

순차이송 GMP 방식용 유리렌즈 금형의 열응력에 관한 연구

장성호¹, 이영민², 신광호², 윤길상², 정우철², 정태성³, 허영무[#]

A Study on the Thermal Stresses of the Glass Lens Mold Using in Progressive GMP Process

S. H. Chang, Y. M. Lee, G. H. Shin, G. S. Yoon, W. C. Jung, T. S. Jung, Y. M. Heo

Abstract

To prevent the damage of glass lens molds and deterioration of glass lenses using in progressive GMP process, a thermal stress and a deformation of the glass lens molds at forming temperature should be considered in the design step.

In this study, as a fundamental study to develop a multi cavity mold used in an aspheric glass lens molding, a heat transfer and a thermal stress analysis were carried out for the case of one cavity glass lens mold used in progressive GMP process. Finally, using analysis results, we estimated the thermal stress in a glass lens mold and predicted a modified height of guide ring that determines the forming height of a glass lens.

Key Words : Thermal Stress Analysis (열응력 해석), Heat Transfer Analysis (열전달 해석), Aspheric Glass Lens Mold (유리렌즈 금형), Progressive Glass Molding Press (순차이송 GMP)

1. 서론

순차이송방식 GMP(Glass Molding Press) 성형공정에서는 각기 다른 가열플레이트 위에서 가열·성형·냉각 과정이 순차적으로 진행되면서 유리 렌즈가 성형되는데 이러한 성형공정에 의해 유리 렌즈 금형 내에는 반복적인 열응력과 열변형이 발생하게 된다. 이 때 발생하는 열응력과 열변형이 큰 경우에는 유리 렌즈 금형의 파손과 유리 렌즈의 품질저하가 나타날 수 있기 때문에 렌즈 금형에 발생하는 열응력 및 변형량을 예측하는 것은 고품질의 유리 렌즈 생산과 금형의 손상 방지 측면에서 중요하다.

Fig. 1에는 비구면 유리 렌즈 성형에 이용되는 1 cavity 금형을 나타내었다. 유리 렌즈 금형은 상/하

부 코어, 가이드 부쉬, 가이드 링으로 이루어져 있으며 유리 렌즈의 성형 높이는 가이드 링의 높이에 따라 결정되어진다. 그런데 설계 과정에서 가이드 링에 발생하는 열변형이 고려되지 않아 유리 렌즈가 설계된 높이까지 성형되지 못하는 현상이 발생되고 있으며 이에 따라 설계된 치수를 만족하는 유리 렌즈가 성형될 때까지 가이드 링에 대한 반복적인 수정 작업이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 유리 렌즈 금형에 대한 열응력 해석을 수행하였으며 금형 내 열응력, 열변형 및 가이드 링의 수정량을 예측하였다. 또한, 열응력 해석에 앞서 금형을 이루는 각 파트들 간의 열교류 정도를 나타내는 계수값을 구하기 위하여 열전달 해석을 수행하였으며 열전달 해석과 실제

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

2. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

3. ㈜재영솔루션

교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀

E-mail:ymheo@kitech.re.kr

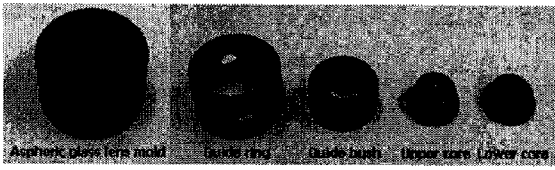


Fig. 1 The configuration of a glass lens mold

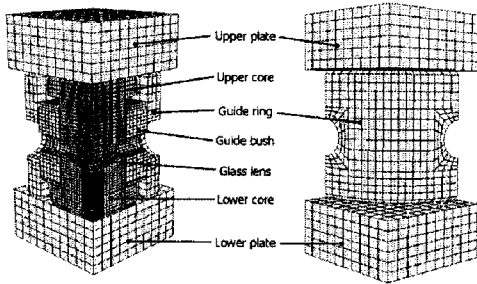


Fig. 2 FEM model for heat transfer analysis

공정에서 측정된 온도 값을 이용하여 접촉면 간의 열전달 정도를 나타내는 계수값을 역공학적으로 구하였다.

2. 유리 렌즈 금형의 열전달 해석

2.1 해석 모델 및 대류 경계 조건

해석 모델은 총 7개의 파트(상/하부 가열플레이트, 상/하부 코어, 가이드 링, 가이드 부쉬, 유리 렌즈)로 이루어져 있으며 Fig. 2에는 열전달 해석을 위한 유한요소모델(1/4 모델)을 나타내었다. 실제 성형과정을 해석에 적용하기 어렵고 전이온도 (T_g) 이상에서 성형되기 때문에 성형 하중에 의한 응력 발생이 매우 작을 것임을 감안, 금형 및 유리 렌즈의 경우는 성형 단계의 모델을 해석에 이용하였다. 유한요소모델은 각각 29,848 / 35,443개의 요소와 절점으로 이루어져 있으며 요소타입은 DC3D8 (ABAQUS solid element)이다[1].

Table 1에는 성형공정의 단계별 가열플레이트의 온도 및 접촉시간 그리고 대기(환경)온도를 나타내었다. GMP 공정의 각 단계별 소요시간은 60s이며 가열플레이트가 하강하는 시간, 금형과 접촉하고 있는 시간(Table 1), 그리고 금형이 이동하는 시간(8s)으로 이루어져 있다. 이동하는 시간 동안에는 금형 내에 어떠한 온도변화도 발생하지 않으며 대기 온도는 각 단계별로 가열플레이트의 온도보다 약 30℃ 정도 낮다고 가정하였다. 대류경

Table 1 Progressive GMP process (Cycle time : 60s)

	Environment temp. (°C)	Plate temp. (°C)	Contact time (s)
Pre heat1	420	450	32
Pre heat2	490	520	32
Pre heat3	550	577	32
Main press	550	577	40
Cooling1	470	504	32
Cooling2	400	430	32

Table 2 Properties of an analysis model

Property	U/L core	Guide bush	Guide ring	Lens
Elastic modulus (GPa)	560	620	210	79.9
Shear modulus (GPa)	224	256.2	80.8	32.5
Poisson's ratio	0.25	0.21	0.3	0.229
Density (10^{-5})(kg/mm ³)	1.4	1.49	0.785	0.239
Thermal expansion (10^{-6})(1/°C)	6	5	12	0.073
Thermal conductivity (W/mK)	70	89	60.5	2.74

계조건의 경우는 밀폐된 공간이어서 대류작용에 의한 열전달이 적을 것이라 판단하였으며 자연대류상에서 일반적인 기체가 가질 수 있는 대류열전달계수의 값이 5~ 20 W/m²K라는 점을 감안하여 가열플레이트와의 접촉면을 제외한 대기 중에 노출되는 면의 대류열전달계수를 5 W/m²K로 하였다 [1~3]. 1/4 모델의 생성을 위한 절단면의 경우는 열전달이 없는 단열의 경계 조건을 적용하였다. 금형의 초기 온도는 금형이 상온에서 대기한 후, pre heat1 단계로 들어감을 감안하여 금형의 초기 온도는 30℃로 가정하였다.

2.2 물성 및 해석 조건

Table 2 에는 해석 모델의 물성을 나타내었다[4]. 열전달 해석에 이용된 소프트웨어(ABAQUS Ver 6.5)의 경우, 접촉면 간의 열교류 정도를 나타내는 계수(gap conductance)를 대류열전달계수의 값으로 정의하도록 되어있다. 때문에 다양한 계수(Table 3)를 적용하여 금형의 온도변화를 고찰하였다.

Table 3 Heat transfer analysis results at main press

Gap conductance (10^3 W/m ² K)	Temp. of mold(°C)		Temp. of lens(°C)		
	Max.	Min.	Max.	Min.	Side
4.0	566.4	555.0	561.1	559.5	559.7
4.5	569.2	560.3	564.9	563.5	563.8
4.7	570.1	561.9	566.1	564.8	565.0
5.0	571.1	564.1	567.6	566.5	566.6
5.2	571.7	565.3	568.5	567.4	567.6
5.5	572.5	566.8	569.6	568.6	568.7
6.0	573.5	568.8	571.0	570.2	570.3
7.0	574.7	571.5	572.9	572.3	572.4
8.0	575.5	573.1	574.1	573.6	573.7
9.0	575.9	574.1	574.9	574.5	574.5
10	576.2	574.8	575.4	575.0	575.0
10 ²	577.0	576.9	576.9	576.9	576.9

Table 4 Applied pressures on an upper plate

	Pre heat1	Pre heat2	Pre heat3
Pressure(MPa)	1,533	1,533	10,731
	Main press	Cooling1	Cooling2
Pressure(MPa)	121,563	44,688	12,563

Table 5 Thermal stress analysis results

	Max. stress (MPa)	Max. temp. (°C)	Max. disp. of z-axis for guide ring (μm)	Max. disp. of z-axis for upper core (μm)
Pre heat1	55.7	358.9	56.1	25.4
Pre heat2	28.3	475.6	84.7	35.9
Pre heat3	16.6	550.9	102.5	42.6
Main press	5.8	570.1	108.8	44.6
Cooling1	5.6	526.4	100.1	43.7
Cooling2	11.5	469.7	88.0	42.5

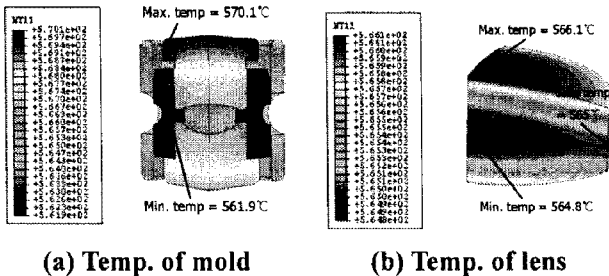


Fig. 3 Temperature distributions of a mold and a glass lens model : main press
(Gap conductance = $4.7(10^3)$ W/m²K)

2.3 열전달 해석 결과

Table 3에는 해석 결과를 정리하였다. Gap conductance의 값이 증가함에 따라서 금형과 유리 렌즈의 온도 또한 증가함을 알 수 있다. Gap conductance 값을 결정하기 위해 GMP 공정에서 측정된 온도를 이용하였으며 main press 단계에서 가열플레이트의 온도가 577°C 일 때 유리 렌즈 측면의 온도는 약 565°C 였다. 이러한 온도 분포는 gap conductance의 값이 $4.7(10^3)$ W/m²K 일 때 가장 유사한 결과(565°C)를 보였다. 따라서 열응력 해석에 적용할 gap conductance 값으로 $4.7(10^3)$ W/m²K를 선정하였다. Fig. 3에는 금형 및 유리 렌즈의 온도 분포를 나타내었다.

3. 유리 렌즈 금형의 열응력 해석

3.1 해석 모델 및 대류 경계 조건

열응력 해석에 이용된 모델은 열전달 해석에 이용된 모델과 동일하며 유한요소모델의 요소타입만을 변경하였다. 열응력 해석에 이용된 요소 타입은 C3D8T(ABAQUS solid element)이다[1].

해석에 적용된 초기 온도 및 대류 경계조건은 열전달 해석과 동일하며 GMP 공정에서 측정된 하중을 Table 4와 같이 단계별로 상부 가열플레이트의 상부에 압력으로 적용하였다.

3.2 물성 및 해석 조건

열응력 해석에 적용된 물성은 열전달 해석과 동일하며 열전달 해석에서 구한 gap conductance [$4.7(10^3)$ W/m²K]를 적용하였다. 열응력 해석은 Table 1과 같은 GMP 공정을 모사하여 수행되었다.

3.3 열응력 해석 결과

Table 5에는 열응력 해석 결과를 정리하였다. Pre heat1 단계에서 55.7 MPa의 최대 응력이 발생되었으며 이는 Table 6에 기재된 가이드 링 소재 인장 강도(560 MPa)의 약 10%에 해당하는 값으로 반복되는 열응력에 의한 금형의 손상은 없을 것이다.

Table 6 Tensile strength of a mold

	U/L core	Guide bush	Guide ring
Material	AE60	D10	SUS316
T.S(MPa)	2,800	1,500	560

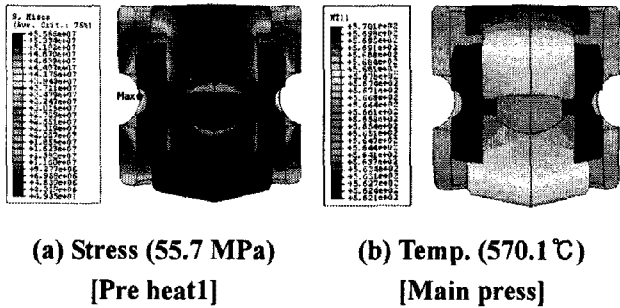


Fig. 4 Thermal stress analysis results

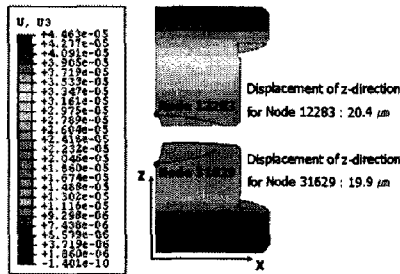


Fig. 5 Displacement of node 12283 and 31629(z-direction)

최고 온도는 main press 단계에서 상부 코어에 507.1°C로 나타났다. 가이드 링의 수직방향(z-direction) 변형량은 main press 단계에서 108.8 μm로 최대 변형을 보였으며 상부 코어도 main press 단계에서 44.6 μm의 최대 변형량을 보였다. Fig. 4에는 열응력 해석 결과를 나타내었다. Fig. 5에는 절점 12283과 31629의 수직방향 변위를 나타내었다. 절점 12283과 31629의 수직방향 변위의 차는 유리 렌즈의 열팽창에 의한 변형량을 나타내는 것으로 유리 렌즈가 약 0.5 μm정도 팽창되었음을 알 수 있다. 이러한 가이드 링과 상부 코어, 유리 렌즈의 변형량을 이용하면 가이드 링의 열팽창에 의하여 64.7 μm만큼 미성형 되었음을 알 수 있다.

최종적으로 앞서 구한 미성형 높이(64.7 μm)와 가이드 링의 평균 온도변화(약 535.1°C) 및 열팽창 계수를 이용하면 기존에 설계된 가이드 링의 수정량을 계산할 수 있으며 이렇게 구한 가이드 링

의 수정량은 64.4 μm이다.

4. 결론

본 연구에서는 순차이송방식 GMP 성형공정에 이용되는 유리 렌즈 금형에 대한 열응력 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 열전달 해석 결과, 접촉간의 gap conductance는 $4.7(10^3) \text{ W/m}^2\text{K}$ 임을 알 수 있었다.

(2) 열응력 해석 결과, 금형 내에 발생하는 최대 응력(55.7 MPa)은 pre heat1 단계에서 가이드 링에 발생하였으며 이는 가이드 링 소재 인장강도의 약 10%에 해당하는 값으로 열응력에 의한 금형의 손상은 없을 것이다.

(3) Main press 단계에서 금형 및 유리 렌즈의 열팽창에 의한 유리 렌즈의 미성형 높이는 64.7 μm이며 이러한 미성형 높이와 가이드 링의 평균 온도변화 및 열팽창 계수를 고려하여 상온에서 가이드 링의 수정량(64.4 μm)을 구할 수 있었다.

후기

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

참고 문헌

- [1] ABAQU/Standard User Manual Ver 6.4
- [2] L. Rabiey., D. Flick. and A. Duquenoy., "3D Simulations of Heat Transfer and Liquid Flow during Sterilization of Large Particles in a Cylindrical Vertical Can," Int. J. of Food Engineering, Vol. 82, pp.409~417, 2007.
- [3] Min. K. H., Son. Y. S., Kim. C. Y., Lee. Y. J. and Hong K. H., "Heat and Moisture Transfer from Skin to Environment through Fabrics: A Mathematical Model," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Proceeding, 2007.
- [4] Sumita Optical Glass, Inc., "Optical Glass Data Book," Glass Data Ver. 3.03, pp.199, 2002