

선반작업에서 직교계획법을 이용한 표면 거칠기 예측모델에 관한 연구

홍민성*, 열철만**

A Study on the Prediction Model of Surface Roughness by the Orthogonal Design for Turning Process

Min Sung Hong*, Zhe Man Lian**

Abstract

This paper presents a study of surface roughness prediction model by orthogonal design in turning operation. Regression analysis technique has been used to study the effects of the cutting parameters such as cutting speed, feed, depth of cut, and nose radius on surface roughness. An effect of interaction between two parameters on surface roughness has also been investigated. The experiment has been conducted using coated tungsten carbide inserts without cutting fluid.

The reliability of the surface roughness model as a function of the cutting parameters has been estimated. The results show that the experimental design used in turning process is a method to estimate the effects of cutting parameters on surface roughness.

Key Words : surface roughness (표면 거칠기), orthogonal design (직교 계획법), regression analysis (회귀 분석), cutting parameter(절삭 매개변수)

1. 서 론

선반가공은 공작물을 회전시키고 공구를 이송함으로써 가공표면을 생성하는 작업이다. 이런 공정을 통해서 얻어진 부품들의 품질평가에서 가장 중요한 특성은 표면 거칠기이다. 그 이유는 표면 거칠기가 마모, 마찰, 윤활 등에 중요한 영향을 미친다는 것이다.

많은 연구자들이 이론과 실험을 통해서 선반 가공에서의

표면 거칠기를 집중적으로 연구해왔다.^(1,2) 그 이유는 주로 선삭이 가장 오래되었고, 또한 기본적인 금속 제거 공정의 하나라는 사실이다. 흔히, 선삭의 연구 결과로부터 얻어진 결론은 밀링 (milling), 드릴링 (drilling), 연삭(grinding)과 같은 다른 공정에도 확대 적용되어진다. Miller⁽¹⁾ 등은 알루미늄 합금에서 절삭 매개변수들이 표면 거칠기에 미치는 영향을 연구해왔고, Bhattacharyya⁽²⁾ 등은 절삭 매개변수(절삭속도, 피드, hardness, cutting edge angle)들을 한번에 한

* 아주대학교 기계 및 산업공학부 (mshong@madang.ajou.ac.kr)

** 아주대학교 기계공학과 대학원

개의 절삭변수가 표면 거칠기에 미치는 영향을 고려했다. 또한 신⁽⁵⁾등은 기계구조용 탄소강에서 절삭 매개변수의 변화에 따른 표면 거칠기 변화관계를 실험을 통해서 관찰해 왔다. Wu^(4,6)는 처음으로 공구수명 연구에 실험계획법의 하나인 반응표면방법론(response surface methodology)을 시도하였다. 이 연구에서는 반응표면법을 이용하여 절삭 매개변수들이 공구수명에 미치는 영향을 살펴보았다.

선삭공정에서 표면 거칠기는 절삭속도, 이송, 절삭 깊이, 공작물 재료 특성, 공작물 경도, 구성인 선, 공구의 노즈반경(nose radius), 공구의 절삭각(cutting edge angle), 공구와 공작물의 설치의 안정성, 체터(chatter), 절삭유의 사용 등과 같은 여러 요소에 의해 영향받는다.

선삭에서 다양한 매개변수들이 표면생성에 미치는 영향들은 많이 연구되어왔다. 그러나 대부분은 표면 거칠기에 속도, 이송, 절삭깊이 등 한번에 한 개의 절삭 변수가 미치는 영향에 대한 연구였고, 결과를 산출하기 위해 많은 실험을 수행하여야 한다. 그리고 이런 실험을 통해서 절삭공정에서 매개변수의 최적조합 즉 변수들의 상호작용을 고려한 결함을 구하기 대단히 어렵다.

따라서 본 논문에서는 표면 거칠기 예측에 사용된 일반적인 수학적 모델을 절삭속도, 이송, 절삭깊이, 노즈반경 등 4개의 독립적인 변수로 표현하였다. 또한 예측모델을 일부실시법(fractional factorial design)의 하나인 직교계획법(orthogonal design)^(6,7)과 회귀분석법⁽⁸⁾을 이용하여 개발하였다.

2. 표면 거칠기 모델

실험식의 개발에는 그래프 방법과 회귀분석 방법이 있다. 그래프 방법의 장점은 비교적 직관적이고 편리하다. 그러나, 주관적인 오차가 있고 방정식이 높은 정밀도를 가지고 있지 않다. 회귀분석법을 사용하여 데이터를 처리하면 이런 문제들을 해결할 수 있다. 절삭 실험에서 여러 개의 인자를 변화시킨다면, 그래프 방법을 사용하는 것은 더욱 불이익을 가져온다. 표면 거칠기를 예측하는데 있어 경험적 수식은 직교계획법과 회귀분석을 사용함으로써 완성될 수 있다.

표면 거칠기 예측모델을 개발하기 위해 표면 거칠기와 절삭 독립변수 사이의 관계를 아래와 같은 수식으로 표현한다.

$$R_a = C_{R_a} v^l f^m a_p^n r_e^p \quad (1)$$

여기서, R_a 는 산술평균(arithmetic average, μm)이고, v , f , a_p , r_e 는 각각 절삭속도(m/min), 이송(mm/rev), 절삭깊이(mm) 노즈반경(mm) 등이다. C_{R_a} , l , m , n , p 는 상수이다.

식(1)을 선형조합의 형태로 표기하면 식(2)와 같다.

$$\ln R_a = \ln C_{R_a} + l \ln v + m \ln f + n \ln a_p + p \ln r_e \quad (2)$$

식(2)에서 각각의 계수를 구하고 1차 예측모델을 개발하기 위해서 다중 선형 회귀 분석법을 적용하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$Y = b'_0 + b'_1 \ln v + b'_2 \ln f + b'_3 \ln a_p + b'_4 \ln r_e \quad (3)$$

여기서

$$Y = \ln R_a, \quad b'_0 = \ln C_{R_a}, \quad b'_1 = l \\ b'_2 = m, \quad b'_3 = n, \quad b'_4 = p. \quad (4)$$

3. 실험 계획법

실험계획법(design of experiments)이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취할 것이며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라 할 수 있다. 넓은 의미의 실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대하여 최적해석법과 실험법의 선정 및 좋은 실험을 어떻게 행하면 좋은가를 계획하는 것으로 해석에는 분산분석법, 상관, 회귀분석 등이 있다. 그 중에서 직교 계획법은 불필요한 상호작용이나 고차의 상호작용을 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험을 실시하는 방법이다.

표면 거칠기 모델을 개발하기 위해, 본 연구에서는 각각 3수준을 갖는 4인자 및 인자간에 상호작용을 고려하여 27번의 실험계획을 수립하였다. 이 실험은 $L_{27}(3^3)$ 직교 배열설계로 나타내었고, 실험순서는 Table 1과 같이 배열하였다. 여기서 기호 A, B, C, D, e는 각각 이송, 절삭속도, 노즈반경, 절삭 깊이, 오차 등을 표시하고, A×B, A×C는 각각 이송과 절삭속도, 이송과 노즈반경의 상호작용을 의

Table 1 Experimental design for an $L_{27}(3^4)$ orthogonal array

Symbol		A	B	A × B	A × B	C	A × C	A × C	e	D	e	e	e	e	Response (μm)	
Factor		f	v	r_e			a_p									
level		0.1	72			0.4				0.5						
	0	0.2	120			0.8				1						
	1	0.4	200			1.2				2						
No.	run order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1	2
1	17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.01	2.02
2	19	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.53	1.45
3	24	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.98	1.07
4	23	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1.08	1.02
5	2	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1.77	1.79
6	27	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2.99	2.85
7	18	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1.16	1.22
8	8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	0.59	0.60
9	7	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	0.67	0.70
10	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3.04	3.06
11	20	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1.86	1.85
12	22	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	4.46	4.58
13	13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	3.57	3.43
14	5	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	1.78	1.71
15	6	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	2.00	1.74
16	25	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	2.98	2.99
17	12	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	1.85	1.84
18	14	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	1.31	1.26
19	4	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	18.23	18.75
20	3	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	7.45	6.18
21	26	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	4.78	4.56
22	15	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	13.98	13.74
23	16	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	6.57	6.37
24	11	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	4.23	4.27
25	21	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	16.02	16.97
26	9	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	6.80	6.98
27	10	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	4.13	4.14

Table 2 Levels of independent variables

Levels	Low	Center	High
Coding	-1	0	1
Feed f (mm/r)	0.1	0.2	0.4
Speed v (m/min)	72	120	200
Nose radius r_e (mm)	0.4	0.8	1.2
Depth of cut a_p (mm)	0.5	1	2

미한다. 이 계획법은 Table 2와 같이 각각의 변수에 대하여 3개의 수준 (low, center, high level)으로 나타내는데, 이를 "-1, 0, 1"로 표시하였다.

본 논문에서는 계산을 단순화하기 위해 실제 절삭 매개 변수들을 통계적 코딩 (statistical coding)화하였다. 이 변환 식들은 아래와 같다.

$$X_1 = \frac{2(\ln f - \ln 0.4)}{\ln 0.4 - \ln 0.1} + 1 \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{2(\ln v - \ln 200)}{\ln 200 - \ln 72} + 1 \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{2(\ln r_e - \ln 1.2)}{\ln 1.2 - \ln 0.4} + 1 \quad (7)$$

$$X_4 = \frac{2(\ln a_p - \ln 2)}{\ln 2 - \ln 0.5} + 1 \quad (8)$$

이 식들을 사용하여 각각의 독립변수가 세 가지 수준일 때의 값을 구할 수 있다. 절삭속도가 높은 수준일 때 $X=1(v=200 \text{ m/min})$ 며 중간 수준일 때는 $X=0$, 낮은 수준에서는 $X=-1$ 이다. 이송, 절삭깊이, 노즈반경도 각각 세 가지 수준에서 같은 결과를 얻을 수 있다. 따라서 식(5)~(8)을 식(4)에 각각 대입하면 식(9)을 얻을 수 있다.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \quad (9)$$

본 연구를 수행하기 위해, 절삭 실험을 통해서 표면 거칠기 값을 구하였다. 절삭실험조건은 Table 3과 같다. 실험은 NC 선반에서 코팅된 초경합금을 사용하여 같은 절삭조건에서 두 번 실험을 수행하였다. 공작물은 SM45C,

Table 3 Experimental conditions

Machine	CNC lathe
Tool	Coated tungsten carbide insert
Workpiece material	SM45C
Diameter of workpiece	Ø48 mm
Length of workpiece	250 mm
Surface roughness instrument	Mitutoyo SURFTEST SV-600

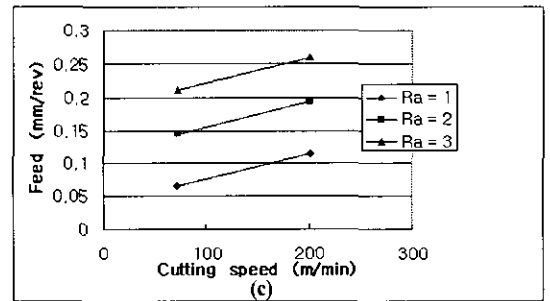
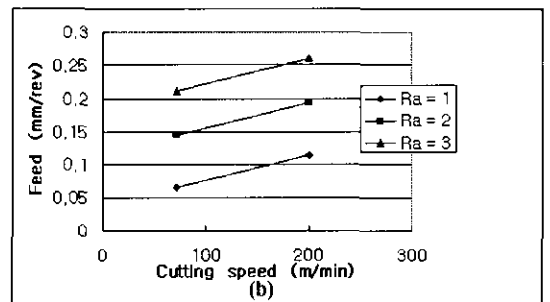
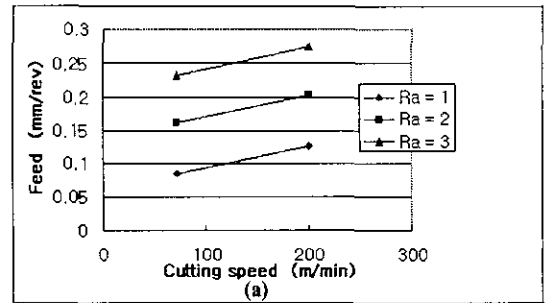


Fig. 1 Surface roughness contours in speed-feed planes at depth of cut:(a) 0.5mm (b) 1mm (c) 2mm

직경 48mm, 길이 250mm의 환봉이며 건식절삭(dry cutting)을 시행하였다. 가공된 표면은 표면 거칠기 측정장치(Mitutoyo SURFTEST SV-600)를 사용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

표면 거칠기 모델의 매개변수를 계산하기 위해, 최소 자승법 (least square method)이 용하여 아래와 같은 1차표면 거칠기 모델을 유도하였다.

$$Y = 1.0426 + 0.9124X_1 - 0.19X_2 - 0.29X_3 + 0.063X_4 \quad (10)$$

따라서 식(10)은 식(5)~(8)을 사용하여 아래와 같이 변경할 수 있다.

$$R_a = 111.6v^{-0.372} f^{1.316} a_p^{0.09} r_e^{-0.528} \quad (11)$$

식(11)은 표면 거칠기가 절삭속도와 노즈반경의 증가에 따라 향상됨을 나타내고, 반면 이송과 절삭깊이의 증가에 따라서 저하됨을 나타낸다. 그리고 이 식의 결정계수 (coefficient of determination) R^2 값은 0.8이며 상당히 높은 유의성을 갖는다.

Fig. 1에서 처럼 노즈반경이 0.8mm 일 때 절삭속도와 이송의 관계에서 각각의 절삭깊이에 따라 표면 거칠기가 얻어진다. 절삭 깊이의 범위를 각각 0.5mm, 1mm, 2mm 의 세 가지 수준으로 선택하였다. 따라서 Fig. 1에서 나타

난 등고선(contour)은 실험을 통한 표면 거칠기의 예측을 도와준다. 같은 맥락에서 적절한 절삭속도와 이송의 조합으로 사용자가 요구하는 표면 거칠기를 얻을 수 있으며, 높은 금속 제거율 (metal removal ratio)을 얻으면서 절삭 시간을 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 절삭 매개변수들이 표면 거칠기에 미치는 영향을 분산분석을 통하여 살펴 보았다. 이 분산분석은 Table 4에 요약하였다. 여기서, 이송과 노즈반경의 검정 통계량 F의 값이 각각 55.2, 6.66로서 ($F_0 > F_{0.05}$) 이송과 노즈반경이 절삭속도나, 절삭깊이보다 통계적으로 큰 영향을 미친 것을 알 수 있다. 그리고 이송과 절삭속도, 이송과 노즈반경의 상호작용도 표면 거칠기에 영향을 미친다.

5. 결론

본 연구에서는 직교 계획법과 회귀 분석을 이용하여 표면 거칠기 예측모델을 개발하였으며 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 직교 계획법과 회귀 분석법을 이용하여 최적표면 거칠기 예측모델을 나타내었다. 연구결과에 의해서 표면 거칠기는 일반적으로 절삭속도와 노즈 반경의 증가에 의해 향상되며, 이송의 증가에 따라 저하된다는 것을 확인하였다.
- (2) 분산분석에 의하여 이송과 노즈반경이 절삭속도나, 절삭깊이보다 표면 거칠기에 더 큰 영향을 미친다는 결론을 도출하였다.
- (3) 절삭 매개변수들 간의 상호작용이 표면 거칠기에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.
- (4) 다중회귀분석법 이용하여 개발된 1차표면 거칠기 예측 모델의 결정계수 (coefficient of determination) R^2 값은 0.8이며 상당히 높은 유의성을 나타내었다.
- (5) 본 논문에서 제안된 방법은 선삭공정은 물론 다른 절삭공정에서도 적용 할 수 있다.

참고문헌

- (1) Miller, J. C., DeVor, R. E., and Sutherland, J. W., "Surface roughness characteristics for turning 380 and 390 aluminum casting alloys", Proceedings of North America Manufacturing Research Conference, pp. 282~288, 1983.

Table 4 Analysis of variance

Source	Sum of Squares	DOF	Mean Square	F_0	F(0.05)
A	1163.11	2	581.55	55.2	4.1
B	53.21	2	26.6	2.53	4.1
C	140.4	2	70.2	6.66	4.1
D	13.35	2	6.68	0.63	4.1
A×B	50.9	4	12.72	1.21	3.48
A×C	101.27	4	25.31	2.4	3.48
e	105.36	10	10.53		
T	1627.63	26			

- (2) Bhattacharyya, A. and Faria-gonzalez, R., "Regression analysis for predicting surface finish and its application in the determination of optimum machining conditions", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 92, pp. 711~714, 1970.
- (3) 신근하, 이진준, "선삭에서 기계구조용 탄소강의 가공시 절삭저항과 표면 거칠기에 미치는 영향에 관한 연구", *한국공작기계학회지*, 제 8권 제 5호, pp. 47~53, 1999.
- (4) Wu, S. M., "Tool life testing by response surface methodology, Parts I and II", *Trans. ASME*, Vol. 86, pp. 105~116, 1964.
- (5) Wu, S. M., and Meyer, R. N., "Cutting tool temperature equation by response surface methodology", *Trans. ASME*, Vol. 86, pp. 150~156, 1964.
- (6) Montgomery, D. C., *Design and analysis of experiments*, Wiley & Son, 1997.
- (7) 박성현, *현대실험계획법*, 民英社, 1993.
- (8) Draper, N. R., and Smith, H., *Applied regression analysis*, Wiley & Son, 1981.