

Taguchi 실험계획법에 의한 연삭가공조건 최적화 및 표면거칠기 예측

곽재섭[#], 하만경^{*}

Optimization of Grinding Conditions and Prediction of Surface Roughness Using Taguchi Experimental Design

Jae-Seob Kwak[#] and Man-Kyung Ha^{*}

ABSTRACT

Grinding is a finishing operation of products in various areas. Surface roughness of industrial components obtained in grinding operation is a critical quality measure but is a function of many operating parameters and their interactions. To achieve higher surface roughness and to identify the influence of grinding parameters on surface roughness, it is an ideal situation for using the design of experiments. This paper presents a successful optimization of grinding conditions and prediction of surface roughness using the design of experiments. From the experimental verification tests, it was observed that this approach was useful as a robust design methodology for grinding operation.

Key Words : Design of experiments(실험계획법), Taguchi method(다구찌 기법), Grinding conditions(연삭조건), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

연삭가공은 스톨에 불균일하게 분포된 미소입자를 절인으로 사용하기 때문에, 입자당 금속제거량이 매우 적어 정밀한 가공표면을 얻을 수 있는 장점이 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 상호작용을 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) 등이 있고,

접수일: 2003년 12월 19일; 게재승인일: 2004년 4월 9일

[#] 교신저자: 부경대학교 기계공학부

E-mail jskwak5@pknu.ac.kr Tel. (051) 620-1622

^{*} 부경대학교 기계공학부

공학분야에서도 이러한 방법을 이용하여 문제를 해결하기 위한 연구가 이루어져왔다.

Enemuoh¹ 등은 적층된 탄소섬유강화 플라스틱 제품의 드릴링 공정에서, 실험계획법을 이용하여 제품의 표면손상을 줄일수 있도록 드릴링 파라미터를 선정하는 최적설계를 하였다. Lin^{2, 3}은 코팅공구에 의한 스테인레스강의 페이스밀링에서 공구수명과 가공면에 발생하는 버(burr)를 줄일 수 있는 가공조건을 선정하였고, 세라믹 게이지블록의 폴리싱공정에도 실험계획법을 적용하였다. 또한 Kim⁴ 등은 래핑공정에서 표면거칠기 향상을 극대화할 수 있는 가공조건을 선정하였다. 한편 Dhavlikar⁵ 등은 무심연삭공정에서 가공물의 진원도 오차를 최소화할 수 있는 최적가공조건을 선정하였다.

본 연구에서는 평면연삭에서 연삭조건이 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향을 실험계획법으로 분석하고, 제한적인 가공조건 범위에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있는 최적연삭조건을 선정하고자 한다. 또한 연삭조건에 따른 가공물의 표면거칠기를 예측할 수 있는 방법을 제안하고, 실험을 통하여 얻어진 값과 비교하여 그 유효성을 평가하고자 한다.

2. 실험계획법

2.1 Taguchi 기법

일본의 제니찌 다구찌(Genechi Taguchi)가 만든 직교배열표를 이용한 '다구찌 기법'은 종래의 실험계획법에 비해 제어불가능한 조건들이 실험결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특성치(measurement characteristic)로 변환하여, 산포를 작게하는 조건들의 값을 찾아내는 강건설계기법(robust design)이라 할 수 있다.^{6, 7}

평가 특성치는 신호와 잡음의 비(S/N ratio, η)로 나타내고, 다음과 같이 세가지로 분류된다.

(1) 망목특성 : 특정한 목표치가 주어져 있는 경우

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{\sigma} \right) \quad (1)$$

(2) 망소특성 : 목표치가 작을수록 좋은 경우

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

(3) 망대특성 : 목표치가 클수록 좋은 경우

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

여기서, y_i 는 실험에서 얻어진 데이터, \bar{y} 는 데이터들의 평균, σ 는 표준편차를 나타내고 n 은 실험회수를 의미한다.

Taguchi 기법의 또 하나의 특징은 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 이용한다는 것이다. 설계단계에서 다루어야 할 많은 설계인자들을 주된 효과와 기술적으로 예상되는 인자들 간의 상호작용은 고려하고 그 이외의 상호작용들을 희생시켜, 실험회수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. 직교배열표에서 모든 열은 서로 직교하기 때문에 임의의 2 열을 골라서 그 곱의 합을 구하면 영(zero)이 된다.

2.2 분산분석

분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 통계적 방법이 된다. 이때 얻어진 값들의 확률적 유의수준은 F-검증을 이용하여 평가한다.

2.3 중회귀분석법

회귀분석은 변수들 간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법으로, 일반적으로 이 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 하거나 통계적 추론을 하게 된다. 특히 중회귀분석(multiple regression analysis)이란 독립변수가 2개 이상이고 종속변수가 1개로 이들의 관계를 1차함수로 가정하는 경우이다. 회귀함수가 얼마나 유효한가는 분산분석표를 작성하여 F-검증을 실시하거나, 실험에서 얻어지는 총편차의 제곱합과 회귀 제곱합으로부터 구해지는 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 이용하여 평가한다.

3. 최적연삭조건 선정

3.1 실험계획

평면연삭 가공물의 표면거칠기를 평가할 주요 인자(factor)로는 연삭입자의 종류, 입자의 크기, 절입깊이, 테이블 속도 및 스파크아웃으로 설정하였다. 각 인자의 수준(level)은 2단계로 변화시켰으며, 그 구체적인 값은 Table 1과 같다. 또한 고정인자로는 공작물의 종류, 연삭속도 및 습식연삭조건이 사용되었다. 실험에 사용된 공작물은 고속도강(SKH51)으로 그 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 2와 3에 나타내었다. 또한 본 연구에서 실시한 실험계획법에 의한 평가절차는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Factors and their levels used in experiment

Factors	Code	Level 1	Level 2
Abrasive	A	WA	GC
Grain size(#)	B	120	200
Depth of cut(μm)	C	10	20
Table speed(m/min)	D	7.5	12.5
Spark-out(No.)	E	0	1
Constant factors	Workpiece : SKH51 (100×22×20mm) Wheel speed : 1800rpm Coolant : Wet		

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (kg/mm ²)	230
Practure strength (kg/mm ²)	546
Fatigue strength (kg/mm ²)	62
Young's modulus (kg/mm ²)	22,100
Hardness (H _R C)	62

Table 3 Chemical composition of specimen(% wt)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Ni
0.8	0.37	0.38	0.03	0.03	3.90	4.70	6.23	1.76	0.23

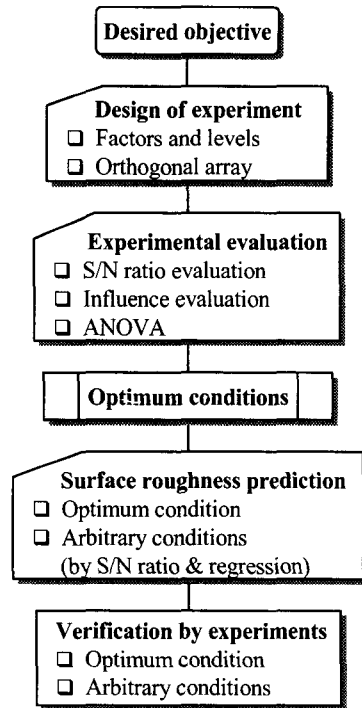


Fig. 1 An approach for design of experiments

Table 4는 실험에 사용된 $L_{16}(2^{15})$ 표준 직교배열표를 나타낸 것이다. 직교배열표에는 15개의 열에 주요인자 및 상호작용이 예상되는 인자들을 A에서 E까지 부호화하여 배치하였고, 실험의 실시회수는 16회로 하였다. 직교배열표에서 숫자 1과 2는 각 인자들의 수준을 의미하고, A, B, C, D, E의 모든 수준에서 실험이 반반씩 이루어지도록 배치하였다. $L_{16}(2^{15})$ 직교배열표의 경우, 주요인자(설계변수)가 5개이고 각 인자의 수준은 2수준이므로 일반적인 실험에서는 2^5 번, 즉 32번의 실험이 필요하지만 다구찌 기법을 이용하면 실험이 절반으로 줄고도 목적치에 가장 적합한 최적조합을 찾아낼 수 있다. 본 연구에서 목표치는 연삭가공물의 중심선 표면거칠기 값(Ra)으로 이를 최소화하고자 하였다.

3.2 실험결과 및 분석

실험은 Table 4에 나타낸 직교배열표에 따라서 실시하였고, 각 실험에서 표면거칠기는 3회씩 측정하였다. 표면거칠기 값은 작을 수록 좋으므로 S/N ratio의 계산은 식 (2)에 나타낸 망소특성식을 이용

Table 4 Standard $L_{16}(2^{15})$ orthogonal array

Factor Run	A	B	AB	C	AC	BC	DE	D	AD	BD	CE	CD	BE	AE	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Table 5 Experimental results and S/N ratio for surface roughness

Run	Measured surface roughness, $R_a(\mu\text{m})$			S/N ratio, η_r (dB)
	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	
1	0.34	0.44	0.37	8.27
2	0.34	0.30	0.30	10.06
3	0.31	0.32	0.35	9.70
4	0.62	0.58	0.62	4.33
5	0.33	0.31	0.32	9.89
6	0.36	0.32	0.36	9.18
7	0.44	0.47	0.46	6.80
8	0.48	0.47	0.50	6.31
9	0.43	0.48	0.47	6.73
10	0.54	0.58	0.56	5.03
11	0.50	0.47	0.55	5.88
12	0.48	0.44	0.45	6.80
13	0.37	0.38	0.41	8.24
14	0.30	0.32	0.32	10.07
15	0.33	0.30	0.31	10.07
16	0.38	0.32	0.38	8.84

하였다. 실험에서 얻어진 표면거칠기 값과 이로부터 계산된 S/N ratio는 Table 5와 같다.

Fig. 2는 각 인자의 수준변화에 따른 표면거칠

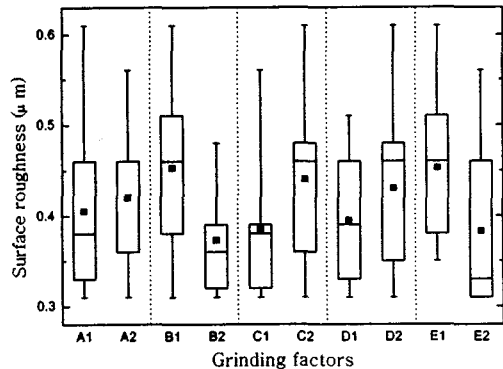


Fig. 2 Box and whisker displays for surface roughness

기를 박스형 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에는 실험에서 얻어진 표면거칠기의 최대, 최소, 중심값 및 전체 표면거칠기의 25%에서 75%까지 분포구간을 도시하였다. Fig. 2의 결과로부터 입자의 크기가 200(B₂) 일때와 절입깊이가 10 μ m(C₁)인 조건에서 매우 양호한 표면거칠기 값을 안정적으로 얻을 수 있고, 입자의 크기가 100(B₁) 일때와 스파크아웃을 행하지 않은(E₁) 조건에서는 표면거칠기가 나쁜편

서 그 분포가 넓기 때문에 불안정적으로 표면거칠기가 얻어짐을 알 수 있다.

Table 6은 Table 5의 S/N ratio를 이용하여 각 인자의 수준별 연삭가공물의 표면거칠기에 미치는 영향력(influence)과 인자별 영향력의 차(difference)를 구한 것이다. 예를들어, 입자의 크기(B)가 표면거칠기에 미치는 영향력(B₁, B₂)과 영향력의 차는 다음과 같이 구한다.

$$\frac{1}{8} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_9 + \eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12}) \quad (4)$$

$$\frac{1}{8} (\eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15} + \eta_{16}) \quad (5)$$

$$Differece = \| B_1 - B_2 \| \quad (6)$$

Table 6 Response table of S/N ratio for each factor

Factor	A	B	C	D	E
Level 1	8.072	7.105	8.439	8.202	7.077
Level 2	7.712	8.679	7.346	7.582	8.707
Difference	0.361	1.575	1.093	0.620	1.631

Fig. 3은 각 인자들의 수준이 변함에 따라서 표면거칠기에 대한 영향력을 도시한 것이다. 여기서 각 수준 변화에 따른 영향력 차가 크게 나타나는 인자일수록, 즉 기울기 변화가 큰 인자 일수록 가공물의 표면거칠기에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서 사용한 인자 중에서는 스파크아웃(E), 입자의 크기(B), 절입깊이(C)의 순서로 표면거칠기에 많은 영향을 미치고, 테이블 속도(D) 및 입자의 종류(A)는 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향이 비교적 적은 것을 알 수 있다. 테이블 속도가 표면거칠기에 미치는 영향이 적은 것은, 통상적으로 연삭숫돌의 원주속도에 비하여 테이블 속도가 매우 느리기 때문에 연삭입자 한개 당 제거하는 공작물의 길이에는 큰 변화를 주지못하므로 테이블 속도는 표면거칠기에는 미치는 영향이 적은 것으로 생각된다. 이상의 결과로부터 각 인자의 수준별 표면거칠기에 미치는 영향력이 큰 값을 연삭가공조건으로 선정하면 이것이 최적연삭조건이 되고, 본 연구의 실험조건 범위에서 적용가능한 최적연삭조건은 Table 7과 같다.

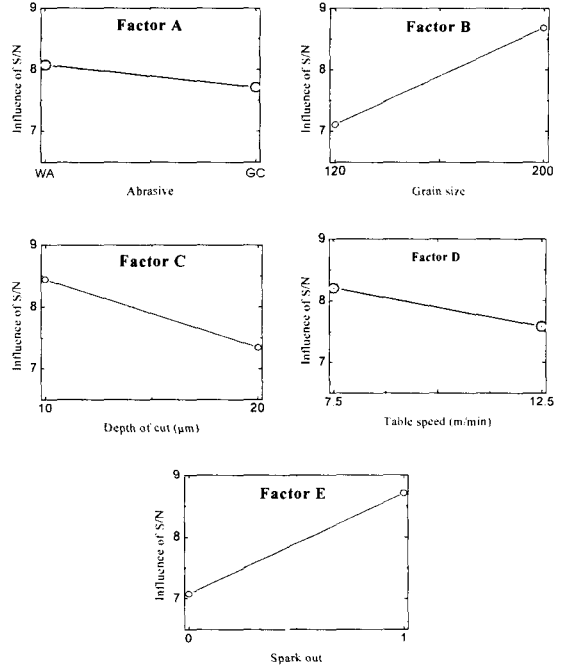


Fig. 3 Influence graph of S/N ratio for each factor

Table 7 Optimal grinding conditions of each factor

Factors	Notation	Conditions
Abrasive	A ₁	WA
Grain size(#)	B ₂	200
Depth of cut(μm)	C ₁	10
Table speed(m/min)	D ₁	7.5
Spark out(No.)	E ₂	1

한편, 연삭가공물의 표면거칠기는 각 인자별 수준변화에 따라서 영향을 받을 뿐만 아니라 각 인자들의 상호결합에 의해서도 영향을 받는다. Table 8은 인자들의 상호결합에 의한 영향력을 구해서 주요 영향인자들만 나타낸 것으로, 가령 입자의 크기와 스파크아웃의 상호작용(BE)은 다음과 같이 계산된다.

$$B_1E_1 = \frac{1}{4} (\eta_1 + \eta_4 + \eta_{10} + \eta_{11}) \quad (7)$$

$$B_1E_2 = \frac{1}{4} (\eta_2 + \eta_3 + \eta_9 + \eta_{12}) \quad (8)$$

Table 8 Response table of S/N ratio for interaction

Interaction	BC	BD	CE	BE
Level 11	7.527	7.851	7.685	5.883
Level 12	6.683	6.859	9.192	8.327
Level 21	9.380	8.453	6.469	8.271
Level 22	7.978	8.405	8.223	9.088

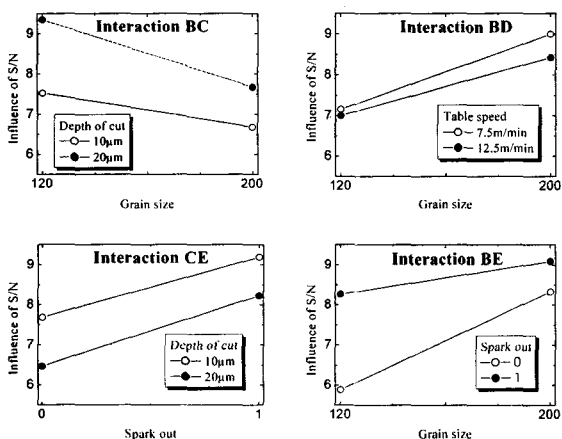


Fig. 4 Influence graph of S/N ratio for interactions

$$B_2E_1 = \frac{1}{4} (\eta_6 + \eta_7 + \eta_{13} + \eta_{16}) \quad (9)$$

$$B_2E_2 = \frac{1}{4} (\eta_5 + \eta_8 + \eta_{14} + \eta_{15}) \quad (10)$$

Fig. 4는 인자들의 상호결합에 의한 표면거칠기에 미치는 영향력을 도시한 것이다. 입자의 크기와 스파크 아웃의 상호결합(BE)은 표면거칠기에 가장 많은 영향을 미친다. 또한 입자의 크기와 절입깊이(BC), 절입깊이와 스파크아웃(CE), 입자의 종류와 테이블 속도의 상호결합(BD)도 표면거칠기에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

3.3 분산분석

각 인자와 상호결합이 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위해서 분산분석표를 Table 9에 나타내었다. 여기서 S_i 는 각 인자별 S/N ratio의 제곱합을, ϕ_i 는 각 인자별 자유도(degree of freedom)를,

Table 9 ANOVA for S/N ratio

	S_i	ϕ_i	V_i	F_{oi}
A	0.008	1	0.008	0.57
B	0.154	1	0.154	11.00**
C	0.074	1	0.074	5.28*
D	0.023	1	0.023	1.64
E	0.166	1	0.166	11.85**
BC	0.691	1	0.691	49.35**
BD	0.288	1	0.288	20.57**
CE	0.298	1	0.298	21.28**
BE	0.691	1	0.691	49.35**
(e)	0.291	20	0.014	
Total	2.684	31		

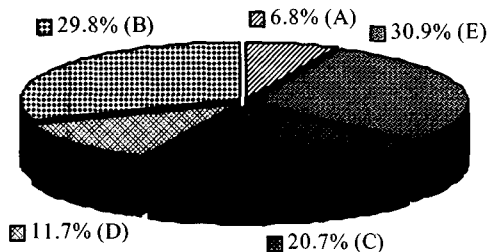


Fig. 5 Percentage distribution of surface roughness for each factor

V_i 는 제곱평균을, F_{oi} 는 제곱평균비를 나타낸다. 또한 *와 **는 F-검증을 통하여 그 값이 각각 95% ($F_{0.05} = 4.35$) 및 99% ($F_{0.01} = 8.10$)의 유의수준을 만족함을 의미한다. Fig. 5는 주요인자들이 표면거칠기에 영향을 미치는 정도를 기여율(percentage distribution)로 나타낸 것이다. 스파크아웃(E), 입자의 크기(B), 절입깊이(C)의 순으로 표면거칠기에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 표면거칠기 예측 및 검증

4.1 표면거칠기 예측

S/N ratio의 평가를 통하여 본 연구에서 적용할 수 있는 최적연삭조건은 Table 7과 같이 선정되었지만, 이러한 최적연삭조건에서 얻을 수 있는 표면

거칠기 값을 예측하였다. 또한, 임의의 연삭조건에서 얻을 수 있는 표면거칠기 값을 S/N ratio를 이용하여 예측하였다. 먼저 제어가능한 인자들의 최적 조합은 $A_1B_2C_1D_1E_2$ 이므로 이로부터 표면거칠기를 예측하면 다음과 같다.

$$\eta_{op} = \bar{\eta} + (A_1 - \bar{\eta}) + (B_2 - \bar{\eta}) + (C_1 - \bar{\eta}) + (D_1 - \bar{\eta}) + (E_2 - \bar{\eta}) = 10.531 \quad (11)$$

여기서 $\bar{\eta}$ 는 S/N ratio의 평균치로 7.892이다. 따라서 최적연삭조건에서 얻어질 수 있는 표면거칠기는 식 (11)과 (2)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$Ra(op) = 10^{-10.531/20} = 0.29\mu m \quad (12)$$

한편 S/N ratio를 이용한 표면거칠기 예측기법의 유효성을 알아보기 위해서, 최적연삭조건이 아닌 설정가능한 임의의 조건에서의 표면거칠기를 예측하였다. 임의의 두 연삭조건은 직교배열표에서 실험을 하지 않은 조건으로서 $A_1B_2C_2D_2E_1$ 과 $A_1B_1C_1D_1E_2$ 으로 선택하였다. 표면거칠기의 예측 과정은 식 (13), (14), (15)와 같다.

$$\eta_{A_1B_2C_2D_2E_1} = \bar{\eta} + (A_1 - \bar{\eta}) + (B_2 - \bar{\eta}) + (C_2 - \bar{\eta}) + (D_2 - \bar{\eta}) + (E_1 - \bar{\eta}) = 7.188 \quad (13)$$

$$Ra(A_1B_2C_2D_2E_1) = 0.437\mu m \quad (14)$$

$$Ra(A_1B_1C_1D_1E_2) = 0.356\mu m \quad (15)$$

각 인자들로부터 표면거칠기를 예측하기 위한 또 다른 방법으로 1차 중회귀식을 식 (16)과 같이 가정하였다.

$$Ra = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_4D + \beta_5E \quad (16)$$

식 (16)에 각 실험조건과 얻어진 표면거칠기를 대입하여 중회귀식에서 얻고자 하는 계수행렬 $[\beta]$ 는 다음과 같이 구한다.

$$[\beta] = ([X]^T[X])^{-1}[X]^T[Y] \quad (17)$$

여기서 $[X]$ 는 각 실험조건으로 구성되는 $[X]$ 행렬의 전치행렬(transpose matrix), $[Y]$ 는 실험에서 얻어진 표면거칠기 값으로 구성되는 행렬이다. 실험조건과 표면거칠기를 대입하면, 각 인자들로부터 얻을 수 있는 표면거칠기 중회귀식은 다음과 같다.

$$Ra(ABCDE) = 0.49 + 0.015A - 0.079B + 0.053C + 0.035D - 0.077E \quad (18)$$

식 (18)에서 입자의 크기(B)와 스파크아웃 회수(E)가 증가할 수록 표면거칠기는 좋아짐을 알 수 있고, 또한 절입깊이(C)와 테이블 속도가 감소할 수록 표면거칠기는 좋아짐을 알 수 있다. 한편, 구해진 표면거칠기 중회귀식이 얼마나 유효한가를 평가하기 위해서 결정계수(R^2)를 구하였다. 일반적으로 결정계수의 크기는 $0 < R^2 < 1$ 이고, 1에 가까울 수록 회귀식의 정도가 좋다. 식 (18)에서 계산된 결정계수는 $R^2 = 0.736$ 이다. 또한 잔차의 제곱평균이 0.0027로 매우 작기때문에 구해진 중회귀식은 충분히 유효함을 알 수 있다. 표면거칠기 중회귀식에 대한 분산분석표는 Table 10에 나타내었다.

S/N ratio에서와 마찬가지로 식 (18)에서 구한 중회귀식에 최적연삭조건($A_1B_2C_1D_1E_2$) 및 임의의 두 조건($A_1B_1C_2D_2E_1$, $A_1B_1C_1D_1E_2$)을 대입하여 표면거칠기를 예측하면 각각 다음과 같다.

$$Ra(A_1B_2C_1D_1E_2) = 0.28\mu m \quad (19)$$

$$Ra(A_1B_2C_2D_2E_1) = 0.449\mu m \quad (20)$$

$$Ra(A_1B_1C_1D_1E_2) = 0.36\mu m \quad (21)$$

이들 결과는 S/N ratio를 이용하여 예측한 표면거칠기 값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 10 Analysis of variance for multiple regression

	S_i	ϕ_i	V_i	F_{0i}
Regression	0.0755	5	0.0151	5.5917*
Residual	0.0270	10	0.0027	
Total	0.1025	15		

4.2 실험적 검증

최적연삭조건과 임의의 두 연삭조건에 대하여 실험을 실시하여 표면거칠기를 측정하였다. 실험과정에서 생기는 오차를 최소화하기 위해서 각 조건에서의 실험은 3회씩 실시하고, 표면거칠기는 각 공작물에서 5회씩 측정하여 평균치를 취하였다. Fig. 6은 각 연삭조건에서 S/N ratio와 중회귀식으로 부터 구한 표면거칠기와 실험을 통해서 얻어진 표면거칠기를 비교하여 나타낸 것이다. 실험결과에서 얻은 표면거칠기가 S/N ratio와 중회귀식으로부터 구한 표면거칠기가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 실험계획법을 통해서 제한된 조건범위에서 표면거칠기를 가장 좋게 하는 최적연삭조건을 선정하는 것이 가능하고, 또한 표면거칠기를 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

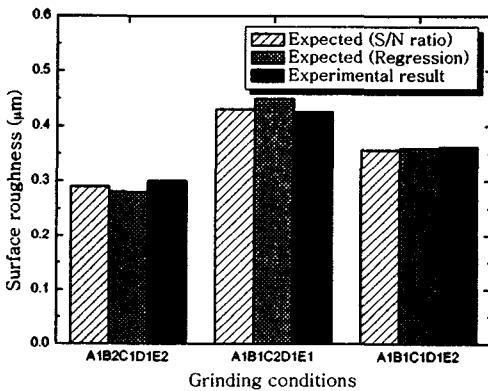


Fig. 6 Surface roughness comparison between expected and experimental result

5. 결론

본 연구는 평면연삭에서 실험계획법을 이용하여 최소의 실험으로 가공물의 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적연삭조건을 선정하고, 각 연삭조건에서 얻어질 수 있는 표면거칠기를 예측하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

표면거칠기 특성치인 S/N ratio를 이용하여 각 인자 및 인자들의 상호작용이 표면거칠기에 미치는 영향을 평가하였다. 특히 스프라크아웃의 유무, 연삭입자의 크기 및 절입깊이는 표면거칠기에 크게 영향을 미치고, 테이블 속도와 연삭입자의 종류는 큰 영향이 없음을 확인하였다. 또한 적용가능한 조건

범위에서 표면거칠기를 가장 좋게 하는 최적연삭조건(A₁B₂C₁D₁E₂)을 선정하였다.

최적연삭조건과 임의의 두 조건에 대하여 S/N ratio와 중회귀식을 이용하여 표면거칠기를 예측하였다. S/N ratio와 중회귀분석 결과, 최적연삭조건에서 얻을 수 있는 표면거칠기는 큰 차이가 없이 각각 0.29와 0.28µ m로 예측되었다. 최적연삭조건과 임의의 두 조건에서 실험을 실시하여 표면거칠기를 측정한 결과, S/N ratio와 중회귀분석을 통한 표면거칠기 예측이 유의함을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 2004년도 부경대학교 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Enemuoh, E. U., Elgizawy, A. S. and Okafor, A. C., "An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 12, pp. 1795-1814, 2001.
2. Lin, T. R., "Experimental design and performance analysis of TiN-coated carbide tool in face milling stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, No. 1, pp. 1-7, 2002.
3. Lin, T. R., "The use of reliability in the Taguchi method for the optimisation of the polishing ceramic gauge block," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 237-242, 2003.
4. Kim, J. D. and Choi, M. S., "Stochastic approach to experimental analysis of cylindrical lapping process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 1, pp. 51-59, 1995.
5. Dhavlikar, M. N., Kulkarni, M. S. and Mariappan, V., "Gombined Taguchi and dual response method for optimization of a centerless grinding operation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, No. 1-3, pp. 90-94, 2003.
6. Hogg, R. V. and Ledolter, J., *Applied statistics for engineers and physical scientists*, Macmillan

publishing company, New York, 1992.

7. Ahn, J. Y., Kim, D. E., Choi, J. Y. and Shin, K. H., "Friction properties of carbon coated ultra-thin film using Taguchi experimental design," Journal of KSPE, Vol. 20, No. 4, pp. 143-150, 2003.