

형상정보 추출을 통한 비구면 렌즈 설계 및 성형해석에 관한 연구

송기혁¹ · 김병찬¹ · 윤호섭¹ · 양지경¹ · 김기범¹ · Xiao Ho¹ · 조명우^{1,#}

Aspherical Lens Design and Injection Mold Analysis Using Extracted Shape Information

K. H. Song, B. C. Kim, H. S. Yoon, J. K. Yang, K. B. Kim, H. Xiao, M. W. Cho

(Received October 6, 2015 / Revised October 23, 2015 / Accepted November 9, 2015)

Abstract

The development of polishing technology has enabled the production of injection molds with high quality surfaces and shapes. For products such as mobile phones which require high quality performance the use of plastic materials has many constraints such as shrinkage and deflection. The purpose of the current research is to use reverse engineering in order to find and analyze the data of a selected aspherical lens and then creating a process to design an improved lens. Additionally, the improved lenses are subject to molding analysis. In order to solve this problem, the lens construction program, Zemax, was used to analyze and optimize performance. In the case of optimization, the object was to eliminate spherical aberration and to find good MTF data. The result of the optimization data was similar to the MTF data found from a random lens. Specific resin and analysis conditions were selected and CAD modeling was done to enhance the injection molding analysis.

Key Words : Aspherical Lens, Reverse Engineering, Injection Molding, Optimization

1. 서론

산업의 발달로 인해 기기의 소형화에 대한 소비자의 요구는 점차 증대되고 있으며 이로 인해 기기에 탑재되는 광학 요소에 대한 소형화의 요구 또한 증대되고 있다. 하지만 광학 요소에서 필연적으로 발생하는 수차로 인해 구면렌즈의 사용에는 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 비구면 렌즈를 사용하고 있으며 특히 플라스틱 소재의 비구면 렌즈는 가격이 저렴하며 무게가 가벼워 사용이 점차 증대되고 있다. 비구면 렌즈는 하나의 구면이 아닌 두 개 이상의 곡률로 이루어져 구면수차로 인한 초점에 대한 문제를

해결해 준다[1]. 하지만 설계 및 가공이 어렵고 플라스틱 소재의 특성인 성형오차 등의 발생으로 인해 실제 설계 데이터와 같은 형상의 제품을 제작하기란 매우 어려우며 제작된 제품에 대한 검증 또한 어려운 것이 현실이다[2]. 따라서 본 논문에서는 역공학을 이용하여 플라스틱 소재의 비구면 렌즈에 대한 형상 검증 및 오차에 대한 수정을 통해 설계 의도에 가까운 성능의 렌즈를 설계 할 것이다. 또한 설계된 렌즈에 대한 성형 해석을 진행하여 성형오차를 최소화 할 수 있는 조건을 찾을 것이다. 이를 통해 플라스틱 소재의 비구면 렌즈의 제작 및 형상 검증에 대한 하나의 프로세스를 제시하고자 한다.

1. 인하대학교 기계공학과

Corresponding Author : DEPT. of Mechanical Engineering, INHA University, E-mail: chomwnet@inha.ac.kr

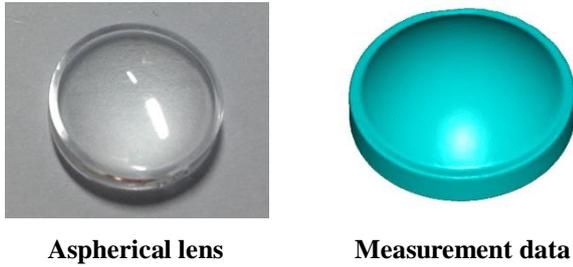


Fig. 1 Aspherical lens and Measurement data

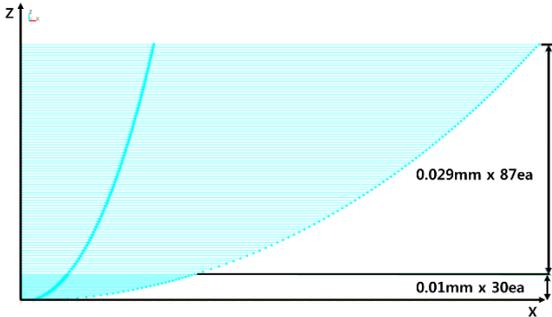


Fig. 2 A newly formed cross-section

2. 역공학을 통한 비구면 렌즈 설계

2.1 역공학을 통한 렌즈의 형상정보추출

3차원 비 접촉식 측정 장비를 이용하여 렌즈 형상을 측정하였다. Fig. 1은 렌즈 및 STL형식의 측정 데이터의 모습이다. 형상분석에 앞서 기본적으로 측정된 데이터는 임의의 좌표공간에 존재하게 되며 alignment 과정을 통해 CAD 데이터와 같은 위치로 이동시켰다. 측정된 렌즈 형상은 제작 시 발생하는 수축 등의 이유로 오차 값이 존재하며 이를 보정하기 위해 Z축에 수직인 XY면을 기준으로 등 간격으로 평행하게 등분하여 이를 다음과 같이 재배치하였다. 렌즈의 만곡점 기준 0.3mm까지는 0.01mm의 등 간격으로 30개의 단면을 추출하였고 0.3mm부터 렌즈 높이까지는 0.029mm의 등 간격으로 단면을 추출한 후 각 단면에 대한 원의 중심을 (0,0)로 수정하여 비구면 렌즈의 단면형상을 재구성 하였으며 Fig. 2는 재배치된 형상 단면을 도시하고 있다. Fig. 3은 새로 구성된 면에 대한 측정데이터와의 비교 결과다. 측정된 형상에 대해 83.5%(±0.015mm)의 만족도를 보였으며 특히 렌즈의 중심부에 대한 만족도가 높게 나왔다. 위 결과를 통해 측정된 데이터에서 실제 제작하려 했던 비구면 렌즈의 형상에 근사화 된 단면 형상 데이터를 도출 할 수 있었다.

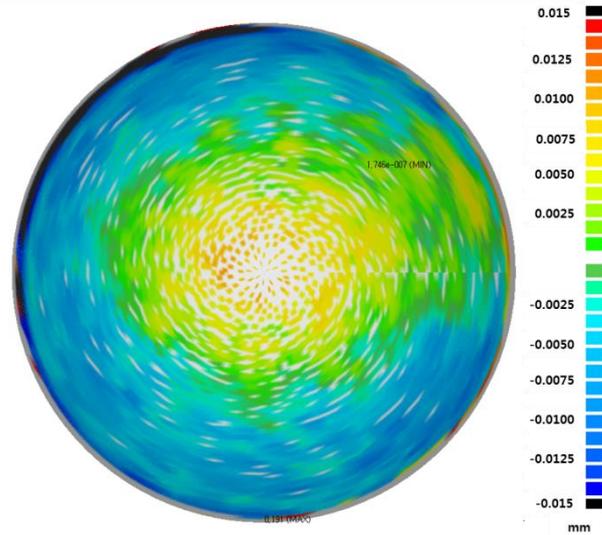


Fig. 3 Compare with scan data

2.2 비구면 식의 근사화

축대칭 비구면 렌즈에 대한 비구면 식은 접평면과 접구면 사이의 거리 값인 $Sag(S^2)$ 값에 대한 멱급수로 전개하여 표현 할 수 있다[3].

$$Z = \frac{cs^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2s^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10} \quad (1)$$

K	Conic constant
c	1/r (radius)
A_n	Aspheric deformation constants

단면 형상에 대한 비구면식의 근사화를 위해 Minitab을 사용하여 반응표면 분석법을 실행하였다. 비구면 형상에 대해 영향을 주는 인자로 반지름과 원추상수를 정하였으며 특성치는 인자인 반지름과 원추상수를 적용한 비구면 식에서 추출한 점 데이터와 측정된 점 데이터간의 오차 값에 대한 표준편차 값으로 정하였다.

반지름 값의 구간을 정하기 위해 재구성된 단면의 점 데이터에 대해 최소자승법을 통한 원의 근사화를 하였다. 비구면식의 반지름 값은 실제 비구면 렌즈 형상의 중심부의 형상에 영향을 줄 것이란 가정 하에 단면 형상 데이터에서 가장자리 데이터를 기준으로 점 데이터를 줄여 나가며 원의 근사화를 진행하였다.

반지름 값에 대한 기준 구간은 근사화에서 가장 작은 오차 값을 보인 반지름 6.24mm를 기준으로 정

Table 1 Condition of Response Surface Analysis

Factor	Name	Low	High
A	Radius	6.23	6.25
B	Conic constant	-1	0

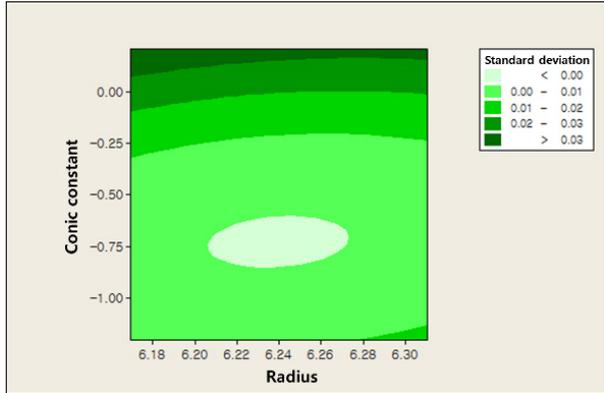


Fig. 4 Contour plot for radius, conic constant and standard deviation

Table 2 Result of Response Surface Analysis

Variable	N	Average	STD deviation	STD error
Deviation	24	0.000045	0.001431	0.000292

하였다. 원추상수의 구간은 $-1 < K < 0$ 로 정하였다. 목표 값은 점 데이터 간의 차이 값에 대한 표준편차에 대한 최소값으로 정하였으며 만족 할 수 있는 값은 고정도 수준인 1~2um로 정하였다.

Table 1은 각 인자들에 대한 민감도 분석을 위한 반응표면 분석법을 위한 조건에 대해 기술하고 있다. 인자로는 비구면 형상에 민감한 반지름과 원추상수를 선정하였다.

Fig. 4는 위 분석을 기초로 하여 원추상수와 반지름에 대한 등고선도에 대해 표준편차와의 상관관계를 보여주고 있으며 등고선도에서 최소점이 존재함을 알 수 있다. 최소점이 존재 하므로 표준편차의 최소값의 조건을 찾기 위한 반응 최적화를 진행하였다. 최소화의 목적을 위해 데이터 간의 차이 값에 대한 표준편차 값은 상한값을 0.001로 정하였으며 목표값은 플라스틱 재질의 렌즈에 대한 초고정도 수준인 0.0001로 정하였다. 반응 최적화를 통해 표준편차의 최소화를 위한 반지름과 원추상수 값은 각각 6.2393mm, -0.7357로 도출되었다. 위의 값을 검

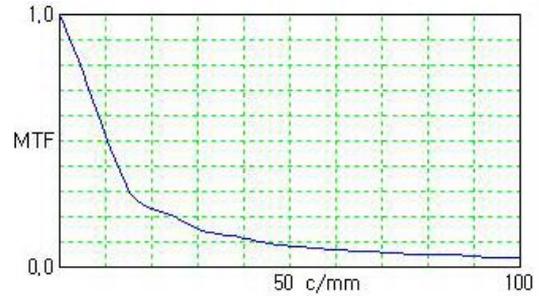


Fig. 5 Result of measurement for MTF

Table 3 Result of optimized aspheric formula by Zemax

Radius	Conic Cont	4 th Coef	6 th Coef	8 th Coef	10 th Coef
6.239	0.736	-4.451E-4	2.974E-5	-7.515E-7	7.167E-9

증하기 위해 최소점에 대한 반지름과 원추상수 값을 적용한 비구면 렌즈 식에 대해 실제 점 데이터 간의 차이 값에 대한 표준편차 값을 확인하였다. Table 2는 그 결과를 보여주고 있으며 표준편차 값이 0.001431로 요구 수준인 1~2um이내에 들어옴을 확인 할 수 있었다.

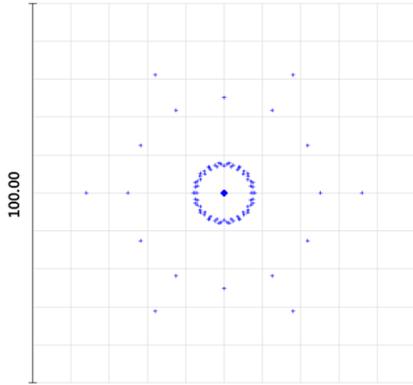
2.3 비구면식에 대한 렌즈성능의 최적화

설계 시 반영된 렌즈의 성능은 가공 오차, 재료의 수축률 등에 의해 설계 성능에 비해 제작된 렌즈는 성능의 저하가 발생하며 역공학 과정에서 발생하는 측정오차 및 근사화에 따른 오차로 인해 근사화 된 비구면식의 성능은 더욱 하향된다.

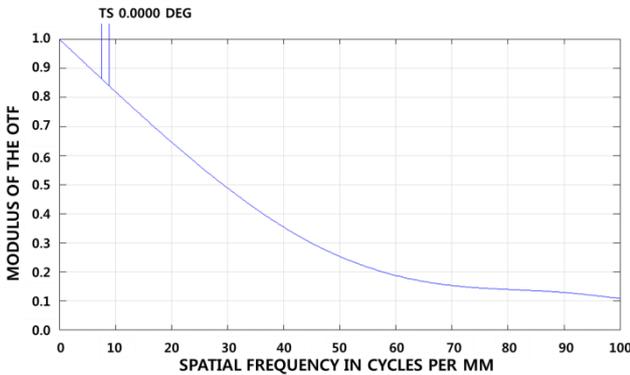
본 논문에서는 이를 반영하기 위해 렌즈 설계 시 사용되는 상용 소프트웨어인 Zemax를 통해 근사화된 비구면 식을 기초로 하여 렌즈 성능의 최적화를 진행하였다. 최적화는 렌즈의 객관적 지표인 변조전달함수와 비구면 렌즈의 성능의 중요한 값인 RMS 값을 목적으로 하였다.

최적화된 비구면식에 대한 성능 비교를 위해 변조전달함수 측정 장비를 통해 실제 비구면 렌즈에 대해 측정을 진행하였으며 Fig. 5는 변조전달함수의 측정 결과에 대한 데이터다.

Table 3은 Zemax를 통해 최적화를 진행하여 찾아낸 비구면식에 대한 정보이며 Fig. 6은 Zemax 통해 최적화를 진행한 비구면식의 변조전달함수와 RMS 값이다. 측정 값과 최적화된 값의 비교를 통해 기존에 비해 향상된 성능을 도출 할 수 있었다.



RMS result (Radius : 12.394um)



MTF result

Fig. 6 Result of optimized aspheric lens by Zemax

3. 성형 해석

플라스틱 소재로 제작된 렌즈의 가장 큰 문제점은 복굴절이 발생한다는 것이다. 복굴절은 수지의 유동 시 발생하는 배향성 및 불균일한 냉각에 의한 수축에 의해 발생되며 전단응력 및 잔류응력과 밀접한 관계를 가지고 있다[4~6].

본 연구에서는 잔류응력을 최소화하기 위한 렌즈의 성형 조건을 제품성형이 가능한 가장 낮은 압력에서의 성형 조건으로 정하였다.

3.1 성형 해석 조건

성형해석에 앞서 비구면 렌즈의 성형 해석을 위한 모델링을 하였다. 캐비티는 렌즈의 생산성을 고려하여 4-캐비티로 설계 하였으며 게이트는 선행 연구에서 많이 적용한 사이드게이트를 적용하였다. Fig. 7은 성형해석을 위한 모델링에 대해 도시하였다.

실제 제품에 사용된 수지는 열가소성 수지 중 비결정성 수지인 LG MMA社의 PMMA IF-850을 선정

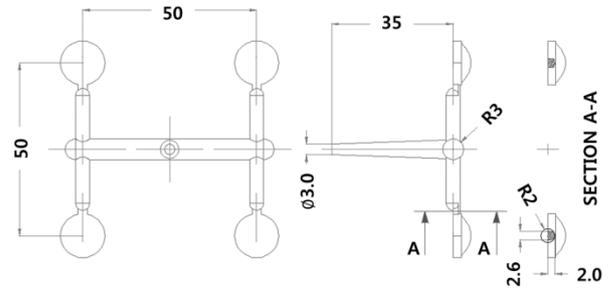


Fig. 7 Design of lens for plastic analysis

Table 4 Mechanical property of PMMA IF-850

Light transmittance (%)		92
Haze (%)		< 0.1
Refraction index		1.49
Fluidity (g/10min)		12.4
Transition temperature (°C)		86
Specific heat (J/KG.C)		1771
Density(g/cm ³)	Solid	1.1863
	Melt	1.0606
Ejection temperature (°C)		85
Melt Tem. (°C)	Range	220~230
	Suggested	225
Mold Tem. (°C)	Range	65~75
	Suggested	70

Table 5 Injection molding conditions for the lens

Fill control	Injection time (sec)	2.5
V/P switchover	Volume filled (%)	99
Pack/holding	%Filled pressure VS time	
Cooling time	Specified (sec)	30
Melt Tem.	(°C)	225
Mold Tem.	(°C)	70

하였다. 해당 수지에 대한 물성은 Table 4에 도시되어 있다. Table 5는 해석을 위한 기초 조건표이다.

3.2 시간에 따른 성형해석 및 변형 해석

수지의 충전 시간의 변화에 따른 충전 시 필요한 압력의 크기에 대한 성형해석을 진행하였다. 충전

시간의 조건과 그에 따른 최대 충전 압력의 결과는 Table 6에 기술되어 있다. 충전 시간은 0.5초부터 시작하여 0.5초 단위로 시간을 늘려가며 해석을 진행하였으며 그에 따른 최대 충전 압력의 결과 값의 변화를 확인하였다.

충전 시간이 일정 시간 동안 늘어갈수록 최대 충전 압력의 크기는 감소하였으며 일정시간 이후에는 다시 증가하였다. 충전 시간이 짧아질수록 주어진 시간 안에 금형 내부로 용융된 수지가 채워져야 하기 때문에 수지의 충전에 보다 많은 힘이 필요하며 이로 인해 큰 압력이 발생한 것으로 파악되었다.

Table 6에서 가장 낮은 최대 충전 압력을 나타낸 조건은 4.5초였으나 사출압력의 밸런스가 유지되는 상태에서의 가장 낮은 최대 충전 압력을 나타낸 충전 시간은 2.5초였다. Fig. 8은 2.5초에서 발생하는 사출압력에 대한 예측을 나타내고 있으며 사출 압력의 밸런스가 유지되는 것을 알 수 있다.

충전 시간의 변화에 따른 변형 값의 변화에 대한 성형해석을 진행하였으며 충전 시간은 0.5초를 기준으로 0.5초씩 늘려가며 해석을 진행하였다. Table 7은 시간의 변화에 대한 모든 방향에 대한 총 변형 값을 기술하였다.

모든 방향에 대한 총 변형 값은 런너에 대한 변형도 함께 계산되므로 각각의 캐비티의 제품이 얼만큼의 변형을 일으켰는지에 대한 정확한 값을 확인 할 수는 없지만 총 변형의 감소는 결국 제품의 변형도 함께 줄어들었다는 예측을 할 수 있으므로 변형에 대한 지표로 선정하였다. Table 7의 분석결과 충전 시간이 늘어갈수록 변형이 작아지는 것으로 예측되었다. 다만 Table 6에서 사출 시간이 0.5초 일 때 충전 압력이 다른 조건에 비해 약 1.5배 높게 나왔으며 같은 조건에서 변형의 크기가 감소하는 경향을 보였는데 이는 성형압력이 다른 시간의 조건에 비해 약 1.5배 높기 때문에 제품의 고화에서 발생하게 되는 변형을 줄여준 것으로 파악되었으나 성형압력이 높은 것은 복굴절 발생을 유발 할 수 있으므로 배제 하였다.

Fig. 9 (a)는 충전 시간이 2초일 때 렌즈 마운트 부에 대한 변형의 크기를 위치에 따라 보여주고 있으며 (b)는 충전 시간에 따른 게이트 부위의 변형을 나타내고 있다. 이는 각각의 캐비티의 제품에 대한 변형 역시 Table 7에서 보여지는 시간의 증가에 따라 변형이 감소되는 결과와 같음을 알 수 있다.

Table 6 Result of maximum injection pressure for injection time

Injection time (sec)	Injection pressure (MPa)
0.5	17.18
1.0	11.92
1.5	10.43
2.0	9.635
2.5	9.158
3.0	8.881
3.5	8.691
4.0	8.591
4.5	8.575
5.0	8.594
5.5	8.635
6.0	8.737

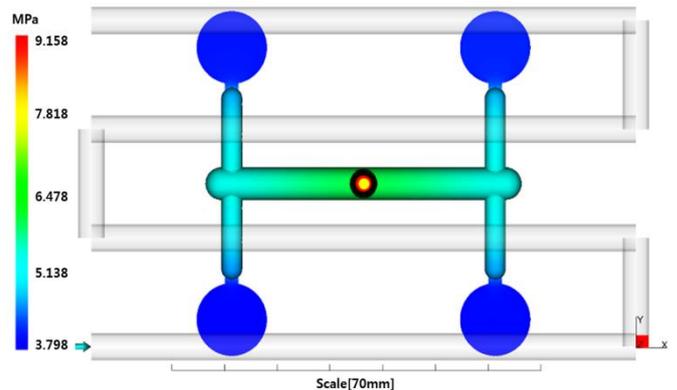


Fig. 8 Result of injection pressure for injection time (2.5s)

Table 7 Result of deflection for injection time

Injection time (sec)	Deflection(mm)
0.5	0.3167
1.0	0.3184
1.5	0.3184
2.0	0.3174
2.5	0.3152
3.0	0.3112
3.5	0.3082
4.0	0.3052
5.0	0.2983
6.0	0.2912

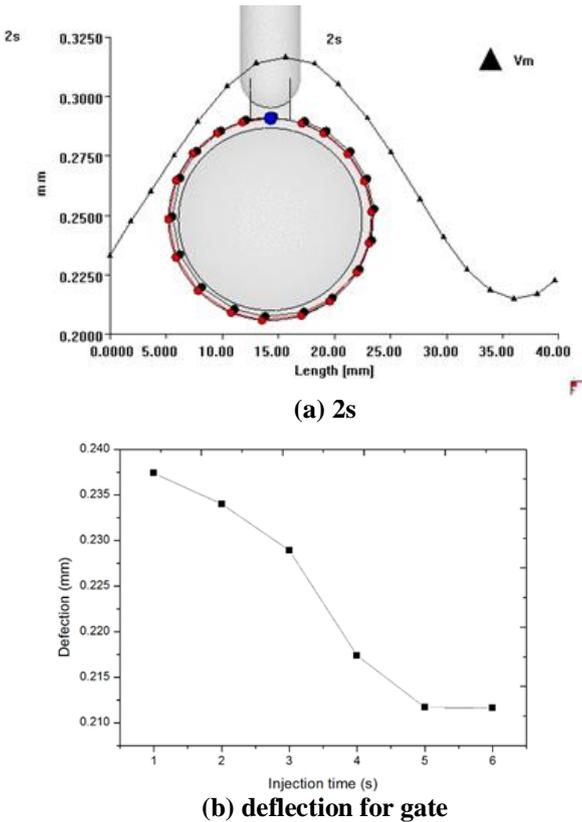


Fig. 9 Result of deflection for injection time

4. 결론

본 연구에서는 렌즈 형상정보 추출을 통한 비구면 렌즈 설계 및 성형해석을 진행하였다. 3차원 측정 장비를 이용하여 렌즈의 형상 데이터를 추출하였으며 최소자승법을 이용한 원의 근사화를 통해 Z축 기준으로 렌즈 형상을 재구성 하였다. 반응표면 분석법을 이용해 비구면 식의 근사화를 진행하였으며 Zemax를 이용해 렌즈 성능의 최적화를 진행하였다. 최적화된 비구면 렌즈에 대한 성형해석을 위한 수지와 해석조건을 선정 하였으며 Moldflow를 이용하여 사출시간에 대한 성형 해석을 진행하였다.

(1) 근사한 단면형상을 찾아내기 위해 Z축 기준으로 렌즈 형상을 재구성 하였으며 실제 설계 데이터와 비교를 통해 근사화 되었음을 확인 할 수 있었다.

(2) 근사한 비구면 식을 찾기 위해 반응표면 분석법을 이용하였다. 인자는 반지름과 원추 상수로 정 하였으며 비구면식에서 추출한 점 데이터와 비구면식에서 추출한 점 데이터간의 차이 값의 비교를 통해 고정도 수준의 오차 값을 가지는 비구면 렌즈식

을 찾을 수 있었다. 또한 Zemax를 이용한 최적화를 통해 보다 향상된 렌즈 식을 찾을 수 있었다.

(3) 사출시간에 대한 해석을 통해 사출 시간이 증가할수록 사출압력은 낮아지는 경향을 보였으며 사출압력의 밸런스를 고려하였을 경우 2.5s에서 가장 안정적인 사출결과를 나타내었다. 일정 시간 이상에서는 사출압력이 다시 증가하였는데 이는 수지의 유동속도 저하로 인해 런너에서부터 수지의 온도변화로 인한 점도의 증가 때문인 것으로 예측되었다. 사출시간에 대한 변형 값은 시간이 증가할수록 낮아지는 경향을 보였다.

본 논문에서는 역공학을 이용하여 비구면 렌즈에 대한 설계 및 최적화를 진행하였다. 추후 위 결과를 바탕으로 금형 제작 및 성형에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음[S2169525, 반도체 TVS Top CD/Depth 측정을 위한 100nm급 시스템 개발].

REFERENCES

- [1] W. J. Smith, 2005, Modern Lens Design, McGraw, New York.
- [2] T. S. Kwak, H. Ohmori, W. B. Bae, 2004, A Study on Searching Method of Molding Condition to Control the Thickness Reduction of Optical Lens in Plastic Injection Molding Process, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 21, No. 2, pp. 27~34.
- [3] R. Kingslake, R. B. Johnson, 2010, Lens Design Fundamentals 2nded, Amsterdam, Boston.
- [4] U. T. Jun, D. H. Hyun, 2006, A Study Birefringence of Injection Molding for Plastics Aspheric Lens, J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng., Vol. 15, No. 1, pp. 108~112.
- [5] Y. Miki, T. S. Kwak, J. K. Jung, 2012, Application of Birefringence CAE in Mould Design of Optic Lens Injection Molding Process, Kor. KSMPE, Vol. 11, No. 3, pp. 1~6.
- [6] S. W. Lee, H. H. Joh, J. S. Hong, M. Y. Lyu, 2011, Birefringent Analysis of Plastic Lens Injection Molding for Mobile Phone Camera, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 1, pp. 54~59.