의한 경우에는 독립변수가 k개인 이차모형을 사용하고자 하며, 이를 위해 식(6)을 사용하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (6)$$

여기에는 x_i 와 x_j 가 곱해져 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

Fig. 2는 실험에 사용된 장비로 수직형 머시닝 센터이며, 고속 증속기를 장착시켜 주축 회전수를 50,000rpm까지 증가시켰다.

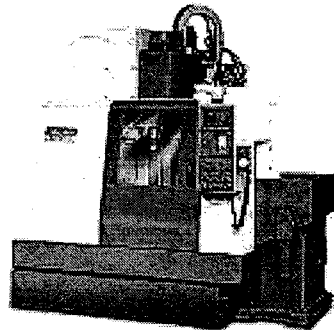


Fig. 2 Vertical machining center

가공재는 사출 금형 제작에 주로 사용되는 고경도강인 경면 가공용인 재료인 KP4M이며, 공구는 $\varnothing 1$ 의 초경 엔드밀 공구를 사용하였다. Table 1은 KP4M에 관한 기계적 성질 및 화학적 성분을 보여주고 있다.

Table 1 The properties and compositions of KP4M

	Specification	Value
The mechanical properties	Yield Point (kgf/mm ²)	75-90
	Tensile Strength (kgf/mm ²)	90-105
	Hardness (Hs)	40-46
The chemical compositions (wt, %)	C	0.32/0.38
	Si	0.20/0.40
	Mn	0.60/1.40
	Cr	1.60/2.00
	Mo	0.40/0.60

3.2 실험 설계

본 실험은 각 요인의 주효과와 교호작용에 대한 자유도를 충분히 확보하여 높은 정도의 실험 결과를 획득하고, 회귀 분석에 의한 근사 함수의 추정을 위한 최소한의 데이터 확보를 위하여 완전 요인 배치법을 통하여 설계되었다. 반응 변수인 공구 수명에 영향을 끼치는 인자는 특성치인 공구 수명에 크게 영향을 끼치는 절삭속도와 절삭량을 결정하는데 현장에서 주로 사용하는 주축회전수(A), 이송속도(B), 절삭폭(C)을 이용하였다. 절삭깊이는 $\phi 1$ 인 소경 엔드밀 공구가 거의 황증삭을 거쳐 미가공 두께가 정해진 정삭에 이용되고, 공구 파단의 위험으로 인한 수준 간격의 결정 및 유의성 검증에 어려움이 예상되어 고정변수로 정하였다.

공구 수명에 대한 기준은 공구 파단과 마모의 두 종류가 있는데, 마모의 경우에는 공구 수명을 결정하는 임계 마모값을 반경의 1/10인 0.1mm로 하였다. 다만, 절삭 공정의 연속성 유지 및 측정의 어려움으로 인하여 실제의 임계값은 0.1-0.15mm 구간 안에 존재하였다. 수준값은 현장 절삭 조건을 참조하여, 여기에 마모가 잘 일어나도록 20-30%를 더하여 1,2수준을, 과절삭에 의한 파단을 예상하여 3수준을 결정하였다.

Table 2 Factors and levels of experiments for tool life

Level		1	2	3
Factor & sign				
Spindle speed (rpm)	A	22,000	25,000	28,000
Feedrate (m/min)	B	600	800	1000
Width of cut (mm)	C	0.13	0.21	0.29
Constant factors		workpiece : KP4M depth of cut (mm) : 0.1 coolant : dry		

실험은 난수표를 이용하여 무작위로 총 27번의 조합으로 이루어졌으며, Table 2는 공구 수명을 위한 선정된 가공조건인 인자와 수준을 보여주고 있다.

4. 실험 결과 및 분석

Table 3은 3인자 3수준의 요인실험을 통하여 얻어진 공구수명에 대한 실험값을 보여주고 있다.

Table 3 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

변동의 분해는 총변동(S_T)을 각 인자에 대한 변동(S_A, S_B, S_C)과 교호 작용에 대한 변동($S_{A \times B}, S_{B \times C}, S_{A \times C}$) 및 오차 변동(S_e)으로 나누었으며, 이를 토대로 분산 분석을 실시하여 각 인자와 인자들간의 교호 작용의 유의성을 파악하였다. 첫 번째 분산분석 후 인자와 교호작용 중에서 가장 유의하지 않은 $A \times C$ 를 오차항으로 풀링(Pooling)시켜 F-검정을 실시한 최종 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Analysis of variance table for tool life

	S	Φ	V	F	F(0.05)	F(0.1)
A	868.7	2	434.4	5.18*	3.89	2.81
B	2130.1	2	1065.0	12.71*	3.89	2.81
C	40065.4	2	20032.7	239.06*	3.89	2.81
A×B	835.0	4	208.8	2.49	3.26	2.48
B×C	1005.0	4	251.3	3.00	3.26	2.48
e	1005.6	12	83.8			
Total	45909.9	26				

각 인자의 주효과는 모두 95% 유의수준에서 유의하며, 특히 절삭폭이 공구 수명에 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 교호작용은 $A \times B$ 와 $B \times C$ 가 모두 유의수준 90%에서 만족한다. 각 인자에 대한 최적의 수준을 알아보기 위하여 인자와 주효과와 교호작용을 살펴보면 Fig. 3, 4와 같다.

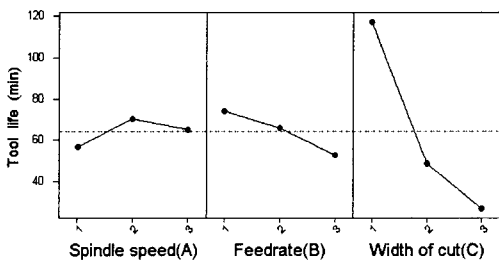


Fig. 3 Main effect of factors for tool life

Fig. 3은 공구 수명에 대한 각 요인의 수준별 주효과를 보여주는 그래프이다. 주축회전수(A)는 2수준(25,000rpm), 이송속도(B)와 절삭폭은(C)은 각각 1수준(600m/min, 0.13mm)일 때 공구 수명이 가장 증가한다는 것을 나타내고 있다.

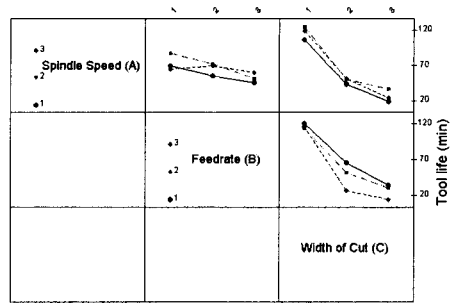


Fig. 4 Interaction effect of factors for tool life

Fig. 4는 공구 수명에 대한 요인간의 교호 작용을 보여주는 그래프이다. 각각의 그래프가 심하게 교차하는 경우 교호 작용의 영향이 크다는 것을 나타내는데, Table 4의 분산분석의 결과와 같이 $A \times C$ 는 유의하지 않은 것으로, $A \times B$ 와 $B \times C$ 는 적지만 교호작용이 존재함을 보여주고 있다.

이를 바탕으로 최적 수준 조합에 대한 모평균을 추정하기 위하여, 식 (1)으로부터 $(ab)_{ij}$ 와 $(bc)_{jk}$ 가 필요하며, 이에 Table 3의 실험 데이터를 토대로 AB 및 BC에 대한 이원표를 작성하면 Table 5와 6을 얻을 수 있다.

Table 5 The calculated AB two-way table for tool life

	A_1	A_2	A_3	$T_{.j}$
B_1	209	263	195	667
B_2	165	217	210	592
B_3	136	155	181	472
$T_{i.}$	510	635	586	1,731

Table 6 The calculated BC two-way table for tool life

	B_1	B_2	B_3	$T_{..k}$
C_1	364	343	348	1,055
C_2	198	156	81	435
C_3	105	93	43	241
$T_{.j}$	667	592	472	1,731

여기에서, $T_{i.}$, $T_{.j}$, $T_{..k}$ 는 각 인자의 i, j, k 수준에서 특성치의 총합을 나타낸다.

가장 합이 큰 수준의 조합은 Fig. 4와 같이 A_2B_1 와 B_1C_1 이다. 이에 주효과와 교호작용을 고

려하여 최적의 가공 조건을 찾으면, $A_2B_1C_1$ 이며, 이것은 실험조건과 일치함을 알 수 있다.

이것을 토대로 최적 수준 조합 $A_2B_1C_1$ 에 대한 모평균에 대한 추정값은 식 (7)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{\mu}(A_2B_1C_k) &= \overbrace{\mu + a_i + b_j + c_k + (ab)_{ij} + (bc)_{jk}} \\ &= \overbrace{\mu + a_i + b_j + (ab)_{ij}} + \overbrace{\mu + b_j + c_k + bc_{jk}} - \widehat{\mu + b_j} \\ &= \overline{x_{ij}} + \overline{x_{jk}} - \overline{x_{.j}} \end{aligned} \quad (7)$$

이에, $\widehat{\mu}(A_2B_1C_1) \approx 134.89$ 를 얻을 수 있으며, 이 조건의 모평균에 대한 신뢰구간을 구하는 식은 (8)과 같다.

$$\widehat{\mu}(A_2B_1C_1) \pm t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_E}{n_e}} \quad (8)$$

여기에서, n_e 는 유효반복수(effective number of replication)을 말한다. (8)식으로부터 교호작용이 유효할 때의 모평균의 90% 신뢰구간을 구하면, Table 7과 같다.

Table 7 Confidence interval of population average for tool life

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

모평균 추정에 의하여 실험조건 $A_2B_1C_1$ 에서 얻어진 실험값(138min)이 신뢰구간의 범위 안에 존재하기 때문에 유의하다 할 수 있으며, 최적 가공 조건과 공구 파단 전에 교환을 가능하도록 하는 최적 공구 수명값을 구할 수 있다.

5. 회귀 분석에 의한 공구 수명의 예측

식(9)는 실험 데이터를 기반으로 하여 중회귀분석에 의한 각 변수들의 추정값을 구하고 이에 대한 회귀식을 구한 것이며, 여기에서, x_1 는 주축 회전수, x_2 는 이송속도, x_3 는 절삭폭을 선형 변환한 값이다.

$$y = 4.22x_1 - 10.78x_2 - 45.17x_3 + 167.52 \quad (9)$$

Table 8은 추정된 중회귀식에 대한 분산분석을 실시하여 유의성을 검증한 것이다.

Table 8 ANOVA of multiple linear regression model for tool life

	S	Φ	V	F	F(0.01)
Model	39132	3	13044	44.27**	4.78
e	6778	23	295		
Total	45910	26			

추정식으로부터 주축회전수가 감소하고, 이송속도와 절삭폭에 증가함에 따라 공구수명이 감소됨을 알 수 있다. F-검정을 통하여 유의수준 99%내에서 추정된 모델식이 유의하다고 판단되며, 결정계수 R^2 가 85.2%임으로 적절한 추정식이라고 생각된다. 하지만, 이 추정식은 교호작용이 고려되지 않았으며 주축 회전수의 2수준에서 일어나는 2차 대비 효과는 알 수 없다.

이에, 좀더 정확한 추정식을 예측하고자 독립변수가 3개인 이차모형을 고려하고자 한다. 식 (10)은 교호작용항에 대한 계수를 추정한 이차 다항 회귀 모형식이다.

$$\begin{aligned} y = & -9.56 x_1^2 + 23.61 x_3^2 + 4.22x_1 - 10.78x_2 \\ & - 45.17x_3 + 4.92x_1x_2 - 3.92x_2x_3 + 54.70 \end{aligned} \quad (10)$$

실험계획법에 의한 주효과 그래프인 Fig. 3과 식(10)의 이차 다항 회귀 모형식을 살펴보면, 주축회전수는 2차 함수의 감소 형태로 곡선 회귀됨을 알 수 있으며, 주어진 조건 범위 내에서 변곡점을 가지는 것으로 보인다. 이송속도는 원만한 감소 형태로 1차 직선 회귀가 2차 곡선 회귀보다 적합하다는 것을 나타내고 있다. 절삭폭의 경우는 주어진 조건 내에서 증가하는 2차 회귀 곡선이지만, 1차 곡선은 감소하는 형태를 가지고 있다. 1차항의 상수가 더 크기 때문에, 1수준에서는 공구수명이 감소하게 되며, 2, 3수준에서는 2차항의 효과가 크기

때문에 다른 인자들에 의하여 공구 수명이 감소하는 것을 완화시키고 있다. 주축회전수와 이송속도의 교호작용 효과계수가 양수인 것은 두 인자가 증가함에 따라 절삭속도가 증가하게 되고 날당 절삭량이 작아지기 때문이며, 이송속도와 절삭폭의 교호작용 효과계수가 음수인 것은 절삭량이 증가하기 때문인 것으로 보여진다.

Table 9는 추정된 이차 다항회귀모델에 대한 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시한 것이다.

Table 9 ANOVA of second-order polynomial regression model for tool life

	S	Φ	V	F	F(0.01)
Model	43499.2	7	6214.2	48.98**	3.77
e	2410.6	19	126.9		
Total	45909.9	26			

추정식은 유의수준 99%내에서 유의하다고 판단되며, 결정계수 R^2 가 94.7%이기 때문에 일반적인 중회귀 모델식보다 실험결과를 더욱 잘 설명한다고 보여진다.

6. 결론

본 논문에서는 소경 볼 엔드밀 공구의 고속 정삭 가공에서 공정의 중단을 막기 위한 목적으로 파단 전에 공구 교환이 가능하게 하기 위하여, 공구 수명에 영향을 끼치는 인자를 파악하고, 공구 수명식을 예측하고자 하였다. 이에 실험계획법을 통하여 분산분석을 수행하고, 다항 회귀모델을 추정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에서 사용된 인자인 주축 회전수, 이송속도, 절삭폭의 변화는 소경 공구의 수명에 영향을 끼치는 주요 인자이며 특히, 주축 회전수와 이송속도, 이송속도와 절삭폭은 절삭속도와 절삭량의 측면에서 유의하다고 판단된다.
2. 이송속도와 절삭폭이 증가함에 따라 공구 수명은 감소하나 주축 회전수는 증가하다 감소하는 2차 대비 효과를 가지는데, 이는 공구 수명식에 2차식이 더욱 적합하다는 것을 보여준다.
3. 공구 수명의 최적 수준조합에 대한 모평균을 추정하여 모평균에 대한 90% 신뢰구간에서 실험

값이 유의하다는 것을 검증하였다. 이에 최적 조합에서의 모평균값을 공구 수명값으로 이용하는 것을 가능하게 하였다.

4. 단순 중회귀 분석에 의한 추정식보다 더욱 정도가 높은 이차 다항 회귀 모형에 의하여 공구 파모와 공구 파단을 함께 고려한 보다 정확한 공구 수명을 예측할 수 있으리라 보여진다.

참고문헌

1. Dewes, R. C. and AspinWall, D. K., "A Review of Ultra High Speed Milling of Hardened Steels," *Materials Processing Technology*, Vol. 69, pp. 1-17, 1997.
2. Lee, D. W., Jeong, Y. H., Kang, M. C., Lee, K. Y., Kim, J. S., Kim, K. G. and Kim, S. W., "Advanced Machining Technology for Die Manufacturing I," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 48-68, 2000.
3. Nakamura, S., "High speed spindles for machine tools," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.* Vol. 30, No. 4, pp. 291-294, 1996.
4. Choi, C. H., "High Speed Machining & Technology of Tooling for Die and Mold Making," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 8, pp. 18-23, 2001.
5. Lim, P., Lee, H. K. and Yang, G. E., "High Speed Machining of the thin surface parts using liquid metal and selection of machining condition by Latin Square Method," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 99-106, 2005.
6. Bae, 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, pp. 52-59, 2000.
7. Lim, P., Jang, D. K., Lee, H. K. and 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.

8. Alauddin, M., I. A., El-Baradie, M. A., "Tool life for end milling steel (190BHN)," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 68 pp. 50-59, 1997.
9. Choudhury, I. A. and 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.
10. Chen, T. C. and Hong, H., "Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi-layer TiCN and TiAlCN for end mills using the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 123 pp. 1-4, 2002.
11. Sharman, A., Dewes, R. C. and Aspinwall, D. K., "Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718TM," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 118 pp. 29-35, 2001.
12. Tosun, N. and Ozler, L., "A study of tool life in hot machining using artificial neural networks and regression analysis method," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 124 pp. 99-104, 2002.
13. Park, S. H., "Morden Design of Experiments," *Minyongsa*, pp. 305-329, 2001.
14. Park, S. H., "Regression Analysis," *Minyongsa*, pp. 175-318, 2003.