

## DOE를 적용한 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈의 가압성형조건 연구

### A Study on Pressing Conditions in the molding of Aspheric Glass Lenses for Phone Camera Module using Design of Experiments

김혜정<sup>1</sup>, 차두환<sup>2</sup>, 이준기<sup>2</sup>, 김상석<sup>1</sup>, 김정호<sup>1,a</sup>

(Hye-Jeong Kim<sup>1</sup>, Du-Hwan Cha<sup>2</sup>, Jun-Key Lee<sup>2</sup>, Sang-Suk Kim<sup>1</sup>, and Jeong-Ho Kim<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

This study investigated the pressing conditions in the molding of aspheric glass lenses for the mega pixel phone camera module using the DOE method. Tungsten carbide (WC; Japan, Everloy Co., 002K), which contained 0.5 w% cobalt (Co), was used to build the mold. The mold surface was ultra-precision ground and polished, and its form accuracy (PV) was 0.85  $\mu\text{m}$  in aspheric surface. We selected four factors, pressing temperature, force and time of first step, and force of second step, respectively, as the parameters of the pressing process. In order to reduce the number of experiments, we applied fractional factorial design considering the main effects and two-way interactions. The analysis results indicate that the only two main effects, the pressing temperature and the time of pressing step 1, are available for the form accuracy (PV) of the molded lens. The analysis results indicated that the best combination of the factors for lowering the form accuracy (PV) value of molded lens was to have them at their low levels.

**Key Words** : Aspheric glass lens, Design of experiment, Glass molding press

#### 1. 서론

비구면 Glass렌즈는 우수한 광학특성, 소재의 다양성 및 높은 내열성 등의 많은 장점으로 인해 고화질 광학계를 중심으로 그 사용영역이 급속히 확대되고 있는 광학부품으로서 고온압축성형법을 이용하여 제작하는 방법이 최근 가장 널리 사용되고 있다[1,2]. 일반적으로 전형적인 비구면 Glass렌즈는 구면렌즈의 제작에 이용되는 연삭연마공정을 사용한다. 현재 Magnetorehological finishing(MRF)와 Precision polishing method의 2가지 방법이 연삭연마공정에 의한 Glass렌즈 제조법으로 사용되

고 있으나 복잡한 공정으로 인한 고단가 문제로 양산화 측면에서 문제점을 가지고 있다[3,4]. 이에 반해 압축성형법은 Glass원소재를 가열 후 압축하는 단공정으로 원하는 형상의 비구면 Glass렌즈 제작이 가능한 방법으로써 Glass 및 Mold의 소재에 따른 성형조건을 적절히 조절할 경우 매우 유용한 방법이라 할 수 있다. 그러나 압축성형공정에서는 성형과 냉각이 동일공정에서 동시에 이루어짐으로 많은 공정변수를 제어해야하는 어려움이 있다. 따라서 최적의 압축성형공정 설계를 위해서는 많은 비용과 시간이 요구된다.

한편, 통계를 바탕으로 한 Design of experiment (DOE)는 체계적인 실험설계와 결과해석을 통해 최소의 실험만으로 유의한 주효과 및 교호작용의 확인을 가능케 하는 유용한 연구기법으로써, DOE를 적용한 공정설계에 관한 많은 연구가 수행되어져 왔다[5-7]. 그러나 수행된 연구들의 대부분이 Plastic제품의 사출공정에 적용된 반면, 본 연구에

1. 한국광기술원 초정밀광학팀  
(광주시 북구 월출동 971-35)

2. 전남대학교 신소재공학부

a. Corresponding Author : kimjh@kopti.re.kr

접수일자 : 2007. 6. 12

1차 심사 : 2007. 7. 13

심사완료 : 2007. 7. 20

서는 Mega급 카메라폰용 비구면 Glass렌즈의 압축성형실험에 DOE기법을 적용하여 가압공정에서 유의한 주효과 및 주요인자간 교호작용을 확인하였다. 또한, 수준에 따라 반응변수에 미치는 주효과와 교호작용효과의 영향 및 설계된 실험점 중 최적가압조건을 확인하였다. 반응변수로는 성형렌즈의 비구면 형상정도(PV)값으로 설정하고, 요인 배치법(2<sup>k</sup>형)을 적용하여 실험점을 설계하였다. 설계된 실험점에 대한 실험결과는 분산분석법을 통해 유의수준( $\alpha$ ) 0.01로 분석되었다.

## 2. 실험

### 2.1 비구면 Glass렌즈 설계 및 실험장비

본 연구에서 압축성형법을 이용하여 제작한 비구면 Glass렌즈의 광학설계도를 그림 1에 나타낸다. 제작된 렌즈는 단면이 비구면, 반대쪽 면이 구면으로 이루어진 광학렌즈이다.

비구면 Glass렌즈 성형을 위한 성형용몰드는 코발트(Co) 함량 0.5 wt.%의 Tungsten carbide (일본, Everloy社, 002K)를 초정밀 연삭가공(비구면 형상정도(PV); 0.85  $\mu\text{m}$ )하여 사용하였고, 성형용 Glass소재는 볼렌즈 형태의 전이점 (Transformation point;  $T_g$ ) 516  $^{\circ}\text{C}$ , 항복점(Yielding point;  $A_1$ ) 553  $^{\circ}\text{C}$  열적특성을 갖는 K-VC79(일본, Sumita社)를 사용하였다[8]. 비구면 Glass렌즈는 초정밀성형기(일본, Sumitomo社, Nano Press-S)를 사용하여 성형하였고, 성형된 렌즈의 형상정도(PV)는 3차원자유곡면형상측정기(일본, Panasonic社, UA3P)로 측정되었다. 그림 2는 고온가압성형장비와 3차원자유곡면형상측정기를 각각 나타낸 것이다.

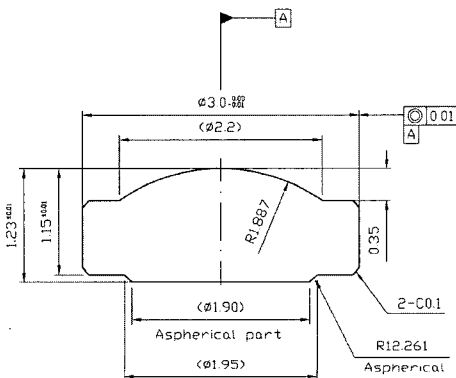
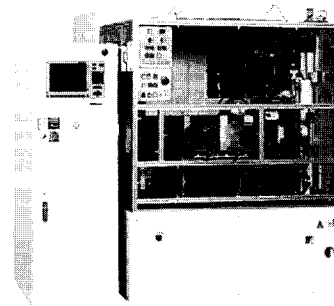
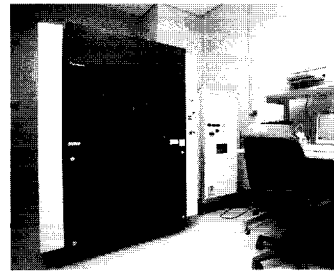


그림 1. 성형렌즈 개략도.  
Fig. 1. Schematic of the test lens.



(a)



(b)

그림 2. (a) Glass렌즈 성형기. (b) 초정밀 3차원 자유곡면 형상 측정기.

Fig. 2. (a) Glass molding press machine. (b) Ultra high accuracy 3D profilometer.

### 2.2 가압성형공정 및 실험점 설계

일반적인 가압성형공정은 그림 3과 같이 크게 3 단계로 이루어진다. 첫번째 단계에서는 성형 Chamber 내에 질소가스를 흘려준 후 성형용 Mold와 Glass 원소재를 성형온도까지 가열한다. 이때 성형온도에서 Glass원소재의 점도는 약  $10^7$ - $10^9$  P정도가 된다 [1]. 두번째 단계는 성형 및 서냉과정이다. 최적의 온도 및 압력 조건 하에서 가압성형이 이루어진 후 서냉과정을 거치게 된다. 마지막으로 세번째 단계에서 냉각이 이루어지고 성형렌즈를 취출한다.

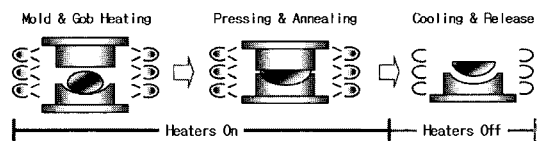


그림 3. Glass렌즈제작을 위한 가압성형공정 개략도.  
Fig. 3. Schematic illustration of glass molding press.

표 1. 각 인자의 수준값 결정을 위한 기준성형 조건.

Table 1. Reference molding conditions for determining levels.

	가압공정			서냉공정	
	지연 시간	1단계	2단계	1단계	2단계
시간 (sec)	30	8	40	-	-
가압력 (N)	-	200	600	400	400
온도 (°C)	성형 온도	서냉 온도	취출 온도	서냉 속도	Lens 두께 : 1.23 mm
	560	500	200	4 °C/sec	

표 2. 실험점 설계를 위한 주효과 및 수준값.

Table 2. Levels and main effects used in factorial design.

인자	기준조건	-1수준	+1수준	단위
성형온도	560	555	565	°C
1단계 가압력	200	150	400	N
1단계 가압시간	8	5	30	sec
2단계 가압력	600	400	800	N

표 1과 2는 각각 인자의 수준값 결정을 위한 기준 공정조건과 주요인자의 수준값을 나타낸다. 성형온도는 성형하고자 하는 Glass소재의 굴복점 이상으로 설정하고, 서냉온도는 전이온도 이하로 설정하였다. 가압과정의 독립변수를 성형온도, 가압 1단계 가압력, 가압 1단계 가압시간 및 가압 2단계 가압력으로 정하고 반응변수로는 성형렌즈 비구면 형상정도(PV)값을 선택하였다. 선택된 4개의 인자에 대해 2수준 일부실시 요인배치법을 적용하여 주효과와 2인자 교호작용을 고려한 총 8회(2<sup>4-1</sup>)의 실험점이 설계되었다. 독립변수를 제외한 모든 성형변수값은 표 1의 기준성형조건 값으로 고정시키고, 설계된 실험점 조건에 따라 Glass렌즈를 성형하였다. 성형렌즈의 비구면 형상정도(PV)값에 대한 분산분석결과로부터 각 인자 및 인자간 교호작용이 반응변수에 미치는 영향을 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

실험점 설계 및 실험결과 분석을 위해서 상용 통계분석 프로그램인 Minitab을 사용하였다. Minitab의 T검정과 분산분석을 통해 얻어진 P-값으로 분석 시 설정한 유의수준(α)과 비교하여 개별요인 및 그룹의 유의성을 판단하였다. 본 연구에서는 유의수준(α)을 0.01로 설정하여 99 %의 분석신뢰도를 갖는다. 수준에 따른 주요인자와 교호작용효과의 영향 및 최적가압조건을 확인하였다.

실험점은 4인자에 대해 2수준 일부실시 요인배치법을 적용함으로써 주효과와 2인자 교호작용을 고려하여 설계되었다. 표 3에 각 실험점에 대한 실험조건 및 성형렌즈의 형상정도(PV) 결과를 나타내었다.

표 3. 일부실시 요인배치법(2<sup>4-1</sup>)으로 설계된 실험조건 및 성형렌즈의 형상정도.

Table 3. Fractional factorial design(2<sup>4-1</sup>) matrix with main effect of pressing process and form accuracy(PV) of the molded lens.

실험점	인자 1	인자 2	인자 3	인자 4	실험결과
	성형 온도 (°C)	1단계 가압력 (N)	1단계 가압 시간 (sec)	2단계 가압력 (N)	형상 정도 (PV; μm)
1	-1	-1	-1	-1	0.92
2	+1	+1	-1	-1	1.14
3	+1	-1	+1	-1	1.17
4	-1	+1	-1	+1	1.12
5	+1	+1	+1	+1	0.99
6	-1	-1	+1	+1	1.36
7	-1	+1	+1	-1	1.39
8	+1	-1	-1	+1	1.05

성형렌즈의 형상정도(PV)값에 미치는 그룹(주효과, 2인자 교호작용)별 영향력은 표 4의 분산분석(ANOVA)표를 통해 확인 하였다. 주효과와 2인자 교호작용의 P-값이 모두 유의수준(α) 0.01보다 작으므로 신뢰도 99 %에서 모두 유의함을 알 수 있었다. 표 5는 성형렌즈의 형상정도(PV)에 미치는 각 요인의 영향력을 나타내며 각 요인의 P-값을 통해 성형온도와 가압 1단계 가압시간 및 모든 2인자 교호작용이 유의함을 확인하였다.

표 4. 성형렌즈 형상정도(PV)값에 대한 분산분석.

Table 4. Summary of analysis of variance (ANOVA) results from form accuracy (PV) of the molded lens (coded units).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
주효과	4	0.18008	0.18008	0.045019	28.44	0.000
2인자교호작용	3	0.20613	0.20613	0.068711	43.41	0.000
잔차	8	0.01266	0.01266	0.001583		
오차	8	0.01266	0.01266	0.001583		
합계	15	0.39887				

표 5. 성형렌즈 형상정도(PV)에 대한 측정효과 및 계수.

Table 5. Estimated effects and coefficients for form accuracy(PV) (coded units).

Term	Effect	Coef	SE coef	T	P
상수		1.14288	0.009946	114.91	0.000
A*	-0.11275	-0.05637	0.009946	-5.67	0.000
B*	0.03588	0.01794	0.009946	1.80	0.109
C*	0.17425	0.08713	0.009946	8.76	0.000
D*	-0.02562	-0.01281	0.009946	-1.29	0.234
AxB**	-0.07687	-0.03844	0.009946	-3.86	0.005
AxC**	-0.18450	-0.09225	0.009946	-9.28	0.000
AxD**	-0.10763	-0.05381	0.009946	-5.41	0.001

\*A:성형온도, B:가압 1단계 가압력, C:가압 1단계 가압시간, D:가압 2단계 가압력

\*\*AxB:A와 B의 교호작용, AxC:A와 C의 교호작용, AxD:A와 D의 교호작용

그림 4는 Pareto chart로써 주효과와 교호작용의 영향력을 상대적으로 비교하여 보여준다. Pareto chart를 통해 반응변수에 미치는 유의한 영향력은 AxC(성형온도 x 가압 1단계가압시간 교호작용)효과가 가장 큰 것으로 나타났고, C(가압 1단계가압

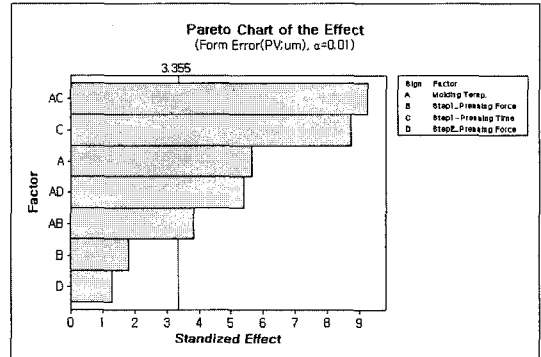


그림 4. 성형렌즈 형상정도(PV)에 대한 Pareto chart.

Fig. 4. Pareto chart of form accuracy(PV) of the molded lens.

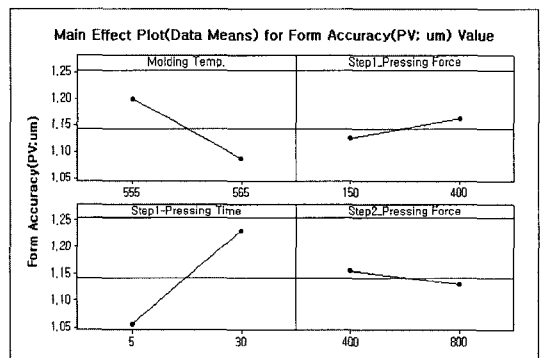


그림 5. 성형렌즈 형상정도(PV)에 미치는 주요인자의 영향.

Fig. 5. Main effect plot for form accuracy(PV) of the molded lens.

시간), A(성형온도), AxD(성형온도 x 가압 2단계 가압력 교호작용), AxB(성형온도 x 가압 1단계가압력 교호작용) 순으로 나타났다.

그림 5와 그림 6은 각각 수준에 따라 성형렌즈의 형상정도(PV)값에 미치는 주효과와 교호작용의 영향을 보여 준다. 주요인자의 경우 성형온도는 고수준(565 °C)에서 가압 2단계 가압시간은 저수준(5 sec)에서 보다 우수한 전사성을 나타내어 형상정도(PV)값이 감소됨을 알 수 있었다. 한편, 그림 6으로부터 주요인자간에 2인자 교호작용효과가 나타남을 알 수 있었고 교호작용 중 AxC(성형온도 x 가압 1단계가압시간 교호작용)효과가 가장 큰 영향을 확인

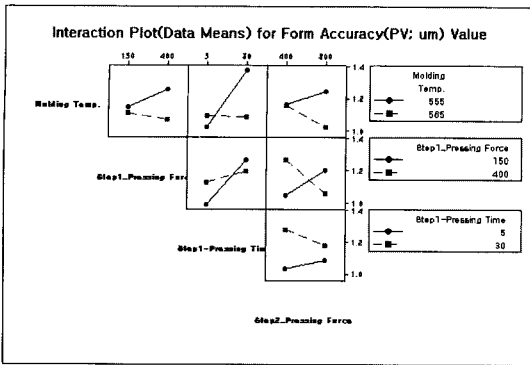


그림 6. 성형렌즈 형상정도(PV)에 미치는 교호작용의 영향.

Fig. 6. Interaction plot for form accuracy(PV) of the molded lens.



그림 8. 성형렌즈 사진.

Fig. 8. Photo of the molded lens.

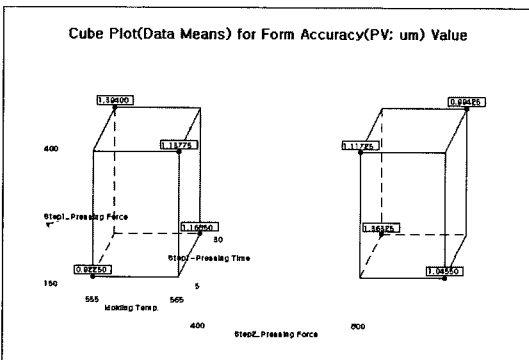


그림 7. 성형렌즈 형상정도(PV)의 cube도표.

Fig. 7. Cube plot for form accuracy(PV) of the molded lens.

할 수 있었다. 설계된 실험점 중 최적가압조건은 그림 7의 Cube plot chart를 통해 확인 할 수 있었으며, 모든 주요인자가 저수준일 때 성형렌즈의 형상정도값이  $0.92 \mu\text{m}$ 로써 최소화됨을 알 수 있었다.

그림 8은 본 연구를 통해 성형된 비구면 Glass 렌즈의 사진이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 DOE를 적용하여 Mega급 카메라폰용 비구면 Glass 렌즈의 성형조건 중 가압과정을 연구하였다. 가압과정의 독립변수 인자로써 성형온도,

가압 1단계 가압력과 가압시간 및 가압 2단계 가압력을 선택하고, 성형렌즈의 비구면 형상정도(PV)값을 독립변수에 대한 반응변수로 선정하고 인자에 대해 2수준 일부실시요인배치법( $2^{k-q}$ 형)을 적용하여 주효과와 2인자 교호작용을 고려한 8개의 실험점을 설계하였다. 실험결과와 분산분석결과, 주효과의 경우 성형온도와 가압 1단계 가압시간이 유의한 인자임을 알 수 있었으며 주요인자간에 유의한 2인자 교호작용효과가 나타남을 확인하였다. 설계된 실험점 중 최적가압조건은 성형온도  $555 \text{ }^\circ\text{C}$ , 가압 1단계 가압력  $150 \text{ N}$ , 가압 1단계 가압시간  $5 \text{ sec}$ , 가압 2단계 가압력  $400 \text{ N}$ 으로써 모든 주요인자가 저수준일 때임을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 변수가 많은 비구면 Glass 렌즈 성형공정 설계시에는 DOE를 적용하여 중요인자의 선정과 인자의 수준범위 등을 먼저 파악한 후 성형조건을 마련하는 것이 최적의 렌즈를 성형할 수 있는 유용한 방법임을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] A. Y. Yi and A. Jain, "Compression molding of aspherical glass lenses-A combined experimental and numerical analysis", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 88, No. 3, p. 579, 2005.
- [2] 김현욱, 정상화, 박용필, 김상석, 김혜정, 김정호, "비구면 Glass 렌즈 성형용 초경합금(WC) 코어의 DLC 코팅 효과", 전기전자재료학회논문지, 19권, 11호, p. 1050, 2006.
- [3] S. D. Jacobs, "International Progress on Advanced Optics and Sensors", Universal Academy Press, Tokyo, p. 3, 2003.

- [4] R. G. Bingham, D. D. Walker, D. H. Kim, D. Brooks, R. Freeman, and D. Riley, "A novel automated process for aspherical surfaces", Proceedings of SPIE 45th Annual Meeting, the International Symposium on Optical Science and Technology, Vol. 4093, p. 4445, 2000.
- [5] R. S. Chen, H. H. Lee, and C. Y. Yu, "Application of Taguchi's method on the optimal process design of an injection molded PC/PBT automobile bumper", Compos. Struct., Vol. 39, p. 209, 1997.
- [6] Y. S. Zu and S. T. Lin, "Optimizing the mechanical properties of injection molded W-4.9 % Ni-2.1 % Fe in Debinding", J. Mater. Process. Technol., Vol. 71, p. 337, 1997.
- [7] K. Park and J. H. Ahn, "Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis", J. Mater. Process. Technol., Vol. 146, p. 221, 2004.
- [8] Sumita Co.: in Optical Glass Data Book, See, <http://www.sumita-opt.co.jp/en/optical/data303.pdf>, Code 610579.