

초정밀 광학렌즈의 복굴절 예측과 금형 전사성

곽태수[#], 오오모리 히토시^{*}

Verification for transcription of spherical radius and prediction of birefringence in injection molding optical lens

Tae Soo Kwak[#], Hitoshi Ohmori^{*}

ABSTRACT

This paper has been focused in developing of plastic lens with ultra-precision and low birefringence ability using by injection molding simulation tools. The simulation tools, 3D-TimonTM and Asu-MoldTM were applied to visualize indirectly the flow pattern of melted polymer enter the mould and the simulation results are verified as compared with the experimental results. Birefringence and polarized light generated in injection molding process was also calculated for each injection conditions and compared with the pictures of experimented optical lens go through the polarized light plates device. A spherical radius of plastic optical lens transcribed from profile of mould core surface was measured to estimate the geometrical accuracy for the each injection conditions. It is confirmed that the simulation results about flow pattern and polarized light area coincided in experimental results. It is known that increasing in thickness shrinkage at center of lens, the spherical radius is larger from comparing the graph measured spherical radius and the thickness shrinkage at center of lens

Key Words: Plastic injection molding(플라스틱 사출성형), Birefringence(복굴절), Polarized light(편광), Optic lens(광학렌즈), Spherical radius(구면반경)

1. 서론

플라스틱 렌즈는 구면/비구면 등의 곡면형상을 가볍고 저 가격으로 비교적 용이하게 만들 수 있기 때문에 영상 정보기기, 안경, 콘택트 렌즈 등의 다양한 제품에 적용되고 있으며, 최근에는 디지털 카메라를 비롯하여 영상기기, 광픽업, 프로젝터, 휴대전화, 복사기 및 프린터 등의 초정밀 광학부품으로 개발되고 있다. 플라스틱 렌즈의 제조법으로서

는 사출성형, 압축성형, 열프레스, 캐스트, 2P 법 등이 있다. 사출 성형법은 범용성이 높고 다양한 형상, 크기 및 두께를 가진 제품에 적용할 수 있으므로 플라스틱 렌즈의 제조에 응용되고 있다.

사출성형의 주요 공정인 수지의 가열용융과 소화 수지의 충전 및 냉각고화 과정은 실린더와 금형 내에서 이루어지므로 외부에서 직접 관찰이 매우 어렵다. 따라서, 실린더 및 금형내의 가시화 방법에 대한 연구를 비롯하여 수지의 유동온도 및

^{***} 접수일: 2005 년 01 월 12 일; 게재승인일: 2005 년 04 월 15 일

[#] 교신저자: 요업(세라믹)기술원

E-mail tesukwak@kicet.re.kr Tel. (02) 3282-2449

^{*} 이화학연구소(일)

압력의 측정기술 등에 관한 연구가 진행되고 있으나, 실제로는 전산모사에 의한 간접적인 가시화 방법에 주로 의존하고 있다¹.

플라스틱 렌즈의 재료로 사용되고 있는 통상의 투명수지는 일반적으로 내열성이 낮고 흡습성이 높으며 상당한 복굴절이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 최근 CD 보다 기록밀도가 높고 재생이 가능한 광디스크가 등장하면서 구동 드라이브에 사용되는 광픽업용 대물렌즈와 회절격자에 복굴절이 거의 발생하지 않는 초정밀 플라스틱 렌즈가 요구되고 있으며, 액정 프로젝터 및 디스플레이에 사용되는 각종 렌즈와 시트도 복굴절을 줄이는 것이 품질 향상을 위한 주요 과제로 인식되고 있다. 이러한 복굴절은 수지의 종류와 사출성형 조건 및 게이트의 형상 등에 크게 의존하므로 플라스틱 렌즈용 수지의 개발과 동시에 복굴절을 줄이는 성형기술이 요구된다.

본 연구는 사출성형 시뮬레이션을 이용하여 초정밀 저복굴절 플라스틱 렌즈의 개발에 초점을 맞추었다. 플라스틱 렌즈의 사출성형 과정을 가시화하고 유동과정을 검증하기 위해서 시뮬레이션에 의한 금형내 충전 과정을 예측하고 실험과 비교하였다. 또한, 성형과정에서 발생하는 복굴절과 편광을 시뮬레이션에 의해 예측하고 실물의 편광 사진과 비교하여 광학적 성능을 검증한다. 한편, 전사정밀도를 확인하기 위해 렌즈의 구면반경(R)을 측정하여 기하학적 성능과 광학적 성능을 동시에 만족하는 사출성형 조건을 제안한다.

2. 플라스틱 렌즈의 편광과 복굴절

복굴절은 굴절율이 방향에 따라 다른 즉, 굴절율이 이방성 재료에 빛이 입사할 때 X 방향으로 편광면을 가지는 빛과 Y 방향으로 편광면을 가지는 빛의 위상이 어긋나는 현상을 말한다(Fig.1)¹. 복굴절의 발생은 편광을 이용하는 광학계에서 중대한 결함이 된다. 플라스틱 고분자를 구성하고 있는 최소단위인 저분자는 크고 작은 분극성을 띠므로 굴절율이 이방성을 보이지만 쇠상 고분자가 무작위로 얽혀 있는 형태로 이루어지는 경우에는 고분자 전체의 분극율 이방성은 거의 사라지며 복굴절이 발생하지 않는다. 하지만, 사출성형 등의 용해가공 과정을 거치면 전단유동에 의해 쇠상 고분자가 유동방향으로 배열되어 고화되기 때문에 복굴절의 발생

은 피할 수 없게 된다. 분자배향에 의한 복굴절은 수지의 분자구조에 의한 고유의 복굴절과 성형조건에 따른 배향의 정도에 의해서 결정된다. 따라서 사출 성형시에 발생하는 분자배향은 성형종료 후 잔류응력으로 남게 되며, 이와 같이 성형된 렌즈는 굴절을 이방성을 띠게 되어 복굴절이 발생하게 된다.

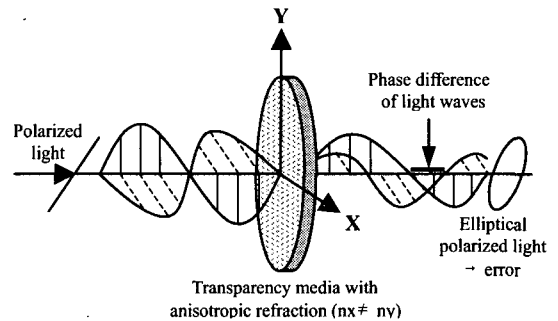


Fig. 1 Schematic diagram for birefringence phenomenon

사출성형 조건을 제어하여 복굴절을 최소화하기 위해서는 전단유동과 열응력에 의한 잔류응력을 제거해야 한다. 사출성형 과정에서 잔류응력은 분자배향이 안정한 상태로 돌아오기 전에 고화되면서 발생한다. 잔류응력을 제거 하기 위해서는 성형수지의 분자배향이 안정한 상태로 돌아오는 완화과정이 필요하다. 충분한 완화과정을 거치지 않고 고화된 분자배향은 복굴절 심화의 원인이 된다.

한편, 분자배향은 금형 온도, 수지온도, 충전 시간 또는 충전 압력, 보압력, 보압 시간, 금형 등에 영향을 받는다. 런너와 게이트의 형상, 냉각관의 위치 등 금형의 구조는 렌즈의 품질에 큰 영향을 미치므로 최적 설계가 요구되나, 금형 이외의 항목은 사출성형기에서 제어할 수 있다. 플라스틱 수지의 유동과정과 성형 후 플라스틱 렌즈의 광학적 성능은 사출성형 조건에 따라 많은 차이를 보이고 있다.

3. 사출성형 해석 및 실험

3.1 사출성형 해석

사출성형 시뮬레이션에서는 Asu-Mold™ 와 3D-

TIMON™ 등 사출성형 전용 해석프로그램을 이용하였다. 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해서 플라스틱 수지의 유동과정을 예측하고 실험과 비교하였다. Asu-Mold™ 는 유한요소 정식화에 의해 계산되는 프로그램이며 본 논문에서는 수지의 충전과정과 잔류응력을 예측하는데 이용되었다. 3D-TIMON™ 은 유한차분법으로 사출성형 과정을 계산하는 프로그램이며 유동과정을 비교하고 편광을 계산하는데 이용하였다. 직경 13.4mm 의 비구면 영상촬영용 광학렌즈를 해석 대상으로 하였다. 해석에 있어서 렌즈의 표면 형상을 최대한 표현하고 계산시간을 단축하기 위하여 렌즈 코어는 사면체 요소를, 그리고 게이트와 런너, 스프루는 셸(shell) 과 빔(beam) 요소를 각각 사용하였다.

$$\Delta n = n_i - n_j = C(\sigma_i - \sigma_j) \tag{1}$$

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau') \epsilon d\tau' \tag{2}$$

$$I = \sin^2 2\phi \sin^2 \left(\frac{R}{2} \right) \tag{3}$$

있다. 여기서 n_i 는 i 방향의 굴절율, σ_i 는 i 방향의 주응력, C 는 광탄성 계수이다. 사출성형 과정에서 발생한 렌즈 내부의 응력 σ 는 발생 응력을 시간적으로 적분하는 구성방정식(2)로부터 계산된다. 따라서 두께방향으로 복굴절(Δn)을 적분한 값 R 과 응력주축과 편광축이 이루는 각도 ϕ 를 계산하여 식(3)과 같이 편광 표시식에 의해 편광을 계산하고 있다².

3.2 실험 및 측정

사출성형 실험은 플라스틱 수지의 유동 패턴을 검증하기 위한 실험과 성형조건에 따른 편광을 검증하는 실험으로 나누었다. Table 1 과 Table 2 는 위의 두 실험을 위해 선정된 사출성형 조건이다. 실험을 위해 선정된 금형온도, 충전온도, 충전시간, 보압시간 등은 성형시 작업의 편리성 여부와 품질에 영향이 큰 항목을 선정하였다. 실험 장치는 형태력, 사출률, 사출압력이 각각 50ton, 114 cm³/s, 2,610 kgf/cm² 인 범용 사출성형기를 사용하였으며, 플라스틱 수지의 흡습량이 일정하도록 전기오븐에서 80℃, 6 시간 건조시킨 후 성형하였다.

Table 1 Conditions for melt front experiment

Resin	Melt temp.	Mould temp.	Filling time	Hold pressure
PMMA	250℃	105℃	0.5sec	20MPa

Table 2 Conditions for birefringence experiment

Inj. Conditions	1	2	3	4	5	6
Melting Temp.(℃)	295	315	300	295	280	315
Mould Temp.(℃)	140	140	135	130	120	120
Filling Time(sec)	0.7	0.6	0.8	0.5	0.9	0.7
Hold Time(sec)	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.3

복굴절의 예측에 필요한 잔류응력은 두 프로그램이 모두 계산해주고 있지만, 3D-TIMON™ 은 별도의 모듈에서 복굴절을 계산하고 편광표시를 지원해 주고 있으므로 복굴절과 편광의 시뮬레이션을 위해 3D-TIMON™ 을 이용하였다. 복굴절(Δn)을 정량적으로 표시하면 식(1)과 같이 나타낼 수

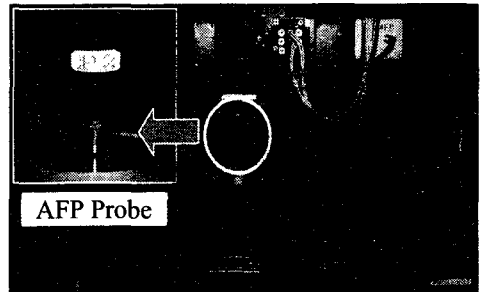


Fig. 2 Measurement picture of aspherical surface on AFP 3D profilometer(UA3P, Panasonic.co.ltd.)

플라스틱 렌즈의 성능은 복굴절 평가와 렌즈 구면반경(R)의 기하학적 전사성 평가로 나누어 생각할 수 있다. 전자는 광학적 성능을 평가하는 기준이 되며, 후자는 플라스틱 렌즈 구면의 형상 정밀도를 판정하는데 사용된다. 복굴절의 측정 방법은 점측정법과 복굴절의 면내분포를 측정하는 면측정법 등이 있으나 점측정법의 경우 피측정 렌즈 투과광의 수광이 곤란하며 측정시간이 과다한 단점이 있고 면측정법은 정점굴절력의 보상방법과 측

정범위가 좁은 등의 문제가 있으므로 측정이 어렵다³. 따라서, 복굴절의 평가는 편광판에 의한 광탄성 간섭호를 눈으로 판별하는 정량평가에 주로 의존하고 있으므로, 시뮬레이션 결과를 비교하는데 매우 유용하다. 본 연구에서는 편광판에 의한 복굴절의 정량평가법을 적용하였다.

플라스틱 렌즈의 구면반경(R)의 측정은 AFP (Atomic Force Probe) 3 차원 표면형상 측정기를 이용하였다. 사용된 측정 Probe 는 팁반경이 0.5mm 인 루비이며 측정력은 0.3mN 이다. Fig.2 는 3 차원 표면형상 측정기에서 금형의 구면반경(R)을 측정하는 모습이다.

4. 결과 및 고찰

본 절에서는 시뮬레이션과 실험에 의한 유동패턴의 일치 여부, 복굴절 및 편광의 예측, 플라스틱 렌즈의 구면반경(R)을 측정한 결과에 대해서 비교 검토한다.

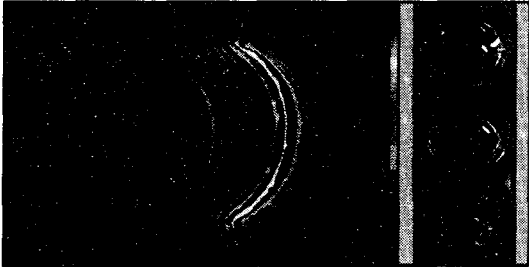


Fig. 3 The comparison of filling pattern analysis using by Asu-Mold™ and experiment results



Fig. 4 The comparison of filling pattern analysis using by 3D-Timon™ and experiment results

4.1 유동패턴의 검증

시뮬레이션 결과를 검증하기 위해서 금형내 수지의 유동패턴을 실험과 비교하였다. 실험에서는 사출성형기에서 충전완료 시간을 체크한 후 사출

시간을 단계별로 조정하여 용융수지의 유동패턴을 확인하는 방법을 사용하였다.

Fig.3 과 4 는 Table 1 의 조건하에서 충전 과정을 해석하고 성형품과 비교한 그림이다. 유동패턴의 예측에 있어서 Asu-Mold™ 와 3D-TIMON™ 에 의한 시뮬레이션 결과는 실험과 대부분 일치하였다.

실험과 시뮬레이션 결과를 살펴보면 용융수지는 게이트를 통해 캐비티로 흘러 들어갈때 외곽의 테두리가 렌즈의 중심부로 진입하는 수지의 유동을 제어하고 있음을 알 수 있다. 이것은 외곽 테두리의 최적설계를 통해 웰드라인의 생성을 방지하고 전단유동을 억제하여 잔류응력을 줄이는데 이용이 가능함을 시사한다.

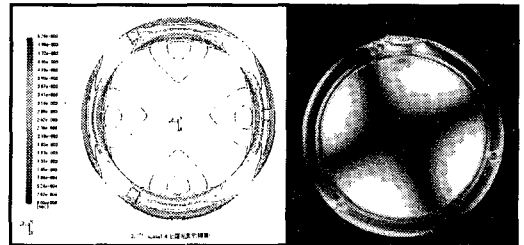


Fig. 5 The comparison of simulation and experienced results to polarized-light-plate about injection condition, 4

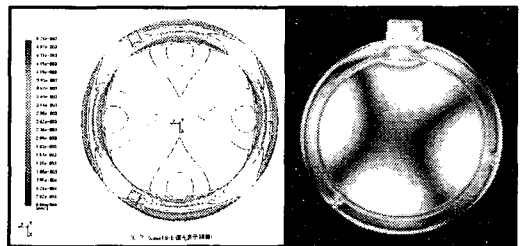


Fig. 6 The comparison of simulation and experienced results to polarized-light-plate about injection condition, 6

4.2 잔류응력과 복굴절

본 절에서는 편광의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교 검토한다. 플라스틱 렌즈에 있어서 이상적인 편광분포는 검은색의 띠가 맑은 십자의 형태를 가진다. Fig.5 와 Fig.6 은 Table 2 의 4 와 6 번 조건에 대한 시뮬레이션과 실험물의 편광사진을 비

교한 것이다. 편광의 경향은 일치하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 게이트를 기준으로 시뮬레이션 결과에 비해 실물사진 쪽이 좀더 비대칭으로 나타났다. 이러한 비대칭은 플라스틱 렌즈의 외곽 테두리에 3 개의 보스가 게이트를 중심으로 비대칭 위치에 있는데 편광 시뮬레이션에서는 등가체적을 가진 사각요소로 대체한 것과 시뮬레이션에 의한 계산 오차인 것으로 사료된다. Fig.5 에 비해 Fig.6 의 경우가 비교적 편광이 심하고 게이트 부근에서 편광이 더욱 심한 것을 확인할 수 있었다.

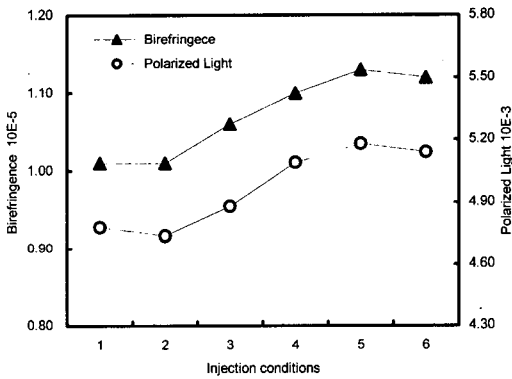


Fig. 7 Simulation results for birefringence and polarized light to injection conditions

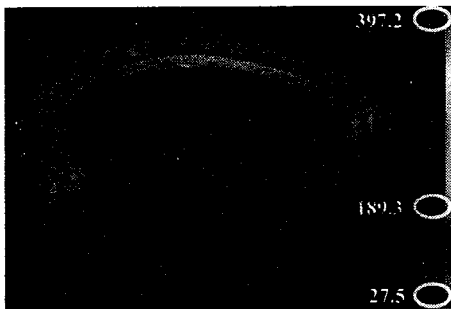


Fig. 8 Distribution of residual stress calculated by simulation tool

Fig.7 은 Table 2 의 사출조건에 따른 복굴절과 편광을 계산한 결과이다. Table 2 의 사출성형 조건 번호순에 따라 편광과 복굴절은 증가하였다. Fig.8 은 렌즈 내부의 잔류응력 분포를 Asu-Mold™ 에서 예

측한 결과이다. 렌즈 외곽의 테두리에서 잔류응력은 189.3 - 397.2MPa 이며, 유효경 내부에서는 27.5 - 189.3MPa 로 테두리에 비해 50%이하였다. 외곽의 테두리는 렌즈내부의 잔류응력을 줄이는 역할을 하는 것으로 생각된다.

4.3 사출성형 조건과 렌즈구면(R)

렌즈의 성능을 평가하기 위해서는 광학적 특성 평가와 함께 기하학적 형상의 정밀도를 측정해야 한다. 플라스틱 렌즈에 있어서 설계 기준이 되는 기하학적 형상치수는 렌즈의 구면 혹은 비구면 값으로 대표된다.

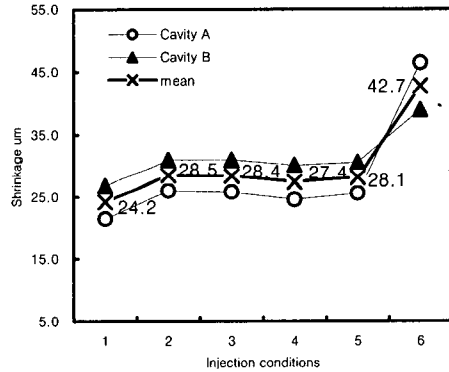


Fig. 9 Shrinkage amount measured in thickness of lens

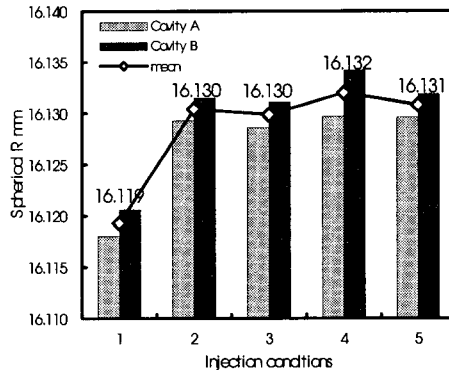


Fig. 10 Results of spherical radius measured by AFP, Atomic Force Probe to injection conditions

플라스틱 수지는 충전 후 냉각과정에서 두꺼운 부분의 수축이 심하게 발생한다. 특히, 볼록렌즈인

경우에 중심부가 주변부에 비해 수축이 커지므로 굴절율이 높은 렌즈일수록 성형 후 렌즈 구면반경(R)의 전사 정밀도가 저하되는 경향이 있다.

본 절에서는 Table 2의 조건에 따라 성형된 렌즈의 구면반경(R)을 측정하고 렌즈의 중심부 두께를 측정한 Fig.9의 그래프⁴와 비교하였다. Fig.10은 AFP 3차원 표면형상 측정기를 이용하여 측정한 결과이다. 6번 조건은 실험에서 렌즈 성형품의 10%가 내부에 기공(Void)이 발생하였으므로 구면반경(R) 측정에서 제외하였다. Fig.9는 렌즈의 중심부에서 두께를 측정하여 수축율을 계산한 결과이며, Fig.10은 구면반경(R)을 측정한 결과이다. 1번 사출성형 조건에서 렌즈의 두께수축은 24.2 μ m이었으며 구면반경(R)은 16.119mm였다. 반면, 2,3,4,5번 조건에서는 27.4-28.5 μ m 범위로 수축하였고 구면반경(R) 값은 16.130-16.132mm로 나타났다. 1번 조건에 비해, 2-5번의 조건에서 두께 수축은 3 μ m 이상, 구면반경(R)은 10 μ m 정도 컸다. 구면반경(R)은 1번 조건의 캐비티 A에서 16.118mm로 최소이며, 4번 사출조건의 캐비티 B에서 16.134mm로 최대였다. 구면반경(R)은 금형의 캐비티와 사출조건에 따라 최대 16 μ m의 차이를 보였다. 금형 코아의 구면반경(R)은 16.224mm이다. Fig.9와 Fig.10의 결과로부터 렌즈 중심부의 두께 수축이 많을수록 구면반경(R)이 증가하는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 플라스틱 렌즈의 사출성형에 있어서 렌즈의 광학적 성능을 저하시키지 않고 렌즈 금형의 기하학적 전사성을 높이기 위해서 시뮬레이션을 통해 유동과정의 가시화 및 광학적 성능을 예측하고 실험과 비교 검토하였다.

1) 금형내에 진입하는 수지의 충전과정을 시뮬레이션하고 실험한 결과, 유동패턴이 일치하였다.

2) 플라스틱 렌즈의 편광 사진과 시뮬레이션을 비교한 결과, 편광 영역은 대부분 일치하였으며 게이트 부근에서의 편광은 시뮬레이션에 비해 편광 사진에서 출현의 정도가 심했다.

3) 렌즈 내부의 잔류응력 분포를 예측한 결과, 테두리에서 잔류응력은 189.3 - 397.2MPa로 나타났으며, 유효경 내부에서는 27.5 - 189.3MPa로 테두리에 비해 50%이하였다.

4) 사출성형 조건별로 편광과 복굴절을 계산한결

과, 1번과 2번 조건에서 편광과 복굴절의 발현이 가장 낮을 것으로 예측되었다.

5) 사출성형 조건별로 렌즈의 구면반경(R)을 측정하고 렌즈 중심부의 두께 수축을 측정하여 비교하였다(Fig.9,10). 1번 조건에서 두께 수축과 구면반경(R)은 각각 24.2 μ m, 16.119 μ m로 가장 작았으며, 1번 이외의 조건에서 두께 수축은 28.0 \pm 0.5[μ m], 구면반경(R)은 16.131 \pm 0.001[mm]이었다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수 지원에 의하여 연구되었습니다. 논문 완성에 도움 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Muranaka, M., "Technical and application of plastic lens system," CMC, pp.16, pp.80-81, 2003.
2. Toray CAE software division, "3D TIMON reference manual version 7.0," Toray Industries Inc., 2002.
3. Morita, N., "Development of the Birefringence measuring system for scanning-lens," Ricoh technical report No.26, pp. 115 - 120, 2000.
4. Kwak, T.S., Ohmori, H., 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. of KSPE, Vol.21, No.2, pp. 33, 2004.