

## 열변형 보정을 통한 열화상카메라용 초정밀 칼코지나이드 유리렌즈 몰드성형 및 특성 평가

차두환<sup>1</sup>, 김정호<sup>1</sup>, 김혜정<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국광기술원 초정밀광학연구센터

### Molding and Evaluation of Ultra-Precision Chalcogenide-Glass Lens for Thermal Imaging Camera Using Thermal Deformation Compensation

Du Hwan Cha<sup>1</sup>, Jeong-Ho Kim<sup>1</sup>, and Hye-Jeong Kim<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Ultra-Precision Optics Research Center, Korea Photonics Technology Institute, Gwangju 500-779, Korea

(Received December 16, 2013; Accepted January 8, 2014)

**Abstract:** Aspheric lenses used in the thermal imaging are typically fabricated using expensive single-crystal materials (Ge and ZnS, etc.) by the costly single point diamond turning (SPDT) process. As a potential solution to reduce cost, compression molding method using chalcogenide glass has been attracted to fabricate IR optic. Thermal deformation of a molded lens should be compensated to fabricate chalcogenide aspheric lens with form accuracy of the submicron-order. The thermal deformation phenomenon of molded lens was analyzed and then compensation using mold iteration process is followed to fabricate the high accuracy optic. Consequently, it is obvious that compensation of thermal deformation is critical and useful enough to be adopted to fabricate the lens by molding method.

**Keywords:** Infrared optics, Chalcogenide glass lens, Glass molding press, Thermal imaging camera, Thermal deformation

#### 1. 서 론

열화상카메라는 고가의 센서와 광학렌즈가 채용됨에 따라 주로 군수용으로 사용되어 왔으나, 근래 저가의 비냉각식 적외선 센서가 개발되어 상용화됨에 따라 자동차, 선박, 보안감시 등 민수 분야에서도 그

수요가 급격히 증가하고 있는 추세이다 [1].

현재까지 비구면 적외선 광학렌즈는 고가의 단결정 소재 (Ge, Si, ZnSe 등)를 SPDT (single point diamond turning) 법을 통한 개별가공으로 제작되어 왔다. 따라서 높은 원소재 비용과 낮은 생산성으로 인해 생산단가가 매우 높을 뿐만 아니라 대량 생산이 요구되는 민수 분야 적용이 어려웠다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 칼코지나이드 유리소재를 활용한 비구면 적외선 광학렌즈 개발이 연구되고 있다 [2]. 칼코지나이드 유리소재는 고가의 소재인 Ge성분을 약 20% 정도만을 함유하며, 단결정 소재에 비해

a. Corresponding author: kimhj@kopti.re.kr

생산 공정비용이 낮다. 또한, 몰드성형이 가능하여 대량 생산 시 기존 SPDT 공정이나 폴리싱 공정에 비해 생산단가를 낮출 수 있다. 따라서 칼코지나이드 유리렌즈의 사용은 저가보급형 비구면 적외선 광학렌즈의 대량 생산에 매우 효과적인 방법으로 기대되고 있다. 최근 이와 관련된 여러 연구가 보고되고 있지만, 대부분 광학설계나 원소재 개발에 관한 것이며 렌즈 제작에 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다 [1-5].

본 연구에서는 칼코지나이드 유리렌즈의 몰드성형 공정 중 냉각공정에서 유리의 수축 및 내부응력으로 인해 발생하는 렌즈의 열변형 현상을 분석하였다. 금형과 렌즈의 형상 오차로부터 계산된 유효변형량을 금형코어의 보정에 적용하고, 렌즈를 성형함으로써 고정밀도의 칼코지나이드 유리렌즈를 성형하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 비구면 칼코지나이드 유리렌즈 설계

본 연구에 사용된 렌즈는 그림 1에 나타낸 바와 같이 직경 20 mm의 양면비구면 칼코지나이드 유리렌즈이다. 비구면 형상은 식 (1)에 나타낸 바와 같이 원추항과 다항식항의 합인 비구면 식으로 표현된다.

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

여기서  $C$ 는 비구면 렌즈의 곡률반경의 역수이고,  $K$ 값과  $A_i$ 는 각각 Conic 상수와 비구면 계수 값을 나타낸다.

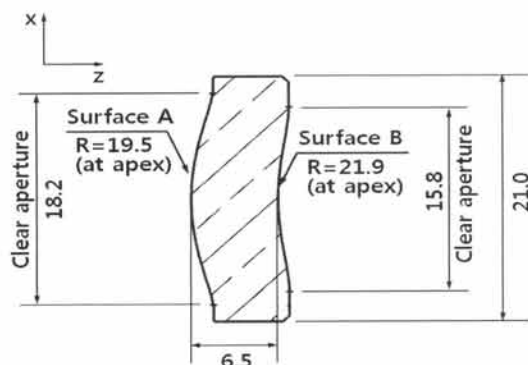


Fig. 1. Schematic design of the biaspheric chalcogenide glass lens.

Table 1. Processing conditions for the mold fabrication.

Grinding process	
Wheel configuration	SD 2000, Resin bond
Workpiece speed	350 rpm
Grinding wheel speed	37,000 rpm
Feed rate	1.0 mm/min
Depth of cut	0.25 um
Polishing process	
Diamond paste (Grain size)	Rough:1.0 um, Finish:0.25 um
Polishing medium	Nylon

### 2.2 금형제작 및 렌즈성형

칼코지나이드 유리렌즈 성형용 금형소재로서 코발트 (Co) 함량 0.8 wt.%의 초경합금 (WC; N18, Namsun Co., Korea)을 사용하였다. 금형코어는 초경합금을 초정밀 연삭 및 폴리싱 가공 후 이형성 향상과 금형 장수명화를 위한 100 nm 두께의 DLC (diamond-like-carbon) 코팅을 적용하여 제작하였다.

표 1은 초경합금의 초정밀 연삭 가공 및 폴리싱 가공 조건을 나타낸다. 적외선 렌즈 성형용 광학소재는 칼코지나이드 유리 ( $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ ; NBU-IR1, Ningbo Univ., China)로서 물성을 표 2에 나타냈다 [6]. 칼코지나이드 유리렌즈의 성형을 위해 그림 2에 나타낸 금형이송형 유리렌즈 성형기 (GMP-54-5S, Toshiba Co., Japan)를 사용하였으며, 표 3의 성형 조건을 적용하여 총 10장의 렌즈를 성형하였다.

Table 2. Thermal and mechanical properties of chalcogenide glass (NBU-IR1).

Thermal properties	
Thermal conductivity (W/m·K)	0.23
Thermal expansion coefficient ( $10^{-6}/\text{K}$ )	14.1
Transition temperature ( $T_g$ )(°C)	285
Softening point ( $T_s$ )(°C)	309
Mechanical properties	
Young's modulus (GPa)	19.11
Knoop hardness (GPa)	1.3

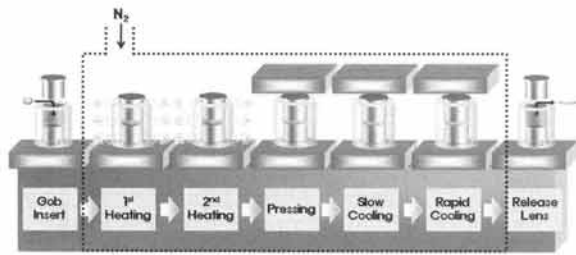


Fig. 2. Schematic of the molding part in GMP-54-5S.

Table 3. Molding conditions and process parameters used in this study.

		Heating		Pressing	Slow cooling
		1st	2nd		
Temp. (°C)	Upper plate	-	-	320	150
	Lower plate	250	320		
Pressing force (N)		-	-	500	200
Unit-process time (s)		800			

본 성형장비는 적외선 (IR) 램프 가열방식이며, 총 5개의 스테이션 (가열 스테이션 2개, 가압 스테이션 1개, 냉각 스테이션 2개)으로 구성되어 있다. 성형렌즈의 특성 평가를 위해 형상오차, 표면조도 및 편심을 3차원 자유곡면형상측정기 (UA3P, Panasonic Co., Japan)로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 칼코지나이드 유리렌즈 외관 및 표면 결함

표 3의 성형 조건은 칼코지나이드 유리의 성형성에 미치는 온도의 영향에 대해 보고한 사전 연구를 기준으로 결정되었다 [7]. 렌즈의 깨짐을 방지하기 위해 첫 번째 가열단계 온도는 칼코지나이드 유리 (NBU-IR1)의 전이점 보다 낮게 설정하였으며, 두 번째 가열단계 온도는 연화점 보다 높게 설정하였다. 가압과 서냉단계의 힘은 각각 500 N과 200 N으로 유지하였다.

그림 3은 성형된 칼코지나이드 유리렌즈의 표면을

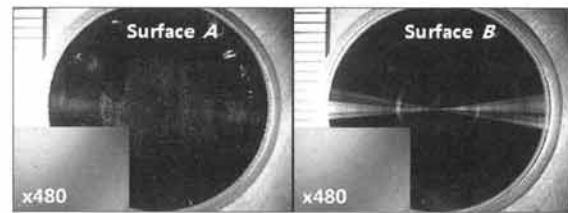


Fig. 3. Surface images of the molded chalcogenide-glass lens.

나타낸다. 렌즈의 깨짐이나 유리의 응착 현상은 발견되지 않았으며, 미세한 표면 결함만이 관찰되었다. 이러한 표면결함은 칼코지나이드 유리렌즈 성형 중 가열 및 가압 단계에서 Sb 등의 휘발성 물질의 증발로 인해 발생하는 것으로 추정된다 [8]. 그러나 관찰된 표면결함은 원적외선 (8~12 um) 영역을 사용하는 렌즈 특성상 광학계의 성능에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

#### 3.2 칼코지나이드 유리렌즈 열변형 보정

칼코지나이드 유리렌즈의 전사성 확인을 위해 렌즈와 금형의 형상오차 및 표면 거칠기를 각각 비교하였다. 그림 4에 렌즈와 금형의 형상오차를 비교하여 나타냈다. 일반적으로 유리렌즈 몰드성형 시 고온에서 금형의 팽창과 성형공정 중 유리의 변형으로 인해 렌즈와 금형의 형상은 약간의 차이를 나타낸다. 특히, 성형렌즈의 형상변형은 주로 i) 냉각단계에서 렌즈의 열수축, ii) 압축단계 끝에서 성형응력 (forming stress), iii) 구조 이완에 의해 결정된다 [9].

본 연구에서 성형렌즈는 그림 5에 나타난 바와 같이 양면 곡률반경이 모두 감소되어, 금형에 비해 높은 형상오차를 보였다. 이러한 변형패턴으로 부터 응력이 렌즈의 형상결정에 중요한 역할을 하는 것으로 추정할 수 있다 [10]. 유리렌즈 성형 시 중심부에 비해 상대적으로 높은 응력이 주변부에서 발생되며, 이러한 현상은 렌즈 외부가 내부에 비해 먼저 냉각되어 경화됨에 따른 렌즈의 불균일 냉각으로 인해 발생된다. 렌즈 내부영역이 냉각되어 수축되려 할 때 이미 경화된 외부층에 의해 수축이 제한됨에 따라 가장자리에서 큰 응력이 발생된다 [9].

렌즈 형상 오차 (PV)는 약 12 um을 나타내어 렌즈

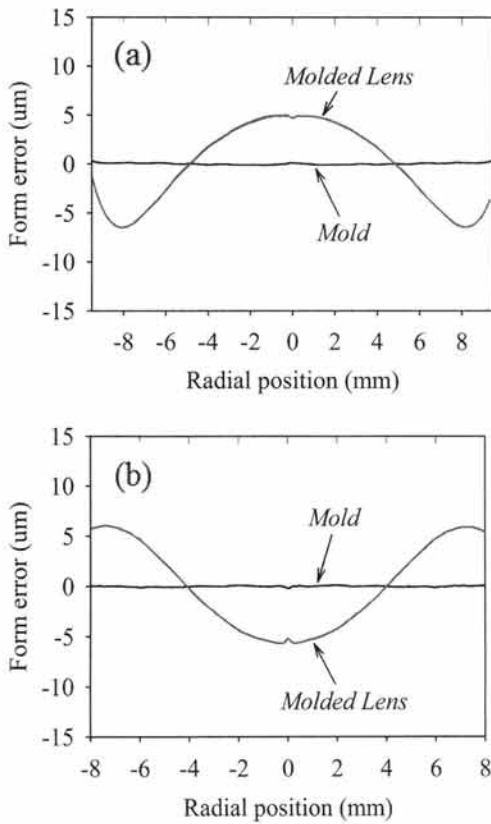


Fig. 4. Form error comparison of the prototype mold and the molded lens. (a) surface A and (b) surface B.

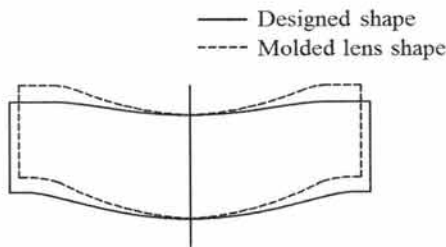


Fig. 5. Schematic of lens deformation after molding.

제작공차 (1 um 이하)를 만족하지 못하였다. 이러한 성형렌즈의 형상을 개선하기 위해 그림 6에 나타낸 바와 같이 렌즈의 변형량을 금형코어 형상에 반영하여 보정해주고, 이를 반복적으로 수행하는 방법이 사용된다.

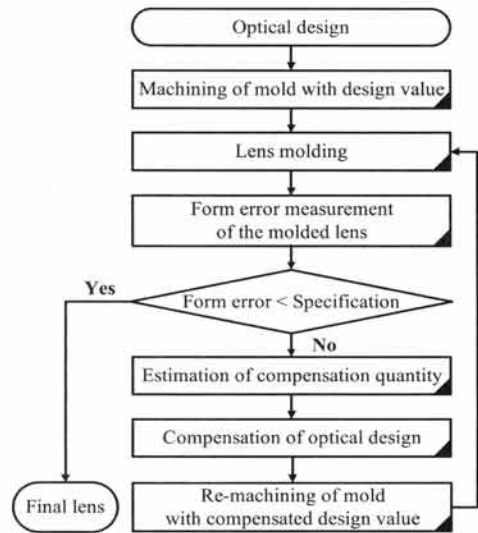


Fig. 6. Flow chart of glass lens fabrication.

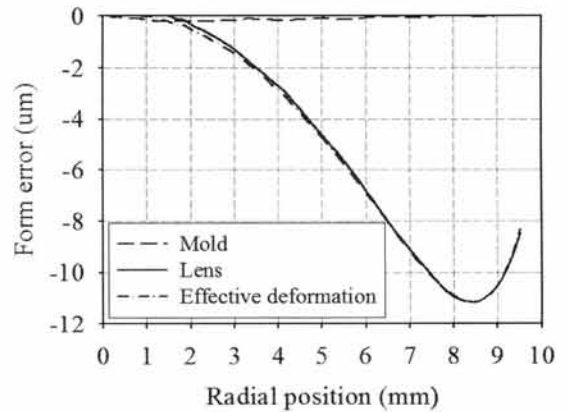


Fig. 7. Calculation of effective deformation of surface A from form error of mold and molded lens.

본 연구에서는 렌즈 변형량 계산 시 금형의 형상오차를 고려한 정밀 보정법을 사용하여 1회 보정으로 고정밀도의 렌즈를 성형하였다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 렌즈의 변형량 계산 시 렌즈 형상오차에서 금형 형상오차를 제외시킨 렌즈의 유효변형량을 금형 보정에 사용하였다. 그 결과 1회 보정으로 그림 8과 같이 렌즈의 형상오차 (PV)는 A면, B면 각각 0.57 um과 0.38 um을 나타냈다. 이러한 수치는 원적외선 (8~12 um) 영역의 과장을 사용하는 열화상카메라용 광학계에 적용 가능한 우수한 형상 정밀도이다.

### 3.3 칼코지나이드 유리렌즈 특성 평가

성형된 칼코지나이드 유리렌즈의 특성 평가를 위해 양면의 형상오차, 표면거칠기 및 편심 (De-center, Tile)을 측정하였다.

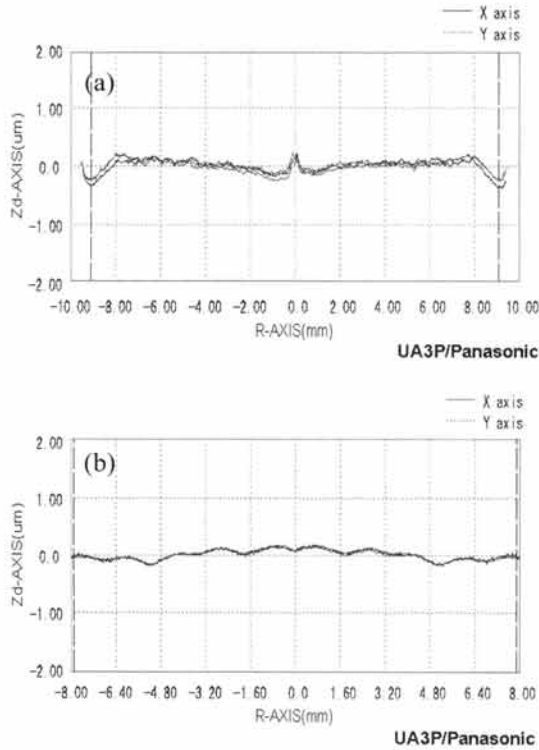


Fig. 8. Form error of the chalcogenide glass lens molded using a compensated mold. (a) surface A and (b) surface B.

표면거칠기는 그림 9에 나타낸 바와 같이 측정된 형정오차에서 cutoff 파장 ( $\lambda_c$ ) 0.8 mm의 고역필터 (high pass filter)를 적용하여 측정하였다. 렌즈의 표면거칠기 ( $R_a$ )는 A면, B면 각각 13 nm와 8 nm를 나타냈다. 이러한 수치는 금형의 표면거칠기 보다 약 3 nm 정도 높은 값으로 냉각 단계에서 고주파 성분 형상 변형으로 인해 발생하는 것으로 추정된다. 광학렌즈의 편심은 렌즈면의 tilt와 De-center로 인해 발생된다. 구면렌즈의 경우, 두 파라메타 모두 췌기 (wedge)를 만드는 동등한 개념이지만, 본 연구에서 목표로 하는 비구면 렌즈에서는 서로 다른 파라메타이므로 각 면에 대해 별도로 측정하였다.

그림 10은 성형렌즈 A면과 B면의 tilt와 De-center 측정 결과를 나타내며, 제작공차를 만족하였다.

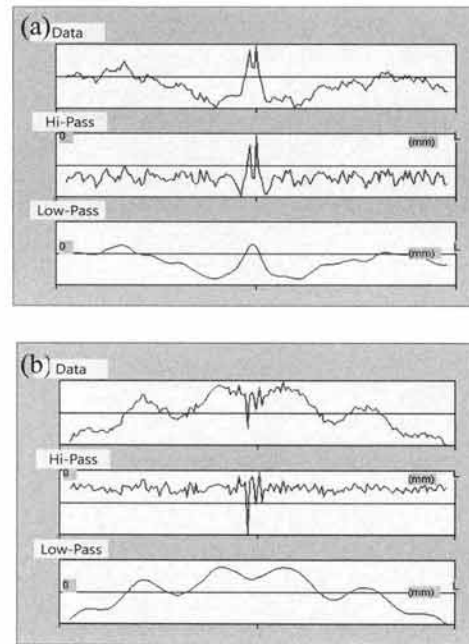


Fig. 9. Surface roughness of the molded chalcogenide-glass lens. (a) surface A and (b) surface B.

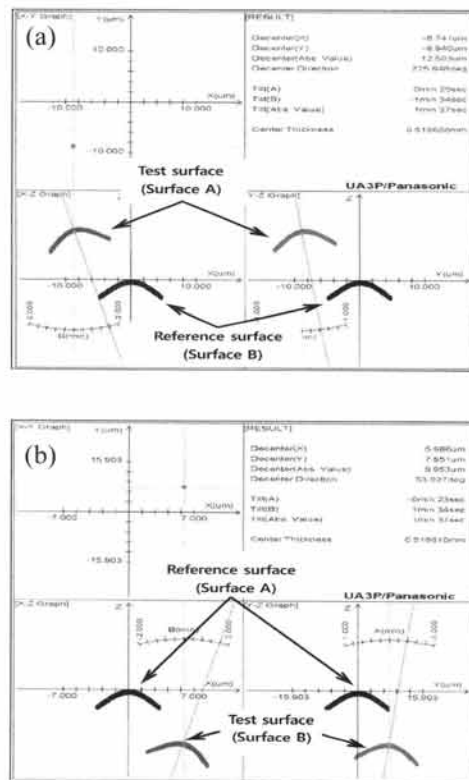


Fig. 10. Tilt and de-center of the molded chalcogenide-glass lens. (a) surface A and (b) surface B.



Fig. 11. Mold and molded lens fabricated in this study.

Table 4. Lens design parameters, molding tolerance, and the measured values.

Term	Form error (PV)	Roughness (Ra)	Tilt	De-center
Fabrication tolerance	< 1.0 $\mu\text{m}$	< 20 nm	< 3 arcmin	< 20 $\mu\text{m}$
Surface A	0.57	13	1.61	12.5
Surface B	0.38	8		9.95

표 4에 설계렌즈의 중요 제작공차와 성형렌즈 측정치를 나타냈다.

그림 11은 본 연구를 통해 제작된 금형코어와 칼코지나이드 유리렌즈의 사진이다.

#### 4. 결론

열화상카메라용 비구면 칼코지나이드 유리렌즈를 몰드성형을 통해 제작하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초정밀 연삭가공으로 제작된 초경합금 금형코어를 사용하여 칼코지나이드 유리렌즈를 성형하였으며, 렌즈 깨짐이나 소재 융착 등의 불량현상은 발견되지 않았다.

(2) 칼코지나이드 유리렌즈는 성형공정 중 냉각단계에서 유리소재의 수축과 내부응력으로 인해 열변형이 발생되었다. 렌즈의 변형패턴으로 부터 응력이 렌즈형상에 중요한 영향을 미치는 것으로 추정하였다.

(3) 열변형으로 인해 발생된 칼코지나이드 유리렌즈의 형상오차를 개선하기 위해 렌즈의 변형량을 금형코어의 형상에 반영하여 보정해 주었다. 이때 렌즈형상에서 금형 형상을 제외시킨 유효 변형량을 금형코어 형상보정에 사용함으로써 1회 보정으로 고정밀도 칼코지나이드 유리렌즈 제작이 가능함을 확인하였다.

#### REFERENCES

- [1] D. H. Cha, H. J. Kim, H. S. Park, Y. Hwang, J. H. Kim, J. H. Hong, and K. S. Lee, *Appl. Opt.*, 49, 1607 (2010).
- [2] X. H. Zhang, Y. Guimond, and Y. Bellec, *J. Non-Cryst. Solids*, 326&327, 519 (2003).
- [3] G. Curatu, SPIE 7060 (2008) p. 706008-1-7.
- [4] G. Curatu, B. Binkley, D. Tinch, and C. Curatu, *Proc. SPIE*, 6206, 62062M (2006).
- [5] B. Bureau, X. H. Zhang, F. Smektala, J. L. Adam, J. Troles, H. Ma, C. Boussard-Pledel, J. Lucas, P. Lucas, D. L. Coq, M. R. Riley, and J. H. Simmons, *J. Non-Cryst. Solids*, 345&346, 276 (2004).
- [6] Ningbo University, <http://www.ir-glass.com/en/product.php>.
- [7] D. H. Cha, H. J. Kim, J. K. Lee, H. U. Kim, S. S. Kim, and J. H. Kim, *Mater. Manuf. Process*, 23, 683 (2008).
- [8] H. H. Chien, C. H. Kuo, and S. W. Huang, *Opt. Eng.*, 51(3), 033401-1 (2012).
- [9] A. Y. Yi and A. Jain, *J. Am. Ceram. Soc.*, 88, 579 (2005).
- [10] X. H. Lu and L. S. Khim, *J. Mater. Process. Technol.*, 113, 189 (2001).