

# 사출성형 유한요소해석과 연계한 비구면렌즈의 광학적 특성평가

박 근<sup>#</sup> · 엄혜주<sup>1</sup> · 김종필<sup>1</sup> · 주원종<sup>2</sup>

## Evaluation of Optical Performance for an Aspheric Lens Connecting with FE Analysis of Injection Molding

K. Park, H. J. Um, J. P. Kim, W. J. Joo

(Received November 16, 2006)

### Abstract

The present study covers an integrated simulation method to evaluate optical performance of an aspheric plastic lens by connecting a finite element (FE) analysis of injection molding with a ray tracing simulation. Traditional ray tracing methods have based on the assumption that the optical properties of a lens are homogeneous throughout the entire volume. This assumption is to a certain extent unrealistic for injection-molded plastic lenses because material properties vary at every point due to the injection molding effects. To take into account the effects of the inhomogeneous optical properties of the molded lens, a new ray tracing scheme is proposed in conjunction with a FE analysis of the injection molding. A numerical scheme is developed to calculate ray paths on every element layer with more realistic information of the refractive indices which can be obtained through the FE analysis. This information is then used to calculate the ray paths based on the FE mesh of which nodal points have unique index values. The proposed tracing scheme is implemented on the tracing of an aspheric lens, and its validity is ascertained through experimental verification.

**Key Words** : Injection Molding, Aspheric Lens, Ray Tracing, Finite Element Analysis, Spherical Aberration

### 1. 서 론

렌즈는 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 주요 부품으로서, 고정도의 형상 및 안정된 내부물성을 요구하는 정밀 부품이다. 광학 렌즈는 특정 광학계 내에서 입사광이 원하는 위치에 초점을 맺을 수 있도록 굴절시켜주는 역할을 하며, 이를 위해 초점거리, 배율, 렌즈의 성능 등을 종합적으로 고려하여 렌즈의 형상을 설계해야 한다 [1]. 이러한 설계과정은 기하광학에 기반한 광선추적(Ray tracing) 기법을 통해 이루어지며 상용 광학

계설계 소프트웨어를 사용하여 수행되고 있다. 광학계설계 소프트웨어에서는 렌즈의 형상 및 재질, 입사되는 광의 특성에 따른 빛의 결상특성을 예측하여 설계된 광학계의 수차(Aberration)를 평가하고 이를 감소시킬 수 있는 방향으로의 설계 개선 기능을 제공해준다.

렌즈는 사용 재질에 따라 유리 렌즈와 플라스틱 렌즈로 구분되는데, 이중 플라스틱 렌즈는 주로 사출성형 기법으로 제작되어 생산성이나 가격 경쟁력 측면에서 장점이 있는 반면, 렌즈의 형상 정밀도 및 광학적 특성 확보를 위한 안정적인 성

1. 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부 대학원

2. 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부

# 교신저자: 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부,

E-mail: kpark@snut.ac.kr

형조건 설정이 필수적이다. 이를 위해 렌즈의 설계기술, 금형설계 및 가공기술, 정밀 사출성형기술 등이 요구되며, 특히 렌즈의 사출과 관련된 여러가지 공정변수가 광학적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석해야 한다.

일반적으로 렌즈 설계시 렌즈면의 형상이 설계치대로 제작되고, 내부의 물성이 렌즈 전체에 대해 균일하다는 이상적인 전제조건을 바탕으로 수차를 최소화할 수 있는 방향으로 설계가 수행된다. 그러나 사출성형 기법으로 제작되는 플라스틱 렌즈의 경우 성형과정에서 발생하는 수축으로 인해 형상정밀도가 저하되며, 위치에 따라 렌즈 내부 물성의 차이가 발생하게 된다. 따라서 이상적인 가정을 바탕으로 수행된 광선추적 시뮬레이션 결과가 실제 결과와는 차이를 보이게 되며, 결과적으로 원하는 특성을 얻기 위해 많은 시행착오를 거쳐야 한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서는 사출성형의 CAE 해석을 병행하여 실제 성형과정에서 발생하는 형상오차 및 내부 물성의 변화를 반영함으로써 성형공정이 고려된 광학설계 시뮬레이션을 수행해주어야 한다. 최근들어 렌즈의 기하학적 특성을 고려하여 3차원 입체요소[2]를 사용한 사출성형 해석결과가 발표되었는데[3~6], 주로 성형 후 렌즈면의 변형량 예측이나 잔류응력 계산을 통한 복굴절패턴 예측 등에 국한되고 있다. 한편 McFarland와 Colton[7]은 CAE 해석으로부터 렌즈의 변형량을 계산하고 이를 바탕으로 Zernike 다항식 근사를 통해 수차를 계산하였는데, 이때 내부의 굴절율은 균일하게 가정하였다. Park 등[8]은 사출성형시 발생하는 내부 굴절율의 변화를 효과적으로 고려하기 위해 유한요소에 기반한 광선추적 기법을 개발하고 구면 렌즈에의 적용을 통해 사출성형의 영향에 의해 렌즈의 수차에 변화가 생김을 입증하였다. 본 연구에서는 선행 연구결과를 기초로 광학용 비구면렌즈에 대해 사출성형의 CAE 해석과 연계한 렌즈의 광학적 특성평가를 위한 제반 연구를 수행하고자 한다.

## 2. 비구면 렌즈의 광학설계

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

차적으로 증가되고 있다. 비구면 렌즈는 구면렌즈에서 발생하는 수차를 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 원추상수(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.

이러한 비구면계수의 최적화 작업은 주로 Code V, OSLO 등의 광학계설계 소프트웨어에서 광선추적 시뮬레이션을 통해 수행되고 있다. Fig. 1에 광학용 대물렌즈에 대해 구면으로만 설계된 경우(Fig. 1(a))와 최적화된 비구면 보정이 이루어진 경우(Fig. 1(b))에 대해 OSLO를 사용한 광선추적 결과를 비교하였다. (a)의 경우 모든 광선과 광축간의 교점이 서로 상이하어 구면수차가 크게 발생하는 반면, (b)의 경우 비구면 보정에 의해 구면수차가 대폭 감소하여 결과적으로 렌즈의 결상능력이 향상됨을 알 수 있다.

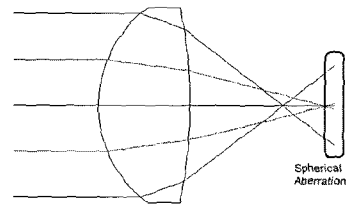


Fig. 1(a) Ray tracing result for a spherical lens

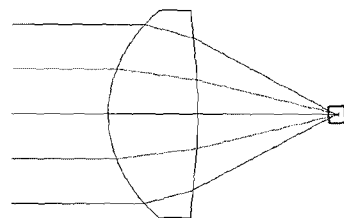


Fig. 1(b) Ray tracing result for an aspheric lens

### 3. 유한요소 기반 광선추적 기법

#### 3.1 광선추적의 이론적 배경

광선추적의 이론적 배경을 살펴보기 위해 Fig. 2에 양면 볼록렌즈로 구성된 단일 렌즈 광학계의 개요를 자오면(Meridional plane)에 대해 도시하였다. 이때 입사된 광신호에 대해 렌즈면에서의 굴절특성을 정의하는 굴절방정식(Refraction equation) 및 매질 내에서의 이동을 표현하는 전달방정식(Transfer equation)을 사용하여 물체점(O)에서 상점(I)까지의 광선추적을 위한 수식을 행렬 형태로 정리하면 아래와 같다[1].

$$\{\psi_i\} = [T_{i2}][R_2][T_{21}][R_1][T_{10}]\{\psi_o\} \quad (2)$$

여기서  $[R_i]$ 는 렌즈의  $i$ -번째 면에 대한 굴절행렬(Refraction matrix),  $[T_{ij}]$ 는 렌즈의  $j$ -번째 면과  $i$ -번째 면 사이에서의 빛의 전달특성을 정의하는 전달행렬(Transfer matrix)이다.

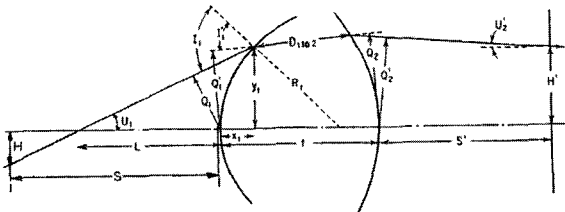


Fig. 2 Basic symbols in meridional ray tracing[1]

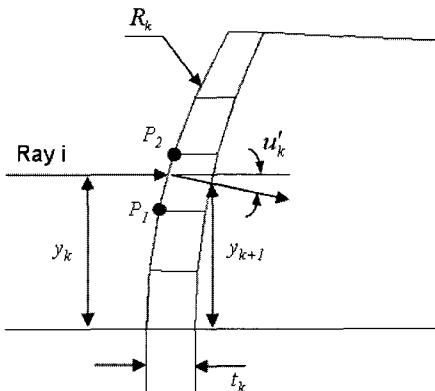


Fig. 3 Schematic description of the finite element based ray tracing method[8]

#### 3.2 유한요소 기반 광선추적 기법

CAE 해석결과로부터 얻어진 굴절을 분포를 고려하여 광선추적을 수행하기 위해서는 유한요소 에 기반하여 계산이 수행되어야 한다. 이때 유한요소 층(layer)의 개수만큼의 렌즈 단면을 구성할 수 있으며, 이때 총  $(k-1)$ 개의 유한요소층을 가진 렌즈의 광선추적 수식은 다음과 같다[8].

$$\{\psi_i\} = [T_{ik}][R_k][T_{k(k-1)}][R_{(k-1)}] \cdots [T_{21}][R_1][T_{10}]\{\psi_o\} \quad (3)$$

이를 구현하기 위한 단일 유한요소층에 대한 광선추적의 개념도를 Fig. 3에 도시하였다. 각 유한요소층에 대한 곡률반경( $R_k$ ) 및 두께( $t_k$ )는 절점의 위치정보를 사용하여 계산된다. 이후 입사광선이 통과하는 요소를 검색하고, 해당 요소의 절점  $P_1$  및  $P_2$ 에서의 형상함수를 사용하여 입사 위치에서의 굴절을 다음과 같이 계산하였다.

$$n_k(\xi) = \left(1 - \frac{\xi}{l}\right)n_k(P_1) + \frac{\xi}{l}n_k(P_2) \quad (4)$$

여기서  $l$ 은 절점  $P_1$  및  $P_2$ 사이의 거리,  $\xi$ 는 절점  $P_1$ 과  $P_2$ 로 이루어진 선분 요소에서의 지역좌표를 의미한다. 이러한 과정을 거쳐 계산된 변수들을 식 (3)에 대입하여 전체 요소층의 개수만큼 광선추적을 반복적으로 수행하였다.

### 4. 렌즈 성능평가를 위한 통합적 수치해석

#### 4.1 렌즈 사출성형 과정의 CAE 해석

본 연구에서는 양면 모두 볼록한 형태로 설계된 광학업용 대물렌즈를 대상으로 해석을 실시하였다. 렌즈의 두께는 1.6mm이고, 경통을 포함한 렌즈의 직경은 5.0mm이다. 사출성형 해석은 Toray社의 3D TIMON을 사용하여 3차원 입체요소 기반 해석을 수행하였다. 재료는 Zeon社의 Zeonex E48R 수지를 사용하였으며, 해당 수지의 기계적 물성치 및 사출성형 조건을 각각 Table 1, Table 2에 요약하였다[5].

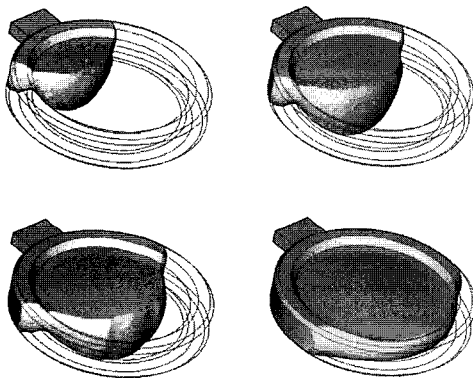
Fig. 4에 단계별 유동패턴을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 양면이 볼록한 비구면으로 이루어져 있어 3차원적인 유동의 양상을 보여주고 있다. 이러한 유동패턴은 기존의 박막요소에 기초한 접근방법으로는 고려할 수 없었던 내용으로 입체요소를 사용하여 보다 효과적인 묘사가 가능함을 알 수 있다.

**Table 1 Mechanical property of ZeonexE48R**

Constants	Value
Young's modulus (GPa)	2.55
Poisson's ratio	0.38
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1020
Thermal expansion coeff. (/°C)	9.40 × 10 <sup>-8</sup>
Specific heat (J/kg.°C)	1441
Glass transition temperature (°C)	140
Refractive index	1.52385

**Table 2 Injection molding conditions for the lens**

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

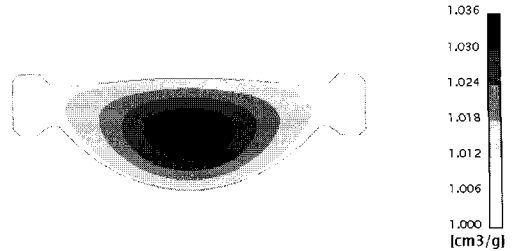


**Fig. 4 Flow patterns during the filling stage**

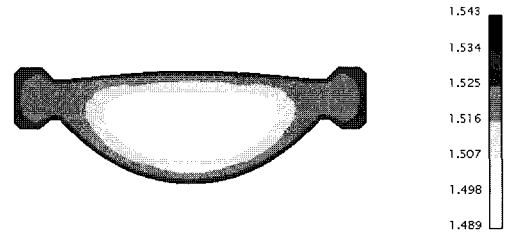
Fig. 5(a)에 렌즈 단면에서의 비체적(Specific volume) 분포를 도시하였다. 해석 결과를 보면 렌즈 표면에서는 비체적이 낮은 반면 중심부로 갈수록 높아짐을 알 수 있는데, 이는 급형과 접촉해있는 표면부에서 먼저 고화가 시작되고 중심부가 나중에 고화됨으로 인해 상대적으로 밀도가 저하되기 때문으로 분석된다. 이러한 비체적의 변화는 내부의 밀도가 변화됨을 의미하고 결과적으로 굴절율의 불균일성을 유발하게 된다.

고분자수지를 등방성으로 가정된 상태에서의 내부의 밀도와 굴절율과의 관계식은 Lorentz-Lorenz 식을 사용하여 다음과 같이 표현될 수 있다[9].

$$\frac{n^2 + 1}{n^2 - 2} = \frac{4\pi}{3} \frac{N_A \alpha_E}{M} \rho \quad (5)$$



**Fig. 5(a) Sectional distribution of specific volume**



**Fig. 5(b) Sectional distribution of refractive index**

여기서  $M$ 은 재료의 분자량,  $N_A$ 는 아보가드로 수,  $\alpha_E$ 는 전기적 포텐셜을 의미한다. 상기 식을 사용하여 CAE 해석 결과로부터 렌즈 내부의 굴절을 분포를 계산할 수 있다.

Fig. 5(b)에 밀도의 변화량을 고려하여 계산된 굴절을 분포를 도시하였다. 굴절율의 분포는 밀도가 높은 표면부에서 높은 값을 보이고, 중심부로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 계산된 렌즈 내부에서의 굴절율의 최대 편차는 0.054이며, 이는 재료의 굴절율(1.52385)의 3.54%에 해당한다. 이러한 사실에서 알 수 있듯이 렌즈 전체에 걸쳐 굴절율이 균일하다고 가정한 기존의 광선추적 기법으로는 정확한 렌즈의 설계 및 성능평가가 어려움을 알 수 있다.

#### 4.2 사출성형 효과를 고려한 광선추적

본 연구에서는 CAE 해석을 통해 계산된 굴절율의 분포를 고려하여 광선추적을 수행하기 위한 통합적 렌즈성능평가 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 6에 개발된 시스템의 기본 구성을 도시하였다. 렌즈의 기하학적 형상은 사출성형 해석시 사용한 유한요소 모델 파일로부터 정의되며, 여기에 추가적으로 입사광의 높이, 각도, 빔의 개수 등 광선추적에 필요한 정보를 입력해주게 된다. 또한 유한요소해석으로부터 계산된 굴절율 분포를 입력받아 이를 고려한 광선추적을 선택적으로 수행할

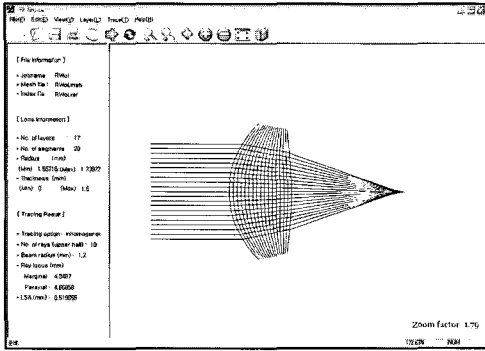


Fig. 6 Basic layout of the developed finite-element based ray tracing software

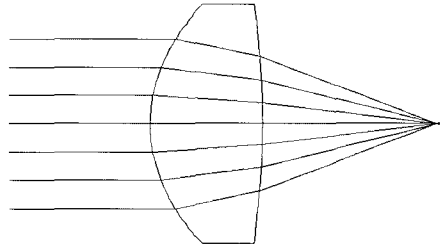


Fig. 7(a) Ray tracing result(homogeneous)

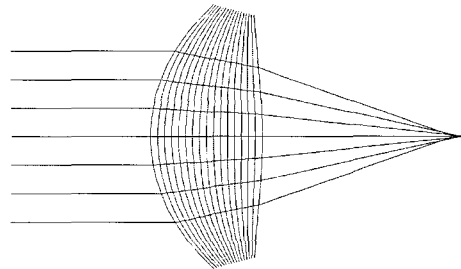


Fig. 7(b) Ray tracing result(inhomogeneous)

수 있도록 구성하였다.

개발된 시스템을 사용하여 대상 렌즈에 대해 광선추적을 수행한 결과를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)는 렌즈의 굴절율이 균일한 것으로 가정하고 수행한 결과로서 횡구면수차가 0.01158mm로 계산되었다. 반면 Fig. 7(b)는 Fig. 5(b)에 표시한 렌즈의 굴절율 변화를 고려하여 총 17개의 레이어에 대해 광선추적을 수행한 결과로서 횡구면수차가 0.01278mm로 10.36% 증가됨을 확인할 수 있었다. 이는 내부 굴절율의 변화에 의해 이상적인 조건에서의 설계안보다 렌즈의 결상성능이 더욱 저하됨을 의미한다.

상기 결과를 검증하기 위하여 실험결과와 비교해보았다. 여기서 횡구면수차를 실험적으로 측정하기에는 많은 어려움이 있는 관계로 간접계로 측정 가능한 3차 구면수차 계수(SA3)의 비교를 통해 상대적인 결상성능 저하 정도를 평가하였다 [10]. 설계치의 경우 SA3가 0.0238이었던 반면, 성형된 제품의 측정치는 0.0265로서 11.34% 만큼의 성능 저하가 발생된 것으로 분석되었으며, 이러한 결과를 통해 제안된 통합적 해석기법의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

보다 정량적인 비교를 위해 입사된 광선의 진행경로에 따른 굴절율의 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 이때 각 레이어에서의 굴절율은 입사광선과 레이어와의 교점에 대해 식 (4)를 사용하여 계산하였다. 결과를 고찰해보면 모든 높이에서의 입사광선에 대해 렌즈의 굴절율이 내부로 진행할수록 감소하다 중간부를 기준으로 다시 증가하는 경향이 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 렌즈 내부에서의 굴절율 저하량을 비교하면 입사광선의 높이에 따라 차이가 발생하며, 입사광 반

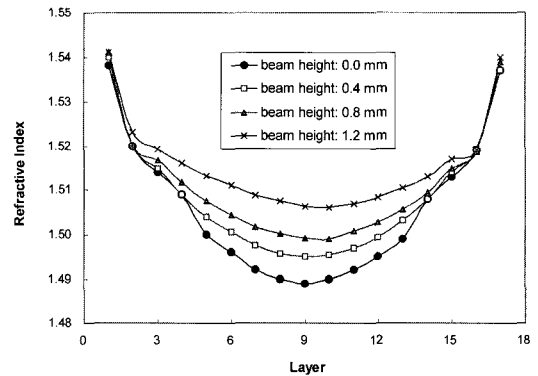


Fig. 8 Variations of the refractive indices through all the layers with various beam radii

경 1.2mm인 주변광선과 중심광선을 비교할 때 최대 1.14%에 해당하는 만큼의 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 이러한 입사광선간 진행경로에 따른 굴절율의 차이는 광선간의 광경로차를 유발하여 결과적으로 구면수차를 증가시키게 된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 사출성형 과정의 CAE 해석과 연계한 렌즈의 광선추적 기법을 적용하여 플라스

틱 비구면렌즈의 광학적 특성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 3차원 육면체 요소를 사용하여 비구면 렌즈 사출성형 과정의 CAE 해석을 수행하고, 렌즈 내부에서의 밀도차이에 의한 굴절율의 변화를 예측하였다.

(2) CAE 해석에서 계산된 렌즈 내부의 굴절율 분포를 고려하여 렌즈의 결상성능을 평가할 수 있는 유한요소 기반 렌즈의 광선추적 시스템을 개발하였다.

(3) 개발된 통합적 해석기법을 적용하여 사출성형의 영향을 고려한 광선추적을 수행하였고, 이러한 해석결과는 균일한 물성으로 가정한 기존의 광선추적 결과와 비교할 때 실험결과와 보다 근접한 결과를 보여 제안된 기법의 유용성을 확인할 수 있었다.

향후에는 이러한 연구결과를 토대로 비구면 렌즈 품질 향상을 위한 금형설계변수 및 성형조건 최적화에 적용할 전망이다.

## 후 기

본 연구는 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비) 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-003-D00032).

## 참 고 문 헌

- [1] W. J. Smith, 1990, *Modern Optical Engineering*, McGraw-Hill.
- [2] K. Park, J. H. Park, S. R. Choi, 2002, Numerical analysis for injection molding of precision electronics parts, *Trans. Mat. Proc.*, Vol. 11, pp. 414~422.
- [3] Y. Maekawa, M. Onishi, A. Ando, S. Matsushima, F. Lai, 2000, Prediction of birefringence in plastics optical elements using 3D CAE for injection molding, *Proc. SPIE*, Vol. 3944, pp. 935~943.
- [4] K. Park, 2004, 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.
- [5] K. Park, C. Y. Han, 2004, 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.
- [6] S. Kim, L. S. Turng, 2006, 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.
- [7] A. W. McFarland, J. S. Colton, 2004, Production and analysis of injection molded micro-optic components *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 44, pp. 564~579.
- [8] K. Park, S. K. Lee, K. S. Jeon, P. S. Mo, 2005, A new ray tracing method of a plastic lens connected with finite-element analysis, *J. Kor. Soc. Prec. Engng.*, Vol. 22, pp. 100~107.
- [9] J. R. Partington, 1960, *An Advanced Treatise of Physical Chemistry: Physico-Chemical Optics*, Longmans, London.
- [10] K. Park, C. Y. Han, C. H. Park, S. R. Choi, 2002, *Design and analysis for precision plastic lenses with aspheric surfaces using MPI/Flow3D and CODE V*, 6 Sigma Project Report, Samsung Electro-Mechanics Co.