

Pickup 렌즈의 사출조건이 복굴절 및 굴절율에 미치는 영향에 관한 연구

이승준*, 현동훈⁺

(논문접수일 2007. 7. 12, 심사완료일 2007. 8. 30)

A Study on Influence of Parameters and Characteristics in the Injection Process on the Birefringence and Refractive Index for Pickup Lens

Seung-Joon Lee*, Dong-Hoon Hyun⁺

Abstract

Injection molding process factors such as molding temperature, injection pressure, flow rate and flow velocity, must be controlled properly in filling and packing phases in the injection molding process. In this study, effects of these factors on the injection molding were investigated through the flow analysis for birefringence and refractive index for pickup lens. This paper presents the birefringence and refractive index reduced with increasing the holding pressure and also the holding pressure time. And there are interaction with birefringence and fill time in the injection process. The optimal conditions through DOE are validated by using injection molding analysis.

Key Words : Aspheric Surface(비구면), Birefringence(복굴절), Lens Injection Molding(렌즈 사출성형), Refractive index(굴절율) Hold pressure(보압)

1. 서론

휴대폰용 고해상도 카메라에 이용되는 플라스틱 비구면 렌즈의 경우, 대량 생산하기 위한 방법으로 사출(Injection Molding)에 의한 성형방법이 많이 이용된다⁽¹⁾. 양질의 렌즈를 생산하기 위해서는 균일한 사출 성형 시스템을 유지하

여야 원하는 광특성을 가진 렌즈를 얻을 수 있다. 사출성형 기술에 대한 연구는 꾸준히 지속되어 왔지만, 휴대폰용 비구면 플라스틱 렌즈에 관한 연구는 최근 들어 보급된 고급기술에 해당된다. 광학 제품의 경우 일반 사출성형 제품에 비해 사출 조건이 보다 까다롭고, 정밀한 성형 환경이 요구되어 진다. 이러한 사실들로 인하여서 개개의 사출조건에 따른 렌즈

* 한국산업기술대학교 지식기반기술 에너지대학원 나노광공학과 (yisj@kpu.ac.kr)
주소: 429-793 경기도 시흥시 정왕동 2121

+ 한국산업기술대학교 나노광공학과

의 광학적 특성변화는 중요한 과제로 대두되고 있어, 사출조건이 광특성 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 반드시 선행되어야 한다⁽²⁾.

초정밀광학 사출성형 기술의 개발은 제품의 질과 생산성을 높이기 위하여 최종 공정 후의 제품의 치수 정밀도와 공학적인 성능의 지표가 되는 잔류응력과 복굴절의 제어/예측 및 실험적 검증이 극히 중요하게 되며, 사출성형 해석 CAE 시스템을 이용하여 초정밀광학 제품의 설계와 생산에 직접적인 영향을 주는 인자를 찾고, 제품의 광학적 성능을 검증하고자 한다⁽³⁻⁴⁾.

2. 사출성형과정에 발생하는 복굴절

2.1 유동에 의한 잔류 복굴절

응력이 없는 긴 고리의 고분자는 녹는점보다 높은 온도에서(즉, 용융상태에서) 평형을 이루면서 자유롭게 꼬여 있는 상태로 유지하려는 경향이 있다. 사출성형과정 동안 고분자들이 미끄러지고 늘어나면서 흐름방향으로 배향된다. 만약, 고분자가 완전히 평형상태로 도달하기 전에 고화가 일어난다면, 분자배향은 사출성형품안에 남게 된다.

이렇게 고화되며 흐름방향으로 늘어나서 배열된 분자배향 때문에, 잔류 복굴절은 흐름방향에 평행한 방향과 수직인 방향에 대해 이방성을 야기시킨다⁽⁵⁾.

2.2 열에 의한 잔류 복굴절

열에 의한 잔류 복굴절은 냉각과정(전체 사이클 시간에 대해 대략 2/3정도를 차지하는)에서 일어난다. 사출성형품이 금형 벽면에서부터 중간면까지 서로 다른 속도로 냉각되고 동시에 압력과 온도의 변화에 의해 수지의 밀도와 점탄성적인 거동이 변함에 따라 잔류 복굴절이 발생한다. 수지는 냉각됨에 따라 수축하는데, 이 수축의 정도는 분자배향에 비례한다. 열에 의한 잔류 복굴절은 다음의 이유 때문에 발생

된다.

첫째, 재료는 공정설정 온도로부터 주위 조건으로 온도가 내려감에 따라 수축한다. 둘째, 재료가 금형 표면으로부터 중심으로 고화됨에 따라 재료 요소들은 서로 다른 열적-역학적 이력(서로 다른 냉각속도 및 패킹압력)을 경험한다. 셋째, 압력, 온도, 분자 및 섬유배향은 다른 밀도 및 기계적 물성을 야기시킨다. 마지막으로, 어떤 금형의 구조는 성형품의 평면 방향으로 수축을 방해하기 때문이다.

이와 같은 열에 의한 잔류 복굴절의 발생은 사출성형 동안 자유냉각이 발생하는 예제로 간편하게 설명될 수 있는데, 이 예제에서는 균일한 온도의 수지가 차가운 금형 벽면 사이에 갑자기 접하게 된다. 사출성형품의 외부 표면층이 냉각되어 수축하기 시작하는 초기 냉각과정 동안은 뜨거운 중심에 있는 수지는 여전히 용융상태로 수축하지 않는다. 그러나 내부가 냉각됨에 따라, 국부적인 열수축이 이미 굳어진 외부 고화층에 의해 방해 받는다. 이로 인해 Fig. 1에서 설명하고 있는 바와 같이 내부의 인장과 바깥쪽의 압축에 의해 균형을 이루는 전형적인 응력분포의 상태가 발생하여 열에 의한 복굴절이 발생하게 된다⁽⁶⁾.

3. 해석시스템

3.1 해석이론

3.1.1. 유한요소해석(Finite Element Analysis)

유한요소해석은 유한요소법(Finite Element Method : FEM)이라고 하는 수치해석법을 이용하여 공학해석을 하는 것이다. 즉, 유한요소법의 이론체계에 기초하여 개발된 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 상에서 다양한 공학문제의 수치해석을 실시하는 것이다⁽⁷⁾.

물체가 외력을 받으면 변형한다는 물리현상은 고체역학에서 방정식문제로 정의되며, 이 방정식을 FEM 과 같은 수치해석 방법에 의해 컴퓨터가 다룰 수 있는 형식으로 변환하면 수치를 계산처리에 의해 풀어 낼 수 있다.

여기서, 각 공학이론에 기초한 수학적인 문제 정의를 공학 모델, 유한요소법에 의해 변환된 형식을 FEM 모델이라 하며, 공학모델은 실제의 현상을 특정한 공학 이론을 사용하기 위하여 “수리화” 한 표현이고, FEM 모델은 공학모델을 수치계산으로 풀 수 있도록 하기 위하여 유한요소에 의해 이산화(요소분할)한 근사표현이라는 것이며 다음과 같은 순서가 된다.

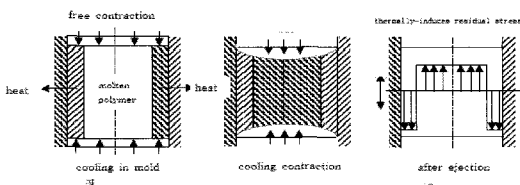


Fig. 1 Thermal-induced residual stress for the free quenched part

3.1.2. FEA 프로세스

해석의 목적은 어떤 조건 하에서의 물리현상을 공학적으로 예측하는 것이다. FEA를 하는 의의는 기존의 이론적 방법이나 실험적 방법에서는 충분히 이해되지 않은 현상을 해명할 수 있으며, 고가이고 손이 많이 가는 실험을 하기 전에 컴퓨터 상에서 설계안의 기능이나 성능을 확인할 수 있기 때문이다. 물론 실험을 모두 FEM으로 해결할 수 있는 것은 아니지만 FEA에 의해 많은 시작 단계에서 발생하는 문제점을 줄일 수 있는 것에 의의가 있다. Fig. 2는 전형적인 FEA 프로세스를 나타내는 것이다.

1) 설계모델과 CAD 형상

설계단계에서 적용한 하나의 구상을 설계모델이라 부른다. 이 설계모델에는 어떤 제약조건으로, 설계안이 정해짐과 동시에 CAD형상이 작성되어 해석을 수행할 준비가 가능해진다.

2) 해석모델의 작성

설계안을 FEA 로 확인하기 위해 해석모델을 생성한다. 해석해야 할 역학현상을 모델화(문제정의)하고, 설계 안에서 공학 모델을 이끌어 낸다. 구체적으로는 해석에 필요한 정보를 입력한다. 이 단계에서의 판단에 의해 모델의 대부분이 결정되므로 담당자는 공학지식과 경험을 바탕으로 하여 모델화하여야 한다. 다음으로 FEM 모델을 생성한다. 즉, 공학모델에서 채용한 해석영역을 요소분할을 하고 조건 설정을 하게 된다. 특히 3차원 CAD와 공유된 FEA 시스템을 이용한다면, FEM 모델을 편리하고 빠르게 자동 생성할 수 있다.

3) 해석의 실행과 결과의 검토

해석의 실행은 자동화되어 있다. 계산이 끝나면, 즉시 결과를 확인 할 수 있다. 다양한 결과의 표시방법이 가능하며

CAD Model generation → FE model generation → Analyzing → Result



Fig. 2 FEA Process

읽어 낸 정보를 기초로 모델이나 해석 결과를 표시한다. 이 판단은 해석모델의 생성단계에서의 판단과 밀접한 관계가 있으며, 결과의 검토도 사용자의 공학적 지식과 경험을 이용해야 하는 작업이다.

4) 설계안의 평가

대체로 설계자는 설계 모델에 부여한 기준에 따라 해석 결과로부터 설계 안을 평가하고, 옳지 못한 경우가 있으면, 설계모델로부터 대책 안을 마련하여야 한다. 해석을 반복함으로써, 복잡한 설계안을 비교하여 순위를 매긴다.

3.2 해석과정

3.2.1 제품 모델링

Fig. 3은 본 연구에 사용된 DVD Pick-up 렌즈로, 양면 볼록형 비구면 렌즈로 업체에서 생산하여 납품을 하고 있는 제품이다.

3.2.2 금형 설계 및 Cavity 설계

Fig. 4는 사출 렌즈 제작에 필요한 금형 어셈블리를 나타낸 것이다. 금형의 구조는 사출기에 부착이 되는 몰드베이스와 초정밀 가공된 렌즈코어, 또 그 코어를 고정시켜 주는 카세트 몰드베이스(Cassette Moldbase)로 구성되어 있으며 매우 미세한 차이에도 성능이 좌우되므로 누적공차가 수 μ m에 그치도록 가공되어야 하며 또한 캐비티 바란스(Cavity

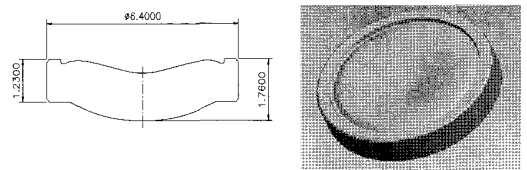


Fig. 3 Lens model

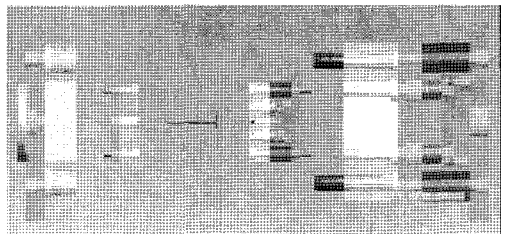


Fig. 4 Cassette mole assembly

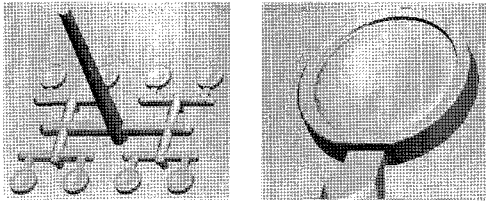


Fig. 5 Modeling of runner and gate

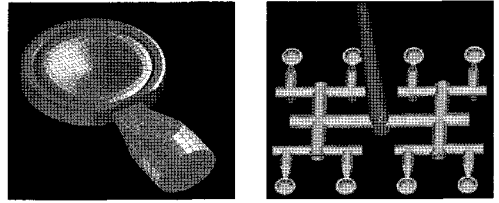


Fig. 7 Delivery system by CAE model

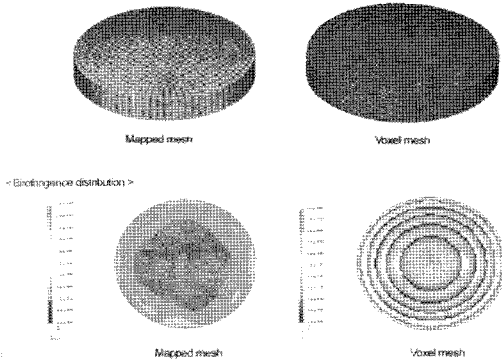


Fig. 6 Deviation of meshing method

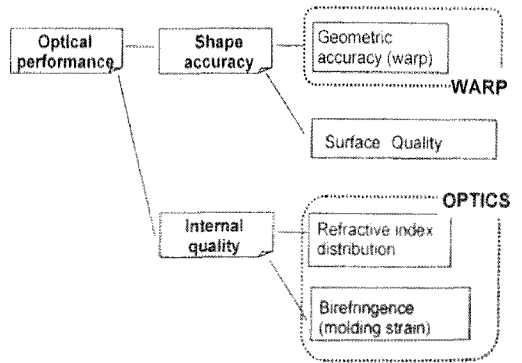


Fig. 8 Variation for optical performance

Balance) 및 유동성을 좋게 하기 위한 런너 및 게이트의 구조를 Fig. 5에 나타내었다.

3.2.3 Mesh 작업

상용 소프트웨어는 자체의 메쉬(Mesh) 프로그램을 내장하고 있다. 조작이 간단하고, 쉽게 원하는 메쉬를 만들 수가 있다. 3D Timon에서 제공하는 voxel-based 로 만들어진 유한요소 모델은 렌즈의 표면을 정확하게 표현하기가 불가능하다. 렌즈표면에 영향을 미치는 응력의 분포를 알기 위해서는 렌즈의 형상에 부합하는 메쉬를 생성하여야 한다. Fig. 6은 3D timon 의 메쉬와 외부 메쉬 프로그램을 이용하여 형상과 결과의 차이를 잘 나타낸 것이다. 메쉬방법에 따라 결과의 값이 현저하게 차이가 나는 것을 알 수가 있다.

Lens의 표면을 정밀하게 표현하기 위하여 투영법을 이용하는 상용 메쉬 프로그램 인 Truegrid 를 이용하여 런너의 일부분에서 렌즈 부분까지의 메쉬를 생성하였다.

아래의 캐비티 부분에 메쉬를 생성 시키고 스프루, 런너는 빔 메쉬(Beam Mesh)방법으로 delivery system이 완성된 그림을 Fig. 7에 나타내었다.

금형의 균일한 온도 유지를 위한 냉각수 라인과 금형을 모델링 하여야 한다. 냉각수라인은 빔 메쉬 방법으로 생성을

시켜서 만든다. 메쉬가 끝나면 냉각라인을 원하는 간격으로 분할 한 후, 냉각수 속성 설정을 하여야 한다. 냉각수 라인은 렌즈 캐비티 가 균일한 조건에서 생산이 될 수 있도록 항상 같은 온도가 유지되도록 관리를 하여야 한다. 금형은 냉각 라인 에 의해 온도가 유지되는 경계로 사용되어 진다. 금형의 복잡한 형태로 메쉬를 설정하지 않고 금형의 최대 경계 설정으로 하면 된다.

3.2.4 광학 해석

렌즈는 사출공정 중에 응력이 발생하고 이로 인해 내부 물성치의 변화를 가져오게 된다. 3D Timon-Optic 을 이용하여 실험에서 발생하는 응력의 분포를 예상 가능할 수가 있다.

Fig. 8은 광학적 특성을 반영하는 분포를 표현한 것이다. 광학적 특성은 크게 두 가지의 특성에 따라 영향을 받는다. 이는 형상 정밀도와 내부 물성치이다. 형상이 완성되는 동안, 형상 정밀도를 평가할 수 있지만, 내부 물성치는 평가가 불가능하다. 이는 광학 부품의 성능은 사출공정이 진행되는 동안의 내부 물성치가 응력의 분포에 의해 전체적인 영향을 받기 때문이다. 잔류응력은 유동, 보압, 변형에서 발생하며⁽⁸⁾, 3D Timon에서는 개별적으로 응력 계산을 하여 광학적 성능을 평가한다.

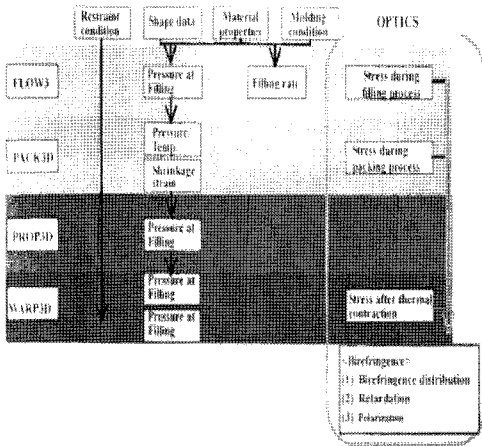


Fig. 9 Optics analysis process

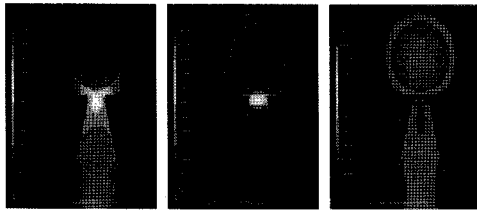


Fig. 10 Stress in injection process

Table 1 Experiments condition

Experiment No.	Fill Time (sec)	Hold Pressure Time (sec)	Hold Pressure (MPa)	Mold Temp. (°C)
#1	0.5	5	10	110
#2	1.3	5	10	110
#3	0.5	5	40	110
#4	1.3	5	40	110
#5	0.5	30	10	110
#6	1.3	30	10	110
#7	0.5	30	40	110
#8	1.3	30	40	110
#9	0.5	5	10	130
#10	1.3	5	10	130
#11	0.5	5	40	130
#12	1.3	5	40	130
#13	0.5	30	10	130
#14	1.3	30	10	130
#15	0.5	30	40	130
#16	1.3	30	40	130

3D Timon은 광학적 특성을 크게 두 가지로 나누어 해석을 한다. Fig. 9는 유동, 보압, 냉각에서 발생하는 응력을 처리하는 Residual stress calculation feature와 광학적 성능을 평가하는 Retardation과 Polarization을 처리하는 Optical simulation feature이다.

Fig. 10과 같이 3D Timon-optics는 각각의 모듈에서부터 계산되어지는 응력값을 기준으로 잔류 복굴절을 예측할 수가 있다. 또한 광학 해석을 수행함으로써 retardation과 polarization을 평가가 가능하다.

3.2.5 실험 계획법을 이용한 인자의 조합

실험 계획법(Design of Experiments)이란 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다⁽⁹⁾. 따라서 실험 계획법을 사용한다는 것은 해결하고자 하는 문제의 인자를 선택하고, 실험 방법을 택하여 실험 순서를 결정하고, 실험 데이터에 대한 최적 분석 방법을 선택⁽¹⁰⁾한다는 과정을 포함하게 된다.

이를 위하여 사출조건 중에서 복굴절에 영향을 미치는 다음의 4가지 조건을 변화시켜가며 실험하였으며 기존의 일반적인 사출조건을 토대로 여러차례에 걸친 시사출을 통하여 제품상태를 확인하여 가며 그 범위를 아래와 같이 설정하였다.

충진 시간 : 0.5초 , 1.3초
 보압 시간 : 5초 , 30초
 보압 압력 : 10MPa , 40MPa
 금형 온도 : 110°C , 130°C
 사용 수지 : Zeonex

이러한 사출조건을 이용하여 실험의 조합과 순서를 수립하면 Table 1과 같다.

4. 해석결과 및 평가

상기의 실험계획표에서와 같이 16회에 걸친 조건변화에 따른 복굴절 및 굴절율의 변화를 고찰해 보면 다음의 그림과 같이 굴절율은 보압과 충진시간, 보압시간의 영향을 많이 받으며 복굴절은 보압의 영향을 주로 받음을 알 수 있었다.

따라서 굴절율과 복굴절에 대해 양호한 결과를 가져오는 조건인 실험번호 #4와, #12가 아래 그림과 같이 대체로 양

호하였고 복굴절과 굴절율에 대하여 금형온도는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

4.1. 사출조건에 따른 굴절율의 변화

사출성형의 조건 중 충전시간, 보압, 보압시간, 금형온도를 바꾸어 가며 굴절률의 변화를 알아보면 아래의 Fig. 11과 같이 충전시간과 보압, 보압시간의 영향을 많이 받음을 알 수 있으며 금형온도에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 특히 보압의 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있었으며 보압과 충전시간은 크고 길게 주었을때, 보압시간은 짧게 주었을때 굴절율이 낮게 나타남을 알 수 있다.

또한 각 조건들의 교호작용을 보면 아래의 Fig. 12에서와 같이 보압과 충전시간이 교호 작용을 나타내고 있다.

굴절율면에서 가장 양호한 값을 나타내는 조건은 Fig. 13의 각 사출조건에 따른 굴절율의 분포에서와 같이 실험번호 #4와 #12에 해당하는 충전시간을 길게, 보압을 크게, 보압시간을 작게 한 경우임을 알 수 있었다.

4.2. 사출조건에 따른 복굴절의 변화

앞의 상황과 같이 각 사출 조건에 대한 복굴절의 변화를 살펴보면 Fig. 14와 같이 나타나며, 굴절율의 변화 상태와는 달리 충전시간, 보압시간, 금형온도는 큰 영향을 주지 않으며 보압에 대하여만 큰 반응을 보임을 알 수 있었다. 그림에서와 같이 보압이 큰 경우 복굴절의 값이 작게 나타나며 교호작용에 있어서는 Fig. 15에서와 같이 충전시간과 보압의 교호작용이 굴절율에 비해 더 확연히 일어남을 알 수 있었다.

Fig. 16에서와 같이 복굴절면에서 가장 유리한 양상을 보이는 실험조건 중 다른 조건은 이렇다 할 영향을 미치지 않고 있으므로 보압이 큰 경우를 고려하여 보면 실험번호 #3,#4,#7,#8,#11,#12,#15 및 #16가 유리함을 알 수 있다.

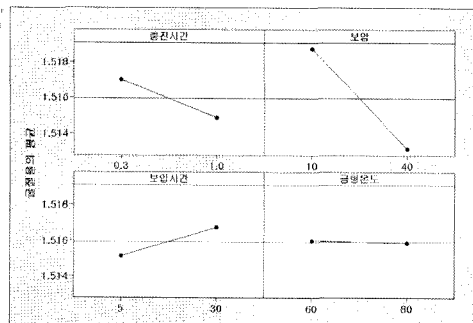


Fig. 11 Main effect for refractive index

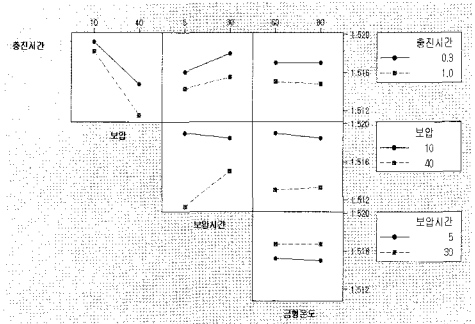


Fig. 12 Interaction plot of refractive index

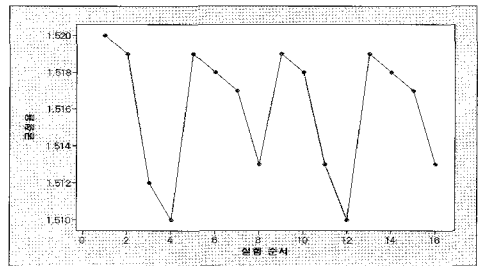


Fig. 13 Distribution of refractive index by injection condition

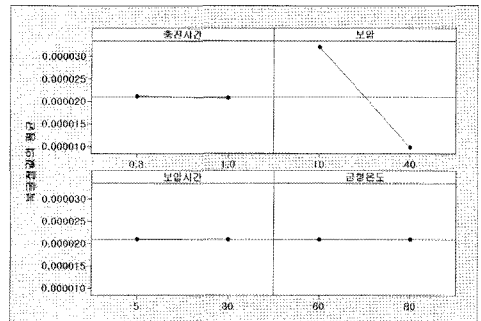


Fig. 14 Main effect for birefringence

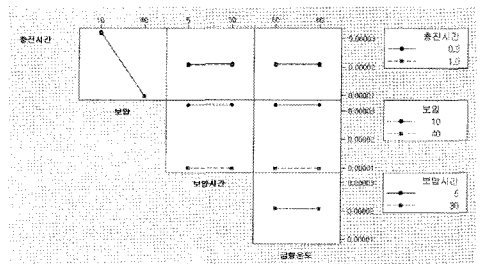


Fig. 15 Interaction plot of birefringence

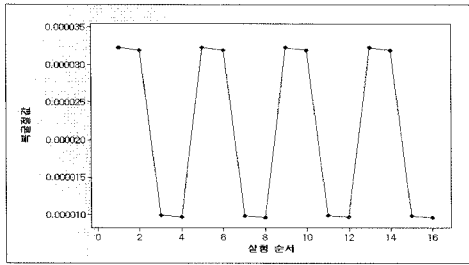


Fig. 16 Distribution of birefringence by injection condition

4.3. 복굴절과 굴절율을 위한 최적 결과

상기의 실험에서와 같이 각 사출 조건을 변경시켜가며 굴절율과 복굴절의 변화를 살펴본 결과 굴절율에 있어서 유리한 사출조건은 충전시간을 길게, 보압을 크게, 보압시간을 작게 한 #4와 #12의 경우이며, 복굴절면에 있어서 유리한 사출조건은 보압을 크게 한 실험번호 #3,#4,#7,#8,#11,#12,#15 및 #16의 경우임을 알 수 있으며 이 두 가지를 모두 만족시키는 경우는 #4와 #12임을 알 수 있었다. 이 경우 굴절율과

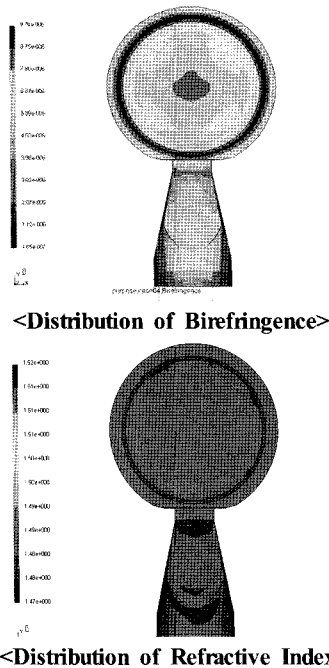


Fig. 17 Distribution of birefringence and refractive index (Fill time : 1.3sec, Hold pressure time : 5sec, Hold pressure : 40MPa, Mold temperature : 110℃)

복굴절을 성형해석 s/w인 3D-Timon으로 시뮬레이션 결과를 Fig. 17과 Fig. 18에 나타내었다.

5. 결론

초정밀 광학 사출성형 제품의 내부 복굴절에 대한 이해 및 개선은 광학적 성능을 향상시키기 위해 중요한 요소로 작용한다. 비구면 사출성형 렌즈 내부의 복굴절은 아래와 같은 조건과 상관관계가 있으며, 비구면 렌즈 내부에 발생하는 복굴절을 최소화하여 내부조직의 균일도를 유지시키는 것이 바람직함을 확인하였다.

- (1) 굴절율과 복굴절 모두 보압과 충전시간의 교호작용이 나타났다.
- (2) 굴절율은 보압, 충전시간, 보압시간에 영향을 많이 받으며 특히 보압의 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있었다.
- (3) 복굴절은 보압의 영향을 주로 받지만 충전시간, 보압시간과 금형온도에는 크게 영향을 받지 않았다. 보압이 큰

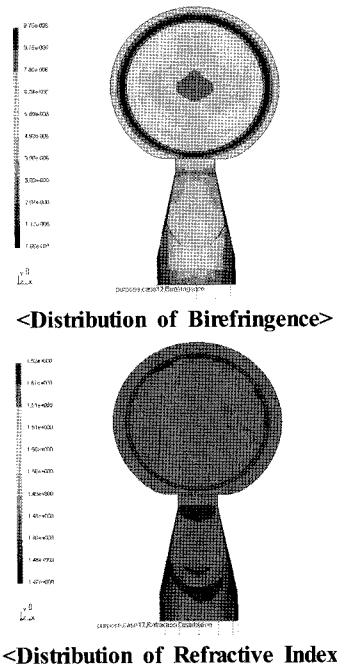


Fig. 18 Distribution of birefringence and refractive index (Fill time : 1.3sec, Hold pressure time : 5sec, Hold pressure : 40MPa, Mold temperature : 130℃)

경우 복굴절의 값이 작게 나타나며 교호 작용에 있어서는 충전시간과 보압의 교호 작용이 굴절율에 비해 더 확연히 일어남을 알 수 있었다.

- (4) 굴절율은 충전시간을 길게, 보압시간을 작게 하였을 때 값이 작게 나타났다.
- (5) 복굴절은 보압을 크게 하였을 때 값이 작게 나타났으며 금형온도에 따른 복굴절의 감소율은 다소 낮게 나타난다.

참 고 문 헌

- (1) Ha, Y. W., Jung, T. H. and Lee, B. J., 2002, "Injection Moulding of Polyetherimide Axi-Symmetric Elements," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 6, pp. 68~74.
- (2) Kang, S. D., Kim, W. S., Jang, K. H. and Kim, D. H., 2004, "A Study on the Compensation of Ultra-precision Aspheric Lens Mold," *Proceeding of KSPE spring conference*, pp. 237~238.
- (3) Kim, J. S. and Yoon, K. H., 2003, "A Study on the Prediction of Thermally-Induced Residual Stress and Birefringence in Quenched Polystyrene Plate Including Free Volume Theory," *KSME (A)*, Vol. 27, No. 1, pp. 77~87.
- (4) Yoon, K. H., 1996, "On The Manufacturing Process of a Optical Disk Substrate," *Polymer Science and Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 284~290.
- (5) Otani, Y., Shimada, T., Yoshizawa, T. and Umeda, N., 1994, "Two-dimensional birefringence measurement using the phase shifting technique," *Opt. Engng.*, Vol. 33, pp. 1604~1609.
- (6) Shyu, G. D., 1993, *Birefringence and Residual Stresses in Molded Articles of Amorphous Polymers*, Ph. D. Thesis, The University of Akron.
- (7) Lee, Y. B., Kwon, T. H. and Yoon, K. H., 2002, "Numerical Analysis of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression molded Center-Gated Disk. Part I and Part II," *KSME (A)*, Vol. 26, No. 11, pp.2342~2354 & 2355~2363.
- (8) Kim, H. P. and Kim, Y. J., 2002, "A Study on the Effects of Filling and Packing Phases on the Injection Molding," *Proceeding of the KSMTE spring conference*, pp. 112~118.
- (9) Lee, H. S., Lee, H. K. and Yang, G. E., 2005, "A Study on Injection Molding Analysis and Validation of Large Injection-Molded Body Using Design of Experiment", *Proceeding of the KSMTE spring conference*, pp. 109~114.
- (10) Lee, S. B., 2005, *Design of Experiment by Minitab*, ELECTRIC INC.