

광픽업용 비구면 렌즈 사출성형 공정의 수치해석

박 근[#], 한철업^{*}

Numerical Analysis for the Injection Molding of an Aspheric Lens for a Photo Pick-up Device

Keun Park [#] and Chul-Yup Han ^{*}

ABSTRACT

In order to produce high-quality optical components, aspheric lenses have been widely applied in recent years. An aspheric lens consists of aspheric surfaces instead of spherical ones, which causes difficulty in the design process as well as the manufacturing procedure. Although injection molding is widely used to fabricate optical lenses owing to its high productivity, there remains lots of difficulty to determine appropriate mold design factors and injection molding parameters. In the injection molding fields, computer simulation has been effectively applied to analyze processes based on the shell analysis so far. Considering the geometry of optical lenses, however, numerical analysis based on solid elements has been reported as more reliable approach than shell-based one. The present work covers three-dimensional injection molding simulation using MPI/Flow3D and relevant deformation analysis of an injection molded plastic lens based on solid elements. Numerical analysis has been applied to the injection molding processes of an aspheric lens for a photo pick-up device. The reliability of the proposed approach has been verified in comparison with the experiments.

Key Words : Aspheric lens (비구면렌즈), Injection Molding (사출성형), Numerical Analysis (수치해석), Solid Element (입체요소), Deformation Analysis (변형해석)

1. 서 론

렌즈는 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 주요 부품으로서, 고정도의 형상 및 안정된 내부물성을 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, 렌즈의 형상정밀도 및 광학

적 특성 확보를 위한 사출성형 조건 설정이 필수적이다. 이를 위해 광학적 특성을 고려한 렌즈의 설계기술, 금형설계 및 가공기술, 정밀 사출성형기술 등이 요구되며 특히 사출성형 과정의 수치해석 기법을 통해 렌즈 성형용 금형 및 공정설계 과정의 효율화를 위한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 현재까지의 대부분의 플라스틱 제품의 사출성형 해석에 관련된 연구는 평면방향 2차원 유동으로 가정한 해석 모델을 적용하고 있다.^{1,4} 즉 입체

접수일: 2003 년 12 월 3 일; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일

[#] 교신저자: 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

E-mail: kpark@snut.ac.kr, Tel: (02) 970-6358

^{*} 삼성전기(주) 중앙연구소 금형팀

적으로 정의되어 있는 제품의 형상을 평면 혹은 곡면을 사용하여 단순화하고, 이에 기반하여 2차원 박막요소(shell element)를 사용한 유한요소 격자를 생성하여 해석을 수행한다. Kim 등⁵은 박막요소에 기반하여 렌즈의 성형과정을 해석하여 광학적 특성을 예측하였는데, 이러한 제품형상의 단순화는 제품의 기하학적 형상정보가 왜곡된다는 단점을 가지고 있으며, 특히 소형 렌즈의 경우 두께에 대한 특성길이의 비가 그다지 크지 않아 두께 방향의 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 사출성형의 유동해석 및 제품 이형후의 후변형 해석에 관한 연구가 진행되어 왔다.⁶⁻¹¹ 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 예측하고자 한다. 또한 실험 결과와의 비교를 통해 제안된 방법의 신뢰성을 입증하고자 한다.

2. 플라스틱 비구면 렌즈의 제작과정

2.1 광픽업용 비구면 렌즈의 설계

종래에 각종 광학기기에서는 구면렌즈를 다수 개 배열하는 방법으로 결상 정도를 향상시켜 왔으나, 최근들어 광학기기의 고정도화, 소형화 및 경량화의 실현을 위해 비구면 렌즈의 사용이 점차적

으로 증가되고 있다. 비구면 렌즈는 구면렌즈에서 발생하는 수차(aberration)를 감소시킴으로써 광학적 정도를 향상시키고, 광학소자의 사용을 대체함으로써 얻어지는 경량화 효과 등의 장점이 있다.

비구면 렌즈의 형상을 반경(r)에 대한 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + \dots \quad (1)$$

여기서 c 는 정점의 곡률(vertex radius), k 는 원추 상수(conic constant), A, B, C 는 각 항의 비구면 계수를 나타낸다. 고성능의 렌즈 개발을 위해서는 식 (1)에서의 고차항 범위의 설정 및 비구면 계수의 선정이 중요하다. 특히 비구면 계수의 선정은 렌즈 자체적 특성뿐만 아니라 렌즈가 장착되는 광학 시스템에서의 성능까지 함께 고려해주어야 한다.

본 연구에서는 소형 정밀 광픽업용 대물렌즈를 대상으로 선정하였다. Fig. 1에 광픽업의 기본 구성을 도시하였으며, 대물렌즈(Objective lens), 집속렌즈(Collimating lens), 반사경(Reflecting mirror), 빔 분할기(Beam splitter), 레이저 다이오드(Laser diode), 포토 다이오드(Photo diode) 등의 부품으로 이루어져 있다. 이중 대물렌즈는 광디스크의 신호를 직접 읽어들이는 역할을 수행하며, 한정된 공간 내에서 원하는 성능을 구현할 수 있도록 양면 비구면으로 제작되고 있다. 본 연구에서는 광학계설계 전문 소프트웨어인 CODE V¹²를 사용하여 대물렌즈 비구면계수를 결정하였으며, 설계된 대물렌즈의 형상을 Fig. 2에 도시하였다. 렌즈의 두께는 1.6mm, 경통을 포함한 렌즈의 직경은 5.0mm이다.

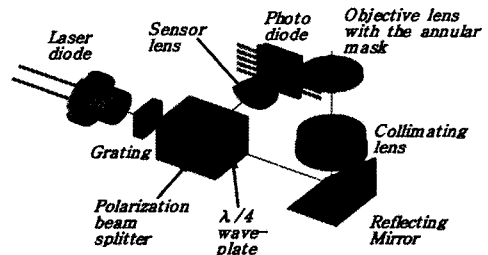


Fig. 1 Schematic description of a photo pick-up

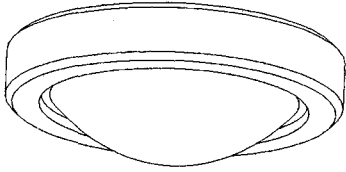


Fig. 2 Three-dimensional view of an objective lens

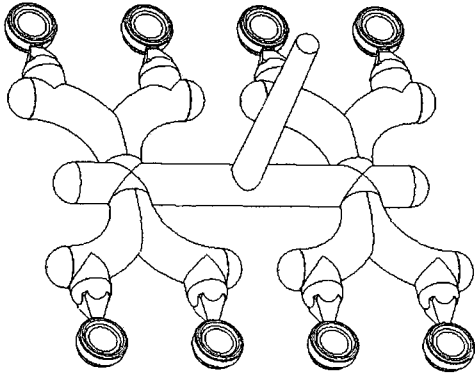


Fig. 3 Runner layout for objective lenses (8-cavity)

2.2 비구면 대물렌즈의 금형설계

본 연구에서 개발하고자 하는 비구면 대물렌즈는 광학용 고분자 수지를 사용하여 사출성형에 의해 제작되며, 생산성을 감안하여 1개의 금형에서 8개의 제품의 성형되는 다중캐비수 구조로 금형을 설계하였다. Fig. 3에 유동안내부(스프루, 런너, 게이트)를 포함한 8개 캐비수 성형품의 형상을 3차원적으로 도시하였다. 금형은 8개 캐비수 2단 금형구조로 설계하였으며, 게이트는 사각형 단면형태를 가진 측면 게이트(side gate)로 설계하였다. 비구면 렌즈부분은 별도의 핀 형태의 코어로 삽입되어 성형 후 이젝터 핀 역할을 동시에 수행할 수 있도록 하였다.

3. 비구면 렌즈의 사출성형 및 후변형해석

3.1 사출성형품의 변형해석 수식화

본 연구에서는 사출성형과정(유동, 보압, 냉각)의 해석은 Moldflow를 사용하여 수행했으며, 이때 얻어진 단계별 온도정보를 토대로 온도변화와 잔류응력에 의한 후변형을 해석하였다.¹⁰ 사출성형품

의 후변형 해석을 위해 온도변화에 의한 잔류응력만을 고려하였고, 응고된 고분자 수지에 대해서만 선형 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때의 평형방정식 및 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{\sigma} + \bar{f} = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\epsilon_{kl} - \alpha \delta_{ij} \Delta T) \quad (3)$$

여기서 α 는 열팽창계수로 고분자수지의 비체적(specific volume) 값으로부터 얻어진다. 비체적은 다음과 같이 온도와 압력의 함수로서 표현될 수 있다.⁴

$$v(T, p) = \frac{b_2}{p + b_1} T + \frac{b_4}{p + b_3}, \quad \text{for } T > T_i \quad (4)$$

$$v(T, p) = \frac{a_2}{p + a_1} T + \frac{a_4}{p + a_3} + a_5 e^{C(T, p)}, \quad \text{for } T < T_i \quad (5)$$

윗 식에서 T_i 는 전이 온도(transition temperature)를 의미하며, 지수항 C는 다음과 같이 온도와 압력의 함수로 표현된다.

$$C(T, p) = a_6 T - a_7 p \quad (6)$$

여기서 $a_1 \sim a_7, b_1 \sim b_4$ 는 고분자수지 물성에 따른 계수이다. 한편 열팽창계수는 비체적을 온도에 대해 미분하여 고분자의 상태에 따라 다음과 같이 얻어진다.

$$\alpha = \frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{1}{3} \left[\frac{\frac{b_2}{p + b_1}}{\frac{b_2}{p + b_1} T + \frac{b_4}{p + b_3}} \right], \quad \text{for } T > T_i \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[\frac{\frac{a_2}{p + a_1} + a_5 a_6 e^{C(T, p)}}{\frac{a_2}{p + a_1} T + \frac{a_4}{p + a_3} + a_5 e^{C(T, p)}} \right], \quad \text{for } T < T_i \quad (8)$$

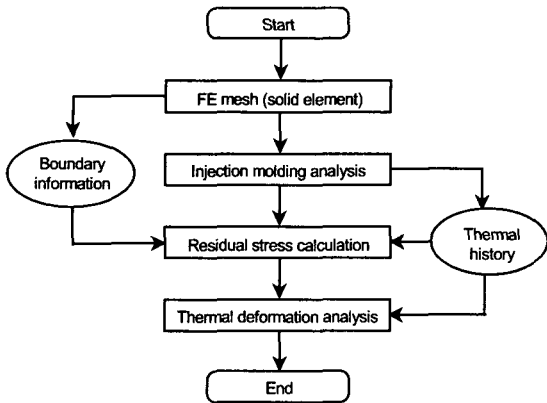


Fig. 4 Schematic procedure for deformation analysis

위와 같은 수식화를 사용하여 금형내의 잔류응력 분포를 계산할 수 있으며, 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 부과해주었다. 또한 계산된 잔류응력을 고려하여 이형 후 수지가 상온에 도달할 때까지의 열변형 해석을 수행함으로써 제품의 최종 변형을 예측하였다. Fig. 4에 이러한 사출성형품의 후변형해석 과정을 개념적으로 도시하였다.

3.2 비구면 렌즈의 사출성형해석

사출성형 해석은 Moldflow社의 MPI/Flow3D¹³를 사용하여 유동, 보압 및 냉각과정에 대해 해석을 수행하였다. 재료는 Zeon社의 ZeonexE48R 수지를 사용하였으며, 해당 수지의 점성모델 계수, pVT 상태방정식의 계수 및 재료의 기계적 물성치를 각각 Table 1, Table 2, Table 3에 요약하였다. 또한 사출성형 조건을 Table 4에 요약하였다.

Fig. 5에 단계별 유동패턴을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 양면이 볼록한 비구면으로 이루어져 있어 3차원적인 유동의 양상을 보여주고 있다. 이러한 유동패턴은 기존의 박막요소에 기초한 접근방법으로는 고려할 수 없었던 내용으로 입체요소를 사용하여 보다 효과적인 묘사가 가능함을 알 수 있다.

Table 1 Viscosity model constants for ZeonexE48R

| Constants | Value |
|---------------|-----------------------|
| n | 0.212 |
| τ^* (Pa) | 2.03×10^5 |
| D_1 (Pa.s) | 9.17×10^{19} |
| D_2 (°C) | 100 |
| D_3 (°C/Pa) | 2.3×10^{-8} |
| A_1 | 51.72 |
| A_2 (°C) | 52.60 |

Table 2 PvT constants for ZeonexE48R

| Constants | Value |
|----------------------------|------------------------|
| a_1 (N/m ²) | 8.108×10^7 |
| a_2 (N/kg.m°C) | 1.105×10^3 |
| a_3 (N/m ²) | 5.707×10^9 |
| a_4 (N/kg.m) | 5.336×10^8 |
| a_5 (m ³ /kg) | 2.173×10^{-6} |
| a_6 (°C ⁻¹) | 9.321×10^{-3} |
| a_7 (kg/m ³) | 4.058×10^{-1} |
| b_1 (N/m ²) | 1.316×10^8 |
| b_2 (N/kg.m°C) | 9.066×10^3 |
| b_3 (N/m ²) | 3.051×10^{10} |
| b_4 (N/kg.m) | 2.709×10^9 |

Table 3 Mechanical property of ZeonexE48R

| Constants | Value |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Young's modulus (GPa) | 2.55 |
| Poisson's ratio | 0.38 |
| Density (kg/m ³) | 1020 |
| Thermal expansion coeff. (/°C) | 9.40×10^{-8} |
| Specific heat (J/kg.C) | 1441 |
| Glass transition temperature (°C) | 140 |

Table 4 Injection molding conditions for the lens

| Items | Contents |
|--------------------------|----------|
| Melt temperature (°C) | 280 |
| Mold temperature (°C) | 120 |
| Injection time (sec.) | 2.0 |
| Packing time (sec.) | 4.0 |
| Cooling time (sec.) | 30.0 |
| Injection pressure (MPa) | 65.0 |
| Packing pressure (MPa) | 55.0 |

3.3 비구면 렌즈의 후변형해석

Fig. 6에 유동, 냉각, 보압해석을 거쳐 변형해석을 수행한 결과 얻어진 렌즈 단면의 최종 변형 형상을 10배 확대하여 도시하였다. 렌즈가 양면 볼록렌즈인 관계로 렌즈의 중심부분에서 상대적으로 수축이 크게 발생함을 알 수 있다. 보다 정량적인 고찰을 위해 반경에 따른 렌즈 하단면의 변형량의 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 렌즈면 오차의 최대 편차는 $7.83\mu\text{m}$ 으로 예측되었으며, 다음 장에서 실험결과와 비교해보도록 하겠다.

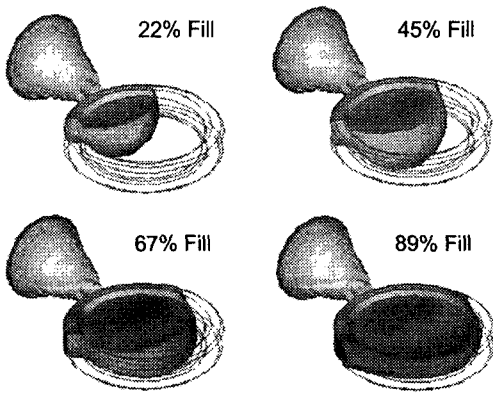


Fig. 5 Flow patterns during the filling stage

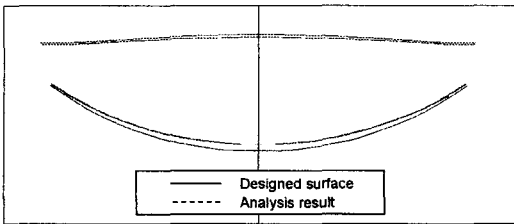


Fig. 6 Estimated deformation pattern of an aspheric lens

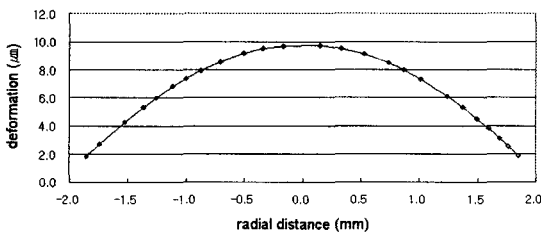


Fig. 7 Estimated deformation pattern of lower surface

3.4 사출성형 조건에 따른 변형량 비교

앞절에서 기술한 렌즈의 후변형해석 기법을 사용하여 사출성형 조건의 변화에 따른 변형량의 양상을 비교하였다. 본 연구에서는 렌즈의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 알려져 있는 금형 온도를 100°C , 110°C , 120°C , 130°C , 140°C 로 변화시켜가며 사출성형 해석을 수행하고, 단계별 온도변화를 고려한 잔류응력 및 열변형 해석을 수행하였다. 또한 해석결과와 신뢰성을 검증하기 위해 Toray社에서 개발한 3D TIMON을 사용하여 동일한 조건에서 해석을 수행하였다. 3D TIMON은 3차원 입체요소를 지원하며, 유동, 보압, 냉각 및 후변형 해석이 통합적으로 지원되는 상용 사출성형 해석 소프트웨어이다.¹⁴

Fig. 8에 각각의 경우에 대해 렌즈 하단면 변형량의 최대 편차를 비교하였다. 우선 본 연구에서 제안된 해석기법의 경우 금형온도가 증가될수록 변형량의 편차가 함께 증가함을 확인할 수 있다. 이는 금형온도가 높을수록 이형시 렌즈의 온도가 증가하고, 해당 온도에서 상온까지 냉각되는 과정에서 발생하는 수축이 상대적으로 증가되기 때문으로 판단된다. 반면 3D TIMON을 사용한 경우 금형온도 130°C 까지는 유사한 경향을 보이나, 140°C 에서 수축량의 편차가 줄어드는 점을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 유동 및 보압과정에서 발생하는 잔류응력이 고려되었는지 여부에 따른 것으로 추정된다. 이러한 차이점은 향후 추가적인 연구를 통해 유동 및 보압과정이 미치는 효과를 반영해야 할 것으로 판단된다.

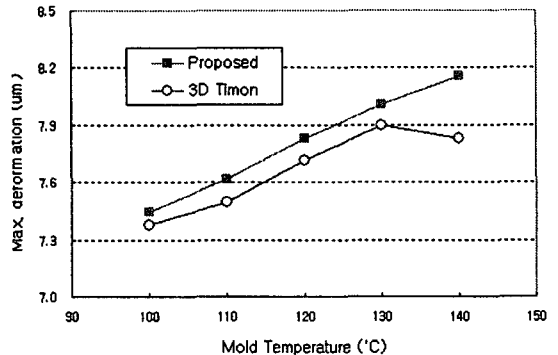


Fig. 8 Comparison of maximum deformation of lower lens surface with various mold temperature

4. 비구면 렌즈의 사출성형

4.1 렌즈 금형가공 및 사출성형

광픽업용 대물렌즈는 축대칭 비구면 형태이며, 광학적 특성을 만족시키기 위해 수 마이크로미터 정도의 형상정밀도가 요구된다. 따라서 일반적인 금형의 코어가공 기법을 사용하여 일체형으로 제작하기에는 많은 어려움이 있으며, 이러한 문제점을 극복하기 위해 일반적으로 축대칭 비구면을 성형하기 위한 코어 금형은 비구면 가공기(Diamond turning machine; DTM)에 의해 핀 형태로 가공된다. Fig. 9에 비구면 가공기를 사용한 핀 코어의 가공 과정을 도시하였다. 한편 경통 및 유동안내부를 성형하기 위한 금형은 별도로 제작되어 여기에 8개의 핀 금형이 삽입되게 된다. Fig. 10에 렌즈 성형을 위한 금형 인서트부의 형상을 도시하였으며, 이를 여타 부품과 조립하여 사출성형기에 장착하게 된다. 한편 사출성형은 전통식 정밀 사출기를 사용하여 진행되었으며, 사출성형을 통해 제작된 최종 제품을 Fig. 11에 도시하였다.

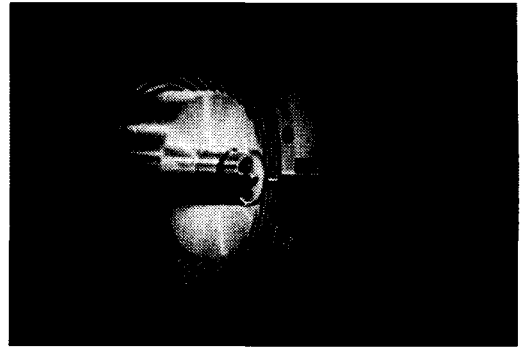


Fig. 9 Fabrication of a pin core using the DTM

4.2 해석결과와의 비교

해석결과로부터 얻어진 렌즈의 변형량에 대한 신뢰도를 검증하기 위해 사출성형된 렌즈의 표면 형상을 측정하였다. 측정은 접촉식 측정장비인 Form Talysurf(FTS)를 사용하여 수행하였고, 측정 결과를 Fig. 12에 도시하였다. 변형량의 전체적인 양상은 Fig. 7에 도시한 해석결과와 유사한 패턴을 보였으며, 렌즈면 오차의 최대 편차는 $6.37\mu\text{m}$ 으로 해석 결과와 $1.23\mu\text{m}$ 정도의 오차에 해당된다.

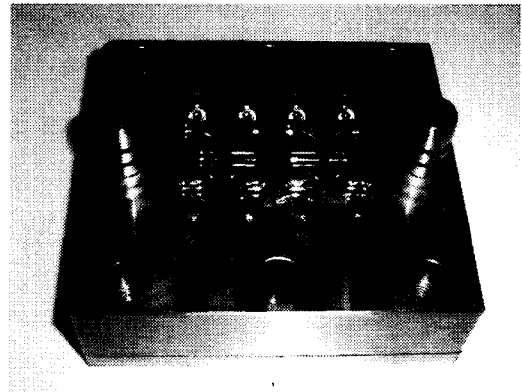


Fig. 10 Fabricated mold for 8 cavity objective lenses

Table 5에 금형온도에 따른 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 이러한 오차는 향후 유동에 의한 잔류응력 효과와 사출성형 과정에서 형성된 고분자의 배향이 후변형에 미치는 영향 등이 추가적으로 고려되면 보다 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

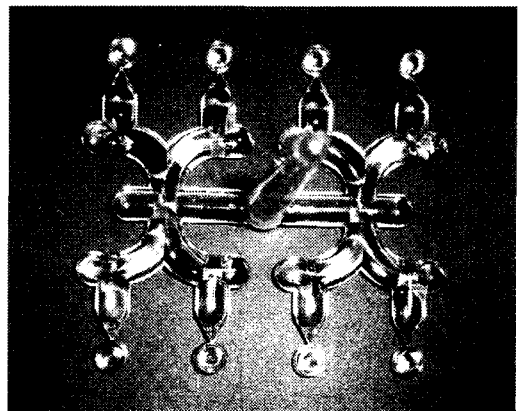


Fig. 11 Injection-molded plastic lenses with runners

Table 5 Comparison of the maximum deformation(μm)

| Mold Temperature | 100°C | 120°C |
|---------------------|-------|-------|
| Analysis (Proposed) | 7.44 | 7.83 |
| Analysis (3D TIMON) | 7.37 | 7.71 |
| Experiments | 5.84 | 6.37 |

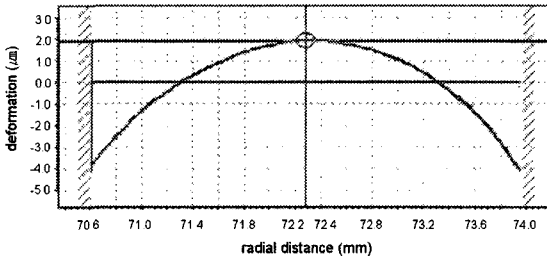


Fig. 12 Lower surface profile measured by FTS (unit: μm)

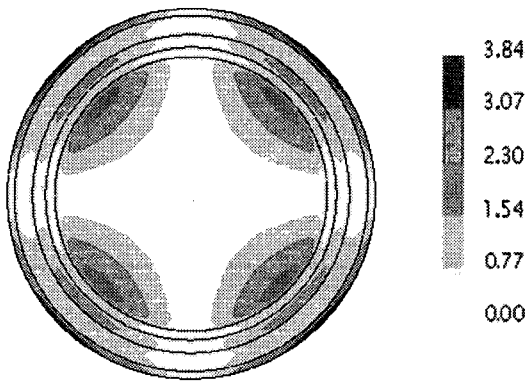


Fig. 13 (a) Residual stress distribution (unit: MPa)

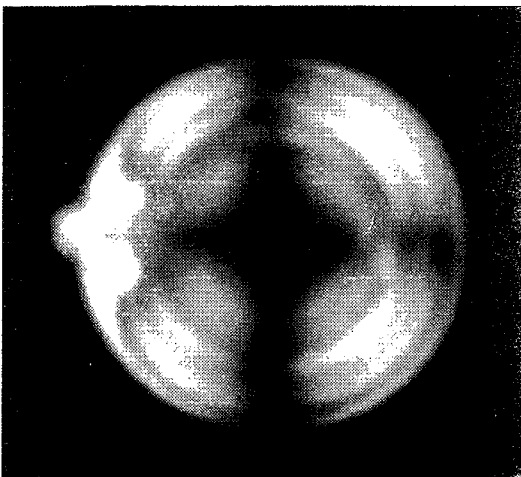


Fig. 13 (b) Birefringence pattern of the lens

한편 해석결과로부터 얻어진 렌즈의 잔류응력 (shear stress) 분포를 절대값으로 환산하여 Fig. 13 (a)에 도시하였다. 일반적으로 사출성형으로 제작된 광학 부품의 복굴절은 잔류응력과 연관이 있는 것으로 보고되고 있으며,⁹ 본 연구에서도 이를 확인하기 위해 계산으로부터 얻어진 잔류응력 분포를 렌즈의 복굴절 패턴(Fig. 13 (b) 참조)과 비교하여 유사한 분포를 가짐을 확인할 수 있었다.

이러한 결과로부터 제안된 기법을 사용하여 사출성형 과정에서 발생하는 잔류응력을 감소시킬 수 있도록 금형설계 변수 및 공정변수를 적절하게 개선해주면 결과적으로 렌즈의 광학적 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 전망된다.

5. 결 론

이상으로 본 연구에서는 광픽업용 정밀 비구면 렌즈의 특성 평가를 위해 입체요소를 사용한 사출성형 및 후변형 해석에 관한 연구를 진행하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 입체요소를 사용하여 사출성형의 유동, 보압 및 냉각과정의 해석을 수행하고, 이때 얻어진 결과로부터 금형내의 잔류응력과 이형 후의 변형해석을 수행하기 위한 제반 연구를 수행하였다.
- (2) 제안된 해석기법을 적용하여 광픽업용 대물 렌즈용 정밀 비구면렌즈의 사출성형 및 변형 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 예측된 렌즈면 변형량의 최대 편차는 $7.83\mu\text{m}$ 으로 실험 결과와 비교하였을 때 $1.23\mu\text{m}$ 정도의 오차를 보였다.
- (3) 제안된 해석기법을 사용하여 금형온도에 따른 변형량의 차이를 비교하여 일반적으로 금형온도의 증가에 따라 변형량의 최대 편차가 증가함을 확인할 수 있었다.
- (4) 광픽업용 대물렌즈 성형을 위한 정밀 금형을 제작하고, 이를 사용하여 렌즈를 성형하기 위한 제반 연구를 수행하였으며, 제작된 렌즈의 표면정밀도 및 복굴절 패턴을 측정하여 해석 결과와 비교하였다.

상기의 연구결과로부터 기존의 박막요소로는 접근할 수 없었던 정밀 플라스틱 비구면 렌즈의 유동특성 및 그에 따른 제품의 성능 예측이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 연구결과를 바탕으로

향후 적절한 비구면렌즈 성형을 위한 금형설계 변수 및 공정조건의 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울산업대학교의 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Heiber, C. A. and Shen, S. F., "A Finite Element/Finite Difference Simulation of the Injection Molding Filling Process," *J. Non-Newton. Fluid Mech.* Vol. 7, pp. 1-32, 1980.
2. Wang, V. W., Heiber, C. A. and Wang, K. K., "C-Flow: A CAE Package with High-level Interactive Graphics," *Appl. Comp. Aided Engng.* In *Injection Molding*, pp. 230-246, 1987.
3. Chiang, H. H., Heiber, C. A. and Wang, K. K., "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part I: Formulation," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 31, pp. 116-124, 1991.
4. Kennedy, P., *Flow analysis reference manual*, Moldflow Pty. Ltd., 1993.
5. 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.
6. 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.
7. Kennedy, P., "Full 3D Analysis: what it is and when to use it," *Int. Moldflow User Group Conf.*, Boston, USA, 2002.
8. 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.
9. Maekawa, Y., Onishi, M., Ando, A., Matsushima, S. and Lai, F., "Prediction of Birefringence in Plastics Optical Elements Using 3D CAE for Injection Molding," *Proc. SPIE Vol. 3944*, pp. 935-943, 2000.
10. Park, K., Ahn, J. H. and Yim, C. H., "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.
11. Kwak, T. S., Ohmori, H. and Bae, W. B., "A study on searching method of molding condition to control the thickness reduction of optical lens in plastic injection molding process," *J. Kor. Soc. Prec. Engng.*, Vol. 21, pp. 27-34, 2004.
12. *Optical Research Associates, Introduction to CODE V*, 2001.
13. *Moldflow Co., MPI/Flow3D User's Manual: Release 2.0*, Moldflow Pty. Ltd., 2001.
14. *Toray Industries, Inc., 3D TIMON - Reference Manual*, 2002