

순차이송방식 GMP 공정에서 공정변수가 유리렌즈 성형성에 미치는 영향

정태성[#], 박규섭¹, 김동식²

Effect of the Molding Conditions on Formability in Progressive Glass Molding Press

T. S. Jung, K. S. Park, D. S. Kim

(Received October 15, 2009 / Revised November 23, 2009 / Accepted November 25, 2009)

Abstract

Remarkable progress had been made in both technology and production of optical elements including aspheric lens. In the past, precision optical glass lenses were produced through multiple processes such as grinding and polishing, but mass production of aspheric lenses requiring high accuracy and having complex profile was rather difficult. Against such a background, the high-precision optical GMP process was developed with an eye on mass production of precision optical glass pasts by molding press. This GMP process can produce with precision and good repeatability special form lenses such as for cameras, video cameras, aspheric lenses for optical items. In this study, Design Of Experiment(Taguchi method) was adopted to find a tendency of molding conditions that influence formability. Three main factors for molding conditions were selected based on pressure at pressing stage and temperature, pressure at cooling stage. Also, the DOE was carried out and the interference patterns were measured to evaluate the formability of GMP process. From the results, it was found that the cooling pressure is the most sensitive parameter for progressive GMP process.

Key Words : Progressive GMP Process, Design of Experiments, Formability, Glass Lens, Interference Pattern, ANOVA

1. 서론

최근 디지털 카메라, 휴대전화, 고집적 광학 저장장치 등 IT산업의 급속한 발전으로 인하여 초정밀 광학 렌즈에 대한 수요가 날로 증가되고 있다. 또한, 소비자의 욕구를 충족하기 위하여 소형화, 박형화, 고화소화, 다기능화 경쟁이 날로 심화되고 있으며, 광학 성능 향상을 위하여 기존 플라스틱 렌즈나 단순 구면 유리렌즈뿐만 아니라 비구면 형상을 포함한 복잡 형상의 유리렌즈 사용이 점차 증가되고 있다[1].

이전에는 유리렌즈의 생산을 위해 주로 연마법이 이용되었으나 연마법으로는 제작할 수 있는 렌즈의 크기, 형태 등이 제한될 뿐 아니라 양산성이 크게 떨어지는 때문에 근래에는 GMP(Glass Molding Press)방식의 직접 프레스 성형법이 이용되고 있다[2~4].

GMP 공정은 유리 소재(pre-form; gob)를 전이온도 이상으로 가열한 뒤 렌즈 형상이 정밀하게 가공된 금형으로 가압하여 성형하는 방식으로 복잡 형상의 렌즈를 다량으로 제조할 수 있는 장점이 있다[5~6].

1. 재영솔루션㈜ 나노광학사업부

2. ㈜옵토메카

교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과,

E-mail: tsjung@inhac.ac.kr

본 연구는 GMP 공정의 생산성 향상을 위한 기초 연구로서 다양한 연구분야에서 실험인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하는 방법으로 널리 알려진 실험 계획법(Design of Experiments; DOE)을 적용하여 공정 조건이 GMP공정의 성형성에 미치는 영향을 살펴보았다[7]. 성형압력, 냉각온도와 냉각압력을 3가지 주요 공정변수로 선택하고 직교 배열법을 적용하여 성형시험을 수행하였으며, 간섭무늬를 측정하여 형상 전사성을 평가하였다. 그 결과를 바탕으로 유리 렌즈 성형에 있어 냉각 시 압력이 성형성에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

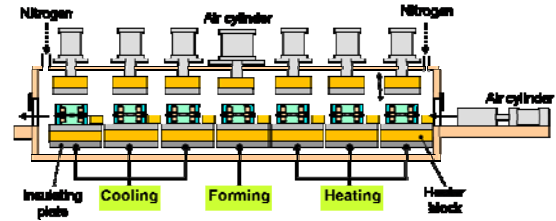
2.1 순차이송방식의 GMP 공정

일반적으로 GMP 공정은 금형이 고정되어 있고 가하는 압력과 온도를 시간적으로 변화시켜 성형하는 일괄처리(batch)방식과 금형이 일정한 온도와 압력으로 설정된 스테이지를 따라 이동하는 순차이송(progressive)방식이 있으며, 본 연구에서는 7 단계의 스테이지를 가진 순차이송방식의 GMP장비(일본, SYS사, PFLF7-40A)를 이용하여 실험하였다 [5~6].

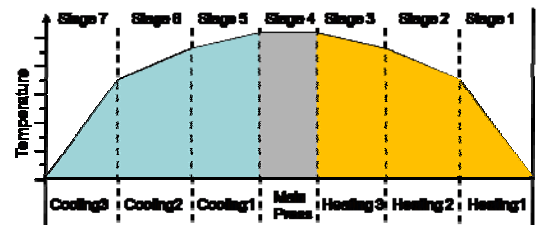
본 연구에서의 순차이송방식 GMP공정은 크게 3단계 제어구간을 가지며, 제품 성형을 위해서 성형 챔버(chamber) 내의 온도를 높이는 예열 구간, 소재의 유리전이 온도 이상에서 금형을 가압하여 형상을 전사 시키기는 성형 구간, 그리고 취출을 위한 냉각 구간으로 구분된다. 또한, 각각의 가열과 냉각 구간은 독립된 3개의 스테이지로 구성되어 있다. Fig.1(a) 는 순차이송방식의 GMP 공정 개략도이며, Fig.1(b)는 GMP 공정의 온도 변화를 나타낸다.

각각의 스테이지는 온도와 압력, 가압 시간을 설정할 수 있으며, 순차이송방식이므로 각 스테이지 별로 머무는 시간은 전체 사이클 타임(cycle time)으로 결정된다. 유리렌즈 성형에서 각 스테이지 별 공정 조건은 유리렌즈의 광학적 성능 및 금형 수명에 지대한 영향을 미치며, 급격한 온도와 압력의 변화는 렌즈 또는 금형의 파손 원인이 된다.

예열 공정은 예열1, 예열2, 예열3의 3단계로 이루어져있으며 예열1 단계는 상온 상태에 있던 금형과 유리 소재가 처음 투입되고 가열되는 공정



(a) Schematic diagram of progressive GMP



(b) control diagram of each stage

Fig. 1 7-stages progressive GMP

으로 유리 소재와 금형 형상에 따라 다르나 일반적으로 200℃ 전후로 설정하며, 예열2 단계는 예열1 공정에서 가열된 금형을 유리소재의 유리전이점(Tg) 부근까지 추가적으로 가열하면서 상층 가열판의 자중을 이용하여 유리 소재를 눌러주는 역할을 한다. 예열3 단계는 프레스 단계와 거의 같은 온도, 즉 소재의 유리전이점(Tg)보다 30~80℃, 항복점(At) 보다 10~50℃ 높은 온도로 유리 소재를 충분히 가열하여 프레스 공정으로 금형을 보내주는 역할을 한다.

프레스 단계에서는 가열된 소재에 압력을 가하여 형상을 전사하는 공정이다.

냉각 단계는 예열 단계와 마찬가지로 냉각 1, 냉각 2, 냉각 3 의 3 단계로 세분화되어 있으며, 냉각 1 의 구간은 일반적으로 소재의 유리전이점에서 40℃ 전후로 설정한다. 냉각 2 는 이미 형상이 완성된 렌즈와 금형을 냉각시키는 단계로 렌즈의 형상 자체에는 크게 영향을 주지 않으며, 냉각 1 의 온도에 비해 50~120℃ 정도 낮은 온도로 설정하는 것이 일반적이다. 냉각 3 은 히터에 전원을 공급하지 않고 자연냉각 방식으로 운행된다.

2.2 렌즈의 형상

본 연구에서 실험을 통해서 성형된 렌즈는 약 8mm 의 직경을 가지는 디지털 카메라용 유리 렌즈로서 Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 한쪽 면은

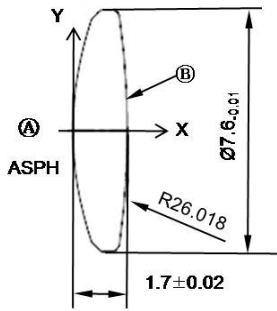


Fig. 2 Designed shape of glass lens

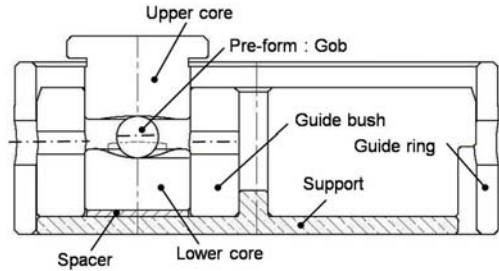
R 26.018mm 의 구면 형상을 가지며, 다른 한 면은 비구면 형상으로 설계되어 있다. 일반적으로 구면 렌즈는 기계적 연마법으로 가공되나 렌즈의 한 면이 비구면 형상을 지니고 있을 경우 GMP 공정을 거쳐 성형하여야 하며, 구면의 경우 일반적으로 레이저 간섭계를 이용하여 렌즈의 광학적 특성을 판별한다.

2.3 금형 및 유리 소재

본 연구에서 유리 렌즈 성형용 금형은 3 개의 캐비티를 갖는 다수 캐비티 금형으로 제작되었으며, 구면 형상을 가진 상측 코어와 비구면 형상의 하측 코어로 구성되었다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 제작된 유리렌즈 성형용 금형의 구조를 나타내는 모식도이며, Fig. 3(b)는 제작된 금형의 실물 사진이다.

GMP 공정은 유리 소재의 유리전이 온도(T_g) 이상에서 가압하여 성형하기 때문에 금형 코어의 형상 전사성이 매우 뛰어나다. 따라서, 유리렌즈 성형용 금형 코어는 설계된 렌즈 형상과의 형상 오차가 매우 작도록 정밀하게 가공되어야 하며, 고온의 성형 환경에서 장시간 사용하여야 하기 때문에 내식성, 내마모성, 경도 등 기계적 특성이 우수한 재질을 이용하여 제작되어야 한다. 본 연구에서 사용된 금형 코어의 재질은 유리렌즈 금형 코어의 소재로 많이 쓰이고 있는 초경합금(WC/Co 0.5%, 일본, 도시바탕가로이샤, AE-60)이고, 5 축의 자유도를 가지는 초정밀 연삭가공기(일본, Nachi-Fujikoshi 사, ASP01) 장비를 이용하여 가공되었다.

각 캐비티의 금형 코어는 형상정밀도 및 거칠기가 광학특성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 형상정밀도 $0.3\mu\text{m}$ 이하, 표면 거칠기 $R_t 0.05\mu\text{m}$,



(a) Schematic diagram of glass lens mold



(b) Photograph of glass lens mold

Fig. 3 3-cavity mold for glass lens

Table 1 Measured data of glass lens mold

Cavity #	Pv [μm]	Rt [μm]	Ra [μm]
1	0.1263	0.0325	0.0039
2	0.0838	0.0353	0.0027
3	0.1577	0.0402	0.0049

Ra $0.007\mu\text{m}$ 이하가 되도록 가공되었으며, 연삭된 금형 코어는 표면조도 Ra $0.005\mu\text{m}$ 이하가 되도록 폴리싱 가공 후 금형 보호 및 이형성 향상을 위하여 Re-Ir 코팅(sputtering)을 하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 금형 코어를 형상측정기(영국, Taylor Hobson사, Form Talysurf)로 측정된 결과이다.

실험에 사용된 유리 소재는 일본 Sumita 사의 K- CSK-120 으로 무색 투명하며 경도 및 탄성률 등 기계적 강도가 우수하고 광학적 균질성, 등방성의 특징을 지니고 있으며, 유리전이 온도와 항복온도는 각각 498°C , 536°C 이다.

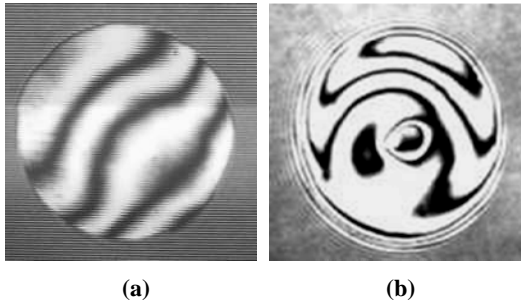


Fig. 4 Irregular interference patterns by poor molding conditions : (a) curved interference, (b) multi curvature interference pattern pattern

2.3 주요 공정변수의 선정

전술한 바와 같이 순차이송방식 GMP 공정은 7개의 세부 공정으로 구성되어 있으며, 각 공정은 온도, 압력 및 시간의 공정 변수를 가지므로, 최적의 성형 조건을 찾기 위해서는 21 가지의 공정 변수가 성형공정에 미치는 영향을 살펴보아야 한다. 그러나, 모든 공정 변수를 고려하는 것은 현실적으로 어렵다고 판단되므로, 본 연구에서는 유사 형상을 가진 단일 캐비티 금형과 일본 Sumita 사의 K-PBK40 소재를 사용하여 기초 실험을 진행함으로써 GMP 공정의 성형성에 영향을 미치는 주요 공정변수를 찾아내었다.

기초 실험에서는 다양한 성형 조건에서 각각 10개의 시편을 분석하였으며, 이를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

예열 단계에서 적정 온도 이상으로 가열할 경우 소재로부터 다량의 가스가 생성, 금형과 렌즈 표면에 점착되어 렌즈가 흐려지게 되며, 충분히 가열되지 못하면 성형 단계에서 균열 또는 미성형이 발생되지만 예열 단계의 공정 변수는 렌즈의 표면 형상에 민감한 영향을 미치지 않는다.

프레스 단계는 고온, 고압 상태에서 렌즈의 전체적인 형상을 결정짓는 공정으로 적당한 압력이 작용되지 않을 경우, 미성형이 발생하게 된다.

냉각 단계는 렌즈의 형상을 최종 고착시키는 단계로 특히, 냉각 1의 구간은 가압 성형된 렌즈를 구속 냉각하는 과정으로 완성된 렌즈의 광학적 특성을 결정짓는 가장 중요한 공정이라 할 수 있다. GMP 공정의 성형성은 냉각 1의 압력과 온도에 매우 민감히 반응하였으며, 성형조건이 적절치 못한 경우 변형으로 인하여 렌즈의 곡률이 국부

Table 2 Results of pre-experiment (Cooling 1 Pressure : 0.2 MPa)

Result No.	Cooling1 Temp.[°C]								
	485	490	495	500	505	510	515	520	530
NG1	4								
NG2	3	4	2	1					
NG3	1	3	6	7	6	3			
NG4			2	2	2	1			
NG5	2	3					1	5	8
OK					2	6	9	5	2
Sum	10	10	10	10	10	10	10	10	10

(Cooling 1 Temperature : 515°C)

Result No.	Cooling1 Pressure [MPa]						
		0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
NG1							2
NG2			1				
NG3			3	4	3		
NG4	2	1	1	2			
NG5	8	9	5	2	2	1	
OK				2	5	9	8
Sum	10	10	10	10	10	10	10

- NG1- crack,
- NG2- multi curvature interference pattern,
- NG3- shrinkage on the boundary of lens,
- NG4- shrinkage on the center of lens,
- NG5- curved interference pattern,

적으로 달라진다. Fig. 4는 레이저 간섭계를 이용하여 측정된 불균일한 간섭무늬 패턴을 보여준다.

Table 2은 냉각 1의 압력이 0.2 MPa 일 때 냉각 1 단계의 온도에 따른 렌즈의 간섭 패턴과 냉각 1 단계의 온도가 515°C 일 때 냉각 1 단계의 압력에 따른 렌즈의 간섭 패턴을 나타낸다.

이상의 기초 실험을 통하여, 냉각 1 단계의 압력과 온도가 GMP 공정의 성형 품질을 결정하는 주요 공정 변수임을 알 수 있었으며, 유리 렌즈 성형공정의 생산성을 향상하기 위해서는 냉각 1 단계의 온도와 압력을 최적화하는 것이 필요하다.

Table 3 Molding conditions of experiments

Stage	Temp. [°C]	Pressure [MPa]	Time [sec]
Heating1	420	0	70
Heating1	530	0	
Heating1	560	0	
Main Press	560	D.O.E	
Coolng1	D.O.E	D.O.E	
Coolng2	400	0.1	



Fig. 5 Measurements setup for characteristic value inspection

2.4 실험 방법

본 실험에서 계획된 성형 조건 최적화를 위하여 다구치 실험계획법을 이용하였다. 유리렌즈의 성형성 결정하는 변수는 매우 많을 것이나 앞서 설명한 바와 같이 GMP 공정 7 개의 단계 중에서 전사성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 메인 프레스 단계와 냉각 1 단계의 변수를 제어인자로 선정하여 실험하였으며 냉각 1 온도, 냉각 1 압력, 메인 프레스 압력을 주 효과 변수로 설정하고 실험을 진행하였으며 나머지 공정 변수는 Table 3 과 같이 동일하게 고정하였다.

실험에서는 현장 엔지니어들이 쉽고 빠르게 적용을 할 수 있다는 점을 고려하여 $L_9(3^4)$ 직교 배열표를 사용하였으며, 반복 수는 3 회를 실시하였다. 다소 오류가 포함된다고 해도 비교적 간편한 직교 배열을 사용하는 것이 현장에서는 더 도움이 될 것으로 판단된다. $L_9(3^4)$ 직교표에서 3 열은 오차항으로 선정하였으며, 교호작용은 없는 것으로 설정하였다. 본 연구에서 유리 렌즈 성형용 금형은 3 개의 캐비티를 가지고 있으므로 총 27 개의 시편을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 Fig.5 의 레이저간섭계(일본, Fujinon 사, F601)를 이용하여 구면의 형상면을 측정함으로

Table 4 Main factors and variables for spherical interference patterns experiments

Main variables	Level 1	Level 2	Level 3
Cooling 1 Temp. [°C]	508	525	545
Main press pressure[MPa]	0.1	0.2	0.3
Cooling 1 Pressure [MPa]	0	0.1	0.2

Table 5 Orthogonal array for Taguchi DOE

Exp#	Cooling1 Temp.	Main Press Pressure	Err.	Cooling1 Pressure
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

써 성형성을 평가하였는데, 이는 비구면 형상보다 렌즈 형상면 전체의 전사성을 평가하는 기초연구로서 적합하기 때문이다.

일반적으로 렌즈, 금형 등의 구면 정도 및 곡률 반경을 평가하는데 사용되는 레이저 간섭계는 기준면에서 반사된 레이저 광과 렌즈에서 반사된 레이저 광의 간섭 무늬를 이용하여 렌즈 표면의 곡률을 측정하는 방식으로, 렌즈 표면의 곡률이 일정할 경우 일직선의 간섭무늬가 발생하지만 곡률이 위치에 따라 다를 경우 간섭 무늬 역시 위치에 따라 휘어지게 된다. 연구에 사용된 간섭계는 632.8nm 파장(λ)의 He-Ne 레이저를 사용하며, 측정 감도는 $\lambda/2$, 즉 0.3um 이고 기준면 정도는 $\lambda/20$ 이다.

정성적 간섭계를 이용하여 특성치를 측정하는 경우, 양품과 불량품에 대해 특성값과 가중치를 어떻게 부여할 것인가 역시 중요한 사항이 된다. 본 연구에서는 양품의 경우 0.1 의 값을 부여하고 불량 수준에 따라 2~5 점까지 차등하여 점수를 책정하여 망소 특성으로 분석을 진행했다.

렌즈 표면의 구면 형상이 균일하게 형성되지

못하거나 렌즈 수축이 심한 것은 5 점, 간섭 무늬의 휘어짐이 심한 것은 4 점, 부분적인 휨이나 수축 현상에 대해서는 2~3 점을 부여하였다. 분석 도구는 KAIST 산업공학과에서 개발된 다구치 해석용 KAISTAT version 1.3 을 사용하였으며 실험 계획 내용을 Table 4, 5 에 정리하였다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 순차이송방식 GMP공정에서 공정변수가 성형성에 미치는 영향을 알아보기 위해 다구치 실험계획법을 이용하여 실험을 진행하였다.

Fig. 6 은 본 실험에서 사용된 유리렌즈 금형의 간섭 무늬 측정 결과를 나타내며, Fig. 7 과 Table 6 는 성형된 렌즈의 구면형상에 대하여 간섭무늬를 측정된 결과를 보여준다.

Table 7 및 Fig. 8은 ANOVA분석 및 신호 대 잡음 비의 분석결과를 보여준다. 결과에서 보면 ANOVA 분석과 신호 대 잡음 비의 결과가 일치함을 알 수 있다. 냉각 1의 온도는 낮을수록, 메인 프레스의 압력은 높을수록, 그리고 냉각 1단계에서의 압력도 높을수록 구면 렌즈에 비치는 간섭무늬 효과는 휨 없이 균일하게 나타남을 알 수 있다. 직교표에서 보면 실험번호 3번의 실험조건이 본 실험에서는 최적 조건으로 나타나는 것으로 알 수 있다.

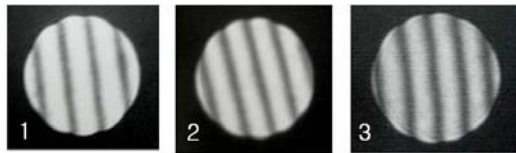


Fig. 6 Interferences patterns of mold

Table 6 Experiment result for Taguchi DOE

Exp#	Cavity 1	Cavity 2	Cavity 3
1	4	0.1	0.1
2	0.1	0.1	0.1
3	0.1	0.1	0.1
4	0.1	0.1	0.1
5	0.1	5	2
6	0.1	0.1	0.1
7	2	0.1	0.1
8	0.1	0.1	0.1
9	0.1	0.1	3

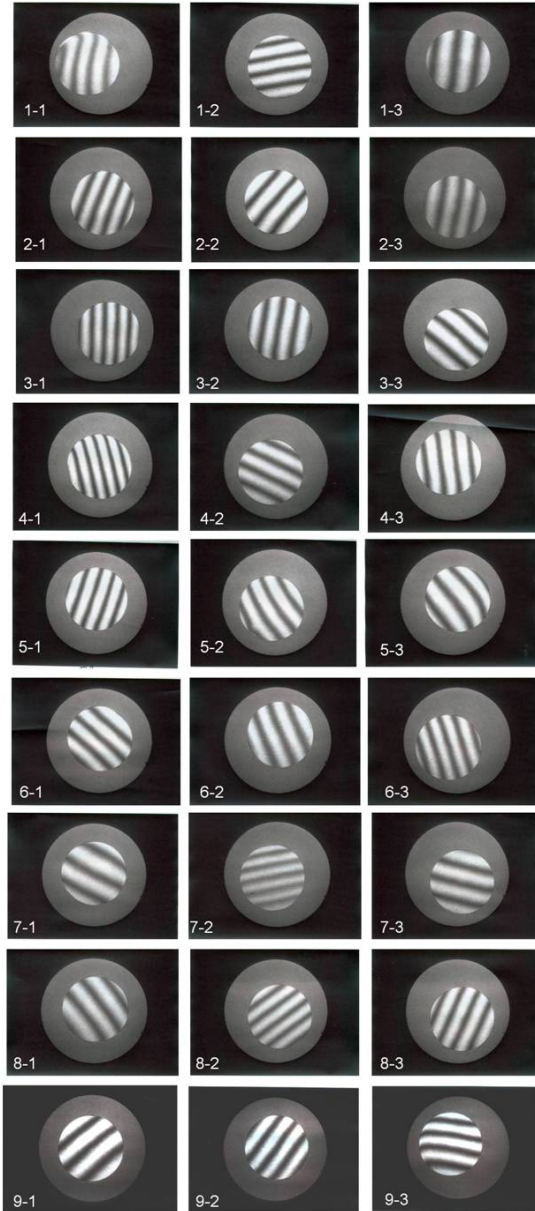


Fig. 7 Comparisons of interferences patterns of glass lens(Exp#-Cavity#)

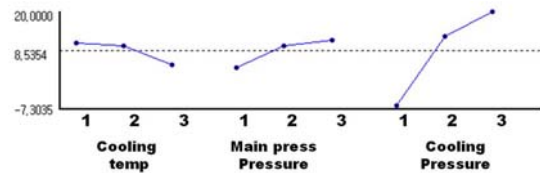


Fig. 8 Signal to noise ratio for spherical interference patterns

Table 7 ANOVA table for spherical interference patterns

Factor	DOF	$\sum x^2$	variance	F value
cooling 1 temp.	2	69.0634	34.5317	0.4898
main press pressure	2	104.438	52.219	0.7407
cooling 1 pressure	2	1204.327	602.1633	8.5408
err	2	141.0079	70.504	
Total	8	1518.836		

4. 결론

본 연구에서는 디지털 카메라에 사용되는 8mm 크기 정도의 유리 렌즈에 대하여 실험계획법을 적용하여 순차이송방식 GMP공정에서의 최적 성형조건을 알아보았으며, 구면 렌즈의 광학적 특성을 대표하는 간섭무늬를 분석한 결과 냉각 1 단계에서의 압력이 전사성에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 냉각 1단계에서의 온도는 일정 온도 이상일 경우 낮을수록 렌즈 품질이 안정화되며, 프레스와 냉각1 단계의 압력은 높을수록 렌즈의 성형성이 우수하였다.

본 연구에서 Sumita 사의 K- CSK-120의 경우 프레스 단계의 압력은 0.3MPa, 냉각 1단계에서의 온도 508℃, 압력은 0.2MPa로 설정하였을 때 가장 좋은 형상 전사성을 보였다.

본 실험에서는 간섭무늬에 대해서만 알아보았으나 유리렌즈의 광학적 특성을 결정하는 요소에는 간섭무늬 외에도 생산성이나 금형 수명 등 고려해야 할 사항들이 존재하며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] H. Suzuki, S. Hara, H. Matsunaga, 1993, Study on Aspherical Surface Polishing Using a Small Rotating Tool, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., Vo.59, No.10, pp.1713~1718.
- [2] B. H. Jeon, S. K. Hong, C. R. Pyo, 2002, Finite Element Analysis for Shape Prediction on Micro Lens Forming, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 7, pp. 581~588.
- [3] M. Umetani, 1998, Manufacturing of optical Glass Lens by Press-Molding Method, New Glass, Vol. 13, pp. 32~37.
- [4] Y. Aono, M. Negishi, J. Takano, 2000, Development of large aperture aspherical lens with glass molding, In Adv. Opt. Manuf. Test. Technol., Proc. SPIE, Vol. 4231, pp. 16~23.
- [5] S. H. Chang, Y. M. Heo, G. H. Shin, Y. M. Lee, J. J. Kang, T. S. Jung, 2008, An Experimental Study on Flow Characteristics of PBK-40 for Glass Molding Press Simulation, Key Eng. Mater., Vols. 364-366, pp. 476~681.
- [6] Y. M. Lee, S. H. Chang, Y. M. Heo, G. H. Shin, G.S. Yoon, T. S. Jung, 2008, Thermal stress analysis for an aspherical glass lens mold, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 12, pp. 125~131.
- [7] S. S. Kim, Y. C. Lee, D. G. Lee, H. J. Kim, J. H. Kim, 2004, Ultra-precision Grinding Optimization of Mold Core for Aspheric Glass Lenses using DOE and Compensation Machining, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 24, No. 6, p. 45.