

# Taguchi 기법을 이용한 형상오차 예측 및 최적조건 선정

지용주\*, 이상진(부경대원), 곽재섭, 하만경(부경대), 전재억(부산정보대)

## Geometric error Prediction and Grinding Condition Optimization using Taguchi Methods

Long-Zhu Chi, Sang-Jin Lee, Jea-Seob Kwak, Man-Kyung Ha, Jae-Uhk Jun

### ABSTRACT

Grinding process is different from other machining processes such as turning, milling and drilling because the cutting edges in a grinding wheel doesn't have uniformity and acts differently on the workpiece at each grinding. This study focus on predicting the geometric error produced during surface grinding and selecting an optimal grinding condition to reduce the geometric error. To achieve the aim, the Taguchi design of experiments was applied and the S/N ratios of each grinding was used for evaluating the results. The predicted quantities by the S/N ratios were compared with the experimental results.

Key Words : Geometric error (형상오차), Taguchi method (다구찌기법), Optimal condition (최적조건), Surface grinding (표면연삭)

### 1. 서론

연삭가공은 다른 절삭가공에 비해 관여하는 인자가 많고 그 인자들이 상호작용하여 가공물의 품질에 영향을 미치므로, 각 인자들의 영향특성을 파악하고 체계화할 필요가 있다. 어떤 공정에 관여하는 인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하는 방법 중 실험계획법이 널리 사용되고 있다.

Nakano<sup>1</sup> 등은 평면연삭에서 공작물의 열변형과 형상오차에 대해서 이론과 실험적인 연구를 하였다. Yokoyama<sup>2</sup> 등은 슛돌축의 탄성변위와 피삭재의 열팽창량 등을 고려한 실험과 단순화된 3차원 모델을 이용한 해석결과를 비교하였다. Jeong<sup>3</sup> 등은 실험계획법을 이용한 세라믹 재료의 최적 연삭조건에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 평면연삭에서 여러 인자들이 형상오차에 미치는 영향을 분석하고, 제한적인 가공조건 범위에서 제일 작은 형상오차를 얻을 수 있는 최적 연삭조건을 선정하고자 한다. 또한 연삭조건에 따른 형상오차를 예측할 수 있는 방법을 제안하고, 실험을 통하여 얻어진 값과 비교하여 그 유효성을 평가하고자 한다.

### 2. 실험계획법

#### 2.1 Taguchi기법

공정 변수와 최종 제품의 품질간의 관계 규명 및 최적화 작업에서 실험횟수를 최소화하고 공정변수가 잡음에 대하여 강건해야 하는 요구사항을 만족시키기 위한 대표적인 실험계획법으로 다구찌기법을 사용하였다. 다구찌기법에서는 신호 대 잡음의 비율을 의미하는 SN비를 사용하는데, 마모, 오차, 불량률 등과 같이 작을 수록 좋은 경우에는 망소 특성을 이용하여 아래와 같이 계산한다.

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

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

#### 2.2 분산분석

분산분석은 특성치의 산포를 제공함으로 나타내고, 이 제공함을 실험과 관련된 인자마다의 제공함으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요

인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 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.<sup>4</sup>

### 3. 최적연삭조건선정

#### 3.1 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치와 요인 및 특성치를 개략적으로 나타낸 것이다. 본 연구의 특성치인 형상오차는 삼차원 측정기를 이용하여 가공면의 좌, 우측과 중앙부에서 연삭 방향을 따라 공작물 전체길이의 좌표 값들을 측정하였고, 그 값을 평균하여 획득하였다. 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 이송속도, 연삭깊이 및 숫돌의 입도를 인자로 하였고, 각 인자의 수준은 3수준으로 하였다.

Table 5는 실험에 사용된  $L_{27}(3^{13})$  표준직교배열 표에 실험을 통하여 측정된 형상오차 값과 망소특성치  $\eta$ 를 함께 배열한 것이다.

#### 3.3 실험결과 및 분석

Table 5의 S/N ratio를 이용하여 각 인자가 서로 다른 수준에서 형상오차에 대한 영향력(influence), 그리고 인자별로 형상오차에 대한 영향력의 차(difference)를 다음과 같이 구할 수 있다. 예를 들어 연삭깊이 C의 영향력과 영향력의 차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_0 = \frac{1}{9}(\eta_1 + \eta_4 + \eta_7 + \eta_{10} + \eta_{13} + \eta_{16} + \eta_{19} + \eta_{22} + \eta_{25}) \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{1}{9}(\eta_2 + \eta_5 + \eta_8 + \eta_{11} + \eta_{14} + \eta_{17} + \eta_{20} + \eta_{23} + \eta_{26}) \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{1}{9}(\eta_3 + \eta_6 + \eta_9 + \eta_{12} + \eta_{15} + \eta_{18} + \eta_{21} + \eta_{24} + \eta_{27}) \quad (4)$$

$$Differeoe = |C_0 - C_1| + |C_1 - C_2| \quad (5)$$

Fig. 2는 형상오차에 대한 각 인자의 수준별 영향

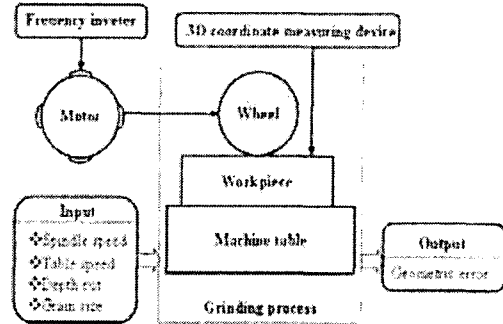


Fig. 1 Experimental setup and input-output parameters

Table 1 Experimental equipments

Instrument	Model
Grinding machine	Horizontal spindle surface grinder
3D Coordinate measuring device	OMS-600(Mahr, Germany)
Frequency inverter	SV037I3-2N (LG)

Table 2 Fixed conditions in experiment

Conditions	Values
Grinding wheel	Abrasive: WA, Grade: K Structure: m, Binder: Vitrified
Workpiece	SKH51(HRC55) (100? 0? 0mm)
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	mm	10	15	20
D	Grain size	#	46	120	200

력과 그 차이를 나타낸 것이고, 여기서 영향력 차가 크게 나타나는 인자일수록 형상오차에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서 사용한 인자 중에서는 연삭깊이(C), 숫돌의 회전속도(A), 그리고 테이블의 이송속도(B)와 숫돌입자의 크기(D)의 순서로 형상오차에 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 3은 각 인자들이 형상오차에 영향을 미치는 정도를 기여율(percentage distribution)로 나타낸 것이다. 또한 각 인

Table 5 Orthogonal array table for L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>)

No	Factor													Geometric error(um)	S/Nratio, η <sub>i</sub> (dB)
	A	B	a*b	a*b <sup>2</sup>	C	a*c	a*c <sup>2</sup>	b*c	D	e	b*c <sup>2</sup>	e	e		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	-20.8
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	-26.0
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	27	-28.6
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	15	-23.5
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	21	-26.4
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	18	-25.1
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	20	-26.0
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	19	-25.6
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	26	-28.3
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	14	-22.9
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	18	-25.1
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	20	-26.0
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	13	-22.3
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	14	-22.9
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	20	-26.0
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	13	-22.3
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	18	-25.1
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	23	-27.2
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	17	-24.6
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	14	-22.9
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	23	-27.2
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	12	-21.6
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	16	-24.1
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	24	-27.6
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	16	-24.1
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	21	-26.4
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	24	-27.6

자의 각 수준 중 S/N ratio가 제일 큰 값을 연삭가 공조건으로 선정하면 이것이 형상오차를 제일 작게 하는 최적 연삭조건이 되고, 본 연구의 실험조건 범위에서 적용 가능한 최적 연삭조건은 Table 6 과 같다. 연삭깊이가 형상오차에 제일 큰 영향을 미치고, 그 크기가 작을수록 형상오차가 작게 나타나는데 이는 연삭깊이가 연삭저항, 숫돌과 공작물의 접촉면 온도에 제일 큰 영향을 주기 때문이며, 연삭깊이가 작을수록 연삭저항과 연삭온도도 따라서 낮아지기 때문이다.

### 3.4 분산분석

각 인자들이 형상오차에 미치는 영향을 알아보기 위한 분석표를 Table 7 에 나타내었다. 여기서 S는 각 인자별 S/N ratio의 제곱합을, ϕ는 각 인자별 자유도(degree of freedom)를, V는 제곱평균을, F<sub>0</sub>는 제곱평균비를 나타낸다. 또한 \*와\*\*는 F-검증을 통하여 그 값이 각각 95% 및 99%의 유의 수준을 만족함을 의미한다.

### 4. 형상오차 예측 및 검증

S/N ratio를 이용하여 인자들의 서로 다른 수준 조합에서의 형상오차를 예측할 수 있다. 먼저 앞에서 얻어진 본 연구에서 적용할 수 있는 최적연삭조건(A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>0</sub>D<sub>0</sub>)으로 부터 형상오차 값을 아래와 같이 예측하였다.

$$\eta_{op} = \bar{\eta} + (A_1 - \bar{\eta}) + (B_1 - \bar{\eta}) + (C_0 - \bar{\eta}) + (D_0 - \bar{\eta}) = -20.8 \quad (6)$$

여기서  $\bar{\eta}$ 는 S/N ratio의 평균치로 -25.0 이다. 따라서 최적연삭조건에서 얻어질 수 있는 형상오차 E<sub>g</sub>는 다음과 같이 계산된다.

$$E_g(op) = 10^{20.8/20} = 11.0(\mu m) \quad (7)$$

한편 최적연삭조건이 아닌 설정 가능한 임의의 조건에서의 형상오차도 같은 방법으로 아래와 같이

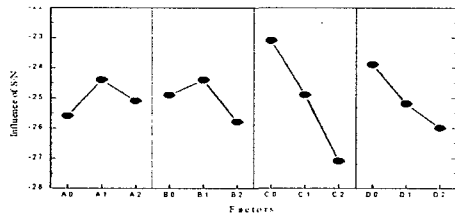


Fig. 2 Influence graph of S/N ratio for each factor

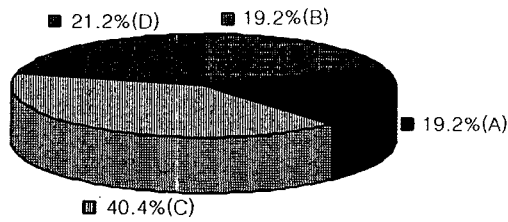


Fig.3 Percentage distribution of geometric error for each factor

Table 6 Optimal sets in this study

Factor	Values
Spindle speed	1800rpm
Table speed	8m/min
Depth of cut	10 <sub>μm</sub>
Grain size	#46

Table 7 ANOVA for S/N ratio

Factor	S	Φ	V	F <sub>0</sub>	F <sub>(0.05)</sub>	F <sub>(0.01)</sub>
A	6.21	2	3.11	4.90*	5.14	10.9
B	9.82	2	4.91	7.74**	5.14	10.9
C	70.15	2	35.08	55.35**	5.14	10.9
D	21.45	2	10.73	16.92**	5.14	10.9
A*B	1.38	4	0.34	0.54	4.53	9.15
A*C	2.59	4	0.65	1.02	4.53	9.15
B*C	0.96	4	0.24	0.38	4.53	9.15
e	3.80	6	0.63			
T	116.36	26				

예측하였다. 임의의 두 연삭조건은 직교배열표에서 실험하지 않은 조건으로서(A<sub>1</sub>B<sub>0</sub>C<sub>0</sub>D<sub>2</sub>) 과 (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>0</sub>) 으로 선택하였다.

$$E_y(A_1B_0C_0D_2) = 10^{23.4/20} = 14.8(\mu m) \quad (8)$$

$$E_y(A_1B_2C_1D_0) = 10^{24.0/20} = 15.8(\mu m) \quad (9)$$

예측결과의 정확여부를 확인하기 위해 실제 검증 실험을 실시하고 그 결과를 예측치와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 결과 예측치와 실제 실험치가 잘 일치하고 예측효과가 우수함을 알 수 있다.

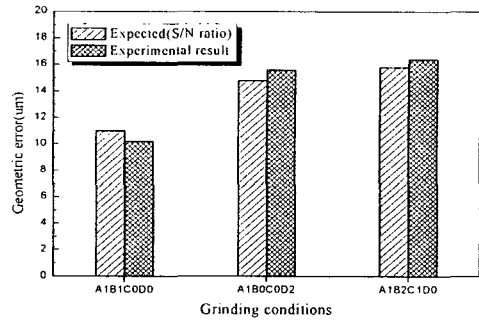


Fig. 4 Geometric error comparison between expected and experimental result

## 5. 결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 고속도 강을 WA숫돌로 평면연삭할 때, 형상오차를 최소화할 수 있는 최적조건을 선정하고, 각 연삭조건에서 얻을 수 있는 형상오차를 예측하는 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)본 연구에서 사용한 인자 및 실험조건 범위에서는 연삭깊이(C), 숫돌의 회전속도(A), 그리고 테이블의 이송속도(B)와 숫돌입자의 크기(D)의 순서로 형상오차에 영향을 미침을 알 수 있다.
- (2)연삭가공면의 형상오차를 최소화할 수 있는 최적연삭조건으로는 주축회전속도1800rpm,테이블 이송속도 8m/min, 연삭깊이 10<sub>μm</sub>, 숫돌입자#46임을 알 수 있었다.
- (3)최적연삭조건과 임의의 두 조건에서 형상오차를 예측한 결과 실제와 큰 차이가 없었다. 이로부터 실험계획법을 통해 형상오차를 유의하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Nakano, Y., and Ota, K., "Analysis of Steady State Thermal Deformations of Workpiece During Surface Grinding Operation," Annals of the JSPE, Vol. 61, pp. 364~368, 1996.
2. Okuyama, S., "Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding," Annals of the JSPE, Vol. 64, pp. 1496~1501, 1998.
3. Jeong, E. S., Kim, S. C., So, E. Y., and Lee, K. S., "A Study on the Optimal Condition of Ceramics using the Design of Experiments," Annals of the KSPE, Vol. 19, pp141~146, 2002.
4. Park, S. H., "Morden Design of Experiments," Minyongsa, pp. 16~18, 2001.