

선반작업에서 실험계획법을 이용한
표면 거칠기에 관한 연구

A Study on the Surface Roughness Using the Design of
Experiment in Turning Process

홍 민 성* 염 철 만**

* 아주대학교 기계 및 산업공학부

** 아주대학교 기계공학과 대학원

Abstract

This paper presents a study of surface roughness prediction model by experimental design in turning operation. Regression analysis technique has been used to study the effects of the cutting parameters such as cutting speed, feed and depth of cut on surface roughness. 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 cutting process is a method to estimate the effects of cutting parameter on surface roughness.

Key words: surface roughness(표면 거칠기), experimental design(실험 계획법), regression analysis(회귀 분석), cutting parameter(절삭 매개 변수).

1. 서론

표면 거칠기는 생산계획(production planning)의

평가에서 매우 중요한 요소이다. 단일공구인 선반 가공에서의 표면 거칠기는 집중적으로 연구되어 왔다^{[1][2]}. 이런 한 원인은 주로 선삭이 가장 오래 되었고, 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.

선삭공정에서 표면 거칠기는 절삭속도, 이송, 절삭 깊이, 공작물 재료 특성, 공작물 경도, 구성인선, 공구의 노즈반경(nose radius), 공구의 절삭각(cutting edge angle), 공구와 공작물의 설치의 안정성, 채터(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. Wu^{[3][4]}는 처음으로 공구수명 실험에서 반응표면방법론(response surface methodology)을 시도하였다. 이 논문에서는 반응표면법을 이용하여 절삭 매개변수들이 공구수명에 미치는 영향을 살펴본다.

본 논문에서 표면 거칠기 예측에 사용된 일반적인 수학적 모델을 절삭속도, 이송, 절삭깊이등 3개의 독립적인 변수로 표현하였다. 또한 예측모델은 실험계획법과 회귀분석법을 이용하여 개발하였다.

2. 표면 거칠기 모델

실험식의 개발에는 그래픽 방법과 회귀분석 방법이 있다. 그래픽 방법의 장점은 비교적 직관적이고 편리하다. 그러나, 주관적인 오차가 있고 방정식이 높은 정밀도를 가지고 있지 않다. 회귀분석법을 사용하여 데이터를 처리하며 이런 문제들을 해결할 수 있다. 절삭 실험에서 여러 개의 요소를 변화시킨다면, 그래픽 방법을 사용하는 것은 더욱 불이익이 된다. 표면 거칠기를 예측하는데 있어 경험적 수식은 직교(orthogonal) 실험 계획법^{[6][7]}과 회귀 분석을 사용함으로써 수립될 수 있다.

표면 거칠기와 절삭 독립변수 사이의 관계는 아래의 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$R_a = C_{R_a} v^x f^y a_p^z \quad (1)$$

여기서, R_a 는 산술평균(arithmetic average)이고 (μm 단위), v , f , a_p 는 각각 절삭속도(m/min), 이송(mm/r), 절삭깊이(mm) 등이다. C_{R_a} , x , y , z 는 상수이다.

이 방정식은 아래와 같은 모든 변수들을 대수로 표현한 선형조합의 형태로 표현할 수 있다.

$$\ln R_a = \ln C_{R_a} + x \ln v + y \ln f + z \ln a_p \quad (2)$$

위 식은 선형관계이다. 다음으로 다중 선형 회귀 분석법^[6]을 이용하여 데이터를 처리하였다.

$$Y = \ln R_a, \quad b_0 = \ln C_{R_a}, \quad b_1 = x, \quad b_2 = y,$$

$$b_3 = z$$

라고 치환하면, 식 (2)는 아래와 같이 표현된다.

$$Y = b_0 + b_1 \ln v + b_2 \ln f + b_3 \ln a_p \quad (3)$$

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 실험횟수에서 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 외에 여러 가지 유의차검정, 상관, 회귀분석 등도 이에 포함된다.

표면 거칠기 모델을 개발하기 위해, 본 연구에서는 9번의 실험으로 구성된 계획을 사용하였다. 9번의 실험은 $L_9(3^4)$ 직교 배열 설계^[7]로 나타내어진다(Table 1 참조). 이 계획법은 각각의 독립변수에 대하여 3개의 수준(low, center, high level)으로 나타내는데, 낮은 수준은 "-1", 중간수준은 "0", 높은 수준은 "1"로 표시된다.

본 논문에서는 계산을 단순화하기 위해 실제 절삭의 매개변수들을 통계적인 코딩(statistical coding)으로 표준화시켰다. 이 변화방정식은 아래와 같다.

$$X_1 = \frac{2(\ln v - \ln 180)}{\ln 180 - \ln 80} + 1 \quad (4)$$

$$X_2 = \frac{2(\ln f - \ln 0.4)}{\ln 0.4 - \ln 0.1} + 1 \quad (5)$$

Table 1. Experimental design

Factor No.	v (m/min)		f (mm/r)		a _p (mm)		R _a (μm)
	levels	values	levels	values	levels	values	
1	L	80	L	0.1	L	1	0.848
2	L	80	C	0.2	C	1.41	1.303
3	L	80	H	0.4	H	2	3.637
4	C	120	L	0.1	C	1.41	0.623
5	C	120	C	0.2	H	2	1.39
6	C	120	H	0.4	L	1	3.63
7	H	180	L	0.1	H	2	0.667
8	H	180	C	0.2	L	1	1.433
9	H	180	H	0.4	C	1.41	3.867

Table 2. Coded variables

No.	X ₁	X ₂	X ₃	Y	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	X ₁ X ₂	X ₂ X ₃	X ₃ X ₁	X ₁ Y	X ₂ Y	X ₃ Y
1	-1	-1	-1	-0.1649	1	1	1	1	1	1	0.1649	0.1649	0.1649
2	-1	0	0	0.2647	1	0	0	0	0	0	-0.2647	0	0
3	-1	1	1	1.2912	1	1	1	-1	1	-1	-1.2912	1.2912	1.2912
4	0	-1	0	-0.4727	0	1	0	0	0	0	0	0.4727	0
5	0	0	1	0.3292	0	0	1	0	0	0	0	0	0.3292
6	0	1	-1	1.2892	0	1	1	0	-1	0	0	1.2892	-1.2892
7	1	-1	1	-0.4049	1	1	1	-1	-1	1	-0.4049	0.4049	-0.4049
8	1	0	-1	0.3598	1	0	1	0	0	-1	0.3598	0	-0.3598
9	1	1	0	1.3525	1	1	0	1	0	0	1.3525	1.3525	0
Σ	0	0	0	3.8442	6	6	6	0	0	0	-0.0836	4.9754	-0.2686

삭깊이도 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 1에서, 세 가지 수준(high, center, low) 사이에 아래와 같은 관계가 성립한다.

$$X_3 = \frac{2(\ln a_p - \ln 2)}{\ln 2 - \ln 1} + 1 \quad (6)$$

이 식을 사용하여 각각의 독립변수가 세 수준일 때의 값을 구할 수 있다. 절삭속도가 높은 수준일 때 $X=1$ ($v=180$ m/min)며 중간 수준일 때는 $X=0$, 낮은 수준에서는 $X=-1$ 이다. 이송과절

$$\text{center level} = (\text{high level} \times \text{low level})^{1/2}$$

Table 2에서는 코드화된 변수들을 표현하였다. 식 (4,5,6)들 식(3)에 각각 대입하면 수식(7)을 얻을 수

있다.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \quad (7)$$

본 연구를 수행하기 위해서, 실험을 통해 표면 거칠기 값을 구하였다. 절삭 실험은 NC 선반에서 노즈(nose)반경 0.8mm인 코팅된 초경합금(NC330)을 사용하였다. 공작물은 SM45C, 직경 45mm, 길이 160mm이며 건식 절삭 실험을 시행하였다. 가공된 표면 거칠기는 표면 측정장치(Mitutoyo SURFTEST SV-600)를 사용하여 측정하였다. 각각의 표본을 원주표면에서 무작위(random)하게 세 번 측정하고(Table 3 참조) 이것의 산술 평균을 표면 거칠기 값으로 하였다.

4. 결과 및 토의

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

$$Y = 0.4271 - 0.0139 X_1 + 0.8292 X_2 + 0.0448 X_3 \quad (8)$$

표면 거칠기 모델을 나타내는 식(8)은 식(4,5,6)을 사용하여 아래와 같이 변경될 수 있다.

$$R_a = 12.9v^{-0.0343} f^{1.196} a_p^{0.1293} \quad (9)$$

식(9)은 표면 거칠기가 절삭속도의 증가에 따라 개선됨을 나타내고, 반면 이송과 절삭깊이의 증가에 따라서 저하됨을 나타낸다.

Fig. 1에 나타나는 것처럼 절삭속도와이송의 관계에서 각각의 절삭깊이에 따라 표면 거칠기가 얻어진다. 절삭 깊이의 범위를 나타내기 위해 낮은 수준(1mm), 중간수준(1.41mm), 높은 수준(2mm)의 세 가지 절삭 깊이로 선택되었다. 이런 등고선은

Table 3. Surface roughness values

R _a (μm)		
0.703	0.861	0.982
1.343	1.301	1.266
3.58	3.69	3.64
0.71	0.58	0.58
1.37	1.41	1.39
3.61	3.63	3.65
0.67	0.62	0.71
1.41	1.45	1.44
3.87	3.86	3.87

실험영역에서 표면 거칠기의 예측을 도와준다. 그리고 이런 개념에서, 같은 표면 거칠기를 생산하는데 있어 절삭속도와 이송의 다른 조합이 많기 때문에, 표면 거칠기의 변화 없이 가공 시간을 감소시키는 이송과 절삭속도의 조합을 선택되는 것이 가능하다. 분산분석은 Table 3에 요약하였다. 여기에서, 이송의검정통계량 F의 값이 2232로서 이송이 절삭속도, 절삭깊이보다 통계적으로 큰 영향을 미친 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 사용된 실험 계획법으로부터 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 표면 거칠기를 예측하는 식이 실험 계획법과 회귀 분석법으로 연구될 수 있다.
- 2) 표면 거칠기는 일반적으로 절삭속도의 증가에 의해 향상되며, 이송의 증가에 따라 저하된다.
- 3) 본 논문에서 제안된 방법은 전삭공정 외에도 다른 절삭공정에서의 표면 거칠기를 예측할 수 있다.

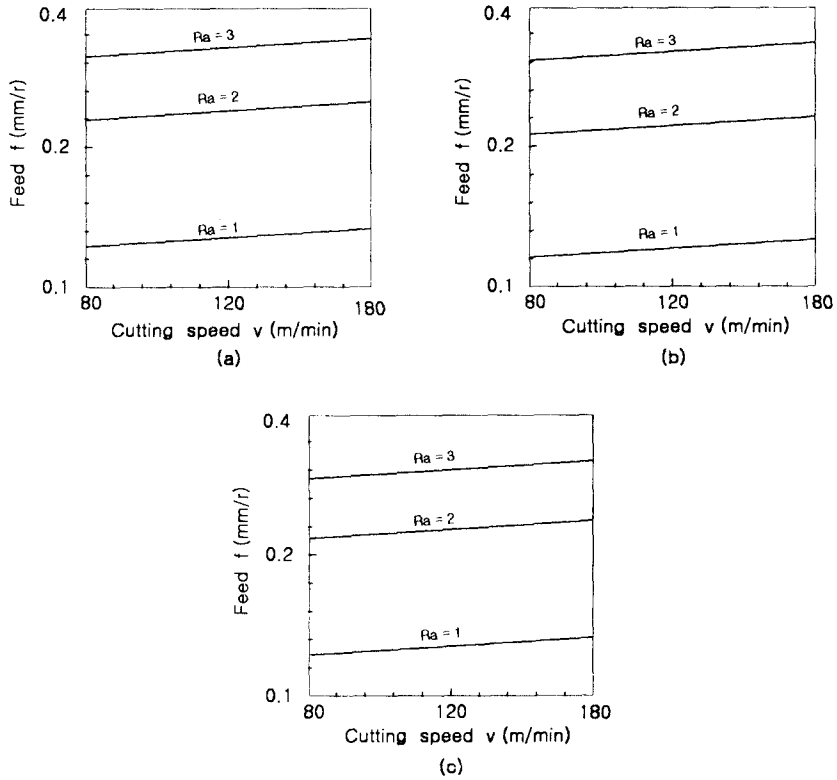


Fig. 1 Surface roughness contours in speed-feed planes at depth of cut: (a) 1mm (b) 1.41mm (c) 2mm

Table 3. Analysis of variance

Source of variation	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F
Speed	2	0.06	0.03	3
Feed	2	44.65	22.325	2232
Depth of cut	2	0.03	0.015	1.5
Error	20	0.2	0.01	
Total variation	26	44.94		

참고문헌

- [1] Shaw, M. C., "Optimum selection of machine tool speeds and feeds", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 5, pp. 25-34, 1965.

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

[3] Wu, S. M., "Tool life testing by response surface methodology, Parts I and II", Trans. ASME, May, pp. 105-116, 1964.

[4] Wu, S. M., and Meyer, R. N., "Cutting Tool temperature equation by response surface methodology", Trans. ASME, May, pp. 150-156, 1964.

[5] Douglas, C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, WILEY, 1997.

[6] Draper, N. R., and Smith, H., *Applied regression analysis*, WILEY, 1981.

[7] 박성현, *현대실험계획법*, 민英社, 1993.