

# 비구면 유리렌즈 열변형 보정에 관한 연구

## A Study on Thermal Deformation Compensation in the Molding of Aspheric Glass Lenses

이동길<sup>1</sup>, 김현욱<sup>1</sup>, 차두환<sup>1</sup>, 이학석<sup>1</sup>, 김혜정<sup>1</sup>, 김정호<sup>1,✉</sup>  
Dong Kil Lee<sup>1</sup>, Hyun Uk Kim<sup>1</sup>, Du Hwan Cha<sup>1</sup>, Hak Suk Lee<sup>1</sup>, Hye-Jeong Kim<sup>1</sup> and Jeong-Ho Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국광기술원 초정밀광학연구센터 (Ultra-Precision Optics Research Center, Korea Photonics Technology Institute)

✉ Corresponding author: kimjh@kopti.re.kr, Tel: 062-605-9260

Manuscript received: 2008.12.31 / Revised: 2010.2.10 / Accepted: 2010.3.30

*Recently, due to the tremendous growth of media technology, demands of the aspheric glass lens which is a high-performance and miniaturized increase gradually. Generally, the aspheric glass lens is manufactured by Glass Molding Press (GMP) method using tungsten carbide (WC) mold core. In this study, the thermal deformation which was occurred by GMP process was analyzed and applied it to compensate the aspheric glass lens. The compensated lens was satisfied that can be applied to the actual specifications.*

Key Words: Aspheric Glass Lens (비구면 유리 렌즈), GMP (유리압축성형), Form Accuracy (형상정도), Compensation Cutting (보정가공), Ultra Precision Grinding (초정밀 연삭가공)

### 1. 서론

최근 미디어의 발달로 인해, 초정밀광부품<sup>1,2</sup>에 대한 수요가 날로 증가하고 있다. 이와 더불어 고해상도화, 고휘도화 등의 광학적 성능향상의 요구도 커지고 있다. 이러한 요구들로 인해 비구면 Glass 렌즈들의 수요가 점차적으로 늘어나고 있는 추세이고, 또한 비구면 Glass 렌즈를 정밀하게 대량생산할 수 있는 방법인 성형용 금형코어의 초정밀 연삭가공기술<sup>3,5,7</sup>과 성형기술<sup>6</sup>이 요구되고 있다. 비구면 Glass 렌즈는 종래의 Glass 연마법으로는 가공이 어려울 뿐만 아니라 렌즈를 대량 생산하기에는 양산성이 크게 떨어지기 때문에 근래에는 유리압축성형 (Glass Molding Press; GMP) 방법<sup>6</sup>이 이용되고 있다.

GMP 방법으로 생산되는 비구면 글라스 렌즈는 예열, 압축성형, 냉각단계의 연속적인 공정을

거치게 되고, 냉각단계에서 비구면 Glass 렌즈의 열 변형현상이 나타난다. 이러한 Glass 렌즈의 열 변형현상은 렌즈의 곡률반경을 광학 설계 값에서 벗어나게 만들어, 광학계의 성능을 저하시키는 중요한 문제점을 유발한다.

본 연구에서는 GMP 공정 중, 냉각과정에서 발생된 비구면 Glass 렌즈의 열 변형현상을 분석하고, 이를 성형용 코어의 초정밀 연삭가공에 적용함으로써, 압축성형과정에서 발생하는 열 변형현상을 형상보정하여, CCTV 용 비구면 Glass 렌즈의 성능향상에 기여하였다.

### 2. 비구면 Glass 렌즈

#### 2.1 비구면 Glass 렌즈 설계

비구면을 표현하는 식은 원추함에 다항식 형태의 비구면 형상계수식을 더한 형태로 표현되며,

식(1)과 같이 나타낸다.

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

여기에서  $C$  는 비구면 렌즈의 곡률반경의 역수이고,  $K$  값과  $A_i$  는 각각 Conic constant 와 비구면 계수 값을 나타낸다. 비구면 렌즈 식에서, Conic constant 의 값에 따라 비구면 렌즈는 긴 타원면체, 쌍곡면, 납작한 타원체면로 나타낼 수 있다.

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 CCTV 광학계용 양면 비구면 Glass 렌즈의 계략도를 나타낸다.

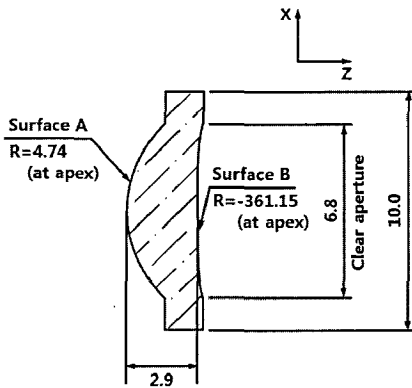


Fig. 1 Schematic optical design of the test lens

### 2.2 성형 비구면 Glass 렌즈 열 변형

일반적으로 비구면 Glass 렌즈의 대량생산을 위해서는 GMP 공정을 사용한다. 본 연구에서는 GMP 방법 중 Progressive 성형법을 사용하였다. Progressive 성형법은 예열, 성형, 냉각의 세부공정이 별도의 스테이션(Station)에서 순차적으로 일어나는 방식으로, 균일한 품질의 비구면 Glass 렌즈의 대량 생산에 적합하다. Fig. 2 는 본 연구에 사용된 Progressive 성형<sup>6</sup>의 계략도를 나타낸다.

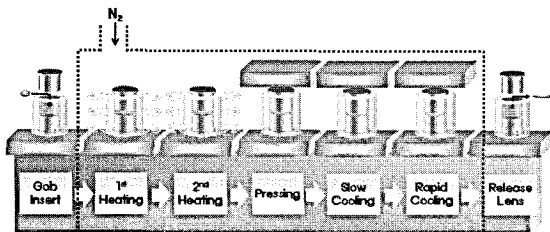


Fig. 2 Schematic of the progressive type molding

GMP 공정은, Preform Glass 를 금형에 삽입한 후, 굴복점( $A_t$ , °C)온도 이상으로 예열하고, 가압공정과 냉각공정을 거쳐 Glass 렌즈를 성형하게 된다. 이때, 고온에서 가압되어 성형된 렌즈가 상온으로 냉각되는 과정에서 렌즈 내부에 발생된 열응력으로 인해 성형렌즈는 열 변형을 일으킨다. 성형에 따른 열 변형현상은 렌즈의 모양이나 크기에 따라 다르게 나타나고, 렌즈의 설계 값에서 형상정도의 오차를 발생시킨다. 이는 비구면 Glass 렌즈의 광학적 성능저하를 유발한다. Fig. 3 은 GMP 공정에서 발생된 비구면 Glass 렌즈의 열 변형현상을 나타낸다.

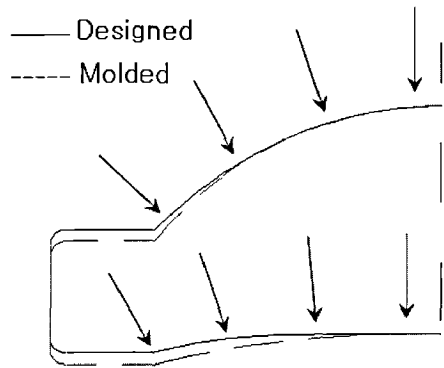


Fig. 3 Schematic description of thermal deformation during GMP processing

### 3. 실험장치 및 조건

#### 3.1 실험장치

본 연구에서는 초정밀가공기(Japan, Nachi-Fujikoshi co., ASP01)를 사용하여 비구면 Glass 렌즈 성형용 코어를 가공하였다. 본 가공기는 2 개의 유정압 슬라이드가 직교형태로 구동하는 3 축 가공기로서, 유정압 베어링에 의해 구동되는 B 축 Rotary Table 에 공기 터빈 스피들이 장착되어, 비구면 가공이 가능한 초정밀가공기이다. 안내면의 위치정밀도는 1 nm 의 정밀도를 가지며, 최대 가공 직경 150 mm 의 공작물 가공이 가능하다. 가공된 코어를 활용한 비구면 Glass 렌즈 성형에는 Progressive 방식 성형기 (Japan, Toshiba machine co., GMP-54-5S)를 사용하였다. 또한, 코어 가공면과 성형렌즈의 비구면 형상정도를 측정하기 위해 초정밀 자유곡면 3-D 형상측정기(Japan, Panasonic Co., UA3P)를 사용하였다.

**3.2 실험조건**

비구면 Glass 렌즈 성형용 코어는 초경합금 (Japan, Fujidie co., TJF03)을 입도 #2,000의 다이아몬드 스톨로 Parallel 연삭가공 하여 제작하였다. Table 1에 구체적인 코어 가공조건을 나타냈다.

Items	Value
Work spindle	350 rpm
Turbine spindle	35,000 rpm
Feedrate	0.5 mm/min
Depth of cut	0.3 μm

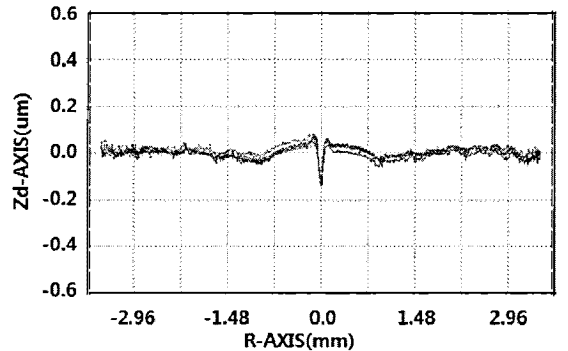
비구면 Glass 렌즈를 성형하기 위해 설계된 렌즈의 체적을 계산하여 φ7.816 mm의 Ball type glass (Japan, Ohara co., L-BAL42)를 사용하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 비구면 Glass 렌즈의 성형조건을 나타낸다. 보정 전후, 비구면 Glass 렌즈의 성형수축 외의 외란에 대한 영향성을 최소화하기 위해, 성형코어의 가공조건과 압축성형조건은 Table 1과 2의 조건으로 고정하여 10개의 렌즈를 성형하였다.

Items	Value
Unit processing time	75 sec
Heating temperature	560 °C
Slow cooling temperature	465 °C
Press force	1,000 N

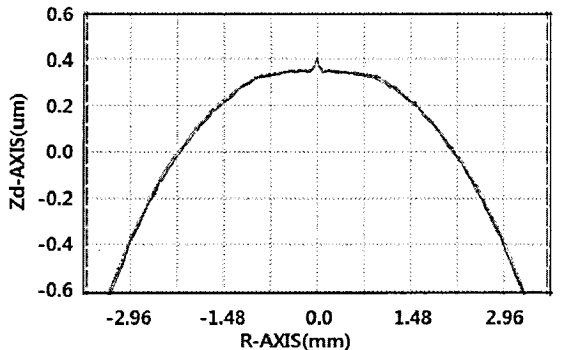
**4. 성형분석 및 보정가공**

초정밀 연삭 가공된 성형용 코어의 형상정도(PV)는 0.213 μm을 나타냈다. 가공된 코어를 사용하여 성형된 10개의 비구면 Glass 렌즈는 성형과정 중 발생한 열 변형현상으로 형상정도(PV) 3.60~3.80 μm을 나타내어 설계된 렌즈의 기준스펙 (PV 0.8 μm 이하)에서 크게 벗어남을 확인하였다. Fig. 4는 보정가공 전의 성형코어의 형상정도와 성형 후 비구면 Glass 렌즈의 형상정도 측정결과를 각각 나타낸다.

성형렌즈의 열 변형으로 인해 발생한 형상오차를 향상시키기 위한 보정 알고리즘을 식(2)와 (3)으로 나타냈다.



UA3P/Panasonic  
(a) Form accuracy of mold core



UA3P/Panasonic  
(b) Form accuracy of molded lens

Fig. 4 Form accuracy of (a) mold core and (b) lens before compensation

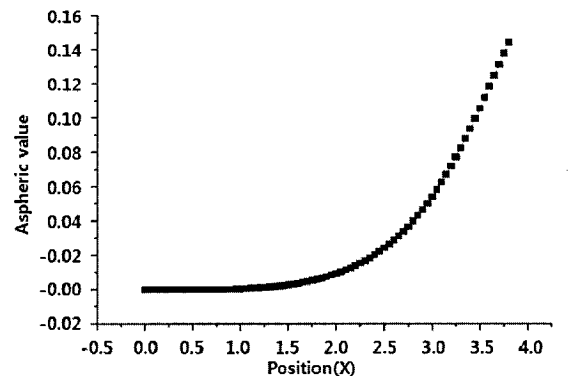


Fig. 5 Results of non-linear curve-fitting

$$Z_a = \sum_{i=4}^n A_i x^i = Z_{ap} + Z_{com} \cdot \alpha \quad (2)$$

$$Z_n = Z_{sp} + Z_a \quad (3)$$

보정과정에서 파라메타의 수를 줄이기 위해 식 (1)의 비구면 식에서 구면 항( $Z_{sp}$ )과 비구면 항( $Z_a$ )을 분리하여, 구면 항을 고정 변수로 두고 비구면 항의 계수 값을 비선형 Curve-fitting 법<sup>4</sup>으로 결정하였다. 보정 비구면식의 Sag 값( $Z_n$ )은 설계된 렌즈의 구면 항( $Z_{sp}$ )와 새롭게 결정한 비구면 계수 항( $Z_a$ )을 더해 줌으로써 얻을 수 있었다. 또한  $Z_a$ 는 설계된 비구면식의 비구면항( $Z_{ap}$ )과 열변형량을 나타내는 보정 비구면항( $Z_{com}$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 이때, 보정률 팩터( $\alpha$ )를 0.85 로 설정하여 보정된 코어에 대한 재 수축현상과 렌즈 측정오차에 대한 영향성을 감소시켰다. Fig. 5 는 수축보정된 비구면 계수( $Z_a$ )의 비선형 Curve-fitting 결과를 나타낸다.

설계된 형상을 사용하여 초정밀 연삭가공한 성형용 코어의 형상정도는 0.157  $\mu\text{m}$ 의 결과를 나타냈다. 보정가공된 성형용 코어를 사용하여 비구면 Glass 렌즈를 성형한 결과 성형된 10 개의 비구면 Glass 렌즈의 형상정도는 0.3~0.45  $\mu\text{m}$ 를 나타냈다.

보정 후 형상정도는 보정 전 비구면 Glass 렌즈 형상정도 약 3.7  $\mu\text{m}$ 에서 약 0.35  $\mu\text{m}$ 으로 향상되어 기준 스팩 (PV 0.8  $\mu\text{m}$  이하)에 만족하는 결과를 얻었다. 이는 본 연구에서 제시한 열 변형 보정 알고리즘이 비구면 Glass 렌즈 생산에 적당하다는 것을 보여 준다. Fig. 6 에 보정 후 연삭가공된 성형용 코어와 성형된 비구면 Glass 렌즈의 형상 정도를 나타냈다.

Fig. 7 에 제작된 비구면 Glass 렌즈와 비구면 Glass 렌즈 성형용 코어의 사진을 나타냈다.

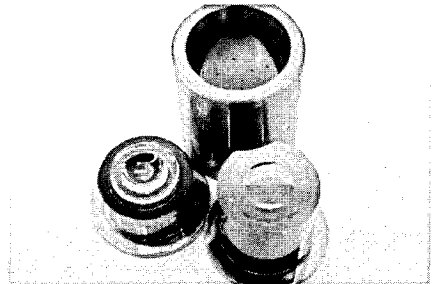
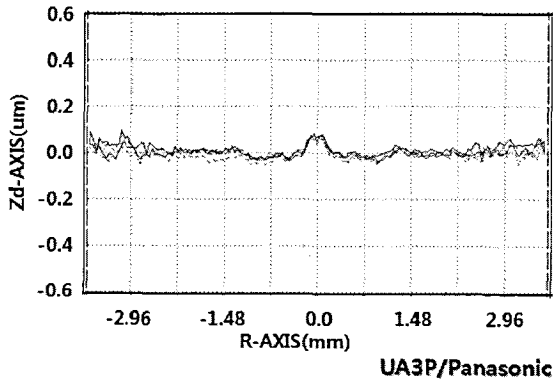
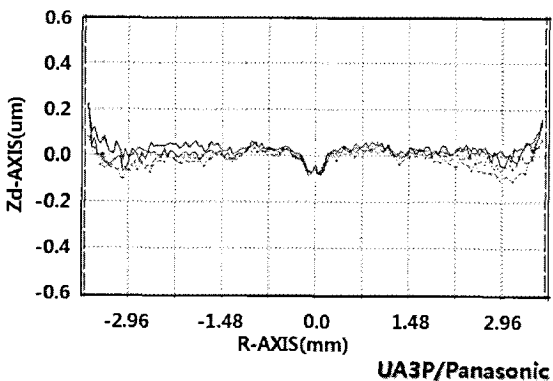


Fig. 7 Photograph of mold core and molded lens



(a) Form accuracy of mold core



(b) Form accuracy of molded lens

Fig. 6 Form accuracy of (a) mold core and (b) molded lens after compensation

### 5. 결론

본 연구에서는 고품질의 CCTV 용 비구면 Glass 렌즈를 제작하기 위해 비구면 Glass 렌즈의 성형과정에서 발생한 열 변형현상을 분석하였다. 성형렌즈의 열 변형을 보정하기 위해 비선형 Curve-fitting 법을 사용하여 보정 비구면식의 계수값을 결정하여 코어를 재가공하였다. 가공된 성형용 코어를 사용하여 Progressive 성형법을 사용하여 압축성형을 시행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 성형된 비구면 Glass 렌즈의 성형과정 중 발생한 열 변형현상을 분석하였고, 렌즈의 성형 열 변형현상을 보정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.
- 2) 보정 전 성형용 코어를 사용하여 성형한 결과 비구면 Glass 렌즈 형상정도 약 3.7  $\mu\text{m}$ 에서 보정 후 성형용 코어를 사용하여 약 0.35  $\mu\text{m}$ 으로 기준 스팩 (PV 0.8  $\mu\text{m}$  이하)을 만족하는 결과를 얻었다.
- 3) 보정 비구면식으로 재가공된 코어를 이용하여 성형된 렌즈의 형상정도 확인을 통해 제안된 열 변형 보정 알고리즘이 유효함을 확인하였다.

### 참고문헌

1. Michaud, L., Tchang, J. P., Baril, C. and Gresset, J.,

- “New Perspectives in Monovision - A Study comparing Aspheric With Disposable Lens,” International Contact Lens Clinic, Vol. 22, No. 9-10, pp. 203-208, 1995.
2. Kuriyagawa, T., Saeed, M., Zahmaty, S. and Syoji, K., “A new grinding method for aspheric ceramic mirrors1,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No. 4, pp. 387-392, 1996.
  3. Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, T., Ohta, T. and Syoji, K., “Precision Grinding of Aspheric CCD-Sic Molding Die,” Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 25-30, 1998.
  4. Walsh, S. and Diamond, D., “Non-Linear Curve Fitting using Microsoft Excel Solver,” Talanta, Vol. 42, No. 4, pp. 561-572, 1995.
  5. Alagumurthi, N., Palaniradja, K. and Soundaraarjan, V., “Optimization of Grinding Process Through Design of Experiment(DOE),” Materials and Manufacturing Processes, Vol. 21, No. 1-2, pp. 19-22, 2006.
  6. Chang, S. H., Heo, Y. M., Yoon, G. S., Shin, G. H., Lee, Y. M., Jung, W. C., Kang, J. J., Jung, T. S. and Kim, D. S. “A Study on Flow Characteristics of PBK40 for Glass Lens Forming Process Simulation Using a Plate Heating Type,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 115-122, 2007.
  7. Kim, S. S., Lee, Y. C., Lee, D. K., Kim, H. J. and Kim, J. H., “Ultra-precision Grinding Optimization of Mold Core for Aspheric Glass Lenses using DOE and Compensation Machining,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 45-50, 2007.