

순차이송 GMP 공정에서의 비구면 유리렌즈 성형 해석에 관한 연구

장성호¹, 강정진², 신광호², 정우철², 허영무*(한국생산기술연구원)
정태성³(재영솔루텍)

Study on the Aspheric Glass Lens Forming Simulation in the Progressive GMP process

S. H. Chang, J. J. Gang, K. H. Shin, W. C. Jung, Y. M. Heo (KITECH), T. S. Jung(JYSolutec)

Abstract

Recently, GMP(Glass Molding Press) process is mainly used to produce aspheric glass lenses. Because glass lens is heated at high temperature above T_y (yielding point) for forming glass, the quality of aspheric glass lens is deteriorated by residual stresses which are generated in a aspheric glass lens after forming. Before this study, as a fundamental study to develop forming conditions for progressive GMP process, compression, strain relaxation and thermal conductivity tests were carried out to obtain the visco-rigid plastic, the visco-elastic and thermal properties of K-PBK40 which is newly developed and applied for precision molding glass material, In this study, using the experimental results we obtained, a glass lens forming simulation in progressive GMP process was carried out and we could forecast the shape of deformed glass lenses and residual stresses contribution in the structure of deformed glass lenses after forming.

Key Words : Aspheric glass lens, Progressive GMP(Glass Molding Press) process, Compression test, Strain relaxation test, Thermal test, K-PBK40, Lens forming simulation

1. 서론

최근 광학 렌즈 산업의 광학계 기능면에서 광학계 구성의 단순화 및 경량화를 동시에 달성할 수 있는 방향으로 발전하여 비구면화 되고 있다. 또한, 소재 측면에서는 굴절률, 색수차, 투과율 등 플라스틱 소재의 광학적 한계를 극복하기 위하여 유리의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 이러한 유리렌즈 부품의 주요 용도는 소형 디지털 카메라가 달린 휴대폰 부품과 소형 디지털 카메라 부품용 사용되고 있으며, 또한 광통신용, Pick-up 용, Laser Printer 용 렌즈, Sensor 렌즈, Display 용 렌즈로 활용 확대되고 있다.

종래의 광학 렌즈 제조 방법인 연마법으로는 생산할 수 있는 렌즈의 크기, 형태 등이 제한될

뿐만 아니라 양산성이 크게 떨어지기 때문에 근래에 GMP(Glass Molding Press) 방식의 직접 프레스 성형법이 개발·이용되고 있다. 이러한 GMP 방식에 의한 유리렌즈 성형법은 면 품질 및 면 정밀도를 완성한 비구면 금형의 성형면상에서 광학 유리의 고상물을 가열, 또는 미리 가열하고 있는 유리의 고상물을 싣고 그 위에서 프레스 성형하는 방법으로 성형 후, 연마 또는 세척 공정을 필요로 하지 않고 정밀한 광학렌즈를 제조할 수 있는 장점이 있다. GMP 방식의 비구면 유리렌즈 제조공정의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

따라서, 본 연구에서는 순차이송 방식의 GMP 공정에서의 유효경 6 mm 급 디지털 카메라용 비구면 유리 렌즈 성형 해석을 통해 그 수축 정도를 예측하고 실제 현장에서의 수축 량과의 비교

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
2. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
3. 재영솔루텍
* 교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀,
E-mail: ymhco@kitech.re.kr

를 통해 유리 렌즈 성형 해석의 활용성을 평가하고 보고한다.

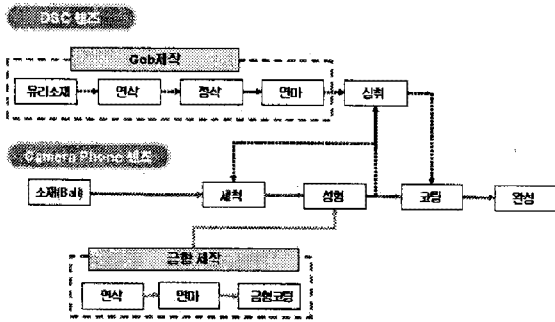


Fig. 1 Flow diagram of fabrication process for the aspheric glass lens in a GMP machine

2. 이론적 배경 및 실험 결과

2.1 압축 성형 공정 해석

압축 성형 공정은 유리 소재(K-PBK40)의 항복점 이상의 높은 온도에서 이루어지기 때문에 유리 거동을 비압축성 뉴턴 유체(incompressible Newtonian fluid)로 보고 다음과 같은 식에 의해서 변형률속도의존 유동 응력식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma = k(\dot{\epsilon})^m \quad (1)$$

이러한 유동응력식의 계수 값을 결정하기 위해 원통형 유리 시험편을 사용하여 고온 압축 시험을 수행하였으며, 그 결과는 아래 Fig. 2에서와 같이 온도에 따른 응력계수(k)와 변형률민감도지수(m)의 변화를 구할 수 있었다[2].

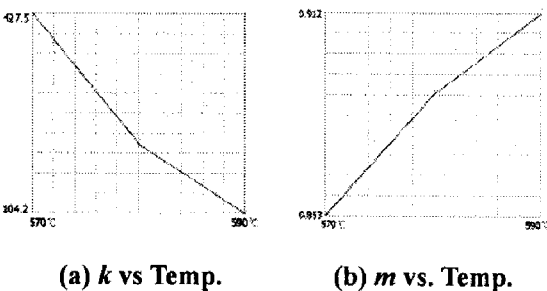


Fig. 2 Results of compression tests at various temperature (at 570 °C, 580 °C, 590 °C)

따라서, 압축성형 공정 해석에 사용된 점소성 거동 모델은 큰 변형에 일반적으로 적용되고 있는 Power law model 을 적용하였다[5].

2.2 냉각 공정 해석

순차이송방식 GMP 공정에서는 3 단계의 가열 단계를 거치고, 압축 성형 단계에서 렌즈 성형이 이루어진 후 3 단계의 냉각 공정을 거치는데 이중 2 단계는 장치 안에서 플레이트의 온도 조절에 의해 감온 되고 마지막 냉각 단계로 장치에서 대기 중으로 나와 렌즈가 취출 되기 전까지 자연 냉각 과정을 거치게 된다. 이러한 냉각과정에서 유리 표면과 내부의 온도 차에 의한 잔류응력이 발생하게 되는데, 이러한 잔류응력이 광학렌즈의 볼록굴절 발생 원인이 된다.[3]

이러한 잔류응력 예측을 위한 점탄성(viscoelasticity) 해석에 필요한 주요 물성치는 크리프(creep)실험으로 구해지며 본 연구에서는 실제 strain relaxation 시험을 통한 전이온도 부근에서의 실험결과를 확보하였다. 냉각 공정 해석에 사용된 점탄성 거동 모델은 Maxwell model 을 사용하였다. Master curve 를 구하기 위해 Thermorheologically simple material 로 가정한 시간-온도 중첩의 원리(time-temperature superposition principle)를 적용하였고, 이때 이동함수(shift function)로 W.L.F. 방정식(William-Landel Ferry equation)을 적용하였다. 아래의 W.L.F. 방정식의 상수인 C_1 과 C_2 의 값은 각각 15, 450 으로 Fig. 3 에 나타낸 실험 결과에 가장 근사한 값으로 결정하여 렌즈 냉각 해석에 적용하였다.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} \quad (2)$$

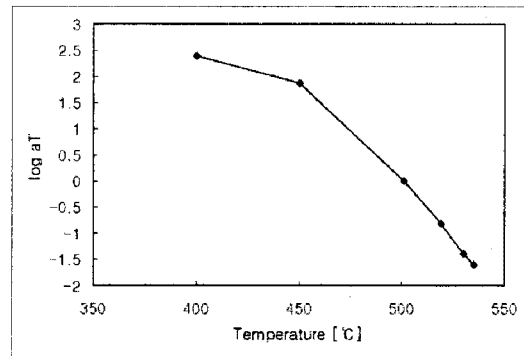


Fig. 3 The shift factor at the various temperatures for K-PBK40. The reference temperature is 501 °C.

또한, strain relaxation 시험으로부터 구해진 점탄

성 계수의 Master curve 를 Fig. 4 에 나타내었고, 이 결과로부터 다음 프로니 급수식을 사용하여 적용된 유리소재(K-PBK40)의 종탄성 계수를 표현 하는데 활용하였다. 결국, 냉각 공정 해석에 적용된 물성 데이터는 Table 1 에 나타내었다.

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \times \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \quad (3)$$

여기서, E_i 와 λ_i 는 i 모드에 대한 전단 계수와 시간 상수이다.

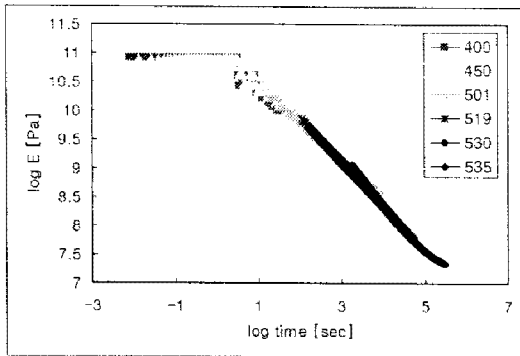


Fig. 4 The master curve of Young's modulus for K-PBK40. The reference temperature is 501 °C.

Table 1 Prony-series constants for the Young's modulus of K-PBK40

i	E_i	λ_i
1	5×10^{10}	3
2	3×10^{10}	25
3	5×10^9	350
4	1×10^9	4500
5	1×10^8	50000

$$E_{\infty} = 2 \times 10^7 \text{ Pa}$$

3. 순차이송 GMP공정 유리렌즈 성형 해석

3.1 성형 해석 모델

렌즈 성형 해석은 상용 FEM code인 MSC MARC를 사용하였다. 그리고 2D 해석모델과 순차이송방식의 GMP 공정 조건을 Fig. 5에 나타내었다. 그리고 성형 중 요소크기가 변하는 Adaptive mesh

법을 적용하였다. 또한 압축시험에 대한 해석 적용을 통해 유리소재와 금형 간 마찰계수를 1.0으로 적용하였다[2].

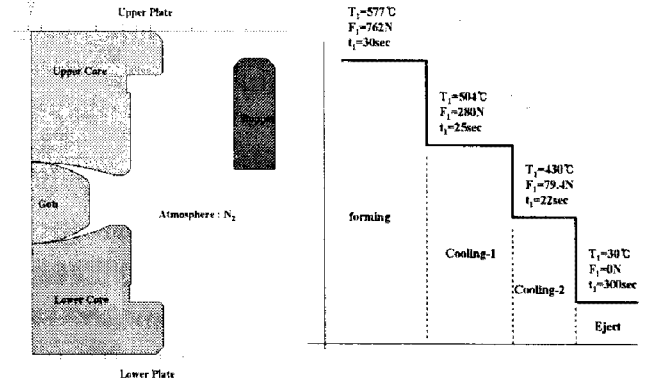


Fig. 5 Glass lens forming simulation 2D half model and forming simulation conditions in the progressive GMP process

3.2 유리 렌즈 성형 해석 결과

Fig. 6에 순차이송 GMP 전공정 해석 후 유리 렌즈 내부의 주응력 분포 결과를 나타내었다. 그리고, Fig. 7에서는 실제 획득해야 할 최종 비구면 유리 렌즈의 단면 형상과 본 연구에서 수행한 렌즈 성형 해석 결과 형상을 비교하여 나타내었다. 해석 결과 형상이 렌즈 가장자리 쪽에 실제 렌즈 제품 형상보다 크게 성형이 되었고, 이는 실제 현장에서 성형 취출 된 유리 렌즈를 연마 후공정에 의해 처리되는 부분이다. 또한, 아래의 구면과 위의 비구면 형상을 보면 실제 렌즈 형상보다 냉각 공정으로 인한 수축으로 인해 전체 형상이 Shift 되어 두께 면에서 감소한 것을 확인할 수 있었다.

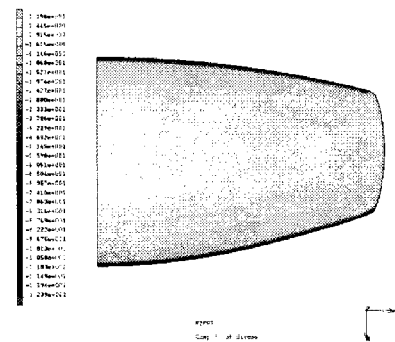


Fig. 6 Simulation results of the primary stress distribution in the glass lens after 1 forming step and 3 cooling steps

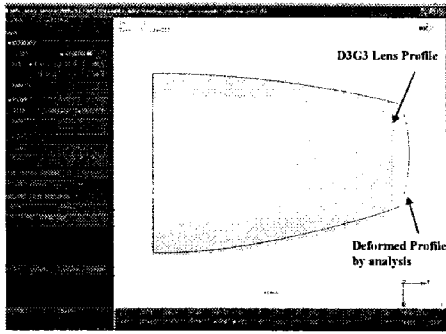


Fig. 7 Simulation results of the primary stress distribution in the glass lens after 1 forming step and 3 cooling steps

이러한 수축현상을 압축성형 단계와 냉각 공정 단계 별 변화를 고찰하기 위해 성형 냉각 과정 중 렌즈의 두께 변화를 검토하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 마지막 냉각 단계 진입 직전에 약 1.5 μm 정도로 유리 렌즈가 팽창 후 다시 수축되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 냉각 마지막 단계가 GMP 장치 밖으로 나와 자연 냉각되는 단계로 장치 안에서 플레이트에 의해 구속되다가 그 구속이 사라지면서 발생된 일종의 스프링백 현상이라고 판단된다.

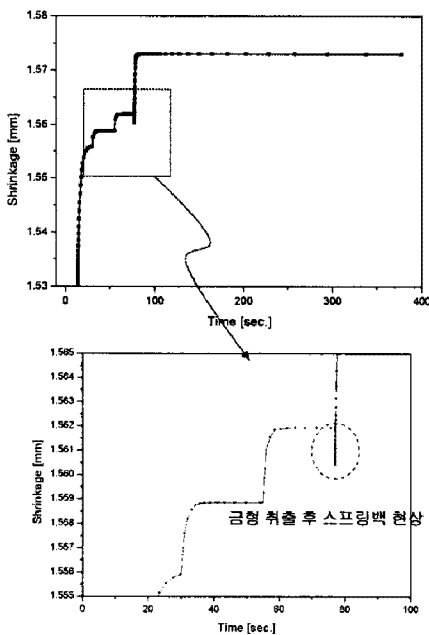


Fig. 8 Simulation results of the springback phenomenon

4. 결론

본 연구에서 순차이송방식 GMP 성형 공정에 이용되는 1 캐비티(cavity) 금형을 이용한 유리 렌즈 성형에 대한 해석을 수행하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

실험을 통한 재료 물성 특성을 확보하여 유리 렌즈 성형 해석을 수행한 결과 렌즈 두께 방향 수축량이 약 20 μm 정도였고, 이 결과는 실제 유리 렌즈 순차이송방식 GMP 공정에서 성형하여 취출 후 측정된 렌즈 두께 방향 수축량보다 과대하게 예측된 결과이다. 실제 성형 결과와 보다 근사한 예측 결과를 얻기 위해서는 유리 렌즈 해석 기법에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 부품·소재기술개발사업의 일환으로 수행중인 [Progressive 방식의 GMP 공정을 위한 다수 Cavity 금형·성형 기술개발(10020636)]의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Umetani, 1998, Manufacturing of optical Glass Lens by Press-Molding Method, New Glass, Vol. 13, pp.32~37.
- [2] 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 Engineering Material, Vols. 364~366, pp. 476~481.
- [3] 전병희, 홍석관, 표창률, 2002, 마이크로 렌즈 성형시 형상예측을 위한 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 제11권, 제7호, pp. 581~588.
- [4] 나진욱, 임성한, 오수익, 전병희, 2003, 개방형 금형을 이용한 유리 렌즈 성형 해석, 한국소성가공학회지, 제12권, 제4호, pp. 296~301.
- [5] MSC. Marc user's guide, Ver. 2005
- [6] Sumita Optical Glass, Inc., 2002, Optical Glass Data Book, Ver. 3.03, pp.199.