

실험계획법을 이용한 연삭가공물의 형상오차 분석

지용주*, 광재섭⁺, 하만경⁺

(논문접수일 2004. 1. 2, 심사완료일 2004. 3. 30.)

Geometric Error Analysis of Surface Grinding by Design of Experiments

Long-Zhu Chi*, Jae-Seob Kwak⁺, Man-Kyung Ha⁺

Abstract

Various controllable parameters of an experiment have influence on grinding process. In order to get good products with a high quality, these parameters should be considered whether each parameter has relations to the quality. This paper describes the use of the design of experiments to minimize geometric error in surface grinding. Controllable parameters for the design of experiments were selected as spindle speed, table speed, depth of cut and grain size. From the experimental results, a degree of influence between these parameters and the geometric error was evaluated. An optimal set of grinding conditions was obtained by means of analysis of variance(ANOVA).

Key Words : Design of Experiments(실험계획법), Analysis of Variance(분산분석), Controllable Parameters(제어가능 인자), Geometric Error(형상오차), Optimal Conditions(최적조건)

1. 서론

연삭가공은 제품의 마무리 가공공정으로 치수 정밀도 및 표면성상이 우수한 제품을 얻을 수 있는 장점이 있어 표면 가공에 폭넓게 사용되어지고 있다. 평면 연삭에서의 평면도나 직진도 등 형상오차는 정밀기기의 직선 정도나 위치결정 정도에 직접 관계될 뿐만아니라 제품의 양부를 결정짓는 중요한 요인이다. 연삭 열이나 잔류응력에 의한 공작물의 변형⁽¹⁾, 연삭 점에서 발생하는 국부적 열 변형⁽²⁾, 유막에

의한 테이블의 부상⁽³⁾, 스톨과 공작물의 접촉강성 등이 형상오차에 영향을 미치는 것으로 밝혀져 있다⁽⁴⁾. 그 중에서 열변형 및 스톨과 공작물의 접촉강성이 지배적인 영향을 미치고 있다. 이와 같이 형상오차에 관여하는 가공변수가 다양하고, 절삭조건 사이의 상관성이 비선형적이기 때문에 연삭가공면의 형상오차를 정확히 파악하기 힘들며, 형상오차에 영향을 미치는 인자들의 영향을 파악하고 체계화할 필요가 있다. 어떤 공정에 관여하는 인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하는 방법 중 실험계획법은

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

최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있으므로 널리 사용되고 있다.

Nakano 등⁽⁵⁾은 평면연삭에서 가공 중에 일어나는 공작물의 열변형과 연삭 후 공작물의 형상오차에 대해서 이론과 실험적인 연구를 하였다. 또 Yokoyama 등⁽⁶⁾은 슛돌 축의 탄성변위와 피삭재의 열팽창량 등을 고려한 실험과 단순화된 3차원 모델을 이용한 해석결과를 비교하였다. Hong 등⁽⁷⁾은 실험계획법을 이용하여 선삭에서 표면거칠기 예측에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 실험계획법을 이용하여 고속도강(SKH51)을 WA 슛돌로 평면연삭할 때 형상오차에 영향을 미치는 4가지 인자들에 대하여 영향 정도를 분석하고 형상오차를 줄이는 최적의 연삭조건을 도출하였다. 효율적인 실험을 위해 직교배열을 이용하였으며, 실험결과에 대한 평가는 분산분석 (analysis of variance) 방법으로 수행하였다.

2. 형상오차 및 실험계획법

2.1 연삭가공물의 형상오차

Fig. 1은 연삭가공 시 열변형과 탄성변형에 의한 형상오차의 생성 원리 및 형태를 모델화하여 나타낸 것이다. 과도한 연삭열로 인해 공작물은 A와 같은 볼록한 형태로 변형하게 된다. 또한 연삭가공 중에 연삭저항으로 인하여 슛돌 축 및 공작물은 탄성변위가 발생하여, 슛돌의 실제 운동 궤적은 설정한 운동궤적 C와 다른 B의 경로를 따르게 된다. 따라서 연삭가공 중 실제 절입깊이는 설정 절입깊이와 다르며 실제의 절입깊이는 가공 중 수시로 변화한다. 이러한 변화 때문에 가공 면에는 결국 형상오차가 발생한다. 열변형에 의해 공작물은 볼록한 형태로 되어 이는 실제 절입깊이를 크게하고, 결국 냉각된 공작물은 오목한 형태의 형상오차가 발생한다. 반대로 슛돌 축과 공작물의 탄성변위는 실제 절입깊이를 작아지게 하는데, 이러한 탄성변위는 연삭이 시작되는 부분부터 서서히 축적되어 연삭이 끝날 때 제일 커지기 때문에, 결국 공작물은 탄성변위에 의해서 연삭이 끝나는 점이 시작 점 보다 높아지는 형태의 형상오차가 발생하게 된다. 공작물의 열변형과 슛돌 축 및 공작물의 탄성변위는 각 자가 형상오차에 미치는 영향이 서로 다르기 때문에 가공조건이 다를 때 가공 면의 형태도 서로 다르게 나타난다.

Fig. 2는 특정한 조건에서 연삭가공된 면의 형상을 측정

하여 나타낸 것이다. (a)에서 볼 수 있듯이 연삭깊이가 작고 테이블의 이송속도가 클 때, 발생하는 연삭열은 적고 슛돌과 공작물의 접촉시간이 짧기 때문에 연삭열에 의한 열변형은 아주 작고, 슛돌 축과 공작물의 탄성변위가 주된 요인이기 때문에 연삭가공 면은 연삭이 끝나는 점이 연삭 시작 점보다 높아지는 경사면으로 나타내고 있다. 반대로 (b)에서 볼 수 있듯이 연삭깊이가 크고 테이블의 이송속도가 작을 때에는 열변형이 주된 요인이므로 연삭가공 면은 오목한 형태를 나타내고 있다. 이와 같이 형상오차의 발생원인이 복잡하고, 또한 영향을 미치는 인자들이 다양하므로 형상오차에 대한 보다 효과적인 평가방법이 필요한 실정이다.

2.2 실험계획법

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 결과 값 즉 특성치(characteristic value)에 대해서, 이에 영향을 미치고 있는 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

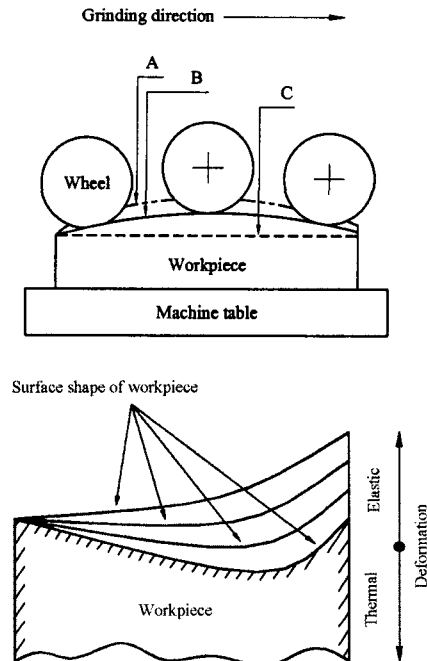


Fig. 1 Patterns of the workpiece deformation

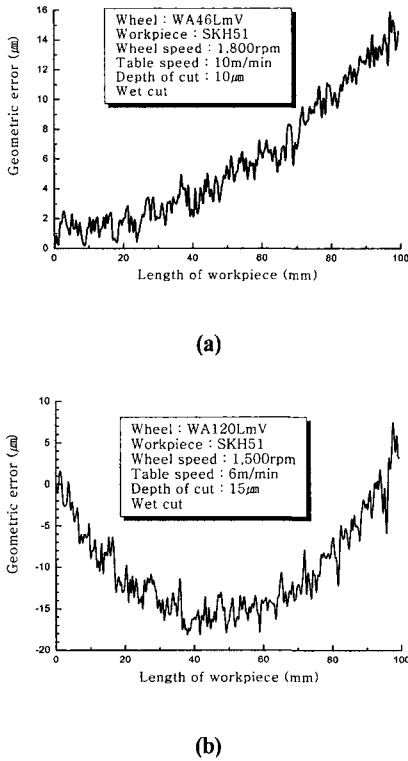


Fig. 2 Examples of geometric error in workpiece

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 함으로 나타내고 이 제곱 함을 실험과 관련된 인자 별의 제곱 함으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 인자의 제곱 함을 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 특성 치에 대하여 요인으로서 A, B, C 및 오차가 있을 경우, 각각의 변동 즉 제곱 함을 S_A, S_B, S_C, S_E 라 하고, 요인간의 교호 작용의 제곱함을 $S_{A \times B}, S_{A \times C}, S_{B \times C}$ 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 각각이 각각 얼마나 큰 영향을 주는 요인인가를 아닌가를 결정하는 것이다. 각 요인에 의하여 발생하는 변동 즉 제곱 함은 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 함을 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 요인 A가 오차에 비해 통계적으로 유의한 영향을 준다고 한다⁽⁸⁾.

3. 실험계획법에 의한 형상오차 분석

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 실험 장치와 요인 및 특성치를 개략적으로 나타낸 것이다. 주축의 회전수가 변속이 가능하도록 인버터(inverter)를 부착하였고 삼차원 측정기를 이용하여 가공면의 좌, 우측과 중앙부에서 연삭 방향을 따라

공작물 전체길이의 좌표 값들을 측정하였고, 그 값을 평균하여 본 연구의 특성치인 형상오차로 하였다. 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 슷들의 입도를 인자로 하였고, 각 인자의 수준은 3수준으로 하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

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 이송속도(B), 연삭깊이(C) 사이의 교호작용을 고려하여 총 27회의 실험회수를 가지는 $L_{27}(3^3)$ 표준 직

교배열표를 적용하였다. Table 5는 $L_{27}(3^3)$ 표준 직교배열표에 각 인자와 앞에서 논한 교호작용 및 인자별 각 3수준을 형상오차 측정치와 함께 배열한 것이다.

직교배열표에 의한 가공실험을 통하여 측정된 형상오차를 토대로 분산분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 F_0 값을 살펴보면 $A \times B$, $A \times C$, $B \times C$ 의 작용은 무시할 수 있을만큼 작으므로 이를 오차항에 풀링하여 다시 분산분석한 결과를 Table 7에 나타내었다. Table 7로부터 얻어진 각 인자들의 형상오차에 미치는 정도를 기여율(percentage distribution)로 Fig. 4와 같이 나타내고 있다. 형상오차에 기여하는 인자는 연삭깊이(C)-주축속도(A)-스틀입도(D)-테이블의 이송속도(B)의 순서로 나타나고 있다. 연삭깊이가 형상오차에 제일 큰 영향을 끼치는 것은 연삭깊이가 연삭저항, 슷들과 공작물의 접촉면 온도에 제일 큰 영향을 주기 때문이라고 사료된다.

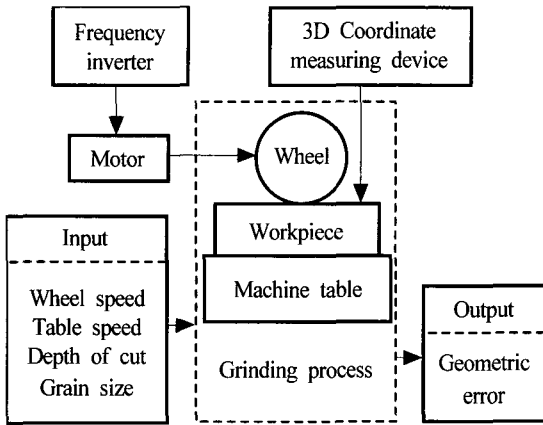


Fig. 3 Experimental setup and input-output parameters

Table 1 Experimental equipments

Instrument	Model
Grinding machine	Horizontal spindle surface grinder
3D Coordinate measuring device	OMS-600(Mahr, Germany)
Frequency inverter	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													Geometric error(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	15
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	29
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	14
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	20
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	17
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	22
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	19
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	26
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	16
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	16
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	20
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	11
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	13
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	20
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	12
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	18
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	17
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	21
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	14
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	22
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	12
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	16
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	25
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	14
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	27
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	26

Table 6 ANOVA table for geometric error

Factor	S	Φ	V	F ₀	F _(0.05)	F _(0.01)
A	110.9	2	55.45	3.74	5.14	10.9
B	70.7	2	35.35	2.39	5.14	10.9
C	236.0	2	118.0	7.96	5.14	10.9
D	89.3	2	44.65	3.01	5.14	10.9
A×B	32.9	4	8.23	0.56	4.53	9.15
A×C	7.6	4	1.9	0.13	4.53	9.15
B×C	25.7	4	6.43	0.43	4.53	9.15
E	88.9	6	14.82			
T	662.0	26				

Table 7 ANOVA table for geometric error after pooling

Factor	S	Φ	V	F ₀	F _(0.05)	F _(0.01)
A	110.9	2	55.45	6.43**	3.55	6.01
B	70.7	2	35.35	4.10*	3.55	6.01
C	236.0	2	118.0	13.69**	3.55	6.01
D	89.3	2	44.65	5.18*	3.55	6.01
E	155.1	18	8.62			
T	662.0	26				

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

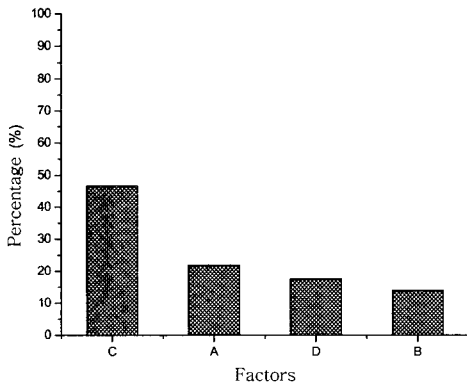


Fig. 4 Percentage distribution of factors

Table 8 Predicted average geometric error

Factors	Average values	
	$\hat{\mu}(A_0)$	
A	$\hat{\mu}(A_1)$	20.6
	$\hat{\mu}(A_2)$	15.9
	$\hat{\mu}(A_2)$	19.7
B	$\hat{\mu}(B_0)$	19.6
	$\hat{\mu}(B_1)$	16.4
	$\hat{\mu}(B_2)$	20.1
C	$\hat{\mu}(C_0)$	15.2
	$\hat{\mu}(C_1)$	18.4
	$\hat{\mu}(C_2)$	22.4
D	$\hat{\mu}(D_0)$	16.4
	$\hat{\mu}(D_1)$	18.8
	$\hat{\mu}(D_2)$	20.9

A, B, C, D 각 인자의 모평균의 점 추정치를 구하여 Table 8에 배열하였다.

직교배열표를 사용한 실험계획에서는 오차변동이 상당히 크게 나오는 경우가 많으므로 신뢰구간의 신뢰율을 90%로 흔히 사용한다. 본 연구에서도 90%의 신뢰구간으로 신뢰폭을 구하면 아래와 같다.

$$t(\Phi'_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_E}{9}} = 1.70 \quad (3)$$

Table 8과 식 (3)으로부터 각 인자의 신뢰구간을 구하여 Table 9에 나타냈고, 이를 그림으로 표시하면 Fig. 5와 같다. Table 9 및 Fig. 5로부터 알 수 있듯이 본 연구의 실험 조건 범위에서 형상오차를 최소화할 수 있는 요인 및 수준의 조합은 C₀A₁D₀B₁이며 이를 나타내면 Table 10과 같다. 연삭깊이는 제일 작은 10 μ m, 주축 회전 속도는 중간치인 1800rpm, 슷돌입자는 입자가 제일 큰 #46, 테이블의 이송속도는 중간치인 8m/min가 형상오차를 최소화 할 수 있는 최적의 가공조건으로 나타났음을 알 수 있다. 연삭깊이가 작을 수록 형상오차가 작아지는데 이는 연삭깊이가 작을 수록 연삭력, 연삭온도도 따라서 낮아지기 때문이다. 주축 회전속도는 중간치인 1800rpm에서 형상오차가 제일 작게 나타나는데 이는 주축회전속도가 높아지면 슷돌과 공작물

Table 9 Confidence range of each factor

Factors	Average values	
A	$\mu(A_0)$	18.9~22.3
	$\mu(A_1)$	14.2~17.6
	$\mu(A_2)$	18.0~21.4
B	$\mu(B_0)$	17.9~21.3
	$\mu(B_1)$	14.7~18.1
	$\mu(B_2)$	18.4~21.8
C	$\mu(C_0)$	13.5~16.9
	$\mu(C_1)$	16.7~20.1
	$\mu(C_2)$	20.7~24.1
D	$\mu(D_0)$	14.7~18.1
	$\mu(D_1)$	17.1~20.5
	$\mu(D_2)$	19.2~22.6

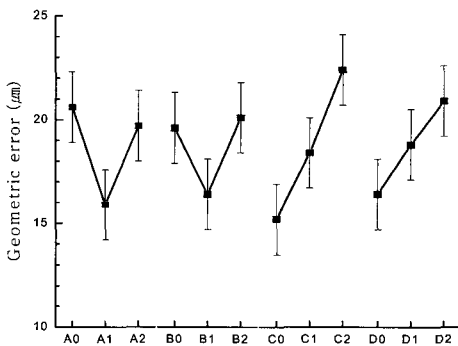


Fig. 5 Graphical illustration of geometric error

Table 10 Optimal sets in this study

Factor	Values
Spindle speed	1800rpm
Table speed	8m/min
Depth of cut	10 μ m
Grain size	#46

의 접촉면 온도도 높아지며 따라서 열변형이 증가하기 때문이고, 주축회전속도가 낮아지면 연삭력이 커짐으로 하여 주축의 탄성변위가 따라서 커지기 때문이라고 보여진다. 연삭입도에서는 입자크기가 제일 큰 #46에서 형상오차가 제일 작게 나타나는데 이는 입자가 클수록 스톨 표면의 단위면적당 입자의 수가 감소하고 그만큼 칩이 배출될 수 있는 공간이 커지기 때문에 연삭력은 작아지고, 연삭온도도 따라서 낮아지기 때문이다. 테이블의 이송속도는 중간치인 8m/min에서 형상오차가 제일 작게 나타나는데 이는 이송속도가 작으면 공작물과 스톨의 접촉시간이 길어져 연삭온도가 높아지며 따라서 열변형이 커지고, 반대로 이송속도가 너무 크면 연삭력이 커짐으로 하여 주축의 탄성변위가 커지기 때문이라고 보여진다.

4. 결론

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

- (1) 연삭가공면의 형상오차에 영향을 미치는 인자는 연삭깊이(C)-주축속도(A)-스톨입도(D)-테이블의 이송속도(B)의 순서로 나타났다.
- (2) 연삭가공면 형상오차를 최소화할 수 있는 최적 연삭조건으로는 주축회전속도 1800rpm, 테이블이송속도 8.0m/min, 연삭깊이 10 μ m, 스톨입자 #46임을 알 수 있었다.
- (3) 실험계획법을 통해 최소의 실험회수로 통계적 분석을 거쳐 연삭가공면 형상오차에 영향을 미치고 있는 가공인자, 연삭가공면 형상오차를 최소화할 수 있는 최적 연삭조건을 규명하는 것이 가능하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경첨단에너지기기연구소센터 지원(과제번호: R12-2003-001-02003-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kovach, J. A., and Malkin, S., 1998, "Thermally Induced Grinding Damage in Superalloy Materials," *CIRP*, Vol. 37, pp. 309~313.
- (2) Okuyama, S., and Kawamura, S., 1979, "Local Thermal Expansion of Workpiece under Grinding," *JSPE*, Vol. 45, No. 5, pp. 418~424.
- (3) Nakano, Y., and Shiozaki, S., 1969, "On the Floating Behavior of Surface Grinding Machine Table (3rd Report)-The Effect of the Behavior of Tables on the Machining Accuracies," *JSME*, Vol. 35, No. 269, pp. 225~229.
- (4) Nishihara, T., Okuyama, S., and Kawamura, S., 1988, "Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding-Effect of Bending Caused Grinding Heat," *JSPE*, Vol. 54, No. 8, pp. 1496~1501.
- (5) Nakano, Y., and Ota, K., 1996, "Analysis of Steady State Thermal Deformations of Workpiece During Surface Grinding Operation," *JSPE*, Vol. 61, pp. 364~368.
- (6) Okuyama, S., 1998, "Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding," *JSPE*, Vol. 64, pp. 1496~1501.
- (7) Hong, M. S., 2001, "A Study on Prediction Model of Surface Roughness by the Orthogonal Design for Turning Process," *KSMTE*, Vol. 10, No. 2, pp. 89~94.
- (8) Park, S. H., 2001, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa, pp. 16~18.