

실험계획법을 이용한 연삭가공물의 표면거칠기 분석

지용주*, 이상진+, 박후명+, 곽재섭**, 하만경**

Surface Roughness Analsis of Surface Grinding by Design of Experiments

Long-Zhu Chi*, Sang-Jin Lee+, Hoo-Myung Park+, Jae-Seob Kwak**, Man-Kyung Ha**

Abstract

A measure for good products manufactured by grinding process is the surface roughness that is affected by a lot of operating parameters such as types of abrasive, grain size, bond material, wheel speed, table speed, depth of cut, hardness of workpiece and stiffness of grinding machine. In this study, an application of the design of experiments was tried for evaluating the effect of operating parameters on the surface roughness. The workpiece was a high speed tool steel(SKH51) and the surface grinding was conducted. In order to obtain the best surface roughness within constraints of the working range, the optimal grinding conditions were selected. The usefulness of this method was evaluated by the statistical strategy.

Key Words : Surface Grinding(평면연삭), Design of Experiments(실험계획법), Operating Parameters(공정인자), Surface Roughness(표면거칠기), Optimal Conditions(최적조건)

1. 서론

연삭가공은 제품의 마무리 가공공정으로 치수 정밀도 및 표면성상이 우수한 제품을 얻을 수 있는 장점이 있어 표면가공에 폭넓게 사용되어지고 있다. 그러나 연삭가공에는 관여하는 인자가 많고 그 인자들이 상호작용하여 가공물의 표면 품질에 영향을 미치므로, 각 인자에 대한 평가 뿐만 아니라 인자들의 상호작용을 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 이와 같이 어떤 공정에 관여하는 인자와 인자들의 상호

작용을 효과적으로 분석하는 방법이 실험계획법(design of experiments)이다. 실험계획법은 실험에 대한 계획방법으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 어떠한 방법으로 실험 및 데이터를 획득하여 어떤 통계적 방법으로 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다. 실험계획법에서 일반적으로 널리 사용되는 데이터의 통계적 분석방법으로는 분산분석(analysis of variance), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis), 반응표면 분석 등이 있으며, 공학분야에서도 이러한 방법을 이용하여 문제를 해결하기 위한

* 부경대학교 대학원 (ch-lzh@hanmail.net)
주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산 100
+ 부경대학교 대학원
++ 부경대학교 기계공학부

연구가 이루어져왔다.

Hong 등⁽¹⁾은 실험계획법을 이용하여 선삭에서 표면거칠기 예측에 관한 연구를 하였다. Shin 등⁽²⁾은 실험계획법을 이용하여 3차원 용접과 밀링공정의 최적화에 관한 연구를 하였다. 또한 Baek 등⁽³⁾은 레이저 리소그라피미세패턴의 최적화 가공조건을 선정하였다. 한편 Jeong 등⁽⁴⁾은 세라믹 재료의 최적 연삭조건을 도출하였다.

본 연구에서는 고속도강(SKH51)을 WA숫돌로 평면연삭할 때 숫돌입자, 연삭깊이, 테이블의 이송속도와 주축의 회전속도가 표면거칠기에 대한 영향 정도를 분석하고 표면거칠기를 줄이는 최적의 연삭조건을 도출하였다. 효율적인 실험을 위해 직교배열표를 이용하였으며, 실험에 대한 평가는 분산분석(analysis of variance)방법으로 수행하였다.

2. 실험계획법

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 결과 값 즉 특성치(characteristic value)에 대해서, 이에 영향을 미치는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 다양하고, 공작물, 실험장치, 숙련도 등의 차이에서 오는 산포가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(sampling error) 등에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 실험에 있어서 측정 데이터에 산포를 준다고 생각되는 많은 원인들 중에서 실험에서 조절 가능한 원인을 인자라고 부른다. 실험을 하기 위한 인자의 특정한 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다.

실험계획법이란 주어진 실험에 대한 실험방법을 의미하는 것으로, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 실험계획법을 세웠다는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법 및 실험순서를 정하고 실험 후에 얻어지는 데이터에 대한 최적의 분석방법을 선택하였다는 의미이다. 실험계획법에서 많이 이용되는 데이터의 분석방법으로는 분산분석, 상관분석, 회귀분석 등이 있다.

상관분석과 회귀분석은 주요하게 모 인자와 특성치 사이의 상관관계를 규명하고 회귀식을 구하는데 쓰이는 반면, 분산분석은 여러 인자들이 특성치에 미치는 영향정도를 분석하고 각 인자들의 최적 조합 및 최적조건들을 선정하는데 쓰인다. 따라서 본 연구에서는 분산분석을 사용하였다.

분산분석이란 실험에서 얻은 특성치의 산포를 제곱 합으로 나타내고 이 제곱 합을 실험과 관련된 인자 별의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 인자의 제곱 합을 그 인자의 자유도로 나누면 그 인자의 제곱평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 인자 별로 분해하여 어느 인자가 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이라 할 수 있다.

만약 어떤 특성치에 대하여 요인으로서 A, B, C 및 오차가 있을 경우, 각각의 변동 즉 제곱 합을 S_A , S_B , S_C , S_E 라 하고, 요인간의 교호 작용의 제곱합을 $S_{A \times B}$, $S_{A \times C}$, $S_{B \times C}$ 라 하면 이들의 총 변동 S_T 는 다음 식이 성립된다.

$$S_T = S_A + S_B + S_C + S_{A \times B} + S_{A \times C} + S_{B \times C} + S_E \quad (1)$$

오차변동 S_E 에 비하여 S_A , S_B , S_C , $S_{A \times B}$, $S_{A \times C}$, $S_{B \times C}$ 가 상대적으로 어느 정도 큰가를 비교하여 각자가 각각 얼마나 큰 영향을 주는 요인인가를 아난가를 결정하는 것이다. 각 요인에 의하여 발생하는 변동 즉 제곱 합은 뚜렷한 이유에 의한 것이나 오차에 의한 변동은 아직 원인이 규명되지 않은 부분이라고 할 경우 이들의 상관관계에서 통계적으로 유의한 영향의 정도는 다음과 같이 구할 수 있다. 예를 들어 요인 A와 오차의 제곱 합을 각각 S_A , S_E 로 표시하고 이와 관련된 자유도를 각각 Φ_A , Φ_E 로 나타내면 S_A/Φ_A 는 A의 제곱평균으로 V_A 로 놓고, S_E/Φ_E 는 오차분산으로 V_E 로 놓으면 이들 값의 비율

$$F_0 = \frac{V_A}{V_E} \quad (2)$$

가 크면 클수록 요인A가 오차에 비해 통계적으로 유의한 영향을 준다고 한다⁽⁵⁾.

3. 실험계획법에 의한 표면거칠기 분석

3.1 실험장치 및 방법

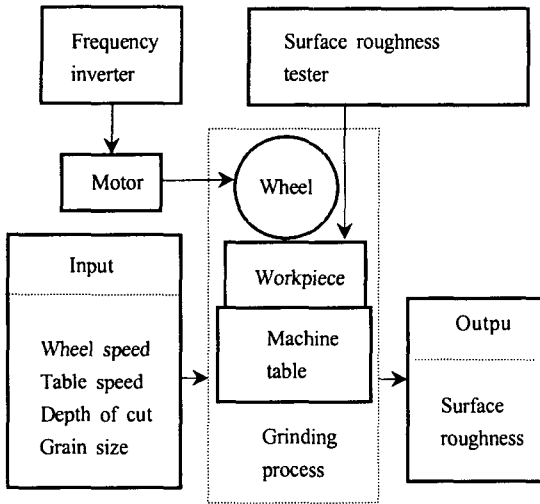


Fig. 1 Experimental setup and input-output parameters

Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 실험 장치와 요인 및 특성을 개략적으로 나타낸 것이다. 주축의 회전수가 변속이 가능하도록 인버터(inverter)를 부착하였다. 본 실험에 사용된 실험장치의 사양과 연삭 조건은 각각 Table 1, 2와 같다. 또한 공작물의 화학적 조성을 Table 3에 나타내었다.

3.2 인자 및 수준의 선정

본 연구에서는 Table 4와 같이 주축회전수, 테이블의 이송 속도, 연삭깊이 및 스톱의 입도를 인자로 하였고, 각 인자의 수준은 3수준으로 하였다.

3.3 실험결과 및 분석

실험계획법에서 직교배열표를 사용하는 이유는 실험을 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 넣을 수 있다는데 있다. 본 실험에서는 각 인자의 주 효과 및 주축 회전수(A), 테이블의 이송속 도(B), 연삭깊이(C) 사이의 교호작용을 고려하여 총 27회의 실험회수를 가지는 $L_{27}(3^{13})$ 표준 직교배열표를 적용하였다. Table 5 은 $L_{27}(3^{13})$ 표준 직교배열표에 각 인자와 앞에서 논한 교호작용 및 인자별 각 3수준을 표면거칠기 측정치와 함께 배열한 것이다.

직교배열표에 의한 가공실험을 통하여 측정된 표면거칠기를 토대로 분산분석한 결과를 Table 6 에 나타내었다. Table 6부터 얻어진 각 인자들의 표면거칠기에 미치는 영향정도를

Table 1 Experimental equipments

Instrument	Model
Grinding machine	Horizontal spindle surface grinder
Surface roughness tester	SJ-210P(Mitu toyo)
Frequency inverter	SV03713-2N (LG)

Table 2 Fixed conditions in experiment

Conditions	Values
Grinding wheel	Abrasive: WA, Grade: K Structure: m, Binder: Vitrified
Workpiece	SKH51(HRC55) (100×90×20mm)
Dressing condition	Single point diamond dresser
Grinding type	Plunge & up-grinding& wet

Table 3 Chemical composition(%) of workpiece

C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V
0.88	0.24	0.29	0.02	0.002	4.01	5.6	4.62	1.63

Table 4 Factors and levels used in experiment

Sign	Factors	Unit	Levels		
			0	1	2
A	Spindle speed	rpm	1500	1800	2100
B	Table speed	m/min	6	8	10
C	Depth of cut	μm	10	15	20
D	Grain size	#	46	120	200

Table 5 Orthogonal array table for $L_{27}(3^{13})$

No	Factor													Surface roughness (μm)
	A	B	$a \times b$	$a \times b^2$	C	$a \times c$	$a \times c^2$	$b \times c$	D	e	$b \times c^2$	e	e	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.39
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.35
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	0.43
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0.23
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	0.47
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	0.23
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	0.47
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0.47
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0.16
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	0.30
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0.38
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	0.30
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	0.38
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	0.36
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	0.42
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	0.44
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	0.44
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0.17
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	0.33
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	0.37
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	0.42
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	0.27
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	0.29
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	0.27
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	0.25
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	0.43

기여율(Percentage distribution)로 Fig.2와 같이 나타내고 있다. 표면거칠기에 기여하는 인자는 슛돌입도(D)-연삭깊이(C)-주축회전속도(A)-테이블의 이송속도(B)의 순서로 나타나고 있다. A, B, C, D 각 인자의 모평균의 점 추정치를 구하면 Table 8과 같다. 직교배열표를 사용한 실험계획법에 서는 오차변동이 상당히 크게 나오는 경우가 많으므로 신뢰

구간의 신뢰율을 90%로 흔히 사용한다. 본 연구에서도 90%의 신뢰구간으로 신뢰폭을 구하면 아래와 같다.

$$t\left(\Phi_E; \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{V_E}{9}} = 0.02 \quad (3)$$

Table 6 ANOVA table for Surface roughness

Factor	S	Φ	V	F_0	$F_{(0.05)}$	$F_{(0.01)}$
A	0.0217	2	0.0109	8.38*	5.14	10.9
B	0.0194	2	0.0097	7.46*	5.14	10.9
C	0.0347	2	0.0174	13.38**	5.14	10.9
D	0.0698	2	0.0349	26.85**	5.14	10.9
A×B	0.0187	4	0.0047	3.62	4.53	9.15
A×C	0.0060	4	0.0015	1.15	4.53	9.15
B×C	0.0378	4	0.0095	7.31*	4.53	9.15
E	0.0077	6	0.0013			
T	0.2158	26				

Table 7 Predicted average Surface roughness

Factors	Average values	
A	$\hat{\mu}(A_0)$	0.38
	$\hat{\mu}(A_1)$	0.35
	$\hat{\mu}(A_2)$	0.31
B	$\hat{\mu}(B_0)$	0.31
	$\hat{\mu}(B_1)$	0.35
	$\hat{\mu}(B_2)$	0.38
C	$\hat{\mu}(C_0)$	0.31
	$\hat{\mu}(C_1)$	0.34
	$\hat{\mu}(C_2)$	0.40
D	$\hat{\mu}(D_0)$	0.41
	$\hat{\mu}(D_1)$	0.35
	$\hat{\mu}(D_2)$	0.28

** : 99% confidence level, * : 95% confidence level

Table 8 Confidence range of each factor

Factors	Average values	
A	$\mu(A_0)$	0.36-0.40
	$\mu(A_1)$	0.33-0.37
	$\mu(A_2)$	0.29-0.33
B	$\mu(B_0)$	0.29-0.33
	$\mu(B_1)$	0.33-0.37
	$\mu(B_2)$	0.36-0.40
C	$\mu(C_0)$	0.29-0.33
	$\mu(C_1)$	0.32-0.36
	$\mu(C_2)$	0.38-0.42
D	$\mu(D_0)$	0.39-0.43
	$\mu(D_1)$	0.33-0.37
	$\mu(D_2)$	0.26-0.30

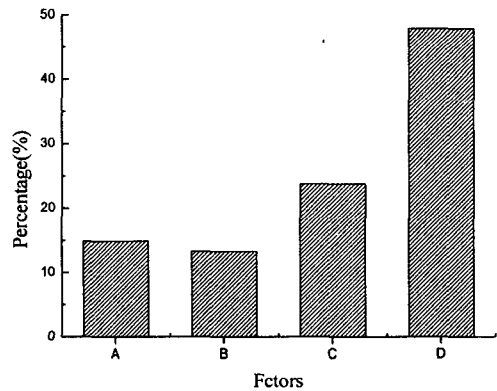


Fig. 2 Percentage distribution of factors

Table 7 과 식(3)으로부터 각 인자의 신뢰구간을 구하여 Table 8에 나타냈고 이를 그림으로 표시하면 Fig.2와 같다. Table 8 및 Fig.3으로부터 알 수 있듯이 본 연구의 실험조건 범위에서 표면거칠기를 최소화할 수 있는 요인 및 수준의 조합은 $D_2C_0A_2B_0$ 이며 이를 나타내면 Table 9과 같다. 숫돌입자는 제일 작은 #200, 연삭깊이는 10um, 주축회전속도는 2100rpm, 테이블의 이송속도는 6m/min가 표면거칠기를 최

소화할 수 있는 최적의 가공조건으로 나타났음을 알 수 있다. 슷돌입자가 표면거칠기에 제일 큰 영향을 끼치는 것은 슷돌입자의 크기가 변함으로하여 연삭시 연삭에 참여하는 입자수가 변하고 따라서 매개 연삭입자 한개당 제거하는 공작물의 길이가 많이 변화하기 때문이다. 연삭깊이, 주축의 회전속도, 테이블의 이송속도도 결국은 매개 연삭입자 한개당 제거하는 공작물 길이의 변화를 통해 표면거칠기에 영향을 끼치는데, 각자가 이에 미치는 영향정도가 다르기 때문에 결국 표면거칠기에 끼치는 영향도 다르게 나타난다.

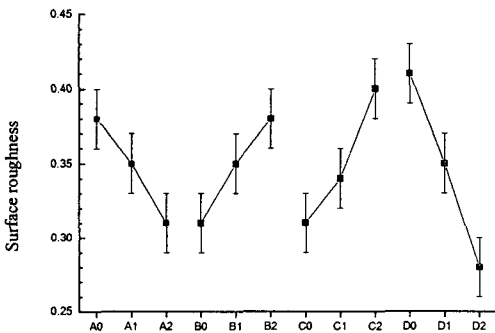


Fig. 3 Graphical illustration of Surface roughness

Table 9 Optimal sets in this study

Factor	Values
Spindle speed	2100rpm
Table speed	6m/min
Depth of cut	10 μ m
Grain size	#200

4. 결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 고속도강을 WA 슷돌로 평면연삭할 때, 연삭인자가 연삭가공면 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하고 연삭가공면 형상오차를 최소화할 수 있는 최적 연삭조건을 선정하는 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연삭가공면의 표면거칠기에 영향을 미치는 인자는 슷돌입자(D)-연삭깊이(C)-주축속도(A)-테이블의 이송속도(B)의 순서로 나타났다.
2. 연삭가공면 표면거칠기를 최소화할 수 있는 최적 연삭조건으로는 주축회전속도 2100rpm, 테이블이송속도 6.0m/min, 연삭깊이 10 μ m, 슷돌입자 #200임을 알 수 있었다.
3. 실험계획법을 통해 최소의 실험회수로 통계적 분석을 거쳐 연삭가공면 표면거칠기에 영향을 미치고 있는 가공인자, 연삭가공면 표면거칠기를 최소화할 수 있는 최적 연삭조건을 규명하는 것이 가능하였다.

참고 문헌

- (1) Hong, M. S, 2001, "A Study on Prediction Model of Surface Roughness by the Orthogonal Design for Turning Process", KSMTE, Vol. 10, No.2 pp89~94
- (2) Shin, S. H, 2000, "Optimization of 3D Welding and Milling Process by Taguchi Method", KSPE, Vol. 17, No.8 pp46~52
- (3) Baek, N. K, 2002, "Optimization of Laser Lithograpatterning Technique based on Taguchi Method", KSPE, Vol. 19, No.7 pp59~63
- (4) Jeong, E. S, 2002, "A Study on the Optimal Grinding Condition of Ceramics using the Design of Experiments", KSPE, Vol. 19, No.8 pp141~146
- (5) Park, S. H., "Morden Design of Experiments," Minyongsa, pp. 16~18, 2001.