

입체요소를 사용한 플라스틱 렌즈의 사출성형 및 후변형 해석

박 근*(서울산업대학교 기계설계·자동화공학부), 한철엽(삼성전기 중앙연구소)

Flow Simulation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Lenses using Solid Elements

Keun Park (School of Mechanical Design & Automation Engineering, SNUT),
Chul-Yup Han (R&D Center, Samsung Electro-Mechanics Co.)

ABSTRACT

The present work covers three-dimensional flow simulation and deformation analysis of injection molded plastic lenses using solid elements. A numerical scheme to evaluate part deformation has been proposed from the results of injection molding analysis. Proposed scheme has been applied to the injection molding processes of optical plastic lenses: a spherical lens and an aspheric lens for a photo pick-up device. Through the simulation processes, residual stress is estimated and the final deformed patterns are obtained for both products. The reliability of the proposed approach has also been verified in comparison with the results of real experiments.

Key Words : Optical lens (광학렌즈), Aspheric lens (비구면렌즈), Injection Molding (사출성형), Finite Element Analysis (유한요소해석), Solid Element (입체요소), Deformation Analysis (변형해석)

1. 서 론

렌즈는 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 주요 부품으로서, 고정도의 형상 및 안정된 내부불성을 요구하는 정밀 부품이다. 렌즈는 사용 재질에 따라 유리 렌즈와 플라스틱 렌즈로 구분되는데, 이중 플라스틱 렌즈는 주로 사출성형 기법으로 제작되어 생산성이나 가격경쟁력 측면에서 장점이 있는 반면, 성형시의 형상정밀도 및 광학적 특성 확보가 필수적이다. 이를 위해 광학적 특성을 고려한 렌즈의 설계기술, 금형설계 및 가공기술, 정밀 사출성형기술 등이 요구되며 특히 사출성형 과정의 수치해석(Computer Aided Engineering: CAE) 기법을 통해 렌즈 성형용 금형 및 공정설계를 위한 목적으로 시도되고 있다.

현재까지의 대부분의 플라스틱 렌즈의 사출성형 해석에 관련된 연구는 평면방향 2차원 유동으로 가정한 해석 모델을 적용하고 있다.⁽¹⁾ 따라서 입체적으로 정의되어 있는 제품의 형상을 평면 혹은 곡면을 사용하여 단순화하고, 이에 기반하여 2차원 박

막요소(shell element)를 사용한 유한요소 격자를 생성하여 해석을 수행한다. 이러한 제품형상의 단순화는 제품의 기하학적 형상정보가 왜곡된다는 단점을 가지고 있으며, 특히 소형 렌즈의 경우 두께에 대한 특성길이의 비가 그다지 크지 않아 두께방향의 유동이나 압력구배를 무시할 경우 해석의 신뢰성에 심각한 영향을 미치게 된다.

광학 렌즈는 특정 광학계 내에서 입사광이 원하는 위치에 초점을 맺을 수 있도록 굴절시켜주는 역할을 하며, 이러한 기능을 수행하기 위해 대부분의 렌즈는 두께가 연속적으로 변하는 특성을 갖고 있다. 따라서 기존의 박막요소 기반 접근방법으로는 두께의 연속적인 변화를 정확하게 고려할 수 없다. 또한 렌즈의 양쪽 면의 정밀도가 광학적 특성에 복합적으로 영향을 미치므로 양쪽 곡면 모두에 대한 평가가 필수적인데, 이러한 특성을 고려할 때 렌즈의 사출성형해석 및 변형해석을 위해서는 입체요소를 사용한 접근이 타당하다고 판단된다.

박막요소 기반 해석기법의 문제점을 개선하기 위해 최근들어 3차원 입체요소를 사용한 사출성형

의 유동해석⁽²⁻⁴⁾ 및 제품 이형후의 후변형해석⁽⁵⁾에 관한 연구가 진행되어왔다. 본 연구에서는 상기 연구결과를 바탕으로 입체요소를 사용하여 충전, 보압, 냉각과정에 대해 사출성형 해석을 수행하고 해석 결과로부터 금형 내의 온도 및 압력분포에 대한 이력을 도출하였다. 도출된 온도이력 정보를 사용하여 금형내에서 발생하는 잔류응력을 계산하고, 이를 토대로 이형 후의 열변형 해석을 수행함으로써 렌즈의 최종 변형량을 예측함으로써 제안된 방법의 신뢰성을 입증하고자 한다.

2. 사출성형품의 변형해석 수식화

본 연구에서는 사출성형품의 후변형 해석을 위해 온도변화에 의한 잔류응력을 고려하였다. 이때 액체상태에서 발생하는 잔류응력은 무시하였고, 응고된 고분자 수지에 대해서만 선형 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때의 평형방정식 및 구성방정식은 다음과 같다.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} + \vec{f} = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \alpha \delta_{ij} \Delta T) \quad (2)$$

여기서 α 는 열팽창계수로 고분자수지의 비체적 (specific volume) 값으로부터 얻어진다. 비체적은 Tait의 상태방정식을 사용하여 다음과 같이 온도와 압력의 함수로서 표현된다.

$$v(T, p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] \quad (3)$$

위 식에서 $v_0(T)$ 와 $B(T)$ 는 각각 다음과 같다.

$$v_0(T) = \begin{cases} b_{1,t} + b_{2,t} \bar{T}, & \text{for } T > T_t \\ b_{1,s} + b_{2,s} \bar{T}, & \text{for } T < T_t \end{cases} \quad (4)$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{3,t} \exp(-b_{4,t} \bar{T}), & \text{for } T > T_t \\ b_{3,s} \exp(-b_{4,s} \bar{T}), & \text{for } T < T_t \end{cases} \quad (5)$$

여기서 \bar{T} 와 T_t 는 각각 유효온도 및 전이 온도 (transition temperature)를 의미하며, 다음과 같이 온도와 압력의 함수로서 표현된다.

$$\bar{T} \equiv T - b_5 \quad (6)$$

$$T_t(p) = b_5 + b_6 p \quad (7)$$

이때 $b_1 \sim b_6$ 는 고분자수지 물성에 따른 계수이다. 한편 열팽창계수는 비체적을 온도에 대해 미분하여 다음과 같이 얻어진다.

$$\alpha = \frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{1}{3} \left[\frac{\frac{C}{B(T)} \frac{p}{B(T)+p} \frac{\partial B(T)}{\partial T}}{1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right)} \right] + \frac{1}{v_0} \frac{\partial v_0}{\partial T} \quad (8)$$

위와 같은 수식화를 사용하여 금형내의 잔류응력 분포를 계산할 수 있다. 이때 입체요소를 사용한 사출성형 해석 결과로부터 단계별 온도분포의 이력을 추출하여 잔류응력 해석 및 이형후 열변형 해석의 입력 데이터로 사용하였다. 이때 3차원 격자구조에서 경계면의 절점 정보를 자동 추출하여 잔류응력 계산시의 경계조건으로 부과해 주었다. 또한 계산된 잔류응력을 고려하여 이형 후 수지가 상온에 도달할 때까지의 열변형 해석을 수행함으로써 제품의 최종 변형을 예측하였다. Fig. 1에 이러한 과정을 개념적으로 도시하였다.

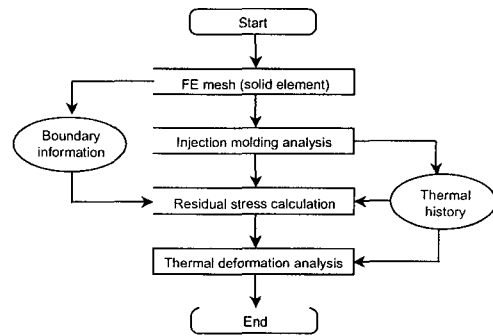


Fig. 1 Schematic procedure for deformation analysis

3. 플라스틱 렌즈의 사출성형 및 후변형해석

3.1 구면렌즈의 변형해석

본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위해 Lu와 Khim의 관련 연구결과⁽⁶⁾를 참조하여 렌즈의 사출성형해석 및 변형해석을 수행하였다. 렌즈의 형상을 살펴보면 한쪽 면은 볼록하고 다른 반대쪽 면은 오목한 구면렌즈로 Fig. 2에 형상을 도시하였다. Table 1에 사출성형 조건을 요약하였는데, 이때 수지는 광학용 PC인 Lupilon S-2000를 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 3에 사출성형 해석(유동, 보압 및 냉각해석)을 통해 최종적으로 얻어진 온도 분포를 도시하였다.

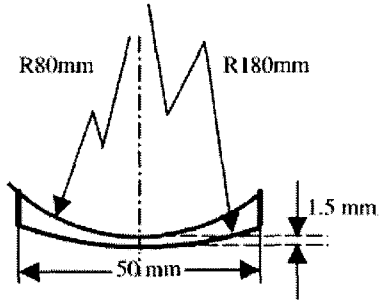


Fig. 2 Sectional view of a spherical lens⁽⁶⁾

Table 1 Injection molding conditions for a spherical lens

Items	Contents
Melt temperature (°C)	300
Mold temperature (°C)	100
Injection time (sec.)	2.0
Packing time (sec.)	5.0
Packing pressure (MPa)	100
Cooling time (sec.)	30.0

Fig. 3을 보면 렌즈 단면 내의 온도분포가 표면의 경우 100°C에서 내부는 130°C까지 다양하게 분포되어 있음을 알 수 있으며, 이는 불균일한 수축을 유발하여 결과적으로 후변형의 원인이 된다. 이러한 온도분포 정보를 기준으로 제안된 입체요소를 사용하여 변형해석을 실시하였다. Fig. 4 (a)는 변형해석을 통해 예측된 렌즈 단면의 변형형상을 5배

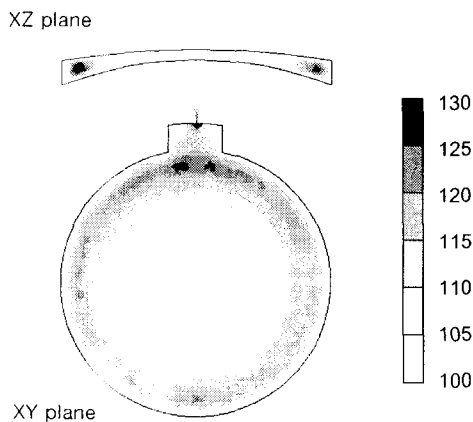


Fig. 3 Sectional views of the temperature distribution at the end of cooling stage

확대하여 도시한 그림으로 상면의 곡률반경은 증가하고 하면의 곡률반경은 감소함을 확인할 수 있다. 또한 이러한 결과는 이러한 결과는 참고문헌⁽⁶⁾에서 기술된 성형조건이 불충분하여 동일한 조건에서의 해석이 불가능했던 관계로 변형량의 정량적인 비교는 어려웠으나, Fig. 4 (b)에 도시한 관련 실험결과와 비교했을 때 거의 유사한 변형패턴을 보임을 알 수 있다.

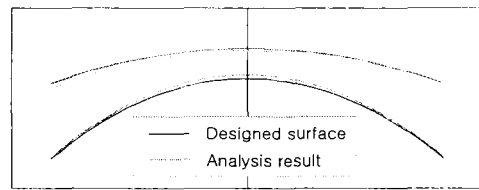


Fig. 4 (a) Deformation pattern (CAE analysis)

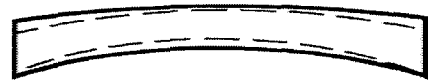


Fig. 4 (b) Deformation pattern (experiments)⁽⁶⁾

3.2 비구면렌즈의 변형해석

종래에 각종 광학기기에서는 구면렌즈를 다수개 배열하는 방법으로 결상 정도를 향상시켜 왔으나, 최근들어 광학기기의 고정도화, 소형화 및 경량화의 실현을 위해 비구면 렌즈의 사용이 점차적으로 증가되고 있다. 비구면 렌즈는 구면렌즈에서 발생하는 수차(aberration)를 감소시킴으로써 광학적 정도를 향상시키고, 광학소자의 사용을 대체함으로써 얻어지는 경량화 효과 등의 장점이 있는 반면, 고난이도의 가공 및 성형기술이 요구된다.

본 연구에서는 양면 비구면으로 구성된 소형 광픽업용 대물렌즈의 특성평가를 위해 제안된 사출성

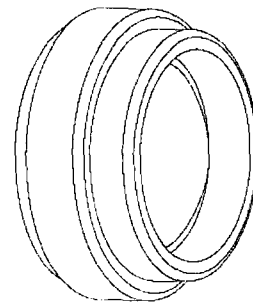


Fig. 5 Three-dimensional view of an aspheric lens

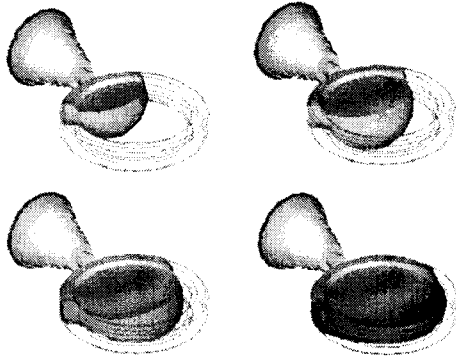


Fig. 6 Flow patterns during the filling stage

형 및 변형해석 기법을 적용하였다. Fig. 5에 대물렌즈의 형상을 3차원적으로 도시하였고, 이때의 성형조건을 Table 2에 나열하였다.

Fig. 6에 단계별 유동패턴을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 양면이 불룩한 비구면으로 이루어져 있어 3차원적인 유동의 양상을 보여주는데, 이는 기존의 박막요소에 기초한 접근방법으로는 고려할 수 없었던 내용이다. Fig. 7에 유동, 냉각, 보압해석을 거쳐 변형해석을 수행한 결과 얻어진 렌즈 단면의 최종 변형 형상을 도시하였다.

Table 2 Injection molding conditions for an aspheric lens

Items	Contents
Melt temperature (°C)	280
Mold temperature (°C)	130
Injection time (sec.)	2.0
Packing time (sec.)	4.0
Cooling time (sec.)	14.0

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 정밀 광학 렌즈의 특성 평가를 위해 입체요소를 사용한 사출성형 및 후변형 해석에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해 입체요소를 사용하여 유동, 보압 및 냉각과정의 해석을 수행하고, 이때 얻어진 결과로부터 금형내의 잔류응력과 이형 후의 변형해석을 수행하기 위한 제반 연구를 수행하였다. 제안된 방법을 적용하여 정밀 렌즈의 사출성형 및 변형해석을 수행하였고, 계산된 렌즈의 변형패턴이 실험결과와 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과로부터

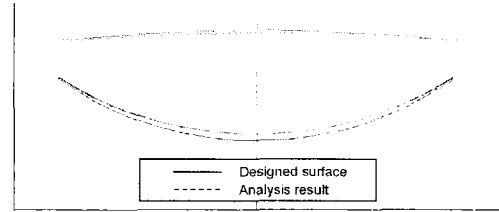


Fig. 7 Estimated deformation pattern of an aspheric lens

기존의 박막요소로는 접근할 수 없었던 정밀 플라스틱 렌즈의 유동특성 및 그에 따른 제품의 성능 예측이 가능할 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 적절한 금형설계변수 및 공정조건 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Kim, S. Y., Rim, M. H., Lim, W. S., and Kim, W. Y., "A Numerical Approach for Predicting the Optical Characteristics of Injection-Molded Lenses", *J. Inj. Mold. Tech.*, Vol. 4, pp. 29 ~ 35, 2000.
- Kihara, S., Gouda, T., Matsunaga, K., and Funatsu, K., "Numerical Simulation of Three-Dimensional Viscoelastic Flow Within Dies," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 39, pp. 152 ~ 163, 1999.
- Kennedy, P., "Full 3D Analysis: what it is and when to use it," *Int. Moldflow User Group Conf.*, Boston, USA, 2002.
- Park, K., Park, J. H., and Choi, S. R., "Numerical Analysis for Injection Molding of Precision Electronics Parts Using Three-Dimensional Solid Elements," *J. of Kor. Soc. Tech. Plasticity*, Vol. 11, pp. 362 ~ 371, 2002.
- Park, K. and J. H. Ahn, "Residual Stress Estimation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Parts using Three-Dimensional Solid Elements", *Trans. of the KSME, A*, Vol. 27, pp. 578 ~ 589, 2003.
- Lu, X. and Khim, L. S., "A Statistical Experimental Study of the Injection Molding of Optical Lenses," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 189 ~ 195, 2001.