

비구면 유리 렌즈 금형의 열응력 해석

Thermal stress analysis for an aspheric glass lens mold

이영민¹, ✉장성호¹, 허영무¹, 신광호¹, 윤길상¹, 정태성²
 Young Min Lee¹, ✉Sung Ho Chang¹, Young Moo Heo¹, Kwang Ho Shin¹, Gil Sang Yoon¹
 and Tea Sung Jung²

¹ 한국생산기술연구원 정밀금형팀 (Precision Molds and Dies Team, KITECH)

² 재영솔루텍 (JYSolutec)

✉ Corresponding author: shchang@kitech.re.kr, Tel: 032-850-0319

Manuscript received: 2008.8.20 / Revised: 2008.3.3,9.10 / Accepted: 2008.9.17

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. In such a background, the high-precision optical GMP processes were developed with an eye to mass production of precision optical glass parts by molding press. Generally, because the forming stage in a GMP process is operated at high temperature above 570 °C, thermal stresses and deformations are generated in the aspheric glass lens mold that is used in GMP process. Thermal stresses and deformations have negative influences on the quality of a glass lens and mold, especially the height of the deformed glass lens will be different from the height of designed glass lens. To prevent the problems of a glass lens mold and the glass lens, it is very important that the thermal stresses and deformations of a glass lens mold at high forming temperature are considered at the glass molds design step. In this study, as a fundamental study to develop the molds used in an aspheric glass lens fabrication, 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, it was predicted the height of thermally deformed guide ring and calculated the height of the guide ring to be modified, 64.5 μm. This result was referred to design the glass lens molds for GMP process in production field.

Key Words: Thermal Stress Analysis (열응력 해석), Heat Transfer Analysis(열전달 해석), Aspheric Glass Lens Mold (비구면 유리 렌즈 금형), Progressive Glass Molding Press(GMP:순차이송방식)

1. 서론

GMP(Glass Molding Press) 성형 방식은 금형 내 유리 소재(gob)를 전이온도 이상으로 가열한 뒤, 유리 렌즈의 형상이 가공되어 있는 금형에 힘을 가하여 유리 렌즈를 생산하는 방식으로 순차이송과 일괄처리방식으로 나눌 수 있다. 이 중에서 순

차이송방식은 각기 다른 가열플레이트 위에서 가열, 성형, 냉각과정을 순차적으로 진행하는 방식으로 Fig. 1 에는 순차이송방식의 모습을 나타내었다. Fig. 2 에는 GMP 성형공정에 이용되는 1 cavity 금형을 나타내었다.

현재 유리 렌즈 금형은 가이드 링(guide ring)의 높이에 의하여 렌즈의 성형 높이가 조절되는 구조

로 되어 있다. GMP 성형 공정에서 유리 렌즈 금형은 가열과 냉각에 따라서 상온에서 577°C 사이의 온도변화를 겪게 되는데 이러한 온도 변화에 의해 금형에는 열응력과 열변형이 발생하게 되며 열응력의 발생이 큰 경우에는 반복적인 성형에 의한 피로 현상으로 인해 금형에 손상이 발생할 수 있다. 금형의 열변형은 유리 렌즈의 품질에 영향을 미치게 된다. 금형의 설계단계에서는 온도 변화에 따른 금형의 열변형이 고려되지 않기 때문에 초기 설계 안에 따라 제작된 금형을 성형에 바로 이용할 경우, 성형된 유리 렌즈의 치수가 유리 렌즈의 설계 안을 만족시키지 못하게 된다. 이로 인해 유리 렌즈의 성형 높이를 결정하는 가이드 링에 대한 추가적인 수정작업이 요구되며, 설계 안을 만족하는 유리 렌즈가 성형될 때까지 가이드 링에 대한 수정작업을 반복하게 된다. 때문에 금형의 열변형량을 계산하여 이를 설계에 반영할 수 있다면 가이드 링의 높이 수정에 추가적으로 소요되는 작업을 줄일 수 있게 된다. 따라서 렌즈 금형에 발생하는 열응력 및 열변형량을 예측하는 것은 고품질의 유리 렌즈 생산, 금형의 손상 방지와 작업의 수월성 측면에서 중요한 부분이다.

본 연구에서는 비구면 유리 렌즈 금형에 대한 열응력 해석을 수행하여 유리 렌즈 금형에 발생하는 열응력과 변형량을 구하였다. 두 물체가 접해 있을 때, 한 물체가 가열되면 전도에 의하여 접해 있는 물체의 온도가 상승하게 된다.

만약 이러한 현상을 해석으로 모사한다면 두 물체의 접촉면 사이에 발생하는 열 교류 정도를 알고 있어야 한다. 유리 렌즈 금형은 상/하부 코어

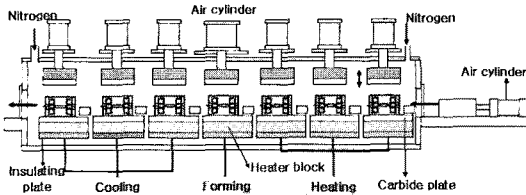


Fig. 1 Progressive GMP process

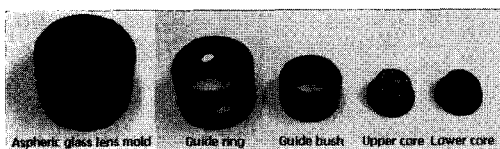


Fig. 2 The configuration of a glass lens mold

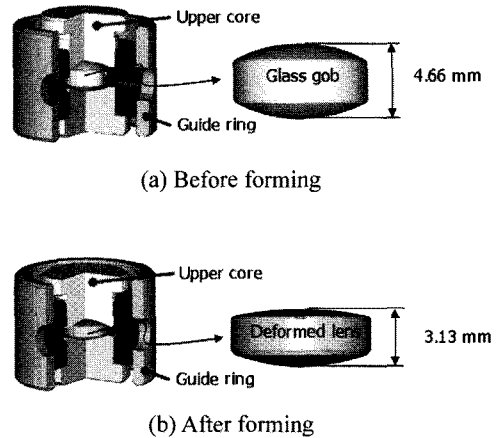


Fig. 3 The configuration of a mold and a glass lens before and after forming

(upper/lower core), 가이드 부쉬(guide bush), 가이드 링과 같은 4 개의 파트로 이루어져있으며 각각의 파트 간에는 서로 접촉면이 존재한다. 이러한 접촉면 사이에는 위의 예와 같은 열전달이 발생하기 때문에 금형의 열응력 해석을 위해서는 접촉면 사이의 열전달 정도를 나타내는 값을 알아야 한다. 하지만 현재 접촉면 간의 열전달 정도를 실험이나 측정을 통하여 구하는 것이 힘들기 때문에 본 연구에서는 먼저, 렌즈 금형 모델을 이용한 열전달 해석을 수행함으로써 접촉면 간의 열전달 정도를 나타내는 값을 구하였다. 최종적으로 열전달 해석으로부터 구해진 값을 이용하여 유리 렌즈 금형에 대한 열응력 해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 가이드 링의 수정 량을 구하였다.

2. 유리 렌즈 금형의 열전달 해석

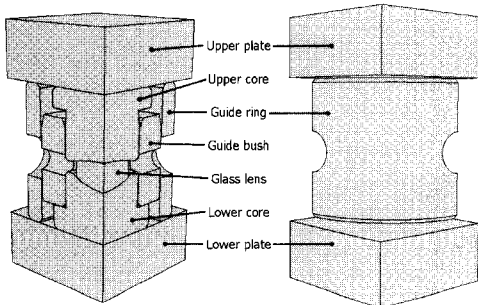
2.1 해석 모델

Fig. 3 에 성형 전(a)/후(b)의 유리 렌즈 금형 및 유리 렌즈의 형상을 나타내었다. 실제로는 상부가 가해지는 하중에 의하여 상부 코어가 유리 렌즈의 성형 높이를 결정하는 가이드 링의 끝 단까지 내려오면서 성형이 이루어지게 된다. 하지만 이러한 유리 렌즈의 성형 과정을 열전달 및 열응력 해석에 적용하기에는 어려움이 있다.

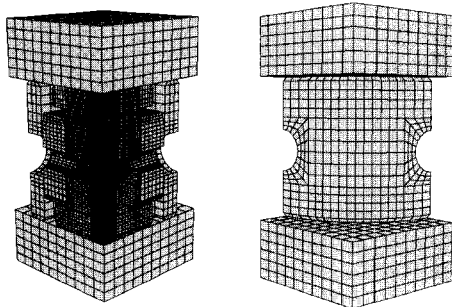
그렇기 때문에, 유리 소재의 강성이 약해 성형 하중에 의하여 발생하는 응력이 열응력에 비해 매우 작을 것임을 감안, 열전달 및 열응력 해석에는 렌즈가 최종적으로 성형된 상태의 모델 Fig. 3(b)를

이용하였다.

Fig. 4(a) 에는 유리 렌즈 금형의 3D 모델을 나타내었다. 금형이 대칭 형상임을 감안하여 실제 모델의 1/4 만을 이용하여 유한요소해석에 이용하였다. 해석 모델은 상/하부 가열플레이트 (upper/lower plate), 상/하부 코어, 가이드 링, 가이드 부쉬, 유리 렌즈 등 총 7 개의 파트로 구성되어있다. Fig. 4(b) 에는 열전달 해석을 위한 유한요소모델을 나타내었다. 해석 모델은 8 개의 절점을 가지는 솔리드 요소로 이루어져있으며 유한요소모델에 관한 간략한 정보를 아래에 나타내었다.¹



(a) 3D model of a glass lens mold



(b) FEM model of a glass lens mold

Fig. 4 3-D and FEM model for heat transfer analysis

Table 1 Progressive GMP process

	Cycle time (s)	Plate temp. (°C)	Contact time (s)
Pre-heat1	60	450	32
Pre-heat2		520	32
Pre-heat3		577	32
Main-press		577	40
Cooling1		504	32
Cooling2		430	32

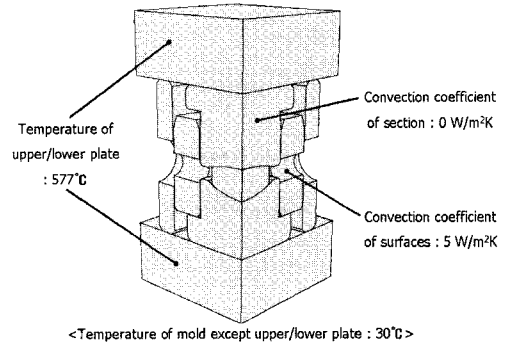


Fig. 5 Initial temperature and convection conditions of analysis model

- Element type: DC3D8 (ABAQUS solid element)
- The number of elements: 29,848
- The number of nodes: 35,443

2.2 초기 온도 및 대류경계조건

Table 1 에는 GMP 성형 공정의 단계별 가열플레이트의 온도를 나타내었다. GMP 공정은 총 6 단계(pre heat1/heat2/heat3, main press, cooling1, cooling2) 로 이루어져 있으며 각 단계별로 Table 1 에 기재된 온도로 가열되어 있는 가열플레이트 위를 렌즈 금형이 이동하면서 가열, 성형, 냉각과정이 순차적으로 이루어진다. 순차이송방식 GMP 공정의 한 사이클은 60sec 이며 각 단계는 상부 가열플레이트가 상부 코어에 접촉하는데 소요되는 시간, 상/하부 가열플레이트가 금형과 접촉하고 있는 시간, 그리고 금형이 다음 단계로 이동하는 시간(8sec)으로 이루어져 있다. 예를 들어 main press 단계의 경우, 상부 가열플레이트가 상부 코어에 접촉하는데 소요 되는 시간은 12sec, 금형이 다음 단계로 이동하는 시간이 8sec 이며 상/하부 가열플레이트가 금형과 접촉하고 있는 시간은 40sec 이다.

열전달 해석의 경우, Table 1 과 같이 6 단계별로 가열플레이트의 온도가 각기 다를음을 감안하지 않고 금형이 총 136sec(pre heat1 단계에서 main press 단계까지 상/하부 가열플레이트가 금형과 실제 접해 있는 시간) 동안 main press 단계의 가열플레이트 위에서 가열(577°C)된다고 가정하였다. 금형 주위의 환경(대기) 온도는 가열플레이트의 온도보다 약 30°C 정도 낮은 550°C로 가정하였다. 금형의 초기 온도는 금형이 상온에서 대기한 후, pre heat1 단계로 들어감을 감안하여 금형(상/하부 가열플레

이트 제외)의 초기 온도는 30 ℃로 가정하였다. 일반적으로 대류 열전달 계수는 주위 환경을 이루는 기체의 종류와 대류 방식에 따라 차이를 보인다.² 순차이송방식 GMP 공정은 질소가스로 이루어진 공간 안에서 모든 단계가 이루어지고 있으며 그 공간은 밀폐된 공간이라 가정할 수 있다. 이에 따라 대류작용에 의한 열전달이 적을 것이라 판단하였으며 자연대류상에서 일반적인 기체가 가질 수 있는 대류 열전달 계수의 값이 5~20W/m²K 라는 점을 감안하여 상/하부 가열플레이트와의 접촉면을 제외한 대기 중에 노출되는 면의 대류 열전달 계수를 5W/m²K 로 하였다.^{1,3,4} 1/4 모델의 생성을 위한 절단면의 경우는 열전달이 없는 단열의 경계조건을 적용하였다. Fig. 5 에는 초기 온도 및 대류 경계조건을 나타내었다.

Table 2 Mechanical and thermal properties of an analysis model

	U/L core	Guide bush	Guide ring	Glass 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/℃)	6	5	12	0.073
Thermal conductivity (W/mK)	70	89	60.5	2.74

Table 3 Gap conductance conditions

Type	1	2	3	4	5	6
Gap conductance (W/m ² K)	10 ¹	10 ²	10 ³	60 (10 ²)	70 (10 ²)	90 (10 ²)
Type	7	8	9	10	11	12
Gap conductance (W/m ² K)	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹

Table 4 Heat transfer analysis results

Type	Temp. of mold(℃)		Temp. of lens(℃)	
	Maximum	Min.	Max.	Min.
1	74.5	41.7	43.4	41.7
2	144.0	68.1	98.8	96.1
3	449.1	365.8	422.0	416.7
4	571.7	564.6	568.0	566.7
5	573.8	569.1	571.7	570.6
6	575.1	571.9	573.3	572.5
7	575.6	573.0	574.0	573.4
8	577.0	576.8	576.9	576.8
9	577.0	576.8	576.9	576.8
10	577.0	576.8	576.9	576.8
11	577.0	576.8	576.9	576.8
12	577.0	576.8	576.9	576.8

2.3 열적 물성 및 해석 조건

Table 2 에는 해석 모델의 기계적/열적 물성을 나타내었다.⁵ 실제로 금형과 유리 렌즈 소재의 경우, 온도 변화에 따라 물성에 변화가 있으나 온도 변화에 따라 물성 변화가 발생하나 이에 대한 정보를 획득하기가 어려워 상온의 물성을 해석에 적용하였다. 열전달 해석은 ABAQUS Ver 6.5 소프트웨어를 이용하여 수행되었다. 해당 소프트웨어는 접촉면 간의 열교류 정도를 나타내는 계수(gap conductance)를 대류 열전달 계수의 값으로 정의하도록 되어있다. 때문에 접촉면 사이의 계수를 Table 3 과 같이 적용하여 계수 변화에 따른 금형의 온도변화를 고찰하였다

2.4 열전달 해석 결과

Table 4 에는 해석 결과를 정리하였다. Gap conductance 의 값이 커질수록 접촉면간의 열전달이 활발하여 금형의 온도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6 에는 해석 결과(type 4)를 나타내었다. 금형에서 발생한 최고 온도는 상부 가열플레이트와 상부 코어가 접하는 위치에서, 최저 온도는 가이드 부쉬에서 나타났다. Gap conductance 의 변화에 따른 금형 및 유리렌즈의 온도 변화를 실제 GMP 공정에서 측정 한 온도와 비교하여 열용력 해석에 적용할 cap conductance 값을 선정하였으며 GMP 공정 중, main press 단계에서 가열플레이트의 온도가 577℃ 일 때 유리 렌즈 측면의 온도는 약

565℃였다. 이와 같은 온도는 Fig. 6 에 나타난 렌즈의 온도분포와 같이 60(10²)W/m²K 일 때 실제 측정값과 해석 값이 가장 유사한 것으로 나타났다. 따라서 열응력 해석에 적용할 gap conductance 는 60(10²)W/m²K 로 선정하였다.

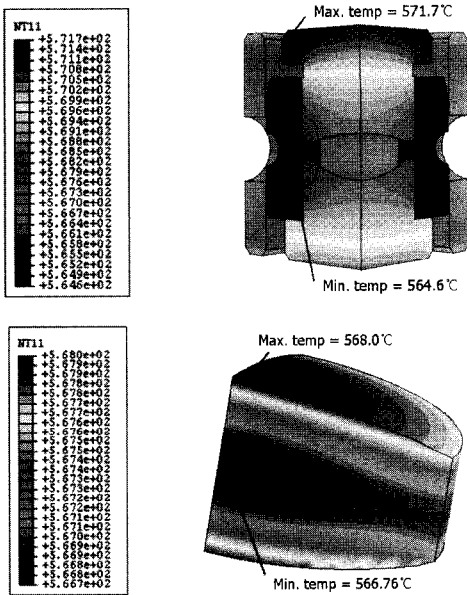


Fig. 6 Temperature distributions of lens mold and lens (Gap conductance = 60(10²)W/m²K, Type 4)

Table 5 Environment temperatures around the glass lens mold at each stage and applied pressures on an upper plate

	Temperature(℃)	Pressure(Pa)
Pre heat1	420	1,533
Pre heat2	490	1,533
Pre heat3	550	10,731
Main press	550	121,563
Cooling1	470	44,688
Cooling2	400	12,563

3. 유리 렌즈 금형의 열응력 해석

3.1 해석 모델

열응력 해석에 이용된 모델은 열전달 해석에 이용된 모델과 동일하며 열응력 해석 모델에 적용된 요소에 대한 특징을 아래에 간략하게 나타내었다.¹

- Element type: C3D8T (ABAQUS solid element)
- The number of element: 29,848
- The number of nodes: 35,443

3.2 초기 온도, 대류경계조건 및 하중조건

열응력 해석에 적용한 대류경계조건은 열전달 해석과 동일하다. 상/하부 가열플레이트를 제외한 그 이외 파트의 초기온도를 30℃로 동일하게 적용하였으며 가열플레이트의 온도 및 가열플레이트와 코어의 접촉 시간은 Table 1 과 같이 GMP 공정의 process 를 적용하였으며 금형이 다음 단계로 이동되는 시간(8sec) 동안에는 금형 내에 어떠한 온도 변화도 발생하지 않는다고 가정하였다. 또한 열전달 해석과 같이 대기 온도는 가열플레이트의 온도보다 약 30℃ 정도 낮다고 가정하였다. Table 5 에는 단계별 대기 온도와 상부 가열플레이트에 적용되는 압력을 나타내었다. 적용 압력은 가열플레이트의 면적과 로드셀로부터 측정된 하중을 이용하여 계산되었다.

3.3 기계적/열적 물성

열응력 해석에 적용된 기계적/열적 물성은 열전달 해석과 동일하다. 접촉면간 계수의 경우는 열전달 해석으로부터 구한 60(10²)W/m²K 를 적용하였다.

3.4 열응력 해석 결과

Table 6 에는 열응력 해석 결과를 정리하였다. Pre heat1 단계에서는 렌즈 금형의 응력이 57.1MPa 까지 증가하였으며 이후, 점차 감소하면서 main press 단계에서는 4.2MPa 의 응력을 나타내었다. 이후 cooling1 과 cooling2 의 단계가 진행되면서 다시 응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 전체 성형 공정에서 발생한 최대 응력은 가이드 링에서 57.1MPa 로 나타났으며 이는 Table 7 에 기재되어있는 가이드 링 소재 인장강도(560MPa)의 약 10%에 해당하는 값으로 반복 성형 및 열응력에 의한 금형의 손상은 없을 것이라 판단된다. Main press 단계에서 상부 코어에서 573.7℃의 최고 온도가 나타났으며 가이드 부위의 경우, 상대적으로 낮은 온도분포를 보였다. 가이드 링의 변형량은 pre heat1 단계에서 main press 단계까지 진행되면서 가열플레이트에 의한 가열온도가 증가함에 따라 수직방향(z-axis) 변형량이 증가하였으며 main press 단계에는 110 μm의 수직방향 변형량을 보였다. 이

후 냉각과정을 거치면서 가이드 링의 변형량은 점차 감소하였다.

Table 6 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	57.1	378.9	61.0	27.0
Pre heat2	24.3	490.8	89.2	37.3
Pre heat3	13.4	561.0	105.6	43.5
Main press	4.2	573.7	110.0	45.0
Cooling1	6.1	523.7	99.7	44.1
Cooling2	11.3	462.2	86.7	42.7

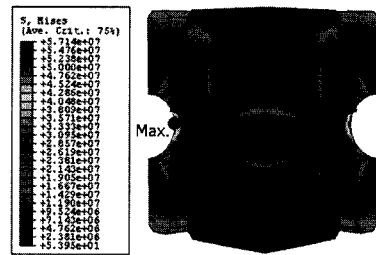
Table 7 Tensile strength of molds

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

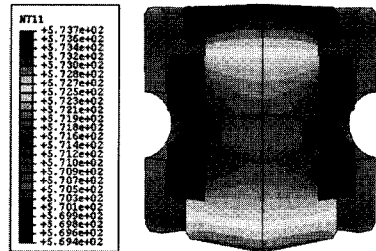
상부 코어의 경우, 가이드 링과 마찬가지로 pre heat1 단계에서 main press 단계에 이르기까지 계속하여 수직방향 변형량이 증가하였으며 main press 단계에서는 45.0 μm의 변형량을 보였다. 이후, 냉각과정을 거치면서 변형량은 점차 감소하였다. 이러한 가이드 링과 상부 코어의 수직방향 변형량을 이용하면 main press 단계에서 가이드 링의 열팽창에 의하여 65.0 μm (110.0 μm - 45.0 μm)만큼 유리 렌즈 성형이 이루어지지 못하였음을 알 수 있다. Fig 7 에는 위의 해석 결과를 나타내었다.

Fig. 8 에는 절점 12283 과 31629 의 수직방향(z) 변위를 나타내었다. Fig. 7(d)와 Fig. 8 을 이용하면 절점 12283 과 31629 의 수직방향 변형량 차이가 유리 렌즈의 열팽창에 의한 변형량임을 알 수 있다. 절점 12283 의 수직방향 변위는 20.6 μm, 절점 31629 의 수직방향 변위는 20.1 μm이며 이는 유리 렌즈가 약 0.5 μm정도 열팽창 되었음을 의미한다. 최종적으로 가이드 링과 상/하부 코어, 유리 렌즈

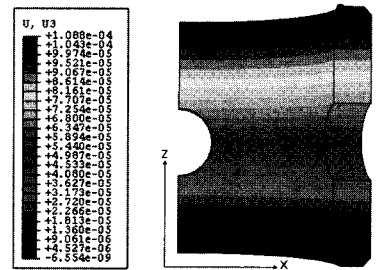
의 열변형에 의하여 유리 렌즈는 설계 안에 비해 65.5 μm(0.5 μm + 65.0 μm) 만큼 성형이 이루어지지 못하게 된다.



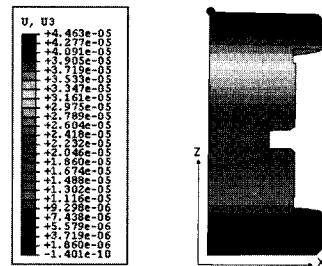
(a) Max. Von Mises stress at pre heat1 (57.1 MPa)



(b) Max. temperature at main press (573.7°C)



(c) Max. displacement of guide ring at main press (110 μm)



(d) Max. displacement of upper core at main press (45.0 μm)

Fig. 7 Max. values of Von Mises stress, temperature and displacement

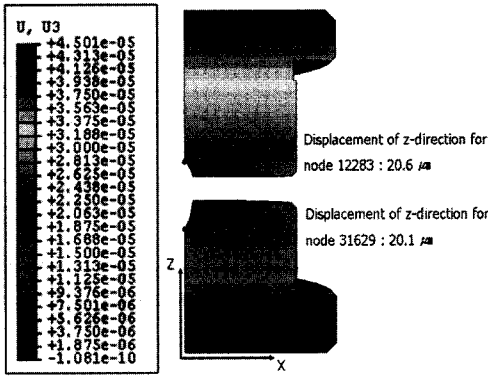


Fig. 8 Displacement of node 12283 and 31629 (z-direction)

3.5 가이드 링의 수정 량 계산

열응력 해석에서는 가이드 링의 렌즈 금형의 열팽창에 의한 변형량을 구하였으며 이러한 변형량과 가이드 링의 평균 온도변화(약 542℃) 및 열팽창 계수를 이용하면 가이드 링의 수정 량을 계산할 수 있으며 상온에서 가이드 링의 수정 량은 다음과 같다.

■ 열팽창 된 가이드 링의 높이

- 가이드 링의 높이(상온, 초기 설계 값) + 열팽창에 의한 변형량 = 16.96mm + 0.11mm = 17.07mm

■ 유리 렌즈 설계 안을 만족하기 위한 가이드 링(열팽창에 의한 변형량 포함)의 높이

- 열팽창 된 가이드 링의 높이 - 성형 온도에서 가이드 링의 수정 량 = 17.07mm - 0.0655mm = 17.0045mm

■ 유리 렌즈 초기 설계 값을 만족하기 위한 상온에서의 가이드 링의 높이(L)

$$L = 17.0045 / (1 + \alpha \Delta T) = 16.8946 \text{mm} \quad (\alpha = \text{열팽창 계수, Table 2 참조})$$

■ 상온에서 가이드 링의 수정 량

- 수정 량 = 16.96mm - 16.8946mm = 65.4 μm

4. 결론

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

(1) 열전달 해석 결과, 접촉면들 사이 열전달의 정도를 나타내는 gap conductance 는 60(10²)W/m²K

임을 알 수 있었다.

(2) 열응력 해석 결과, 금형 내에 발생하는 최대 응력은 pre heat1 단계에서 가이드 링에 발생하였으며 크기는 57.1MPa 이었다. 이는 가이드 링 소재 인장강도의 약 10%에 해당하는 값으로 열응력에 의한 금형의 손상은 없음을 알 수 있다.

(3) Main press 단계에서 금형 및 유리 렌즈의 열팽창에 의해 유리 렌즈의 성형이 이루어지지 못한 높이는 65.6 μm이며 이러한 변형량을 고려하여 상온에서 가이드 링의 수정 량(65.4 μm)을 계산할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. ABAQUS Ins., "Standard User Manual Ver 6.4," ABAQUS Ins., 2002.
2. Yoon, S. H., Kim, M. K. and Kim, D. S., "Effects of the Convector Plate Shape and the Atmospheric Gas on Characteristics of Heat Transfer in a Batch Annealing Furnace," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 72-79, 1996.
3. Rabiey, L., Flick, D. and Duquenoy, A., "3D Simulations of Heat Transfer and Liquid Flow during Sterilization of Large Particles in a Cylindrical Vertical Can," Journal of Food Engineering, Vol. 82, Issue 4, pp. 409-417, 2007.
4. 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," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 25-26, pp. 5292-5304, 2007.
5. Sumita Optical Glass, Inc., "Optical Glass Data Book," Glass Data Ver. 3.03, p. 199, 2002.