

# 실험계획법과 보정가공을 이용한 비구면 유리렌즈 성형용 코어의 초정밀 연삭가공 최적화

김상석\*, 이용철#, 이동길\*, 김혜정\*, 김정호\*

## Ultra-precision Grinding Optimization of Mold Core for Aspheric Glass Lenses using DOE and Compensation Machining

Sang Suk Kim\*, Yong Chul Lee#, Dong Gil Lee\*, Hye Jeong Kim\* and Jeong Ho Kim\*

### ABSTRACT

The aspheric lens has become the most popular optical component used in various optical devices such as digital cameras, pick-up lenses, printers, copiers etc. Using aspheric lenses not only miniaturizes and reduces the weight of products, but also lower prices and higher field angles can be realized. Additionally, plastic lenses are being changed to glass lenses more recently because of low accuracy, low acid-resistance and low thermal-resistance in the plastic lenses. Currently, one fabrication method of glass lenses is using a glass-mold method with a high precision mold core for mass production.

In this paper, DOE (Design Of Experiments) and compensation machining were adopted to improve the surface roughness and the form accuracy of the mold core. The DOE has been done in order to discover the optimal grinding conditions which minimize the surface roughness with factors such as work spindle revolution, turbine spindle revolution, federate and cutting depth. And the compensation machining is used to generate high form accuracy of the mold core.

From various experiments and analyses, we could obtain the best surface roughness 5 nm in Ra, form accuracy 0.167  $\mu\text{m}$  in PV.

**Key Words** : Aspheric lens (비구면렌즈), Compensation cutting (보정가공), Design of experiments (실험계획법), Form accuracy (형상정밀도), Ultra-precision machining (초정밀가공)

### 1. 서론

급속한 산업발전과 더불어 정보기기, 디지털 카메라를 비롯한 영상·음향기기, 광픽업, 프로젝터, 휴대전화, 복사기 및 프린터 등의 초정밀 광학부품

<sup>1,2</sup>에 대한 수요가 날로 증가하고 있음과 더불어 고해상도화·고휘도화 등의 광학적 성능향상의 요구도 커지고 있다. 이러한 요구충족을 위해서는 광학렌즈의 비구면화와 플라스틱렌즈에서 유리렌즈로의 변환<sup>3,4</sup>이 불가피하다. 아울러 비구면 렌즈

☞ 접수일: 2007년 1월 12일; 게재승인일: 2007년 3월 20일

\* 한국광기술원

# 교신저자: 연암공업대학 컴퓨터응용기계과

E-mail: ycleee@yc.ac.kr Tel. (055) 751-2071

를 정밀하게 대량생산할 수 있는 방법인 초정밀 성형용 금형코어 제작과 성형기술이 뒤따라야 한다.

최근 다양한 연구분야에서 실험인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하기 위하여 실험계획법(design of Experimentns; DOE)을 적용<sup>5,6</sup>하고 있다. 실험계획법은 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가진다.

따라서 본 연구에서는 비구면유리렌즈 성형용 금형코어의 제작에 있어서 표면거칠기와 형상정밀도 향상을 위해서 실험계획법과 보정가공법을 도입하였다. 실험계획법에서는 금형코어를 연삭가공할 때 표면거칠기에 영향을 미치는 4 가지 인자, 즉 주축회전속도, 터빈회전속도, 이송속도 그리고 연삭깊이를 공정변수로 선택, 2<sup>4</sup> 요인배치법을 적용하여 최상의 표면거칠기를 얻을 수 있는 연삭조건을 구하였다. 이 방법으로 구한 최적연삭조건을 적용·연삭가공을 수행함과 동시에 공작물의 회전중심과 연삭숫들의 공구인선반경의 중심불일치로 발생하는 오차를 기상계측과 보정가공을 실시, 목표로 하는 정밀도 수준에 이를 때까지 반복·수행하여 고정밀도의 금형코어를 제작할 수 있는 초정밀 연삭가공의 최적화를 제안하였다.

## 2. 실험장비 및 방법

### 2.1 실험장비

본 연구에서는 유리렌즈 성형용 코어 가공을 위해 초정밀 연삭가공이 가능한 초정밀가공기(일본, Nachi-Fujikoshi 사, ASP01)를 사용하였다. 본 가공기는 2 개의 유정압 슬라이드가 직교 형태로 구동하는 3 축 가공기로서 유정압 베어링에 의해 구동되는 B 축 Rotary Table 에 공기 터빈 스피들이 장착되어 비구면 가공이 가능한 초정밀가공기이다. 안내면의 위치정밀도는 1 nm 의 정밀도를 가지며, 최대가공 직경 150mm 의 공작물 가공이 가능하다. 안내면의 구동은 AC Servo Motor 에 의해 구동된다. 초정밀가공기는 크린룸(Class 10,000)의 항온실에 설치되어져 주변온도 22±1℃로 일정하게 유지하고, 진동에 의한 영향을 피하기 위하여 특수 설계된 제진대 위에 설치하였다. 가공된 초경합금의 표면거칠기를 측정하기 위하여 초정밀 자유곡면 3-D 형상측정기(일본, Panasonic 사, UA3P)를 사용하였다.

Fig. 1 과 Fig. 2 는 본 연구에 사용된 초정밀가공

기와 초정밀자유곡면 3D 형상측정기를 각각 나타내었다.

### 2.2 실험계획법

본 연구에 사용된 공작물의 재질은 유리렌즈

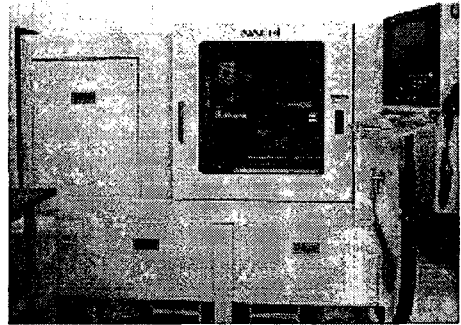


Fig. 1 Micro-lens process machine  
(Japan, Nachi Co., ASP01)



Fig. 2 Ultra-high accurate 3-D profile-meter  
(Japan, Panasonic Co., UA3P)

성형용 금형코어 소재로 많이 쓰이고 있는 초경합금(WC, Co 0.5%)이고, 연삭가공에 사용된 공구는 다이아몬드숫들 입도 #2,000 을 사용하였다. 다이아몬드숫들 입도 #2,000 은 일반적으로 유리렌즈 성형용 초경합금 코어를 최종 정삭가공할 때 사용하였다.

본 연구에서는 특성치를 초정밀연삭가공 후 중심선평균거칠기 Ra 로 결정하고, 주축회전속도, 터빈회전속도, 이송속도 그리고 연삭깊이를 인자로 한 2<sup>4</sup> 요인배치법을 적용하여 실험을 수행하였다. Table 1 과 Table 2 에 2<sup>4</sup> 요인배치법에 적용한 실험인자와 실험점을 각각 나타내었다. 연삭가공 조건 변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 연삭

숫돌 드레싱을 주기적으로 실시하면서 실험을 수행하였으며, 가공 후 측정된 표면거칠기 분석은 실험계획법의 상용프로그램인 MINITAB 을 이용하였다.

Table 1 Factors and levels for experiment

Factor	Low Level (-)	High Level (+)
Work Spindle (rpm)	200	300
Turbine Spindle (rpm)	30,000	50,000
Feedrate (mm/min)	0.25	1.5
Depth of Cut ( $\mu\text{m}$ )	0.1	1.0

Table 2 Experimental points for experiment

Experimental points	Factors			
	Work spindle	Turbine Spindle	Feedrate	Cutting depth
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

### 2.3 보정가공

보정가공 실험에서의 장치 및 공작물은 2.1 절에서와 같고, 측정장치는 Nachi-Fujikoshi 사의 기상계측기와 NA-OMM 프로그램을 이용하였다.

초정밀가공에서는 공구인선형상이 그대로 공작물에 전사되는 원리를 이용하여 가공하는데, 공구인선의 형상이 완벽한 곡률반경을 갖지 않았을 경우에는 가공 접촉점이 일치하지 않아 실제의 가공면은 가공형상오차가 발생한다. 공작물의 회전중

심과 연삭숫돌의 공구인선반경의 중심이 일치하지 않아 발생하는 오차는 기계상에서 X 좌표 값을 변경함으로써 보정이 가능하다. 이때의 가공조건은 실험계획법에 의해 도출된 최적 연삭조건을 사용하였으며, 그 조건은 연삭깊이 0.1  $\mu\text{m}$ , 이송속도 0.25mm/min, 주축회전속도 30,000rpm, 공작물회전속도 300rpm 이다. 가공된 금형코어는 고정밀도의 기상계측기로 측정된다. 측정결과에 따라 발생한 오차를 NA-OMM 프로그램을 이용하여 먼저 X 축 중심으로부터 생겨난 오차와 R 형상오차를 분석하고, 이들 오차만큼을 보정한 다음 연삭가공을 다시 실시한다. 가공과 측정의 이러한 과정을 목표로 하는 정밀도를 얻을 때까지 반복 · 수행하게 되며, Fig. 3 에 보정가공 흐름도를 나타내었다.

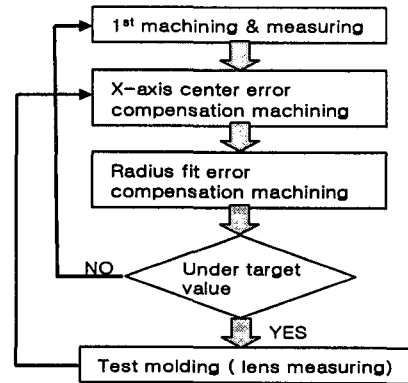


Fig. 3 Block diagram of compensation machining

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 실험계획법의 실험결과 및 고찰

초정밀연삭가공한 초경합금 금형코어의 측정결과 중심선평균거칠기 Ra 를 Table 3 에 나타내었다. Table 3 에서 알 수 있듯이 본 연구에서의 초경합금 연삭가공의 경우 연삭깊이(D) 0.1  $\mu\text{m}$ , 이송속도(C) 0.25mm/min, 터빈회전속도(B) 30,000rpm 에서 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 공작물 표면거칠기에 중요한 영향을 주는 주요 3 인자에 대해 3 인자 교호작용을 Pareto 분석하여 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 연삭깊이가 가장 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있다.

Table 4 는 본 실험에 사용된 주요인자와 3 인자

의 교호작용이 포함된 분산분석 결과를 나타낸 것이다. F-검증을 통해서 주요인자와 3 인자 교호작용이 유의함을 알 수 있다. Fig. 5 와 6 에 주요인자와 3 인자 교호작용이 표면거칠기에 미치는 효과를 각각 나타내었다

Table 3 Results of surface roughness according to cutting conditions

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Work Spindle	Turbine Spindle	Feedrate	Depth of Cut	Surface Ra(nm)		
1	1	15	1	1	200	3000	0.25	0.1	7.22	
2	2	9	1	1	300	3000	0.25	0.1	7.53	
3	3	3	1	1	200	5000	0.25	0.1	7.62	
4	4	5	1	1	300	5000	0.25	0.1	7.91	
5	5	7	1	1	200	3000	1.50	0.1	8.38	
6	6	4	1	1	300	3000	1.50	0.1	8.25	
7	7	6	1	1	200	5000	1.50	0.1	8.12	
8	8	16	1	1	300	5000	1.50	0.1	8.43	
9	9	8	1	1	200	3000	0.25	1.0	9.22	
10	10	11	1	1	300	3000	0.25	1.0	9.31	
11	11	14	1	1	200	5000	0.25	1.0	9.18	
12	12	10	1	1	300	5000	0.25	1.0	9.24	
13	13	13	1	1	200	3000	1.50	1.0	9.47	
14	14	2	1	1	300	3000	1.50	1.0	9.62	
15	15	12	1	1	200	5000	1.50	1.0	9.74	
16	16	1	1	1	300	5000	1.50	1.0	9.85	
17										

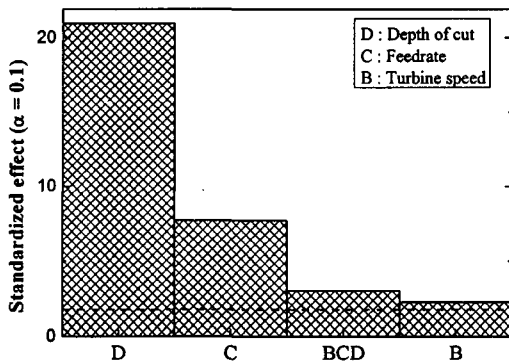


Fig. 4 Pareto chart of standardized effects

Table 4 Analysis of variance (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Main Effects	3	10.2856	10.2856	3.42854	171.84
3-Way Interactions	1	0.1743	0.1743	0.17431	8.74
Residual Error	11	0.2195	0.2195	0.01995	
Lack of Fit	3	0.0877	0.0877	0.02924	1.78
Pure Error	8	0.1317	0.1317	0.01647	
Total	15	10.6794			

Fig. 5 와 6 에서 알 수 있듯이 반응변수인 표면 거칠기 Ra 의 값은 작을수록 좋기 때문에 주요인자

들의 낮은 수준을 최적조건으로 선택할 수 있다.

초경합금을 소재로 비구면렌즈 성형용코어를 초정밀 연삭가공을 했을 때 표면거칠기에 기여하는 인자는 연삭깊이(D)와 이송속도(C)로 나타났다. 이 같은 결과는 초정밀연삭에 사용되는 연삭숫돌의 입자경이 10 μm 이하인 초미립자로 제작되어 연삭날의 낮은 돌출량과 협소한 칩포켓(Chip pocket)에서 기인한 것으로 보인다. 연삭날의 낮은 돌출량과 협소한 칩포켓은 미소량의 과다 연삭깊이에도 연삭날 마모와 눈메움>Loading) 현상이 쉽게 발생하게 된다. 이러한 결과들은 연삭성을 나쁘게 함은 물론 연삭면 표면거칠기의 변화에 직접적으로 악영향을 미치게 되는 것으로 판단된다. 아울러 연삭숫돌과 공작물의 접촉면에 작용하는 연삭력에도 영향을 받는 것으로 보인다.

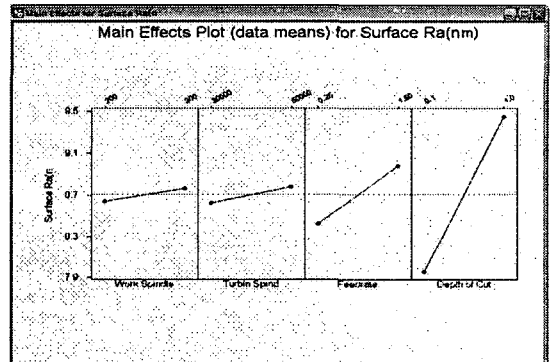


Fig. 5 Main effects plot for surface roughness Ra(nm)

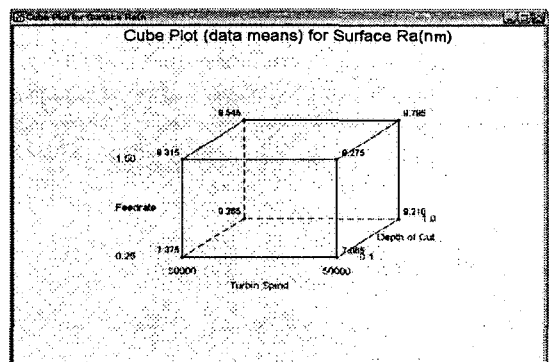


Fig. 6 Cube plot for surface roughness Ra(nm)

### 3.2 보정가공 실험결과 및 고찰

보정가공 실험에서는 1 차 가공된 공작물을 가공기의 고정척에서 떼어내지 않고 기상계측장치를

이용하여 X 축 중심 위치오차와 R 형상오차를 측정·평가하고 그 결과를 NA-OMM 프로그램으로 분석한 보정값으로 보정가공을 실시하였다. 1차 가공한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 1차 가공에서의 형상정밀도는 PV 0.572  $\mu\text{m}$ , X 축 중심위치오차는 0.000326mm, R 형상오차는 0.00134mm로 나타났다.

이 1차 가공 측정결과에 의하면 X 축 중심위치오차는 0.000326mm, R 형상오차는 0.00134mm로 보정가공이 필요하게 된다. 이러한 결과를 가지고 Stylus offset을 적용한 시뮬레이션을 하면, X 축 중심위치는 +0.00155mm, R 형상은 0.005mm를 보정가공하여야 하므로, 이를 토대로 2차보정가공을 수행하였다. 2차 보정가공의 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다.

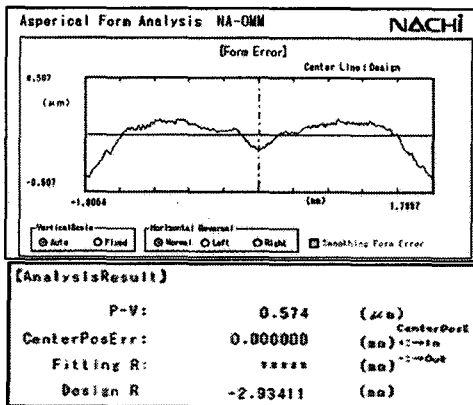


Fig. 7 Experimental results of 1st machining

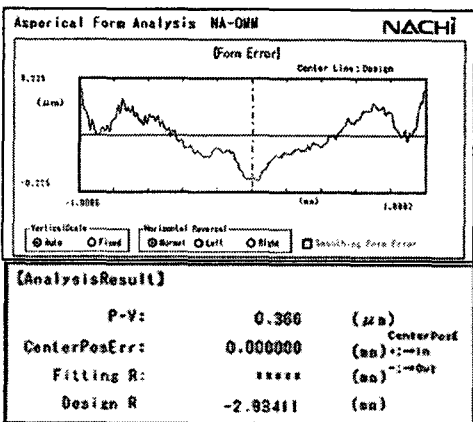


Fig. 8 Experimental results of 2nd machining

2차 보정가공한 결과, 형상정밀도 PV 치는 0.366  $\mu\text{m}$ 으로 좋아졌으며, X 축 중심위치오차는 0.000317 mm, R 형상오차는 0.00092mm로 나타났다. 2차 보정가공과 마찬가지로 Stylus offset을 적용한 시뮬레이션을 실시하여, X 축 중심위치는 +0.001mm, R 형상은 0.002mm를 보정, 3차 보정가공을 수행하였다. 3차 보정가공의 측정결과를 Fig. 9에 나타내었으며, 이것은 최종 정삭가공 후의 가장 좋은 형상정밀도로 PV 0.133  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이 값은 본 실험에서 설정한 목표치를 만족하므로 3차 가공을 최종공정으로 하였다.

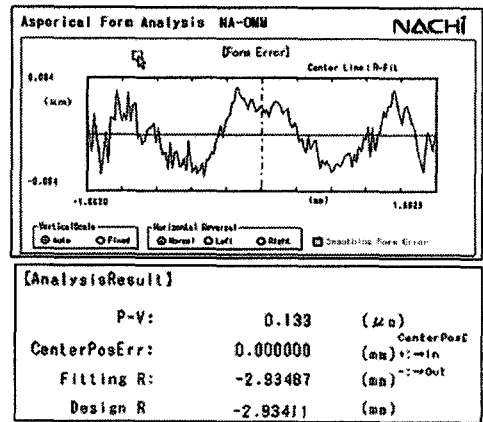


Fig. 9 Experimental results of 3<sup>rd</sup>(final) machining

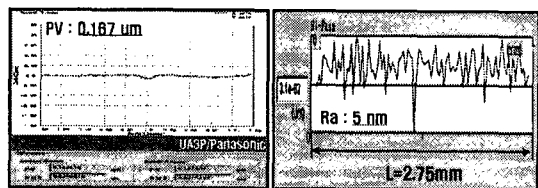


Fig. 10 Profile of form accuracy & surface roughness

Fig. 10에는 위와 같은 공정으로 보정가공한 금형코어를 일본 Panasonic사의 초정밀 3D 자유곡면형상측정기(UA3P)를 이용하여 측정된 형상정밀도와 표면거칠기 프로파일을 나타내었으며, Fig. 11에는 보정가공에 의해 가공된 비구면렌즈 성형용 금형코어의 사진을 실었다.

초정밀 비구면가공에서 X 축 중심위치오차와 R 형상오차를 측정된 후 보정가공을 실시하는 일련의 반복보정가공사이클을 수행함으로써 형상

오차를 감소시켜 목표로 하는 요구정밀도를 충족시키는 고품질의 금형코어 가공이 가능하였다.

분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

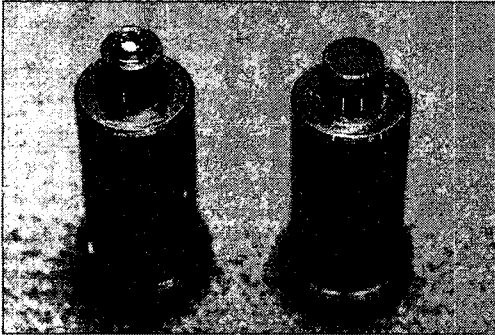


Fig. 11 Photograph of mold core

#### 4. 결론

비구면유리렌즈 성형용 금형코어 제작에 있어서 초경합금 소재를 입도 #2,000 의 다이아몬드연삭숫돌로 초정밀연삭을 할 경우, 표면거칠기와 형상정밀도를 좋게 할 수 있는 최적연삭조건을 구하기 위해 실험계획법과 보정가공을 적용· 실험한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 초경합금의 초정밀 연삭가공에서 표면거칠기에 가장 큰 영향을 주는 인자는 연삭깊이였으며, 다음으로 이송속도, 공구회전속도, 공작물회전속도 순으로 나타났다.

2. 표면거칠기를 가장 좋게 하는 최적연삭조건은 연삭깊이 0.1  $\mu\text{m}$ , 이송속도 0.25 mm/min, 터빈회전속도 30,000rpm, 주축회전속도 300rpm 으로 나타났다.

3. 연삭깊이와 공구회전속도, 공작물회전속도와 공구회전속도, 그리고 공구회전속도와 이송속도 간의 교호작용이 유의함을 알 수 있었다.

4. 보정가공에 의한 비구면유리렌즈 성형용 금형코어의 표면거칠기는 5nmRa, 형상정밀도는 PV 0.167  $\mu\text{m}$ 까지 가능하였다.

#### 후 기

본 논문은 산업자원부 지역산업기술개발사업의 중점기술개발사업(과제명:초정밀자유곡면가공기 및 가공기술개발, 과제번호: 10018065-2007-21)의 위탁과제인 “초정밀자유곡면 가공을 위한 연삭공정기술 개발” 사업결과의 일부이며, 이에 관계자 여러

1. Michaud, L., Tchang, J. P., Baril, C. and Gresset, J., “New Perspectives in Monovision - A Study Comparing Aspheric With Disposable Lenses,” International Contact Lens Clinic, Vol. 22, No. 90, pp. 203, 1995.
2. Kuriyagawa, T., Saeed, M., Zahmaty, S. and Syoji, K., “A new grinding method for aspheric ceramic mirrors1,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No. 4, pp. 387, 1996.
3. Suzuki, H. and Kodera, S., “Precision Grinding of Aspherical CVD-SiC Molding Die,” Journal of the Japan society for precision engineering, Vol. 64, No. 4, pp. 619, 1998.
4. Kwak, T. S., Kim, G. N. and Lee, Y. C., “Study on nano-mirror surface finishing on mold core to glass lens molding,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 97-104, 2006.
5. Alagumurthi, N., Palaniradja, K. and Soundararajan, V., “Optimization of Grinding Process Through Design of Experiment(DOE),” Materials and Manufacturing Processes, Vol. 21, No. 1-2, pp. 19-22, 2006.
6. Chi, L. Z., Kwak, J. S. and Ha, M. K., “Geometric Error Analysis of Surface Grinding by Design of Experiments,” Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 1-8, 2004.