

휴대폰 카메라용 비구면렌즈의 성형해석 및 후변형해석

박 근^{1*} · 엄혜주¹ · 안종호²

¹서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부, ²삼성전기(주) 정밀기술그룹

Mold Filling Analysis and Post-deformation Analysis of Injection-molded Aspheric Lenses for a Mobile Phone Camera Module

Keun Park^{1*} · Hyeju Eom¹ · Jong-Ho Ahn²

¹Seoul National University of Science and Technology, ²Samsung Electro-Mechanics Co.

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, a full-3d simulation based on solid elements has been reported as a reliable approach. The present work covers three-dimensional injection molding simulation and relevant deformation analysis of an injection molded plastic lens based on 3d solid elements. Numerical analyses have been applied to the injection molding processes of three aspheric lenses for an image sensing module of a mobile phone. The reliability of the proposed approach has been verified in comparison with the experimental results.

Key Words : Aspheric lens, Injection Molding, Numerical analysis, Solid element, Image sensing module

1. 서 론

렌즈는 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 주요 부품으로서, 고정도의 형상 및 안정된 내부 물성을 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 광학적 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 성

형용 금형 및 공정설계 과정의 효율화를 위한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

일반적으로 플라스틱 제품의 사출성형 해석에 관련된 연구는 평면방향 2차원 유동으로 가정한 해석 모델을 적용하고 있다.^{1,2)} 즉 입체적으로 정의되어 있는 제품의 형상을 평면 혹은 곡면을 사용하여 단순화하고, 이에 기반하여 2차원 박막요소(shell element)를 사용한 유한요소 격자를 생성하여 해석을 수행한다. 그러나 광학렌즈는 두께가 연속적으로 변하는 특성을 갖고 있어 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 고려하기 위해 3차원 입체요소를 사용한 해석이 타당한 것으로 알려져 있다.³⁻⁵⁾

* To whom correspondence should be addressed.
kpark@seoultech.ac.kr
접수 : 2011. 12. 13. 채택 : 2012. 05. 11.

본 연구에서는 3차원 입체요소를 사용하여 충전, 보압, 냉각과정에 대해 사출성형 해석 및 후변형 해석을 수행하고 해석 결과로부터 3매로 구성된 휴대폰용 비구면렌즈의 최종 변형량을 예측하고자 한다. 또한 해석으로부터 얻어진 렌즈면의 변형형상을 실제 제품 측정결과와의 비교를 통해 제안된 방법의 신뢰성을 확인하고자 한다.

2. 플라스틱 비구면렌즈 설계

2.1. 비구면 렌즈 개요

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 있다.

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

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

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.⁴⁾

2.2. 휴대폰 카메라용 비구면 렌즈

영상인식 카메라 모듈(Image sensing module)은 렌즈의 수광 신호를 화상센서(Image sensor)를 이용하여 디지털 신호로 변환하는 장치이다. 최근들어 휴대폰용 카메라 모듈로의 사용이 급증하고 있으며, 그 밖에도 홈네트워크, 자동차, 로봇, 의료용 등의 분야에도 널리 사용되고 있다. 휴대폰 카메라 모듈은 크게 렌즈 모듈, 센서, 기판, 케이스 등의 부품으로 구성되어 있으며, Fig. 1에 기본 구조를 도시하였

다. 특히 최근 요구되는 렌즈의 고성능과 경량화를 동시에 만족시키기 위해 다수개의 비구면렌즈로 구성되어 있다.

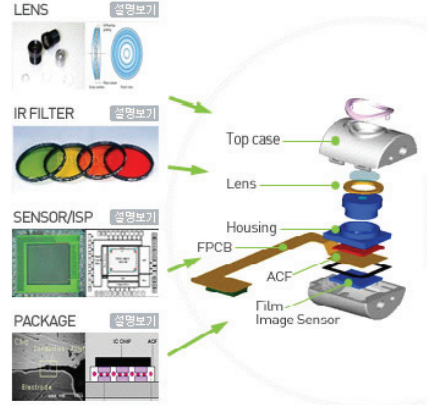


Fig. 1. Schematic description of an image sensing module

본 연구에서는 130만화소의 휴대폰 카메라용으로 사용되는 렌즈 모듈에 대해 해석을 진행하였다. 렌즈 모듈은 3매의 비구면 렌즈로 구성되어 있으며, Table 1에 3개의 렌즈의 기본 형상 및 치수를 요약하였다. Fig. 2에 3개의 렌즈로 구성된 휴대폰 카메라 모듈 광학계의 광선추적 결과를 도시하였다. 광선추적은 CODE V⁶⁾를 사용하여 수행되었다. 현재의 광선추적 결과를 보면 여러 범위의 Field 및 파장에서 모두 동일한 위치에 초점을 맺을 수 있도록 렌즈의 비구면계수가 최적화되어 있음을 알 수 있다.

Table 1. Basic specifications of three aspheric lenses (mm)

Lens type	Lens (1)	Lens (2)	Lens (3)
Outer diameter	4.5	4.5	4.6
Lens thickness	0.86	0.93	0.72
Radius (surface 1)	1.48	1.08	6.77
Radius (Surface 2)	6.45	0.82	1.72

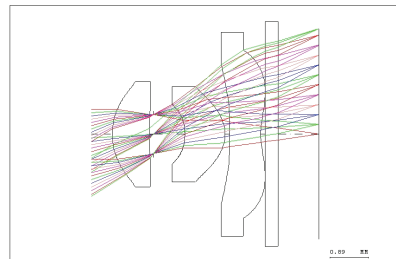


Fig. 2. Configuration of three aspheric lenses with ray tracing⁷⁾

그러나 상기 광선추적 결과는 렌즈면이 설계치대로 제작된다는 가정하에 수행된 결과로 사출성형시 발생하는 변형량의 고려가 필요하다.

3. 렌즈 사출성형 및 후변형해석

3.1. 사출성형의 지배방정식

사출성형의 공정은 크게 가소화(plastication), 충전(filling), 보압(packing), 냉각(cooling), 이형(ejection)의 5단계로 구분된다. 이중 충전과정을 수치적으로 묘사하기 위해서는 고분자의 유동에 대한 수식화가 선행되어야 한다. 고분자의 유동은 일반적으로 점성이 전단변형을 속도(shear rate), 온도, 그리고 압력에 따라 변하는 비뉴토니안(non-Newtonian) 유체로 알려져 있다. 고분자의 유동을 수학적으로 묘사하기 위한 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u_i)_i = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -p_{,i} + \tau_{j,i} + \rho f_i \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i T_{,i} \right) = T_{,ii} + \tau_{j,i} + \eta \mathcal{E} \quad (4)$$

이때 점성계수(η)는 5개의 재료상수($n, \tau^*, \beta, T_b, \gamma$)를 갖는 수정된 Cross 점성모델을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\eta(T, \mathcal{E}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \mathcal{E}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (5)$$

여기서 n 은 지수, τ^* 는 전단 전이응력(transition stress), η_0 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)로 다음과 같다.

$$\eta_0(T, p) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\beta p) \quad (6)$$

3.2. 사출성형품의 변형해석 수식화

사출성형품의 후변형 해석을 위해 사출성형 해석을 통해 계산된 온도변화에 의한 잔류응력을 고려

하였고, 응고된 고분자 수지에 대해 선형 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때의 평형방정식 및 구성방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \tilde{\sigma} + \overset{\rho}{f} = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \alpha \delta_{ij} \Delta T) \quad (8)$$

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

$$v(T, p) = \frac{b_2}{p + b_1} T + \frac{b_4}{p + b_3}, \quad \text{for } T > T_i \quad (9)$$

$$v(T, p) = \frac{a_2}{p + a_1} T + \frac{a_4}{p + a_3} + a_5 e^{C(T,p)}, \quad \text{for } T < T_i \quad (10)$$

윗 식에서 T_i 는 전이 온도(transition temperature)를 의미하며, $a_1 \sim a_7, b_1 \sim b_4$ 는 고분자수지 물성에 따른 계수이다. 한편 열팽창계수는 비체적을 온도에 대해 미분하여 고분자의 상태에 따라 다음과 같이 얻어진다.⁴⁾

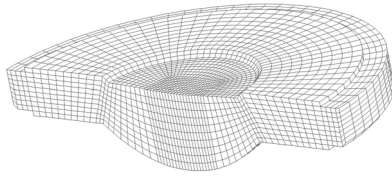
$$\alpha = \frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{1}{3} \left[\frac{\frac{b_2}{p + b_1}}{\frac{b_2}{p + b_1} T + \frac{b_4}{p + b_3}} \right], \quad T < T_i \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[\frac{\frac{a_2}{p + a_1} + a_5 a_6 e^{C(T,p)}}{\frac{a_2}{p + a_1} T + \frac{a_4}{p + a_3} + a_5 e^{C(T,p)}} \right], \quad T < T_i \quad (12)$$

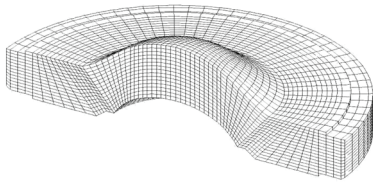
4. 비구면 렌즈의 후변형해석 결과

4.1. 해석 개요

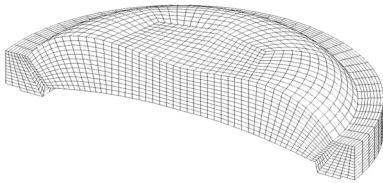
Fig. 3에 3가지 렌즈의 CAE 해석을 위한 유한요소 모델을 제시하였는데, 렌즈 단면부에서의 격자구성 형태를 표현하기 위해 1/2 부분에 대해 도시하였다. 요소는 8절점 육면체 요소를 사용하였으며, I-DEAS를 사용하여 3차원 유한요소모델을 구성하였다. 사출성형 및 후변형해석은 3D Timon⁸⁾을 사용하였으며, Table 2에 해석 조건을 요약하였다.



(a) mesh structure for the lens (1)



(b) mesh structure for the lens (2)



(c) mesh structure for the lens (3)

Fig. 3. Three-dimensional mesh structure for three lenses

Table 2. Injection molding conditions for three lenses

Lens type	Lens (1)	Lens (2)	Lens (3)
Nozzle temperature (C)	270	270	270
Mold temperature (C)	120	120	120
Injection time (second)	2.0	2.0	2.0
Holding time (second)	6.5	6.5	6.0
Cooling time (second)	35	35	35

4.2. 렌즈의 후변형해석 결과

Fig. 4에 사출성형해석 및 후변형해석을 통해 계산된 렌즈의 Z-방향 변위를 유동 수직방향 단면에 대해 도시하였다. 해석은 기준면의 Z-변위를 고정시키고 해석을 수행하였다. 해석 결과를 보면 렌즈면 1번의 경우 수축에 의해 +Z 방향으로 변위가 발생하였고, 렌즈면 2번의 경우 -Z 방향으로 변위가 발생하였음을 알 수 있다. 최대 변위는 14 μ m로 계산되었으며, 기준 두께(0.96mm)와 비교할 때 0.9% 정도의 수축이 발생하였음을 알 수 있다.

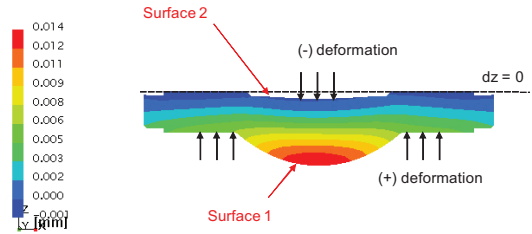
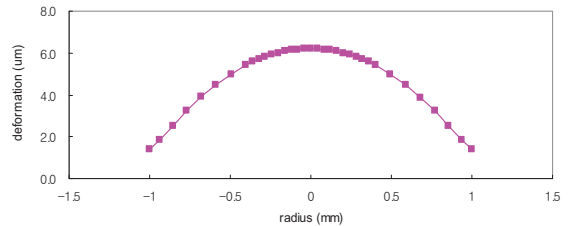
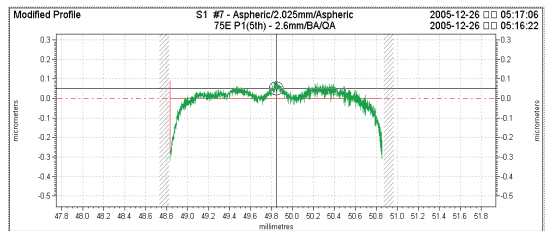


Fig. 4. Amount of deformation along the z-direction

Fig. 5에 각각 CAE 해석 결과로부터 계산된 1번 렌즈의 1번 렌즈면에 대한 변형 프로파일과 실험 결과로부터 측정된 프로파일을 비교하였다. 여기서 Fig. 5(b)에 도시된 측정 결과는 FTS 장비를 사용하여 성형된 렌즈의 표면 측정치를 바탕으로 설계치 수와의 차이를 그래프 형태로 나타낸 것이며, Fig. 5(a)의 해석 결과 그래프도 동일한 기준으로 작성하였다. 결과를 분석해보면 Fig. 4에서 알 수 있듯이 렌즈 중앙부에서 수축이 많이 발생하여 결과적으로 중앙부의 변형오차가 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 실험 결과와도 유사함을 알 수 있다. 마찬가지로 방법으로 Fig. 6의 (a)와 (b)에 각각 1번 렌즈의 2번 렌즈면의 변형 프로파일에 대한 CAE 해석결과와 측정결과를 비교하였다. 결과를 비교해보면 해석결과와 실험결과가 상당히 유사함을 알 수 있다.

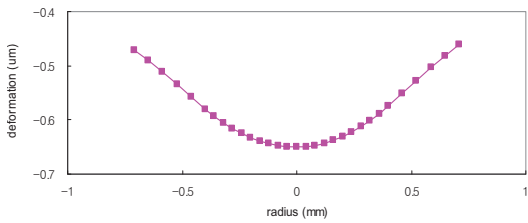


(a) CAE analysis result

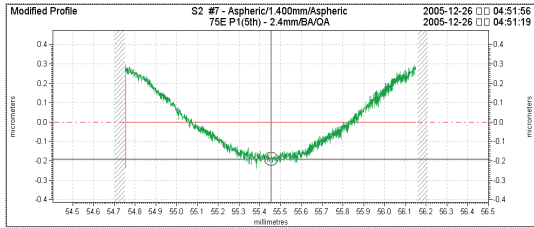


(b) Measured profile

Fig. 5. Comparison of deformation profiles for the surface(1) of the lens(1)



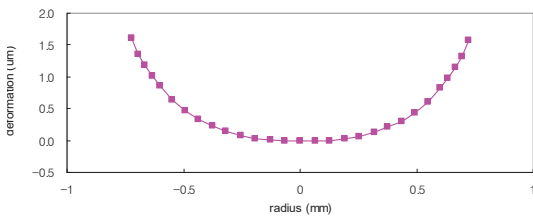
(a) CAE analysis result



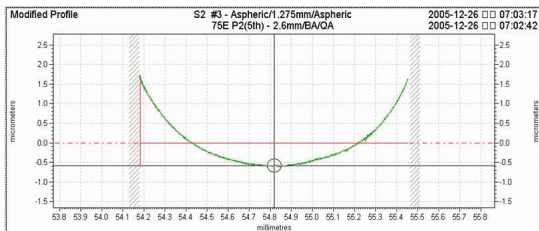
(b) Measured profile

Fig. 6. Comparison of deformation profiles for the surface(2) of the lens(1)

마찬가지 방법으로 Fig. 7과 8에 2번 렌즈의 1, 2번 렌즈면에 대한 변형 프로파일을 비교하였다. 1번 렌즈면의 경우 외측의 변형이 크게 발생하는 'U'자 형태를 보이고, 2번 렌즈면의 경우 'M'자 형태의 변위를 보이는 점이 해석결과와 실험결과 모두 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

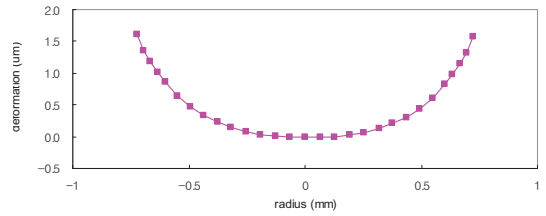


(a) CAE analysis result

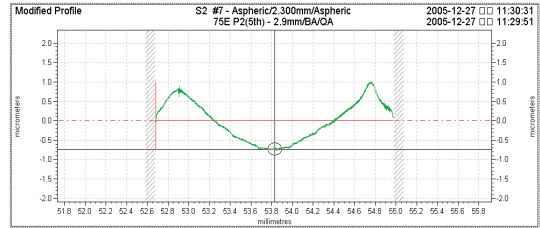


(b) Measured profile

Fig. 7. Comparison of deformation profiles for the surface(1) of the lens(2)



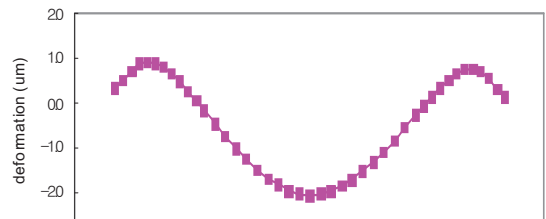
(a) CAE analysis result



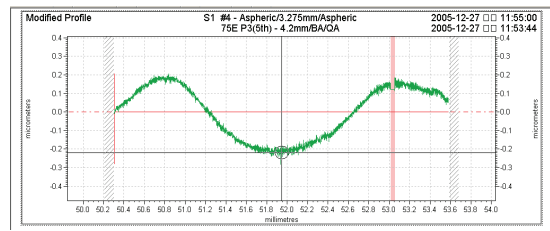
(b) Measured profile

Fig. 8. Comparison of deformation profiles for the surface(2) of the lens(2)

마찬가지 방법으로 Fig. 9와 10에 3번 렌즈의 1, 2번 렌즈면에 대한 변형 프로파일을 비교하였다. 1번 렌즈면의 경우 'M'자 형태의 변형을 보이는 반면 2번 렌즈면의 경우 'W'자 형태의 변위를 보이는 점이 해석결과와 실험결과 모두 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

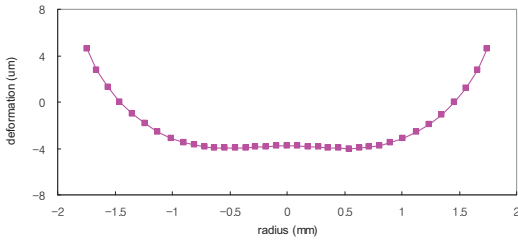


(a) CAE analysis result

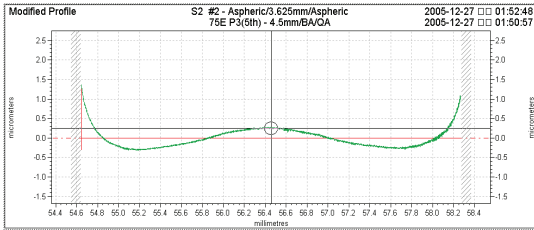


(b) Measured profile

Fig. 9. Comparison of deformation profiles for the surface(1) of the lens(3)



(a) CAE analysis result



(b) Measured profile

Fig. 10. Comparison of deformation profiles for the surface(2) of the lens(3)

4. 결 론

이상으로 본 연구에서는 휴대폰 카메라 모듈용 초정밀 정밀 비구면 렌즈의 특성 평가를 위해 입체요소를 사용한 사출성형 및 후변형 해석에 관한 연구를 진행하였다. 이러한 연구결과를 종합적으로 정리하면 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 휴대폰 카메라 모듈용 3개의 비구면렌즈의 사출성형 및 변형해석을 수행하였다.
- 3) 해석 결과로부터 3개의 비구면렌즈면에 대한 변형 프로파일을 예측하였으며, 실험결과와의 비교를 통해 전반적으로 변형 프로파일이 유사함을 확인할 수 있었다.
- 4) 상기 결과를 실험치와 비교하면 각각의 절대 변형량의 경우는 해석결과와 실험결과간에 다소 차이를 보여 실제 해석결과를 제품개발에 적용하기 위해서는 해당 오차에 대한 보정이 필요할 것으로

판단된다.

상기의 연구결과를 바탕으로 향후 적절한 비구면 렌즈 성형을 위한 금형설계 변수 및 공정조건의 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

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) 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.
- 3) Park, K., "A study on flow simulation and deformation analysis for injection-molded plastic parts using three-dimensional solid elements," Polym. Plast. Tech. Engng. Vol. 43, pp. 1569-1585, 2004.
- 4) Park, K. and Han, C. Y., "Numerical analysis for the injection molding of an aspheric lens for a photo pick-up device," J. Kor. Soc. Prec. Engng., Vol. 21, pp. 507-514, 2004.
- 5) Kim, S. and Turng, L. S., "Three-dimensional numerical simulation of injection molding filling of optical lens and multiscale geometry using finite element method," Polym. Eng. Sci., Vol. 46, pp. 1263-1274, 2006.
- 6) B. R. Irvin and D. Hasenauer, "Introduction to Code V," Optical Research Associates, 2001.
- 7) Eom, H. and Park, K., "Ray tracing of a plastic aspheric lens by considering index distribution induced from injection molding," Trans. Mater. Proc., Vol. 18, pp. 128-134, 2009.
- 8) Toray Industries, Inc., 3D TIMON - Reference Manual, 2002.