

# 칼코겐유리렌즈 압축성형 시 표면결함을 고려한 가열조건 최적화

손병래\*, 안준형\*\*, 이영환\*\*\*, 황영국\*\*.#

\* 호남대학교 미래자동차공학부, \*\* 조선이공대학교 자동화시스템과, \*\*\* 전남과학대학교 자동차과

## Optimization of Heating Conditions for Compression Molding of Chalcogenide Glass Lenses Based on Surface Defects

Byeong-Rea Son\*, Jun-Hyung Ahn\*\*, Young-Hwan Lee\*\*\*, Young-Kug Hwang\*\*.#

\*Department of Automotive Engineering, Honam University.,

\*\*Department of Automatic System, Chosun College of Science & Technology.,

\*\*\*Department of Automobile, Chunnam Techno University

(Received 31 May 2021; received in revised form 10 June 2021; accepted 17 June 2021)

### ABSTRACT

This study aimed at identifying and optimizing the heating-condition parameters that cause surface defects during the compression molding of chalcogenide glass (GeSbSe) lenses through thermal analysis. We derived the optimal heating conditions for molding chalcogenide glass lenses through thermal analysis and analyzed the surface defects. As a result, we observed a significant reduction in surface defects, which verified the analysis process.

**Key Words** : Chalcogenide Glass(칼코겐유리), IR Optics(적외선광학), Precision Glass Molding(정밀유리성형), Thermal Analysis(열해석)

## 1. 서 론

열화상카메라에 사용되고 있는 적외선광학렌즈는 주로 원적외선 파장(8~12 $\mu$ m)이 투과되는 특수 광학 소재(Ge, ZnSe, Chalcogenide glass 등)를 생산성이 낮은 SPDT(single-point diamond turning) 공법으로 직 가공하여 개별 제작해 왔기 때문에 매우 고가에

거래되고 있다. 이러한 가격문제를 해결하기 위해 최근 칼코겐유리를 사용한 압축성형방식 적외선광학렌즈가 연구되고 있다<sup>1-3)</sup>.

칼코겐유리는 기존 결정질재료에 비해 가격이 저렴하고, 압축성형방식으로 대량생산 시 렌즈 생산 단가를 크게 낮출 수 있다. 따라서 칼코겐유리를 활용한 압축성형은 저가 보급형 적외선광학렌즈의 대량생산에 적합한 렌즈 생산기술로 기대되고 있다. 그러나 칼코겐유리는 산화물유리에 비해 낮은 열전도도 및 경도, 높은 열팽창계수 값을 갖고 있

# Corresponding Author : [hk@cst.ac.kr](mailto:hk@cst.ac.kr)

Tel: +82-62-230-8294, Fax: +82-62-230-8291

기 때문에 물성적으로 압축성형이 매우 어려운 광학 유리 소재이다. 또한 칼코겐유리의 주성분은 불안정한 휘발성 물질이기 때문에 렌즈 압축성형 시 고온에서 다량의 성분가스가 발생되어 다양한 문제를 발생시킨다. 따라서 칼코겐유리렌즈 압축성형 공정 시 온도, 압력, 시간 등 다양한 파라미터의 최적화를 위한 많은 연구가 필요하다. 일반적으로 압축성형 공정 파라미터 최적화를 위해서 실험계획법(DOE)과 컴퓨터응용해석(CAE)이 활용되고 있다.

본 연구는 칼코겐유리렌즈 압축성형 시 렌즈표면에 발생하는 결함발생에 미치는 가열조건 파라미터를 확인하고, 열해석을 통해 해당 파라미터를 최적화하기 위한 것이다. 열해석을 통해 칼코겐유리렌즈를 성형할 수 있는 최적 가열조건을 도출하여 실제 렌즈성형에 적용하고 현미경을 통한 표면 관찰을 통해 해석과정 및 결과의 유효성을 확인 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 칼코겐유리렌즈 설계

본 연구에 사용된 칼코겐유리렌즈는 그림 1에 나타낸 바와 같이 직경 25 mm의 메니스커스형 양면 비구면 형상이다.

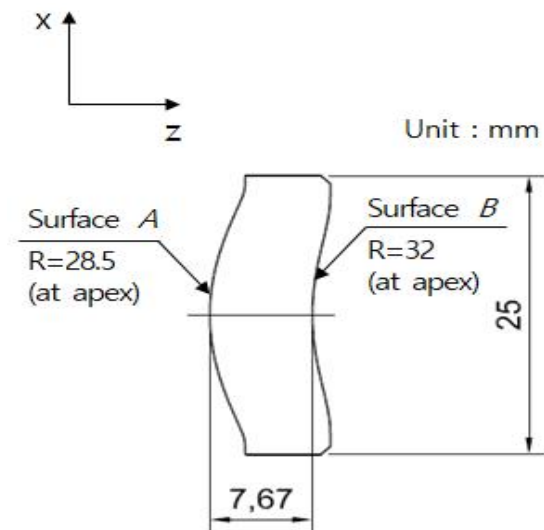


Fig. 1 Schematic design of the target lens

Table 1 Thermal and mechanical properties of chalcogenide glass(IRG 25)

Thermal properties		
Thermal conductivity	W/m·K	0.25
Thermal expansion coefficient	10 <sup>-6</sup> /K	14
Transition temperature (T <sub>g</sub> )	°C	285
Softening temperature (T <sub>s</sub> )	°C	310
Mechanical properties		
Young's modulus	GPa	22.1
Knoop hardness	GPa	1.13

비구면 형상은 식 (1)에 나타낸 바와 같이 원추형과 다항식항의 합으로 표현된다.

$$Z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{(1 - (1 + K)C^2x^2)}} + \sum_{i=1}^n A_i x^i \quad (1)$$

여기서, x는 광축으로 부터의 높이, Z는 x축에 수직 한 면의 Sag 값, C는 비구면의 곡률반경의 역수, K와 A<sub>i</sub>는 각각 Conic 상수와 비구면 계수이다. 압축성형에 사용한 칼코겐유리의 조성은 Ge<sub>28</sub>Sb<sub>12</sub>Se<sub>60</sub>(IRG25, SCHOTT Co., Germany)로서 물성을 표 1에 나타냈다<sup>[4]</sup>.

### 2.2 금형코어제작 및 압축성형

칼코겐유리 성형용 금형코어소재로서 코발트(Co) 함량 1.0 wt.%의 초경합금 (FB01, DIJET Industrial Co., Japan)을 사용하였다. 초경합금을 초정밀 연삭 가공하여 비구면을 가공한 후 이형성 및 금형수명 향상을 위해 120 nm 두께의 DLC(diamond like carbon)코팅을 적용하여 금형코어를 제작하였다.

칼코겐유리 압축성형장비로 그림 2에 나타낸 금형이송(Progressive)방식 유리렌즈 성형기 (GMP-54-5S, Toshiba Machine Co., Japan)를 사용하였다. 본 성형장비는 5축으로 구성되어 있으며 적외선램프에 의해 2단계 가열이 이루어지고, 압축과 서냉 단계에서는 상·하 플레이트에 의해 개별적으로 가열과 냉각이 수행된다. 렌즈의 압축은 서보모터 방식으로 수행되기 때문에 압축속도 및 위치제어가 가능하다.

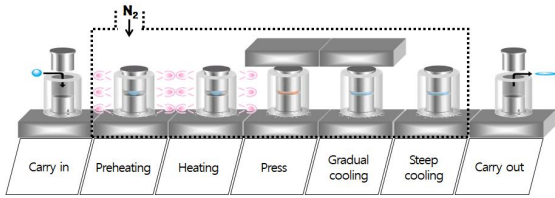


Fig. 2 Schematic of the molding part in GMP-54-5S

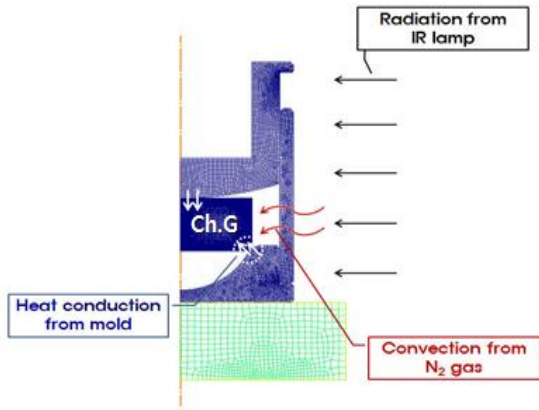


Fig. 3 Schematic modeling of heat transfer mechanism during heating process

### 2.3 열해석

본 연구에서는 금형이송방식 성형기를 이용한 칼코젠유리렌즈 성형공정 중 가열단계에서 일어나는 열전달 현상을 유한요소법(FEM)에 기초한 상용 소프트웨어(Deform<sup>TM</sup>-2D)를 사용하여 해석하였다. 가열부에서 칼코젠유리의 온도를 상승시키는 열전달 기작을 그림 3에 나타냈다.

일반적으로 고온압축성형 시 외부에서 유리까지의 열전달 기작은 금형과 유리의 접촉부에서 나타나는 전도(Conduction), 주위 분위기(N<sub>2</sub> Gas)에 의한 대류(Convection) 및 적외선램프에 의한 복사(Radiation)의 영향이 고려되지만, 기존 연구에 의하면 복사의 영향은 상대적으로 미비한 것으로 보고되고 있다<sup>[5]</sup>. 또한, 본 실험에서 사용된 성형시스템은 적외선램프에 의해 전달되는 복사열이 금형홀더에 의해 차단되므로 열해석 시 복사에 의한 열전달을 배제시키고 대류와 전도의 영향만을 고려하였다. 따라서, 유리의 열전달 지배방정식은 식

(2)와 같이 두 가지 항으로 정의된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_M(T - T_M) \text{ by Conduction} \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_N(T - T_N) \text{ by Convection}$$

여기서  $k$ 는 열전도도,  $h_M$ 은 금형코어와 칼코젠유리 사이의 전도 열전달계수,  $h_N$ 은 질소가스와 칼코젠유리 사이의 대류 열전달계수,  $T$ 는 칼코젠유리의 온도,  $T_M$ 은 금형코어의 온도,  $T_N$ 은 분위기(N<sub>2</sub>)의 온도, 그리고  $n$ 은 경계면에 수직인 단위벡터를 나타낸다. 경계면에서 열전달 속도는 온도와 열전달계수의 함수로 표현된다.

본 연구에서 가열단계 열해석을 위한  $h_M$ 과  $h_N$  값은 기존 선행 연구보고를 기초로 하여 각각 2,800 W/m<sup>2</sup>·K와 20 W/m<sup>2</sup>·K를 적용하였다<sup>[6]</sup>. 외부에서 유리에 전달된 열은 유리의 열전도도에 의존하여 표면부에서 중심부로 전달되는데, 이때 열전도도는 고온복사의 영향으로 인해 온도에 의존하여 복잡한 양상으로 변화한다. 유리내부에서 열전달문제를 다룬 기존의 많은 연구에서는 고온복사의 영향을 등가열전도도(Equivalent thermal conductivity) 문제로 단순화시켰다. 본 연구에서는 표 1의 칼코젠유리소재 열전도도 값을 사용하여 열해석을 수행하였다.

열해석 결과가 신뢰성을 갖기 위해서는 해석결과에 크게 영향을 미치는 중요변수에 대해서는 실제실험 환경과 가능한 유사한 값을 적용해야 한다. 본 연구에 사용된 렌즈성형장비의 가열단계는 그림 4에 나타낸바와 같이 적외선램프 가열방식으로 장비에서는 바닥플레이트의 온도만을 제어하기 때문에 가열단계 설정온도와 금형내부의 분위기 온도는 동일하지 않을 것으로 판단하였다. 실제 렌즈성형 시 가열단계 온도를 확인하기 위해 열전대를 부착한 더미금형을 렌즈금형과 동일한 크기로 제작하여 성형장비의 가열단계에 투입하여 금형 내부와 외부 분위기온도를 측정하였다. 온도측정 결과 분위기온도가 설정온도 보다 높게 측정되었고 이러한 편차는 설정온도가 높은 수록 크게 나타났다. 따라서, 성형장비의 설정온도를 바닥플

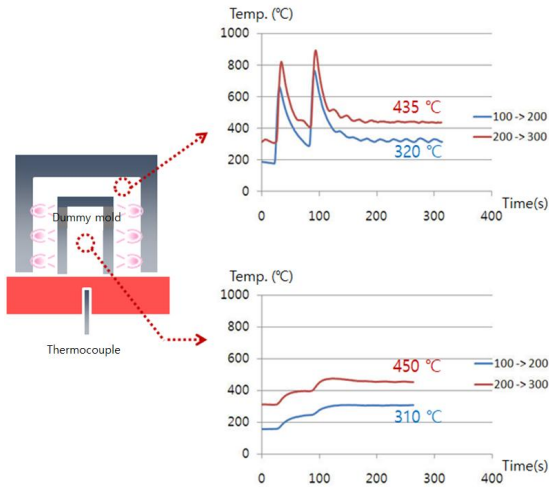


Fig. 4 Atmospheric temperature measurement of mold interior and exterior in heating step of GMP-54-5S

Table 2 Temperature of mold interior and exterior measured using dummy mold

	Setting (Bottom plate)	Mold interior	Mold exterior
Temp. (°C)	200	310	320
	300	450	435

Table 3 Initial molding conditions based on thermal properties of chalcogenide glass(IGR 25)

	Preheating	Heating	Press	Gradual cooling
Temp. Top plate (°C)	-	-	330	175
Bottom plate (°C)	160	330	330	175
Pressure(MPa)	-	-	0.2	0.1
Unit-process time(s)	600			

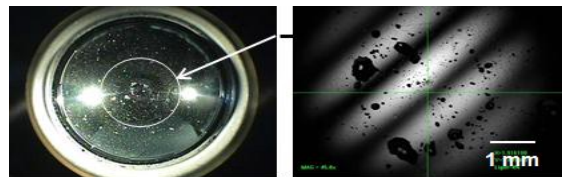
레이트 온도로 사용하고 표 2의 측정된 온도 데이터를 분위기 온도로 사용하여 열해석을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

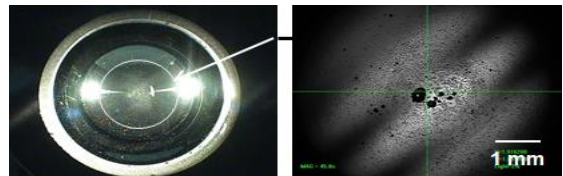
#### 3.1 칼코겐유리의 열특성을 고려한 렌즈 성형

일반적으로 CAE를 활용하지 않고 유리렌즈 성형조건을 경험적으로 설정하는 경우 유리소재의 열특성(전이점, 연화점), 렌즈의 형상 및 부피를 고려하여 결정한다. 본 연구에서도 초기 성형조건을 표 1의 칼코겐유리 열특성 및 렌즈외형을 고려하고, 칼코겐유리렌즈 성형성에 미치는 온도의 영향에 대한 기존 연구를 참고하여 표 3과 같이 결정하였다<sup>[7]</sup>. 압축성형 시 칼코겐유리의 깨짐 현상을 방지하기 위해 가열과 압축단계 온도는 연화온도(310 °C) 보다 높게 설정하였다.

그림 5는 초기 성형조건으로 성형된 칼코겐유리렌즈 표면의 현미경 사진(x46배)을 보여준다. 렌즈표면에 심각한 표면결함이 발생된 것을 확인할 수 있으며, 이러한 표면결함은 적외선 투과율 저하를 일으켜 렌즈불량의 원인이 된다.



(a) surface A



(b) surface B

Fig. 5. Surface images of chalcogenide glass lens molded under the initial molding conditions

#### 3.2 칼코겐유리렌즈 표면결함에 미치는 조건 파라미터

칼코겐유리렌즈의 표면결함에 미치는 가열조건인 중요 파라미터인 온도 및 가열시간의 영향을 확인하기 위해 표 4와 같이 성형조건을 결정하였다.

**Table 4 Molding conditions to verify the effect of parameters on surface defects**

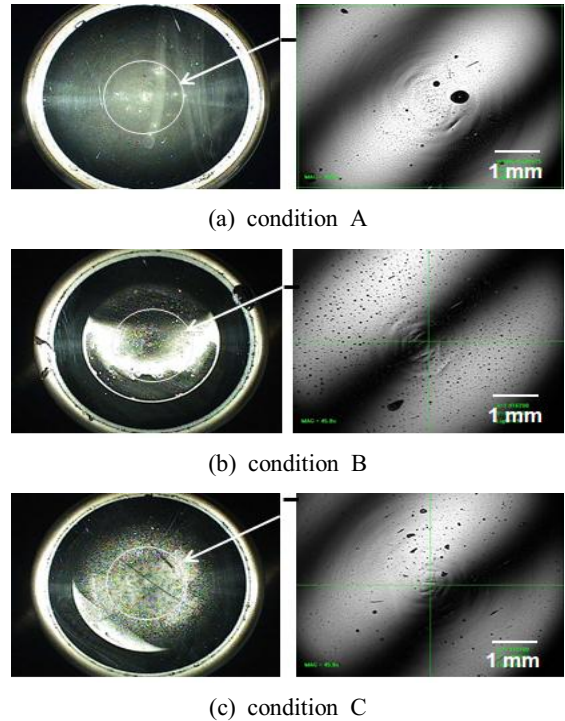
	Preheating	Heating	Press	Gradual cooling	
Temp. (°C)	Top plate	-	-	315/330	175
	Bottom plate	160	315/330	315/330	175
Pressure(MPa)	-	-	0.2	0.1	
Unit-process time(s)	800/1,000				
Condition no.	A	B	C		
Heating/Press step temp.(°C)	315	330	315		
Unit-process time(s)	800	800	1,000		

가열 및 압축단계 온도와 단위공정시간을 변수로 설정하여 성형조건 A~C를 결정하고, 이외의 조건들은 모두 고정변수로 설정하여 칼코겐유리렌즈를 성형하였다. 조건별로 성형된 칼코겐유리렌즈 표면을 현미경(x46배)으로 관찰한 결과 그림 6과 같이 온도 및 단위공정시간에 따라 표면결함 발생이 크게 달라짐을 확인할 수 있었고, 온도 및 시간이 가장 낮게 설정된 A조건으로 성형된 렌즈의 표면결함 발생이 상대적으로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 이러한 실험결과를 통해 칼코겐유리렌즈 표면의 결함은 고온에서 소재 구성 성분이 휘발하여 표면에 고립됨에 따라 발생하는 현상으로 추정하였다.

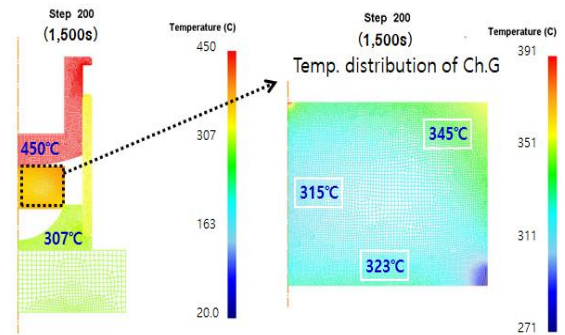
### 3.3 열해석을 활용한 칼코겐유리렌즈 성형

칼코겐유리렌즈 성형 시 가스발생을 줄여 표면결함을 최소화하기 위해서는 성형온도와 단위공정시간을 가능한 낮춰야 함을 확인하였다. 기존 연구에 의하면 칼코겐유리렌즈 성형에 적합한 온도 범위는 렌즈깨짐과 소재융착을 고려하여 소재 연화점부터 연화점 보다 약 20 °C 정도 높은 온도로 보고되었다<sup>[7]</sup>.

본 연구에 사용된 칼코겐유리소재( $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ )의 연화점(310 °C)을 고려할 때 성형에 적합한 온도는 310~340 °C 정도로 보여 진다. 따라서, 렌즈성형용 칼코겐유리 원소재를 성형에 적합한 온도분포를 갖도록 가열하기 위한 최적의 가열 온도와 시간을



**Fig. 6 Surface images of chalcogenide glass lens molded under the conditions A~C of Table 3**



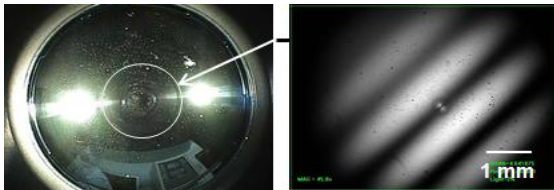
**Fig. 7 Thermal-analysis results using Deform-2D**

도출하기 위해 가열단계 열해석을 수행하였다.

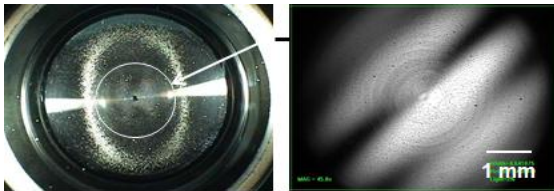
그림 7은 열해석 결과를 나타낸 것으로 바닥플레이트 온도를 300 °C, 가열챔버 내 분위기 온도를 450 °C로 설정하고, 1,500초 가열 후에 칼코겐유리소재의 온도분포가 315~345 °C를 나타내어 성형에 적합한 것으로 나타났다. 이러한 열해석

**Table 5 Modified molding conditions based on thermal-analysis results**

		Preheating	Heating	Press	Gradual cooling
Temp. (°C)	Top plate	-	-	300	175
	Bottom plate	300	300	300	175
Pressure (MPa)		-	-	0.2	0.1
Unit-process time (s)			750		



(a) surface A



(b) surface B

**Fig. 8 Surface images of chalcogenide glass lens molded under the modified molding conditions**

결과를 바탕으로 표 5와 같이 칼코젠유리렌즈 성형조건을 수정하여 렌즈를 성형하였다.

그림 8은 열해석 결과를 바탕으로 결정된 조건으로 성형된 칼코젠유리렌즈 표면의 현미경 사진(x46배)이다. 소재의 열특성을 고려하여 설정된 표 3의 초기조건으로 성형된 렌즈 대비 표면결함이 크게 줄어들었음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구는 칼코젠유리렌즈 압축성형 시 렌즈표면에 발생하는 결함발생에 미치는 관련 가열조건 파라미터를 확인하고, 열해석을 통해 해당 파라미터를 최적화하기 위한 것이다. 열해석을 통해 칼

코젠유리렌즈 성형조건 최적화 전·후 각각 성형된 칼코젠유리렌즈 표면을 비교분석 함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 칼코젠유리렌즈 압축성형 시 렌즈표면에 발생하는 표면결함은 성형온도가 높고 가열시간이 길수록 증가하는 것으로 확인 되었다. 이를 통해 칼코젠유리렌즈 성형 시 가열조건과 표면결함 발생의 연관성을 확인 하였으며 표면결함이 칼코젠유리를 구성하고 있는 성분이 고온에서 휘발하여 렌즈표면에 고립되어 발생하는 것으로 추정할 수 있었다.
2. 성형온도 및 가열시간 파라미터를 최적화하기 위해 열해석을 수행하고, 성형조건을 수정하였다. 수정된 조건으로 성형한 렌즈의 표면을 관찰한 결과 소재의 열특성을 고려하여 설정된 초기조건 대비 표면결함이 크게 줄어들었음을 확인하였다. 이를 통해 열해석을 위해 적용한 경계조건 및 해석과정이 유효함을 확인 하였다.
3. 칼코젠유리렌즈 압축성형 시 열해석을 통해 가열조건을 결정함으로써 렌즈표면의 결함을 최소화 할 수 있음을 확인하였다.

#### REFERENCES

1. Cha, D. H., Kim, J. H., and Kim, H. J., "Experimental study of the fabrication of chalcogenide glass lenses by using precision glass molding," Journal of the Korean Physical Society, Vol. 65, pp. 1675-1681, 2014.
2. Cha, D. H., Kim, H. J., Hwang, Y., and Kim, J. H., "Fabrication of molded chalcogenide-glass for thermal imaging applications," Applied Optics, Vol. 51, pp. 5649-5712, 2012.
3. Curatu, G., "Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide glass molding," Proc. of SPIE 7060, 2008.
4. <https://www.schott.com>, IRG 25
5. Yan, J., Zhou, T., and Kuriyagawa, T., "Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation

- analysis,” Precision Engineering, Vol. 51, pp. 150-159, 2009.
6. Jain, A., & Yi, A. Y., “Numerical modeling of viscoelastic stress relaxation during glass lens forming process,” Journal of the American Ceramic Society, Vol. 88, pp. 530-535, 2005.
  7. Cha, D. H., Kim, H. J., Park, H. S., Hwang, Y., Kim, J. H., Hong, J. H., and Lee, K. S., “Effect of temperature on the molding of chalcogenide glass lenses for infrared imaging applications,” Applied Optics, Vol. 49, pp. 1607-1613, 2010.