

순차이송형 유리렌즈 성형공정에서 비구면 유리렌즈의 최적 성형조건 연구

정태성^{1*}, 박규섭², 윤길상³

¹인하공업전문대학 기계설계과, ²재영솔루텍 나노광학사업부,

³한국생산기술연구원 정밀금형팀

A Study on the Optimal Molding Conditions for Aspheric Glass Lenses in Progressive GMP

Tae-Sung Jung^{1*}, Kyu-Sup Park² and Gil-Sang Yoon³

¹Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College

²Nano-Optics Division, JYSolutec

³Precision Molds and Dies Technology Team, KITECH

요 약 최근 개발된 GMP공정의 활용으로 디지털 카메라, 광저장기기, 각종 전자기기 등의 광응용 기기에서 비구면 유리렌즈가 폭넓게 활용되고 있다. GMP공정은 복잡한 형상의 유리렌즈를 정밀하면서도 경제적으로 생산할 수 있다. 본 연구에서는 다구치 실험계획법을 이용하여 순차이송형 GMP공정에서 비구면 유리렌즈의 성형 조건을 최적화 하였다. 냉각 1단계에서의 압력과 온도, 시간을 3가지 주요 공정변수로 정하였으며, 3캐비티 금형을 이용하여 실험한 결과 순차이송형 유리렌즈 성형공정에서 냉각시간이 비구면 유리렌즈의 형상정밀도(PV)에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Abstract By the recently developed GMP(Glass Molding Press) process, aspheric glass lenses are widely used in many optical applications such as digital cameras, optical data storages and electrical devices etc. The GMP process can economically produce complex shaped glass lenses with high precision and good repeatability. This study deals the optimization of molding conditions for aspheric glass lenses in progressive GMP process through Design Of Experiment(Taguchi method). Tree main factors for molding conditions were selected based on pressure, temperature and cooling time at 1st cooling stage. From the analysis of experiments which were preformed with 3-cavity glass mold, it was revealed that the cooling time was the most sensitive parameter for form accuracy(PV) in progressive GMP process.

Key Words : Progressive GMP process, Aspheric glass lens, Design of experiments, Form accuracy

1. 서론

최근 IT분야에서 소형화, 지능화, 자동화, 다기능화, 고성능화의 경쟁이 전산업적으로 대두됨에 따라 각종 화상처리장치, 광학저장장치, 자동화기기 및 초고속 통신시스템 등의 핵심부품으로 초정밀 광학 렌즈의 사용이 확대되고 있다[1,2]. 특히, 근래 저용점 유리소재의 개발과 초정밀 금형기공 기술을 바탕으로 유리렌즈의 대량생산

이 가능한 고온압축성형법 (GMP; Glass Molding Press) 이 보급됨에 따라 재료적, 형상학적으로 광학 성능이 우수한 비구면 유리렌즈 수요가 꾸준히 증가되고 있으며 [1,2], 이를 위한 초정밀 유리렌즈 금형 정밀기공 및 성형 기술, 전산해석기술, 유리 금형 소재 등에 관한 연구가 지속되고 있다[1-9]. 본 연구에서는 순차이송형 GMP 공정에서 정밀도 높은 디지털 카메라용 비구면 유리렌즈를 생산하기 위한 최적 성형조건을 알아보았다.

*교신저자 : 정태성(tsjung@inhac.ac.kr)

접수일 11년 01월 10일

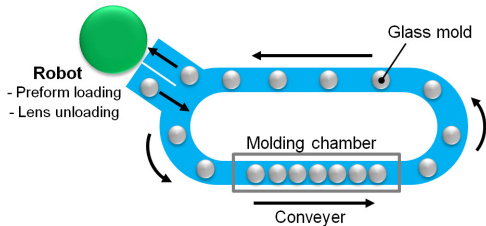
수정일 11년 03월 09일

게재확정일 11년 03월 10일

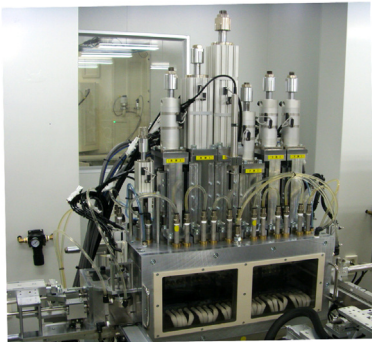
실험계획법(Design of Experiments; DOE)을 이용하여 냉각압력, 냉각온도와 냉각시간을 3가지 주요 공정변수로 선택하고 L₉ 직교표에 배치하여 3캐비티 금형으로 성형시험을 수행하였으며, 렌즈의 형상정밀도를 측정함으로써 공정조건이 형상오차(PV)에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 비구면 유리렌즈 성형에 있어 냉각 시간이 형상오차에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

2. 순차이송형 GMP공정

GMP 공정은 유리전이온도 이상으로 유리 소재(preform; gob)를 가열한 뒤 정밀하게 가공된 금형으로 가압 성형하는 방식으로 경제적으로 복잡한 비구면 형상의 렌즈를 제조할 수 있는 장점이 있다[5].



(a) 순차이송형 GMP 성형기의 구성

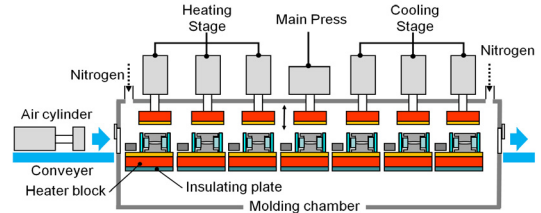


(b) 유리렌즈 성형기의 사진

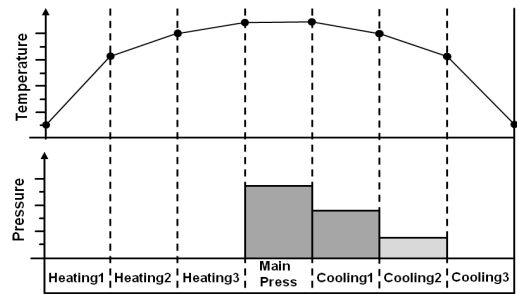
[그림 1] 순차이송형 GMP성형 시스템

일반적으로 GMP 공정은 다수 캐비티를 가진 금형을 질소로 충전된 챔버(chamber)에 넣고 가열과 성형, 냉각을 순차적으로 진행하는 일괄처리(batch)방식과 유리렌즈 금형이 일정한 온도와 압력으로 설정된 스테이지를 따라 이동하는 순차이송(progressive)방식으로 구분된다[7,8]. 그림 1은 본 연구에서의 순차이송형 유리렌즈성형기(일본, SYS사, PFLF7 - 40A)의 사진과 시스템 구성을 보여준다.

본 연구에서의 순차이송방식 GMP 성형기는 그림 2에서 보는 바와 같이 온도와 압력이 개별로 제어되는 7개의 스테이지를 가지고 있으며, 각 스테이지는 크게 예열구간, 성형구간, 냉각구간의 3개 공정구간으로 구분된다. 그림 2(a)는 본연구의 순차이송방식 GMP 공정 개략도이며, 그림 2(b)는 각 공정별 온도와 압력 변화 패턴을 나타낸다.



(a) 순차이송형 GMP 공정의 개략도



(b) 각 공정별 온도, 압력 변화

[그림 2] 순차이송형 GMP성형공정

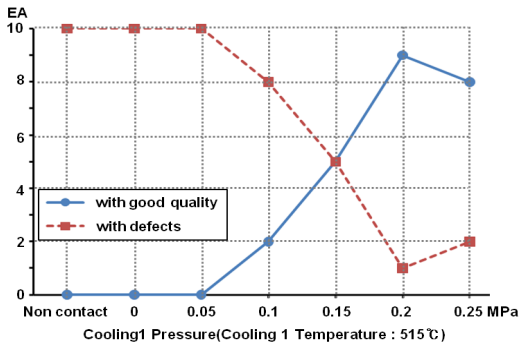
예열1단계에서 금형과 유리 소재가 약 200℃ 전후로 가열되며, 예열2단계에서는 유리소재의 유리전이점(Tg) 부근까지 추가적으로 가열하면서 상층 가열판의 자중을 이용하여 유리 소재를 눌러주는 역할을 한다. 따라서 이때부터 소재의 변형이 시작되며, 금형을 눌러주는 시간과 압력은 되도록 줄여주어야 한다. 예열3 단계는 소재의 유리전이점(Tg)보다 30~80℃, 항복점(At) 보다 10~50℃ 정도 높은 온도로 유리 소재를 가열한다. 순차이송방식의 GMP공정에서 예열 단계의 공정 변수는 렌즈의 형상정밀도에 큰 영향을 미치지 않는으나, 과도하게 가열할 경우 렌즈의 중심부가 녹아내리거나 소재에서 발생된 가스로 인해 렌즈가 흐려지고 코어(core)면이 오염되며, 충분히 가열되지 못하면 가압시 균열 또는 미성형이 발생된다. 가압성형 단계는 고온, 고압 상태에서 형상을 전사하는 공정으로 적당한 압력이 작용되지 않을 경우 미성형이 생기며, 다른 공정에 비해 온도 변화에 따른 영향이 크다.

냉각 1의 구간은 소재의 유리전이점보다 약 40℃ 정도 낮은 온도에서 가압 성형된 렌즈를 구속 냉각하는 과정으로 완성된 렌즈의 형상 및 광학적 품질을 결정짓는 가장 중요한 공정이라 할 수 있다. 성형조건이 적절치 못한 경우 변형으로 인하여 곡률이 국부적으로 달라진다. 냉각 2는 이미 형상이 완성된 렌즈와 금형을 냉각시키는 단계로 냉각 1의 온도에 비해 약 50~120℃ 정도 낮은 온도로 설정하고 가압하지 않거나 짧은 시간 상측 플레이트를 접촉하는 것이 일반적이는데, 렌즈의 형상 자체에는 크게 영향을 주지 않는다. 냉각 3은 온도를 설정하지 않고 자연냉각 방식으로 금형과 성형된 렌즈를 서랭한다.

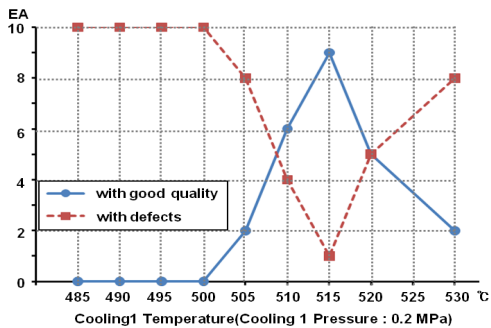
유리렌즈 성형에서 각 스테이지 별 공정 조건은 유리렌즈의 광학적 성능 및 금형 수명에 영향을 미치며, 급격한 온도와 압력 변화는 렌즈 또는 금형의 파손 원인이 되기도 한다. 일반적으로 예열1, 예열2, 예열3, 프레스, 냉각1 단계의 온도구배는 50~60℃ 정도이다. 특히, 순차이송형 GMP공정의 성형성은 냉각 1의 압력과 온도에 매우 민감히 반응하는데, 대체로 냉각 1의 온도는 낮을수록, 냉각 1 압력은 높을수록 형상 전사성이 좋은 것으로 알려져 있으나, 과도하게 낮은 온도와 높은 압력에서는 렌즈 파손 등이 생긴다.

그림 3은 냉각 1의 공정조건에 따른 GMP 공정의 성형성을 평가하기 위하여 단일 캐비티 금형과 일본 Sumita 사의 K-PBK40 소재를 이용해 구면과 비구면의 조합으로 이루어진 양면 볼록 형상의 렌즈를 가압 성형한 결과를 보여준다. 그림 3에서 보여준 다양한 성형 조건에서 각각 10개의 시편을 분석하였을 때, 특정 성형 조건에서만 품질 규격을 만족하는 렌즈가 생산됨을 알 수 있으며, 공정 조건이 적절하지 못할 때 깨짐, 간섭 무늬이상, 국부적 수축 등의 불량이 발생되어 불량품이 증가하였다. 예비 실험의 경우 냉각1의 온도가 515℃이고, 냉각 1의 압력이 0.2 Mpa일 때, 10개의 시편 중 불량품의 개수가 1개로 가장 좋은 성형성을 보였다[8].

7개의 세부공정으로 구성된 순차이송형 GMP 공정에서 공정조건을 최적화하기 위해서는 각 공정별 온도, 압력 및 공정간 이동시간(cycle time)이 유리렌즈의 성형성에 미치는 영향을 분석해야 하지만 현실적으로 모든 요인을 고려하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실험 계획법을 적용하여 GMP공정의 성형 품질에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 냉각 1단계의 압력과 온도, 시간을 최적화하였다.



(a) 압력변화에 따른 성형성 평가결과

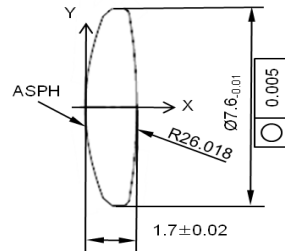


(b) 온도변화에 따른 성형성 평가결과

[그림 3] 냉각 1의 공정 조건에 따른 성형성 평가

3. 성형공정 최적화

3.1 렌즈의 형상 및 소재



$$X = \frac{CY^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)C^2Y^2} + aY^4 + bY^6 + cY^8 + dY^{10}}$$

$$C = 1/R, R = 10.372, K = 1.8451$$

$$a = -0.379520E-03$$

$$b = -0.599065E-05$$

$$c = -0.104647E-06$$

$$d = -0.886382E-08$$

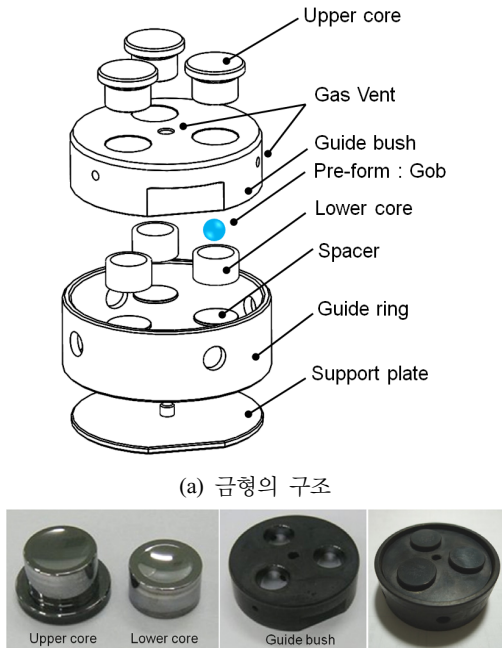
[그림 4] 비구면 유리렌즈의 형상

그림 4는 본 연구에서의 렌즈의 형상과 비구면 계수식을 보여준다. 비구면 유리 렌즈는 디지털 카메라용 유리

렌즈로서 직경 8mm 정도의 크기를 가지며, 한쪽 면은 비구면 형상으로 설계되어 있고, 상대면은 R 26.018mm의 구면 형상으로 이루어져 있다. 소재는 무색투명하고 광학적 균질성, 등방성의 특징을 지닌 일본 Sumita 사의 K-CSK-120으로 유리전이 온도와 항복온도는 각각 498℃, 536℃이다.

3.2.3 캐비티 유리렌즈 성형용 금형

금형은 3 캐비티(cavity) 금형으로 제작되었으며, 구면 형상을 가진 상측 코어와 비구면 형상의 하측 코어로 구성되었다. 그림 5(a)는 유리렌즈 성형용 금형의 구조를 보여주며, 그림 5(b)는 금형의 실물 사진이다.



(a) 금형의 구조

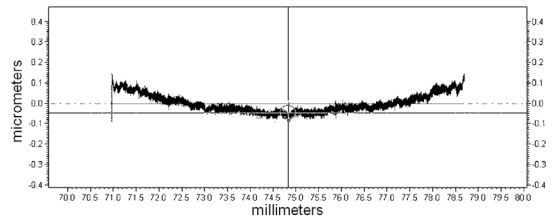
(b) 3-캐비티 금형 사진

[그림 5] 유리렌즈 성형용 금형

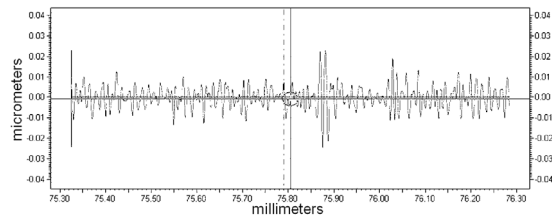
금형 코어는 내식성, 내마모성, 경도 등 기계적 특성이 우수하여 고온 성형 환경에서 장시간 사용이 가능한 초경합금(WC/ Co 0.5%, 일본, 도시바탕가료이사, AE-60) 재질로 만들어졌으며, 5축 초정밀 연삭가공기(일본, Nachi-Fujikoshi사, ASP01)를 이용하여 형상정밀도 0.3 μm 이하, 표면 거칠기 Rt 0.05 μm, Ra 0.007 μm 이하가 되도록 가공한 후 표면조도 Ra 0.005 μm 이하가 되도록 폴리싱하여 이형성 향상을 위한 Re-Ir 코팅박막을 증착(sputtering)으로 형성하였다.

[표 1] 각 코어의 형상정밀도(비구면 형상)

Cavity #	PV [μm]	Ra [μm]
1	0.1730	0.0039
2	0.2583	0.0041
3	0.1864	0.0028

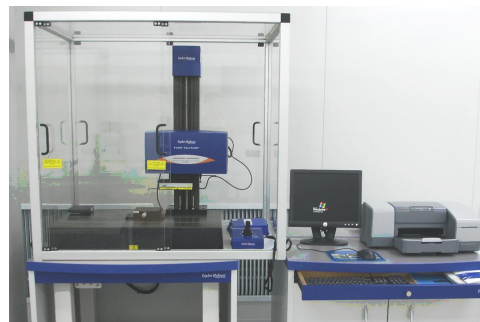


(a) 형상정밀도 측정결과



(b) 표면조도 측정결과

[그림 6] 코어의 형상정밀도 측정결과 (캐비티#2)



[그림 7] 형상측정기(영국, Taylor Hobson사)

3.3 실험 계획

본 연구에서는 다구치 실험계획법을 이용하여 GMP공정 7개의 단계 중 유리렌즈의 형상정밀도에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 냉각1 단계의 공정 조건을 최적화하였다.

유리렌즈의 품질 특성치에는 형상정밀도, 투명도, 간섭무늬 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 비구면 형상정도(PV)값으로 정하고, 냉각1 온도(A), 냉각 1 압력(B), 공정 시간(C)을 주 제어인자로 선정하였다. 각 인자에 대한 수준은 성형 한계 내에서 다음과 같이 각각 3수

준으로 결정하였다. 순차이송방식이므로 전체 사이클 타임(cycle time)은 각 스테이지 별로 머무는 시간과 같다.

제어 인자를 배치하기 위한 직교표는 $L_9(3^4)$ 표를 사용하였고, 교호작용은 없는 것으로 설정하였으며 반복수는 3회를 실시하였다. 표 3과 같이 1열, 2열,4열에 각각 제어 인자를 배치하여 3열은 오차항으로 선정하였다. $L_9(3^4)$ 직교배열표는 3열과 4열에 교호작용이 나타나 다소 오류가 포함될 수 있으나, 현장 엔지니어들이 비교적 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 실험에서 나머지 공정 변수는 표 4와 같이 동일하게 고정하였다.

[표 2] 주요인자

Main variables	Level			Unit
	1	2	3	
Cooling1 temperature(A)	508	525	545	℃
Cooling1 pressure(B)	0	0.1	0.2	Mpa
Cycle time(C)	70	80	90	sec

[표 3] 다구치 DOE 직교표

실험	A	B	C	D
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

[표 4] 스테이지별 공정 조건

Stage	Temperature [℃]	Pressure [MPa]	Cycle time[sec]
Heating1	420	-	D.O.E
Heating1	530	-	
Heating1	560	-	
Main press	560	0.2	
Coolng1	D.O.E	D.O.E	
Coolng2	400	0.1	
Coolng3	-	-	

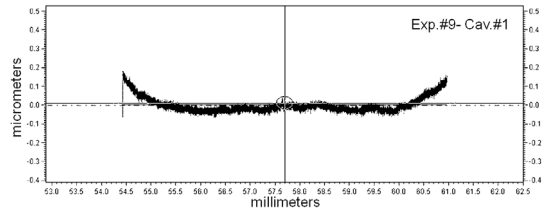
4. 실험 결과

본 연구에서는 다구치 실험계획법을 통하여 순차이송형 GMP공정에서 냉각1의 공정변수가 비구면 렌즈의 성형성에 미치는 영향을 살펴보았다. KAIST 산업공학과에서 개발된 다구치 해석용 KAISTAT version 1.3을 사용하였으며, 망소 특성으로 분석하였다.

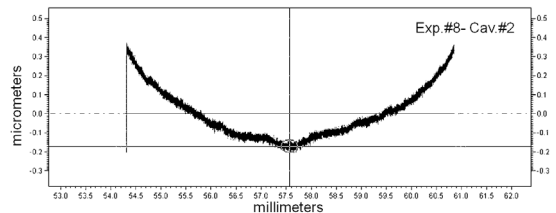
[표 5] 비구면 형상오차(PV) 측정결과

(단위: μm)

Exp#	Cavity #1	Cavity #2	Cavity #3
1	0.3781	0.4400	0.3741
2	0.3716	0.5360	0.3596
3	0.3708	0.4885	0.4727
4	0.4183	0.4984	0.4567
5	0.3601	0.4718	0.4415
6	0.4050	0.4313	0.4535
7	0.3304	0.3123	0.4822
8	0.3738	0.5826	0.4379
9	0.2513	0.3732	0.4916



(a) 형상정밀도 측정결과(실험9-캐비티#1)



(b) 형상정밀도 측정결과(실험8-캐비티#2)

[그림 8] 유리렌즈의 형상정밀도 측정결과

본 실험에서 유리렌즈 성형용 금형은 3개의 캐비티를 가지고 있으므로 총 27 개의 시편을 얻을 수 있었으며, 표5는 형상측정기로 측정한 비구면 형상오차(PV)값을 보여준다. 또한 그림 8은 1번 캐비티에서 실험9 조건으로 성형된 렌즈와 2번 캐비티에서 실험8 조건으로 제작된 렌즈의 형상정밀도 측정 결과로서, 그래프의 세로축 값은

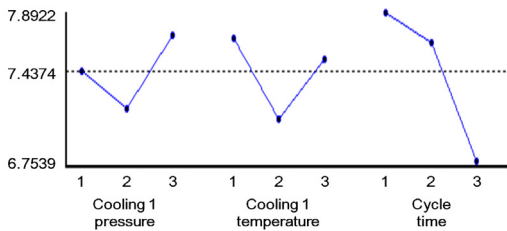
비구면 렌즈의 이론적 설계값과 제작된 렌즈와의 형상 오차를 나타낸다.

비구면 유리렌즈의 형상정밀도에 미치는 주 인자별 영향력을 표 6의 분산분석(ANOVA)을 통해 확인할 수 있으며, 가장 큰 영향을 미치는 요인은 냉각시간으로 분석되었고, 냉각온도, 냉각압력의 순으로 기여도가 있었다. 그림 8은 실험 대 잡음비의 분석결과를 보여준다. 최적 성형조건은 A₃B₁C₁로 예측되었다. 이때 통계적으로 예측된 비구면 형상오차는 0.3788 μm 이다.

그림 9는 본 연구를 통하여 성형된 비구면 유리렌즈의 사진이다.

[표 6] 분산분석 결과(ANOVA)

Factor	DOF	Σx ²	variance	F value
Cooling 1 pressure	2	0.4640	0.2320	3.2921
Cooling 1 temperature	2	0.6304	0.3152	4.4728
Cycle time	2	2.1788	1.0894	15.4587
Error	2	0.1409	0.0705	
Total	8	3.4141		



[그림 8] 요인별 주효과도



[그림 9] 개발된 비구면 유리렌즈 사진

5. 결론

본 연구에서는 순차이송형 GMP공정에서 실험계획법을 적용하여 직경 8 mm 정도의 디지털 카메라용 유리 렌즈의 최적 성형조건을 알아보았으며, 본 논문을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 비구면 형상오차를 측정할 결과 공정시간이 렌즈의 형상정도에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 냉각온도, 냉각압력의 순으로 기여도가 있었다.
2. 본 연구에서 Sumita 사의 K- CSK-120의 경우 냉각 1단계에서 가압하지 않고, 온도 545℃에서 70초간 냉각하였을 때 가장 좋은 형상정밀도를 나타내었다.

본 연구에서는 비구면 형상오차를 최소화하는 성형 조건에 대하여 분석하였지만 유리렌즈의 안정적인 생산을 위해서는 단순한 이론적 최적 공정조건이 아닌 품질관리 한도 내에서 금형의 수명과 유지보수 주기, 생산성 등을 동시에 고려한 최적의 양산조건을 적용하여 한다. 즉, 실제 양산 공정조건을 선정함에 있어 실험적으로 알아낸 최적성형 조건에서 생산된 렌즈가 형상적 측면에서 설계 규격에 가장 근접한다 하더라도 금형의 수명 감소나 냉각시간 증가로 인한 생산성 감소가 발생할 시 형상오차가 품질관리 규격을 만족하는 범위 내에서 양산성을 고려한 차상위 성형 조건을 선택하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] M.Umetani, "Manufacturing of optical Glass Lens by Press-Molding Method", New Glass, Vol. 13, pp. 32-37, 1998.
- [2] 김혜정, 차두환, 김정호, "카메라용 모듈용 비구면 Glass렌즈의 성형 및 광학 특성평가", 한국산학기술학회 논문지, 제12권, 제3호, pp. 124-131, 2007.
- [3] 김혜정, 차두환, 이준기, 김상석, 김정호, "DOE를 적용한 카메라용 모듈용 비구면 Glass렌즈의 가압성형 조건 연구", 전기전자재료학회 논문지, 제20권, 제8호, pp. 720-725, 2007.
- [4] S. H. Chang, et al., "An Experimental Study on 4low Characteristics of PBK-40 for Glass Molding Press Simulation", Key Engineering Materials, Vols. 364-366, pp. 476-681, 2008.
- [5] 백승엽, 이은상, "휴대폰 카메라용 비구면 마이크로 렌즈 최적 연삭가공 평가", 한국공작기계학회 논문지, 제15권, 제2호, pp. 1-9, 1월, 2006.
- [6] 김상석, 이용철, 이동길, 김혜정, 김정호, "실험계획법과 보정가공을 이용한 비구면 유리렌즈 성형용 코어의 초정밀 연삭가공 최적화", 한국정밀공학학회 논문집, 제24권, 제6호, pp. 45-50, 2007.

- [7] 이영민, 장성호, 히영무, 신광호, 윤길상, 정태성, “비구면 유리렌즈 금형의 열응력 해석“, 한국정밀공학회 논문지, 제25권, 제12호, pp. 125-131, 2008.
- [8] 정태성, 박규섭, 김동식, “순차이송방식 GMP 공정에서 공정변수가 유리렌즈 성형성에 미치는 영향“, 한국소성공학회 논문지, 제18권, 제8호, pp. 633- 639, 2009.
- [9] 장태석, 임태환, “유리 금형용 다공질 소결재의 제조에 관한 연구“, 한국산학기술학회 논문지, 제6권, 제6호, pp. 468-472, 2005.

윤길상(Gil-Sang Yoon)

[정회원]



- 2000년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2003년 5월 ~ 2005년 12월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2006년 1월 ~ 2010년 12월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2011년 1월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

사출금형, 마이크로 가공, CAD/CAM

정태성(Tae-Sung Jung)

[정회원]



- 1998년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2009년 2월 : 재영솔루텍 수석연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계설계과 교수

<관심분야>

정밀금형, 사출성형, 기계가공, CAD/CAM, 쾌속조형

박규섭(Kyu-Sup Park)

[정회원]



- 1999년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 11월 ~ 현재 : 재영솔루텍 선임연구원

<관심분야>

광학, 정밀 금형, 마이크로 액추에이터, 열전달