

DOE를 적용한 비구면 Glass 렌즈 성형용 초경합금(WC) 코어 연삭가공 최적화

김현욱*, 정상화*, 안준형**, 차두환**, 이동길**, 김상석**,
김혜정**, 김정호#

Optimal Grinding Condition of Tungsten Carbide(WC) for Aspheric Glass Lens Using DOE

Hyun-Uk Kim*, Sang-Hwa Jeong*, Jun-Hyung Ahn**, Du-Hwan Cha**, Dong-Gil Lee**,
Sang-Suk Kim**, Hye-Jeong Kim**, Jeong-Ho Kim#

ABSTRACT

In recent years, the demands of the aspheric glass lenses increase since it is difficult to obtain the desirable performance in the plastic lens. Glass lens is manufactured by the forming with high precision mold core. This paper presents the analysis of optimal grinding condition of tungsten carbide(WC, Co 0.5%) using design of experiments(DOE). The process parameters are turbin spindle, work spindle, feedrate and depth of cut. The experiments results are evaluated by MINITAB software.

Key Words : Aspheric Lens(비구면 렌즈), Mold Core(금형코어), Design of Experiments(실험계획법)

1. 서 론

최근 메가픽셀급 고화소 구현을 위한 광학계 채용과 광학제품의 경박단소화로 인해 Plastic 렌즈 또는 구면 Glass 렌즈만으로는 요구되는 광학적 성능 구현이 힘들기 때문에 비구면 Glass 렌즈에 대한 요구가 증가하고 있다^[1]. 이러한 비구면 Glass 렌즈는 일반적으로 초경합금 성형용 코어를 이용한 고온 압축 성형

방식으로 제작되어지기 때문에 초경합금 초정밀 연삭가공기술이 필요하다^[2,3].

최근 다양한 연구분야에서 실험인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하기위하여 실험계획법(Design of Experiments; DOE)을 적용하고 있다. 실험계획법은 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가진다^[4,5].

본 연구에서는 성형용 코어 형상정도 향상을 위한 선행연구로써 초경합금(WC, Co 0.5%)을 연삭가공 할 때 표면거칠기(Ra)에 영향을 미치는 4가지 인자를 공정변수로 선택, 2⁴ 요인배치법으로 실험계획법을 수행하여 표면거칠기(Ra)를 최대한 줄일 수 있는 최적연삭가공조건을 개발하였다.

* 조선대학교 기계공학과
교신저자 : 한국광기술원
E-mail : kimjh@kopti.re.kr
** 한국광기술원 초정밀광학팀

2. 실험계획법 및 실험방법

2.1 실험계획법

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 특성에 대해서, 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 이는 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 다양하고 공작물, 실험장치 및 숙련도 등의 차이에서 오는 산포가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(Sampling error)등에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 여기서 측정 데이터에 산포를 준다고 생각되는 많은 원인들 중에서 실험에서 조절 가능한 원인을 인자라고 하고, 실험을 하기 위한 인자의 특정한 조건을 인자의 수준(Level)이라고 한다.

실험계획법이란 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법 및 실험순서를 정하고 실험 후에 얻어지는 데이터에 대하여 최적의 분석을 수행하는 것이다. 이러한 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 인자들이 최적 조합 및 최적 조건들을 선정하는데 쓰인다.

본 연구에서는 성형용 코어 형상정도 향상을 위한 선행연구로써 초경합금을 연삭가공 할 때 표면거칠기에 영향을 미치는 4가지 인자를 공정변수로 선택, 2⁴ 요인배치법을 적용하여 가공하였다. 가공결과는 분산분석을 사용한 실험계획법을 사용하여 최적연삭가공 조건을 개발하였다.

2.2 실험장비

본 연구에서는 Glass 렌즈 성형용 코어 가공을 위해 초정밀 연삭가공이 가능한 초정밀가공기(일본, Nachi社, ASP01)를 사용하였다. 본 가공기는 2개의 유정압 슬라이드가 직교 형태로 구동하는 3축 가공기로서 유정압 베어링에 의해 구동되는 B축 Rotary Table에 공

기 터빈 스피들이 장착되어 비구면 가공이 가능한 초정밀가공기이다. 안내면의 위치정밀도는 1 nm의 정도를 가지며, 최대 가공 직경 150mm의 공작물 가공이 가능하다. 안내면의 구동은 AC Servo Motor에 의해 구동된다. 초정밀가공기는 크린룸(Class 10,000)의 항온실에 설치되어서 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社, UA3P)를 사용하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에 사용된 초정밀 가공기와 초정밀 자유곡면 3-D 형상측정기를 각각 나타낸다.



Fig. 1 Microlens process machine (Japan, Nachi社, ASP01)



Fig. 2 Ultra precision non-axisymmetric aspheric generator (Japan, Panasonic社, UA3P)

2.3 실험방법

본 연구에서는 Glass 성형용 초경합금 코어 초정밀 연삭가공기술을 개발하기 위하여 실험계획법을 적용

하였다.

성형용 코어의 재료는 초경합금이고, 연삭가공에 사용된 공구는 고정치로 다이아몬드 휠 #1500을 사용하였다. 다이아몬드 휠의 입도 #1500은 Glass 렌즈 성형용 초경합금 코어를 가공할 때 일반적으로 사용하며, 정확한 실험결과를 얻기 위해 가공 후 다이아몬드 휠을 드레싱하여 공구 마모에 의한 영향을 최소화 하였다. 특성치는 초정밀 가공 후의 표면거칠기값으로 목표치를 20 nm로 정하였으며 Cut of length 0.025mm로 측정하였다. 또한, 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도 및 터빈회전속도 등을 인자로 2⁴ 요인배치법을 적용하여 각각 16회 실험을 수행하여 가공결과를 측정·평가하였다. Table 1과 Table 2는 2⁴ 요인배치법에 적용된 실험인자와 실험점을 각각 나타낸다.

Table 1 Factors and levels used in experiments

Factor	Low Level(-)	High Level(+)
Depth of Cut (μm)	0.1	1.0
Feedrate (mm/min)	0.25	1.5
Work Spindle (rpm)	200	300
Turbin Spindle (rpm)	30,000	50,000

Table 2 Experimental point used in experiments

Experimental Point	Factor			
	Depth of Cut	Feedrate	Turbin Spindle	Work Spindle
1	-	-	-	-
2	-	-	-	+
3	-	-	+	-
4	-	-	+	+
5	-	+	-	-
6	-	+	-	+
7	-	+	+	-
8	-	+	+	+
9	+	-	-	-
10	+	-	-	+
11	+	-	+	-
12	+	-	+	+
13	+	+	-	-
14	+	+	-	+
15	+	+	+	-
16	+	+	+	+

초정밀 연삭가공 후의 표면거칠기 측정결과는 실험계획법 상용프로그램인 MINITAB를 이용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

본 실험에서 수행한 연삭가공 후 표면거칠기 측정결과는 Fig. 3에 나타낸다.

SrtOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Work Spindle	Turbin Spindle	Feedrate	Depth of Cut	Surface Ra(um)
1	1	1	1	200	30000	0.25	0.1	16.21
2	2	6	1	300	30000	0.25	0.1	16.32
3	3	2	1	200	50000	0.25	0.1	16.34
4	4	12	1	300	50000	0.25	0.1	16.16
5	5	3	1	200	30000	1.50	0.1	16.68
6	6	16	1	300	30000	1.50	0.1	16.91
7	7	4	1	200	50000	1.50	0.1	16.72
8	8	9	1	300	50000	1.50	0.1	16.63
9	9	10	1	200	30000	0.25	1.0	17.02
10	10	7	1	300	30000	0.25	1.0	17.11
11	11	13	1	200	50000	0.25	1.0	17.32
12	12	11	1	300	50000	0.25	1.0	17.21
13	13	5	1	200	30000	1.50	1.0	17.43
14	14	15	1	300	30000	1.50	1.0	17.82
15	15	8	1	200	50000	1.50	1.0	17.82
16	16	14	1	300	50000	1.50	1.0	17.59

Fig. 3 Result of surface roughness according to cutting conditions

Fig. 3에서 알 수 있듯이 초경합금의 초정밀 연삭가공시 연삭깊이(D) 0.1 μm , 이송속도(C) 0.25mm/min, 주축회전속도(A) 300rpm, 터빈회전속도(B) 50,000rpm에서 가장 낮은값의 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 4인자 교호작용이 포함된 Pareto 분석 후 중요한 영향을 주는 인자에 대해 Pareto 분석결과 연삭깊이가 가장 유의한 영향을 주는 인자임을 Fig. 4를 통해 알았다.

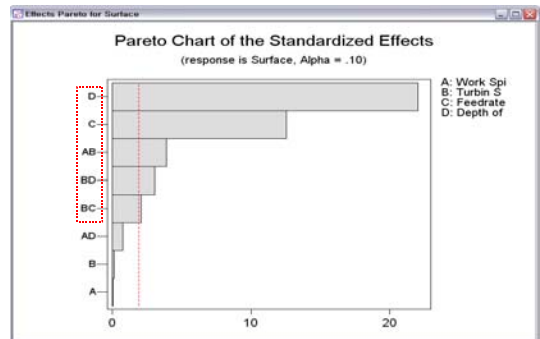


Fig. 4 Pareto chart of the standardized effects

유의수준 α 가 0.1일때 분산분석결과 목표치에 영향을 주는 유의한 인자가 연삭깊이와 이송속도임을 알 수 있었으며, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 P value를 통해 주효과와 2인자 교호작용이 유의함을 알았다.

Fractional Factorial Fit: Surface Ra(n versus Work Spindle, Turbin Spind, ...

Estimated Effects and Coefficients for Surface (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		16.9669	0.02021	839.55	0.000
Work Spi	-0.0012	-0.0006	0.02021	-0.03	0.976
Turbin S	0.0062	0.0031	0.02021	0.15	0.881
Feedrate	0.5087	0.2544	0.02021	12.59	0.000
Depth of	0.8913	0.4456	0.02021	22.05	0.000
Work Spi*Turbin S	-0.1588	-0.0794	0.02021	-3.93	0.006
Work Spi*Depth of	0.0313	0.0156	0.02021	0.77	0.465
Turbin S*Feedrate	-0.0838	-0.0419	0.02021	-2.07	0.077
Turbin S*Depth of	0.1238	0.0619	0.02021	3.06	0.018

Analysis of Variance for Surface (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	4.21277	4.21277	1.05319	161.17	0.000
2-Way Interactions	4	0.19403	0.19403	0.04851	7.42	0.012
Residual Error	7	0.04574	0.04574	0.00653		
Total	15	4.45254				

Fig. 5 ANOVA table for surface roughness

2인자 교호작용이 포함된 분산분석결과 주효과와 2인자 교호작용이 유의함을 알 수 있었으며, Fig. 6와 Fig. 7은 주효과와 2인자 교호작용에 대한 결과를 각각 나타낸다.

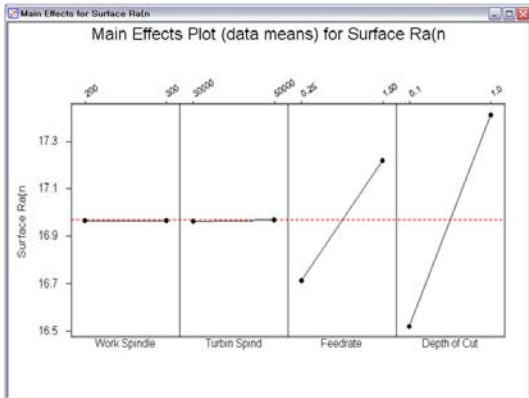


Fig. 6 Main effect plot for surface roughness, Ra

Fig. 6에서 알 수 있듯이 반응변수(Surface Roughness, Ra) 값은 작을수록 좋기 때문에 인자들의 낮은 수준을 선택해야하며, 인자 주축회전속도와 터빈회전속도는 어떤 수준을 선택해도 그 효과가 동일함을 알 수 있었다.

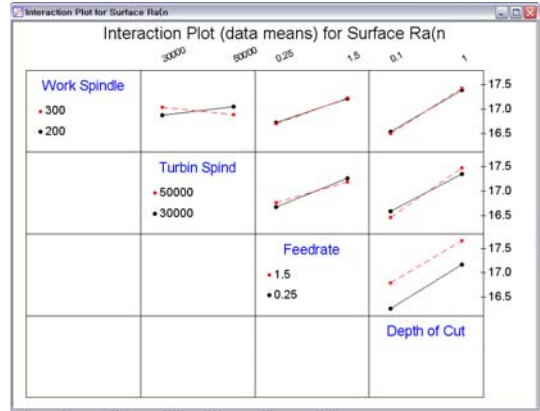
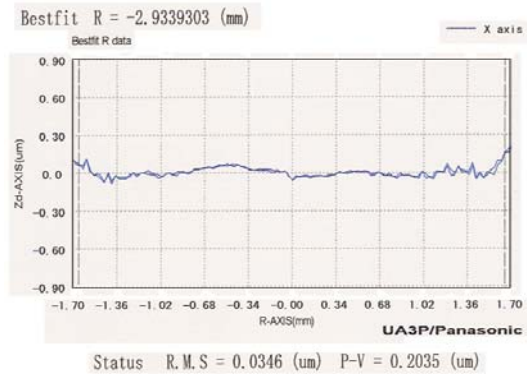
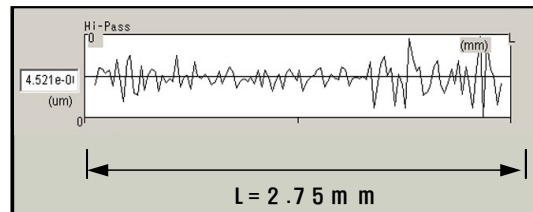


Fig. 7 Interaction plot for surface roughness, Ra

Fig. 7은 주축회전속도와 터빈회전속도, 터빈회전속도와 이송속도, 그리고 터빈회전속도와 연삭깊이 간의 교호작용이 유의함을 나타낸다.



(a) Form accuracy of mold



(a) Surface roughness of mold

Fig. 8 Measurement result of mold for aspheric glass lens

초경합금의 초정밀 연삭가공시 표면거칠기에 기여하는 인자는 연삭깊이(D)와 이송속도(C)의 순으로 나타났으며, 연삭깊이가 표면거칠기에 가장 크게 영향을 미치는 것은 다이아몬드 휠과 공작물의 접촉면에 발생하는 연삭력에 큰 영향을 미치기 때문으로 평가되었다.

실험에서 얻어진 가공조건을 통해 비구면 Glass 렌즈 성형용 코어를 가공한 결과 형상정도 0.204 μ m, 표면거칠기 16nm의 가공결과를 나타내었다. Fig. 8은 비구면 Glass 렌즈 성형용 코어의 측정결과를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 초경합금의 연삭가공 시 표면거칠기에 영향을 미치는 4가지 인자에 대하여 분석하였고, 표면거칠기를 최대한 줄일 수 있는 연삭가공조건을 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초경합금(WC, Co 0.5%)의 표면거칠기를 최소화하는 최적 연삭가공조건으로는 연삭깊이 0.1 μ m, 이송속도 0.25 mm/min에서 가장 좋은 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.
2. 초경합금(WC, Co 0.5%)의 초정밀 연삭가공시 표면거칠기에 영향을 주는 인자는 연삭깊이와 이송속도의 순으로 나타났으며, 인자 주축회전속도와 터빈회전속도는 어떤 수준을 선택해도 그 효과가 동일함을 알 수 있었다.
3. 주축회전속도와 터빈회전속도, 터빈회전속도와 이송속도, 그리고 터빈회전속도와 연삭깊이 간의 교호작용이 유의함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Langis Michaud, Jean-Pierre Tchang, Celine Baril, and Jacques Gresset, "New Perspectives in Monovision-A Study Comparing Aspheric With Disposable Lenses", International Contact Lens Clinic, Vol. 22, No. 90, p. 203, 1995.

2. Tsunemoto Kuriyagawa, Mohammad Saeed, Sepasy Zahmaty, and Katsuo Syoji, "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors1," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No. 4, p. 387, 1996.
3. H. Suzuki and S. Kodera, "Precision Grinding of Aspherical CVD-SiC Molding Die," Journal of the Japan society for precision engineering, Vol. 64, No. 4, p. 619, 1998.
4. 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.
5. Long-Zhu Chi, Jae-Seob Kwak, and Man-Kyung Ha, "Geometric Error Analysis of Surface Grinding by Design of Experiments," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 13, No. 4, 2004.