

광학렌즈의 사출압축성형에서 오버플로우를 이용한 웰드라인과 복굴절 저감

공기환*, 이진효*, 강병욱*, 곽태수*^{#,}

*경남과학기술대학교 기계공학과

Reduction of Birefringence and Weld-Line using Over-Flow in Injection Compression Molding for Optic Lens

Ki-Hwan Kong*, Jin-Hyo Lee*, Byung-Ook Kang*, Tae-Soo Kwak*^{#,}

*Dept. of Mechanical Engineering, Gyeongnam National Univ. of Sci. and Tech.

(Received 13 January 2018; received in revised form 26 January 2018; accepted 31 January 2018)

ABSTRACT

This study has focused on the weld-line and birefringence reduction of a plastic optic lens using over and CAE analysis in injection compression molding. A concave lens, which has a thin thickness in the center and a large difference in thickness between the center and the periphery, often causes weld-line defects during injection molding. CAE analysis has been applied to optimize the overflow design in order to reduce the weld-line defects and the polarization defects. To reduce the weld line and birefringence defects, overflow design and application using CAE analysis show that the measured birefringence values of the specimens before the overflow application were 46.8nm and 36.9nm, and the values after the over-flow application were 13.6nm and 14.0nm. From the experimental results, it is confirmed that birefringence is greatly improved when overflow is applied.

Key Words : CAE Analysis(CAE해석), Weld-line(웰드라인), Over-flow(오버플로우), Injection Compression Molding(사출압축성형), Birefringence(복굴절)

1. 서 론

고화소용 플라스틱 렌즈는 구면/비구면 등의 곡면 형상을 가볍고 저 가격으로 비교적 용이하게 만들 수 있기 때문에 영상 정보기기, 안경, 콘택트 렌즈 등 다양한 제품에 적용되고 있다. 최근에는 디지털 카메라를 비롯하여 영상기기, 팽 픽업, 프

로젝터, 휴대전화, 복사기 및 프린터 등의 초정밀 광학부품으로 활용되고 있다^[1]. 사출성형품의 정밀도는 수지의 종류와 물성, 금형, 성형조건 등의 영향을 받고 있으며^[2], 고화소용 정밀 플라스틱 렌즈를 성형하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 특히 중심부가 얇아 주변부와의 두께 차이가 큰 오목 렌즈를 성형할 때는 유동선단의 속도 차이로 인한 성능 저하가 쉽게 나타난다. 대표적인 성능

Corresponding Author : tskwak@gntech.ac.kr
Tel: +82-55-751-3317, Fax: +82-55-751-3319

저하 요인으로는 웰드라인 생성 및 복굴절의 과다 출현이 있다. 복굴절은 용융수지가 금형의 캐비티 내부로 흘러갈 때 전단유동에 의해 쇠상 고분자가 유동방향으로 배열되면서 고화되어 잔류응력에 의해 나타나는 현상이다. 복굴절은 사출 성형품에서는 피할 수 없는 불량 유형이며, 편광을 이용하는 광학계에서 중대한 결함이 된다. Rim^[3] 등은 사출 성형 $f\theta$ 렌즈에서 부주사 빔경 편차의 주요인을 밝혀내기 위해서 복굴절 및 비구면 형상을 측정하여 부주사 빔경 편차의 주요인이 복굴절임을 밝혀낸 바 있다. Kwak^[4] 등은 광학렌즈의 사출성형에서 CAE해석을 통해 복굴절을 위상차로 정량화하고 편광판으로 시편을 측정한 결과와 비교, 검증하였다. Hong^[5] 등은 광탄성 장치를 이용하여 투명한 사출성형품의 잔류응력을 측정하고 컴퓨터 해석을 통해 사출성형품의 광학적 특성을 예측하였다. Park^[6] 등은 사출성형 조건에 따른 사출성형 광학렌즈의 위상차를 CAE해석하고 편광 측정기를 이용하여 정량화한 시편의 위상차를 비교하였다. Lee^[7] 등은 사출압축성형으로 광학렌즈를 성형하고 일반 사출성형으로 제작한 렌즈를 비교한 결과, 사출압축성형이 복굴절과 웰드라인 불량 저감에 효과적임을 확인하였다. 살펴본 바와 같이 플라스틱 렌즈 성형 시에 나타나는 복굴절과 웰드라인은 광학적 성능을 저하시키는 주요 원인이며, 이를 저감하기 위하여 사출압축성형 기술의 활용 및 복굴절 정량화를 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

본 연구는 중심부가 얇고 주변부가 두꺼운 형상의 플라스틱 오목 렌즈를 제작하기 위해서 사출압축성형 기술을 적용하고, CAE해석을 통해 오버플로우(Over-Flow)를 설계 및 적용함으로써 웰드라인 생성 및 복굴절을 최소화하고자 한다.

2. CAE 해석 및 실험 방법

2.1 렌즈형상과 성형 공정

본 연구에 사용한 플라스틱 광학렌즈는 중심부 두께 1.3mm, 주변부 3.413mm, 외경 23.6mm, 유효경 18.7mm로서 고굴절이 요구되는 오목렌즈이다.

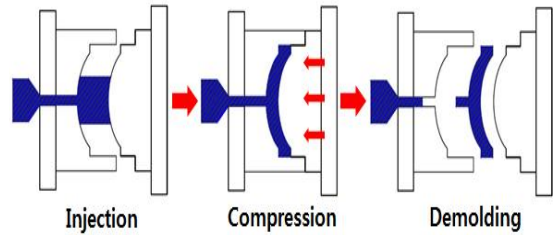


Fig. 1 Injection-compression molding process

유효경 내부와 외곽부의 두께 차이가 큰 렌즈는 일반 사출성형으로 웰드라인을 제거하기 어려우므로 사출압축성형 공정의 적용을 검토하였다.

유동에 의한 복굴절은 충전과정에서 전단응력 및 법선응력에 의해 나타나므로 이를 최소화하는 공정이 적합하다. 사출압축성형은 Fig. 1과 같이 금형 내 캐비티에 성형품과 동일한 량의 수지를 사출한 후 금형으로 압축하여 제품을 완성하는 방법으로 사출과정에서 공동부가 넓어져 웰드라인을 억제하는 장점이 있다. 또한 유동방향에 따라 배열된 고분자를 압축과정에서 배열 방향을 분산해 주어 복굴절을 저감시킬 수 있다. CAE 해석 결과를 이용하여 사출 압축 시 유동과정을 분석하고, 웰드라인을 저감하기 위한 오버플로우 설계에 적용하였다. 웰드라인 및 복굴절 해석 결과를 비교하여 최적 성형조건 선정에 활용하고 오버플로우 형상 설계에 반영하였다.

2.2 해석 및 실험방법

사출압축성형 실험 및 CAE해석을 위해 사용된 광학용 플라스틱 수지는 Zeonex E48R(Nippon Zeon Co., Ltd.)이다. Table 1은 수지의 물성을 나타낸 것이며, Fig. 2는 PVT특성 그래프이다. 해석을 위해 3D형상을 모델링하고 CAE해석의 전처리 프로그램인 하이퍼메쉬(HyperMeshTM, Altair Eng.)를 사용하여 유한요소를 생성하였다. 캐비티는 4개, 십자형으로 배열하였으며, 해석 시간을 줄이기 위해 1/4 대칭해석 모델을 사용하였다. 대칭 모델의 요소수는 27,312개, 렌즈의 체적은 843.8mm³, 런너와 게이트의 체적은 365.9mm³이다. 사출압축성형 해석은 3D TIMONTM (Toray co. Ltd.) 프로그램

램을 사용하였다. 사출 성형시 웰드라인을 제거하는 방법은 사출속도, 사출압력, 보압시간 등 성형조건을 최적화 하는 방법과 오버플로우를 설치하거나 가스빼기 추가, 게이트 위치 변경 등 금형의 구조를 변경하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 CAE를 활용하여 성형조건을 선정하고, 오버플로우 설계를 위하여 게이트의 형상 및 크기가 웰드라인에 미치는 영향을 확인하였다. 웰드라인을 최소화하는 사출압축성형 조건을 찾기 위해 사출속도, 수지온도, 압축개시 시간, 압축깊이 등이 웰드라인 생성에 미치는 영향을 분석하여 사출압축성형 조건을 선정하였다. 사출압축성형을 위한 실험장치는 형체력 50ton, 스크류 직경이 22mm, 최대스트로크가 75mm인 FANUC ROBOSHOT(α -S50iA)을 이용하였다. 성형렌즈 시편의 광학적 성능을 평가하기 위해서 Fig. 2의 2차원 복굴절 평가시스템(WPA-100S) 장치를 이용하여 복굴절을 측정하였다. 이 장치는 위상차를 2차원 면분포 데이터로 정량화하여 복굴절을 나타낸다.

형상정밀도는 UA3P(Panasonic co., ltd.)를 이용하여 렌즈시편을 측정하였다. Table 2는 실험 및 CAE 해석을 위한 성형조건표이다.



Fig. 2 Retardation measurement device, WPA-100S

Table 1 Physical properties of Zeonex E48R

Properties	Zeonex E48R
Light transmission [%]	92
Density [g/cm^3]	1.01
Refractive index (n_d)	1.530
Glass transmission temperature [$^{\circ}C$]	139

Table 2 Molding conditions

Conditions	Zeonex E48R
Mold Temperature [$^{\circ}C$]	120
Cooling Time [sec]	15
Packing Time [sec]	15
Packing Pressure [MPa]	30
Compression Velocity [mm/s]	100

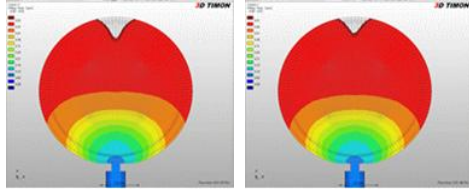
3. 해석 결과 및 고찰

3.1 성형조건과 유동패턴

사출압축성형 조건은 렌즈의 품질을 결정하는 요인 중 하나이다. 사출속도, 사출온도, 압축거리, 압축개시 시간을 주요 성형조건으로 선정하고 각각의 성형조건이 웰드라인 형성에 미치는 영향을 확인하였다. CAE해석 결과를 이용하여 유동패턴의 변화를 정성적으로 분석하였다. Fig. 3은 사출 온도 변화에 따른 유동패턴의 변화를 나타낸 것이다. 사출온도가 높아지면 수지의 점성이 줄어들어 유동속도가 빨라진다. 해석 결과에 따르면 수지의 충전 속도는 5.18s에서 5.14s로 줄어들었으며, 사출온도가 265 $^{\circ}C$ 일 때는 97.5% 충전 시, 280 $^{\circ}C$ 에서는 98.2%충전 시 웰드라인이 나타날 가능성이 높았다. 사출 온도가 높을수록 웰드라인 형성이 늦어지지만 수지의 물성을 고려하여 사출 온도를 올리는데 한계가 있다. Fig. 4은 사출속도 변화에 따른 유동패턴 해석 결과이다. 사출속도 10mm/s와 같이 낮은 사출속도에서는 웰드라인이 형성될 가능성이 높은 것으로 나타났다. 25mm/s이상의 사출속도에서는 유동패턴의 변화는 거의 나타나지 않았다. Fig. 5 및 Fig. 6은 압축거리와 압축개시 시간에 변화에 따른 유동해석 결과이다. 압축거리가 클수록 웰드라인 형성이 늦어질 것으로 예상되었으나 압축거리 2.0mm이상에서는 유의미한 차이가 발견되지 않았다. 압축개시 시간이 늦어질수록 웰드라인 형성이 지연되었다.

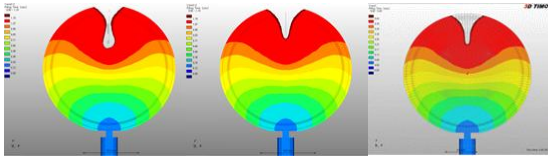
3.2 오버플로우 게이트와 웰드점축각

오버플로우는 성형 중에 발생하는 웰드라인을 제거하거나 캐비티 내부의 가스 빼기 또는 가스로 인한 미성형을 제거하기 위하여 주로 적용된다.



(a) 260°C (b) 280°C

Fig. 3 Comparison of flow pattern according to injection temperature



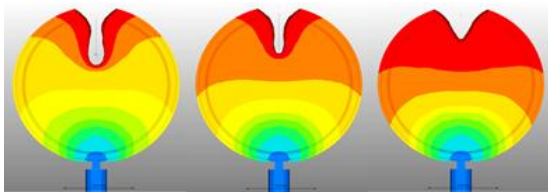
(a) 10mm/s (b) 25mm/s (c) 30mm/s

Fig. 4 Comparison of flow pattern according to injection speed variation



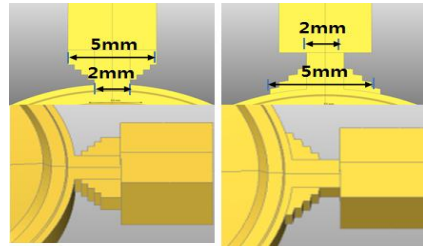
(a) 1.5mm (b) 2.0mm (c) 2.5mm

Fig. 5 Comparison of flow pattern according to compression distance



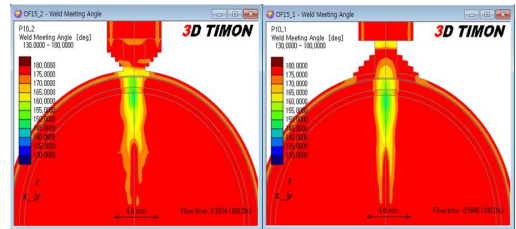
(a) 0.3s (b) 0.4s (c) 0.5s

Fig. 6 Comparison of flow pattern according to compression start time

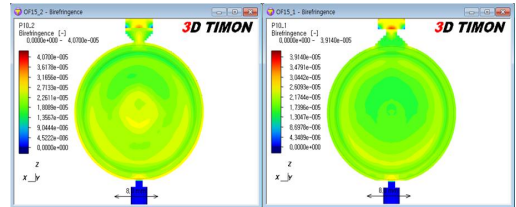


(a) Enlarged gate (b) Reduced gate

Fig. 7 Design of enlarged and reduced gates



(a) weld meeting angle



(b) Birefringence

Fig. 8 CAE analysis results comparison for (a) weld meeting angle and (b) birefringence using enlarged and reduced gate

오버플로우는 한 변의 길이가 5mm인 정육면체로 설계하고, 오버플로우 게이트가 웰드라인 및 복굴절에 미치는 영향을 확인하기 위해 CAE 해석을 수행하였다. 오버플로우 게이트는 두께와 폭이 각각 1.0mm×1.5mm인 사각(Square)단면 게이트와 Fig. 7과 같이 확대(Enlarged) 및 축소(Reduced) 게이트 2종류를 설계하였다. CAE 해석 결과에서 웰드라인 예측은 웰드점축각을 확인함으로써 가능하다. 본 연구에서 웰드라인은 Zeonex E48R 수지의 웰드점축각 140°를 기준으로 하였다.

Table 3 Analysis results of birefringence and weld meeting angle according to compression start time

Analysis results	Compression start time[sec]			
	0.490	0.495	0.500	0.505
Birefringence [$\times 10^{-3}$]	2.582	2.591	2.601	2.611
Minimum weld meeting angle[$^{\circ}$]	130	135	140	145

Table 4 Analysis results of birefringence and weld meeting angle according to gate type

Analysis results	Over-Flow gate type		
	Enlarged	Reduced	Square
Birefringence [$\times 10^{-3}$]	2.609	2.713	2.611
Minimum weld meeting angle[$^{\circ}$]	145	145	145

Table 5 Measurement results of molded samples

Molded samples	with over-flow		without over-flow	
	1	2	1	2
Shape accuracy R1[PV, μm]	0.0965	0.1268	0.1200	0.1434
Shape accuracy R2[PV, μm]	0.1078	0.1426	0.1036	0.1160
Birefringence [nm]	13.6	14.0	46.8	36.9

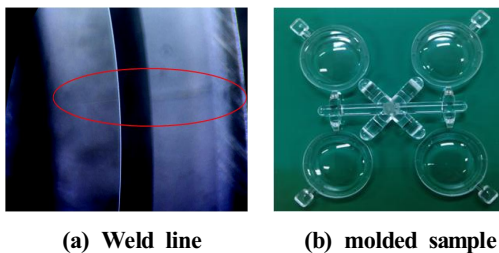
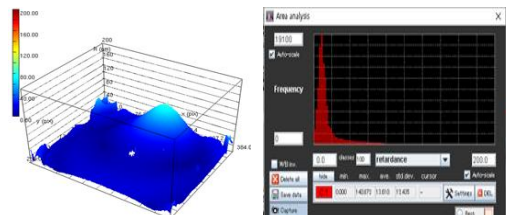
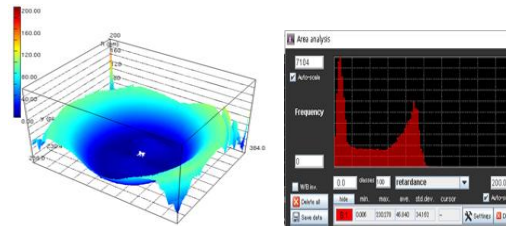


Fig. 9 weld line defect and molded samples

CAE해석 결과에서 압축개시 시간이 유동패턴에 가장 큰 영향을 미치고 있었다. 사각단면 오버플로우 게이트에 대해서 압축개시 시간 0.5s를 전후하여 0.490s, 0.495s, 0.500s, 0.505s에 대한 웰드접촉각과 복굴절 해석 결과를 비교하였다(Fig. 8 (a), (b)).



(a) before application of over-flow



(b) after application of over-flow

Fig. 10 Birefringence measurement results for samples (a) before application and (b) after application of over-flow

Table 3은 압축개시 시간에 따른 웰드접촉각과 복굴절 해석 결과를 정량화 한 것이다. 압축개시 시간이 늦어질수록 복굴절은 약 1.1% 증가하였다. 웰드접촉각은 압축개시 시간이 늦어질수록 발생 확률이 감소하였다. Fig. 9과 Table 4는 오버플로우 게이트의 형태에 따른 해석결과를 비교한 것이다.

복굴절은 축소(Reduced) 게이트에서 가장 크게 나타났으며 확대(Enlarged) 게이트에 비해 4.0% 증가하였다. 사각단면 게이트와 확대 게이트의 복굴절은 0.08%로 거의 차이가 나지 않았다. 웰드접촉각은 모두 145 $^{\circ}$ 로 동일하였다. 해석결과에서 오버플로우 확대 게이트와 사각단면 게이트 모두 복굴절 출현이 적고, 웰드라인 확률이 낮으므로 실험에는 금형 제작이 쉬운 사각단면 게이트를 적용하였다.

3.3 실험 및 측정 결과

실험을 위해 제작된 금형은 4 캐비티의 카세트 금형이며 사각단면 오버플로우 게이트를 적용하여 제작하였다. CAE 해석과 동일한 성형조건으로 오

버플로우를 적용한 시편과 적용하지 않은 시편을 제작하고 복굴절과 형상정밀도를 측정하였다. 웰드라인은 금형온도, 제품형상, 성형조건 등에 따라 생성될 수 있다[8]. Fig 9 (a)는 성형렌즈 시편에서 나타나는 웰드라인 사진이며, Fig. 9 (b)는 오버플로우를 적용하여 제작한 시편의 사진이다. Fig. 10은 제작 시편의 복굴절을 측정한 결과이다. Table 5는 복굴절 및 형상정밀도를 측정한 결과이다. 오버플로우 적용 전과 후 시편의 형상정밀도는 차이가 나타나지 않았다. 반면, 복굴절은 오버플로우 적용 전 시편에서 46.8nm, 36.9nm, 적용 후 시편에서 13.6nm, 14.0nm로 크게 개선되었다.

4. 결론

유효경 내부와 외곽부의 두께 차이가 큰 플라스틱 오목 렌즈의 사출압축성형에서 웰드라인 및 복굴절을 저감하기 위해 오버플로우(Over-Flow) 설계 및 CAE해석을 이용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 사출온도, 사출속도, 압축거리, 압축개시 시간이 유동패턴에 미치는 영향에 대해서 CAE 해석한 결과, 압축개시 시간이 유동패턴의 변화에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.
2. 오버플로우 축소(Reduced) 게이트와 확대(Enlarged) 게이트의 웰드접촉각 및 복굴절 해석 결과에 따르면 복굴절은 축소 게이트가 확대 게이트에 비해 4.0% 크게 나타났으나 웰드접촉각의 차이는 나타나지 않았다.
3. 사각단면 게이트와 확대 게이트의 웰드접촉각 및 복굴절을 비교한 결과, 복굴절 차이는 0.08%로 해석오차 범위 내에 있었으며, 웰드접촉각은 145°이상으로 동일하였다.
4. 사각단면 오버플로우 게이트 적용 전과 후 시편을 제작하고 복굴절을 측정한 결과, 오버플로우 적용 전 시편은 46.8nm, 36.9nm, 적용 후 시편은 13.6nm, 14.0nm로 복굴절이 크게 개선되었다.

후 기

이 논문은 경남과학기술대학교 2016년도 대학 회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kwak, T. S., Ohmori, H. and Bae, W. B., "A study on searching method of molding condition to control the thickness reduction of optical lens in plastic injection molding process", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 2, pp. 27-34, 2004.
2. Choi, K. K., Hong, S. M. and Han, S. R., "Effect of Flow Pattern of Coolant for Injection Mold on the Deformation of Injection Molding", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14 No. 4, pp. 92-99, 2015.
3. Rim, C. S., "The effect analysis of birefringence of plastic fθ lens on the beam diameter", Journal of Optical Society of Korea, Vol. 11, No.2, pp.73-79, 2000.
4. Kwak, T. S. and Ohmori, H., "Verification for transcription of spherical radius and prediction of birefringence in injection molding optical lens", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 6, pp.55-60, 2005.
5. Hong, J. S., Park, S. R. and Lyu, M. Y., "Measurement of Residual Stress Using Photoelasticity and Computer Simulation of Optical Characteristics in a Transparent Injection Molded Article", Polymer(Korea), Vol. 35, No. 1, pp.1-6, 2011.
6. Park, S. H., Kim, T. K. and Kwak, T. S., "Retardation Analysis of Plastic Optic Lens according to Injection Speed Variation", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 2, pp.93-98, 2015.
7. Lee, H. S., Jeon, W. T. and Kim, S. W., "Development of Plastic Lenses for High-Resolution Phone Camera by Injection-Compression Molding", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A, Vol. 37, No. 1, pp.39-46, 2013.
8. Lee, S. H., and Hur, J. W., "Effect of Design Parameters and Molding Temperature on Polymethyl Methacrylate Lens Warp", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 109-116, 2016.