

광탄성을 이용한 투명한 사출성형품의 잔류응력측정 및 광학적 특성의 컴퓨터 모사

홍진수* · 박서리* · 류민영†

서울과학기술대학교 제품설계금형공학과, *서울과학기술대학교 NID융합기술대학원
(2010년 4월 22일 접수, 2010년 8월 30일 수정, 2010년 10월 5일 채택)

Measurement of Residual Stress Using Photoelasticity and Computer Simulation of Optical Characteristics in a Transparent Injection Molded Article

Jin Soo Hong*, Seo Ri Park*, and Min-Young Lyu†

Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 149-743, Korea

*Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University Science and Technology, 172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 149-743, Korea

(Received April 22, 2010; Revised August 30, 2010; Accepted October 5, 2010)

초록: 사출성형은 고온의 수지를 고압으로 금형에 충전하고 냉각하여 제품을 만드는 공정으로 큰 온도차이와 고압에 의해 성형품에 잔류응력이 형성된다. 이러한 잔류응력은 시간이 지남에 따라 이완되면서 제품에 변형을 일으켜 형상 품질을 저하시킨다. 본 연구에서는 광탄성 장치를 이용하여 투명한 사출성형품의 잔류응력을 측정하는 방법을 연구하였다. 빛은 전자파처럼 진행하는데 편광필름을 통과하면 하나의 파장만이 진행하게 된다. 그 파장이 시편을 통과하면서 시편에 존재하는 잔류응력 때문에 복굴절이 형성되고 두 번째 편광필름을 통과하면서 다양한 색의 패턴을 보이게 된다. 이 색의 패턴을 이용하여 사출성형으로 제작된 사각평판의 잔류응력을 정량적으로 측정하였다. 또한 컴퓨터 해석을 통해 사출성형품의 광학적 특성을 예측하였으며 실험과 비교하였다.

Abstract: Pressurized high temperature plastic resin flows into the cavity of mold and is solidified in injection molding process. Residual stress is being developed in injection molded part because of high temperature variations and high pressure. Developed residual stress relaxes as time goes. Consequently this makes part deformed and deteriorates quality of product. A measurement method of residual stress for injection molded transparent articles has been investigated using photoelasticity. Light, a composite of electromagnetic waves, is purified into a single wave by a polarized film. When this wave passes through the specimen, birefringence is developed according to the level of residual stress in the specimen and color fringed pattern appears after the second polarized film. Residual stress in the injection molded transparent flat a part has been measured quantitatively using the color fringed pattern. Optical characteristics have been a part also predicted by computer simulation and compared with experimental results.

Keywords: photoelasticity, birefringence, fringed order, residual stress, transparent injection molded article.

서 론

사출성형공정은 생산성과 성형 정밀도가 높기 때문에 플라스틱 제품의 성형에서 가장 많이 사용되고 있다.^{1,2} 최근 정밀사출성형에 대한 요구가 증가하고 있고,^{3,4} 사출성형품의 정밀도는 측정 정밀도에 이를 만큼 높아져 있다. 하지만 사출성형 제품은 성형 중 생성된 잔류응력에 의하여 후변형을 일으켜 제품의 품질을 저하시킨다.⁵ 잔류응력은 열에 의해 발생하는 것과 흐름에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다.⁶

잔류응력에 관한 연구는 주로 보압 및 냉각과정,⁷ 또는 사출압력과 온도와 같은 성형조건을⁸ 조절하여 잔류응력을 최소화하는 연구가 있고, Hole-drilling Method와 Layer Removal Method,^{9,10} 광탄성(photoelasticity),¹¹ X-ray 회절법 등을¹² 이용한 잔류응력 측정에 관한 연구가 있다. 이중, 광탄성을 이용한 측정법은 편광된 빛이 잔류응력이 존재하는 투명한 시편을 통과하여 나타나는 복굴절(birefringence) 패턴을 이용하는 것이다. 복굴절 패턴이 시편의 잔류응력의 주응력간의 차이와 비례하여(Rheo-optic Law) 색으로 나타나기 때문에 잔류응력을 정성적으로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 광탄성으로 나타나는 정성적인 잔류응력을 정량적

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@snut.ac.kr

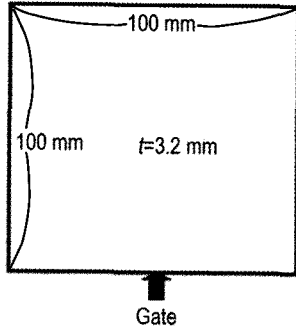


Figure 1. Injection molded specimen for experiment.

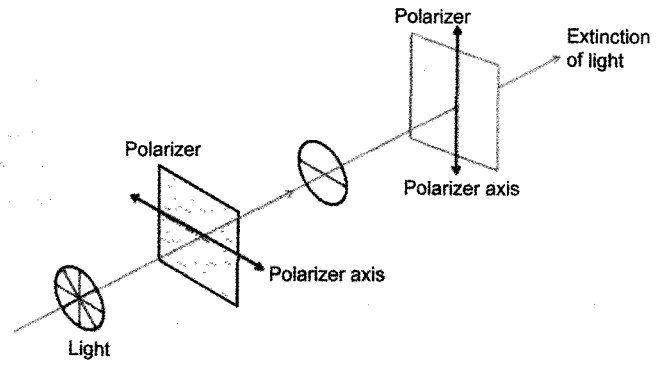


Figure 3. Polarized light from two polarized films.

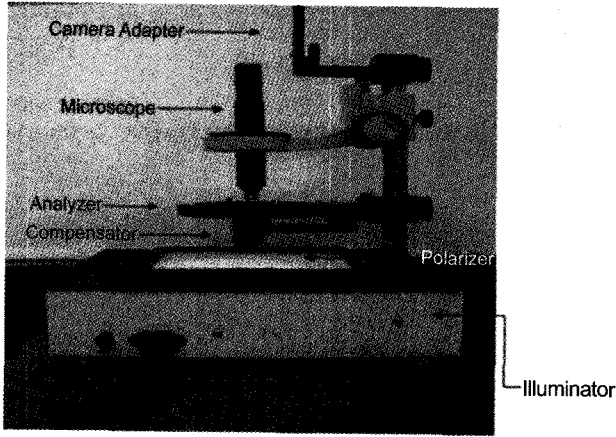


Figure 2. Photograph of photoelasticity equipment, PS-100.

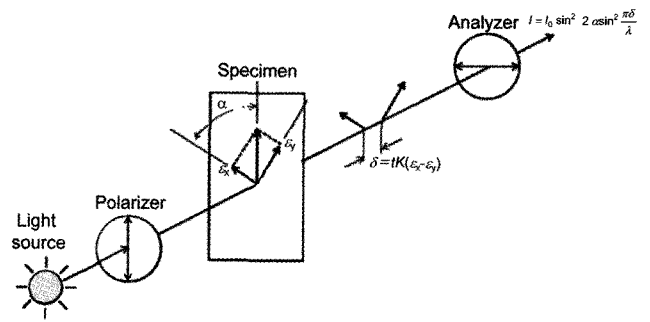


Figure 4. Principle of measurement of retardation.

으로 측정하는 방법에 대해서 연구하였다. 또한 상용 해석 프로그램 (Moldex3D)을 이용하여 사출성형품의 복굴절 패턴이나 지체량 (retardation)과 같은 광학적 특성을 모사하였으며 이를 실험과 비교하였다.

실 험

시편 사출. 잔류응력 측정을 위해 Figure 1과 같이 정사각형의 편광 시편을 사출하였다. 크기는 100 mm×100 mm×3.2 mm(*t*)이며, 수지는 LG-DOW사의 CALIBRE200 10(polycarbonate, PC)을 사용하였다. 사출기는 우진세렉스사의 ELF25-B를 사용하였으며, 금형온도와 수지온도는 각각 60 °C와 290 °C로 하였다.

광탄성 장치. 복굴절을 통한 잔류응력을 평가하기 위해 광탄성 장치인 Strainoptic사의 PS-100을 사용하였다. Figure 2는 광탄성 장치의 모습이다. PS-100의 구성은 다음과 같다. Illuminator에서 빛이 나오고 편광필터를 통과한 빛은 편광된다. 그 위로 편광된 빛에 대하여 수직으로 편광축을 가진 두 번째의 편광판이 있다. 두 편광판 사이에 시편이 놓이게 되며, 보정기(compensator)를 이용하여 복굴절 파장의 지체량을 측정할 수 있다. 현미경을 이용하여 확대관찰이 가능하고, camera adapter에 카메라를 장착하여 실험결과를 촬영할 수 있도록 되어 있다.

잔류응력측정 및 컴퓨터 해석

측정원리. 빛은 전자파의 형태로 진동하며 진행한다. 빛의 진동은

빛의 이동방향과 수직을 이루는데 하나의 광원은 한 종류의 파장형태로 빛을 내뿜으며 모든 평면에 대하여 진동하며 진행한다. 하지만 편광필터를 지나면 오직 한 방향으로 진동하는 빛만 통과하게 되며 통과한 빛은 편광필터의 축과 평행하게 진동한다. 만약 Figure 3과 같이 두 편광필터를 편광축이 서로 수직이 되도록 놓는다면 두 번째 편광필터 다음에는 모든 빛이 차단되어 보이지 않는다.

진공에서의 빛의 속력(*C*)은 3×10^{10} cm/sec이다. 만약 빛이 투명한 물질을 통과할 경우, 그 속력(*V*)은 느려지며, 그 비율 *CV*를 물질의 굴절률이라 한다. 등방성의 물질의 경우 굴절률은 빛의 투과 방향이나 진동방향에 상관없이 일정하다. 그러나 결정성 물질이나 응력이 가해져 비등방성이 된 물질의 경우 굴절률은 진동방향 및 축방향에 따라 다르게 나타나는데 이를 복굴절이라 한다. 특히 물질이 외력을 받거나 내부에 잔류응력이 존재할 경우 복굴절이 다르게 나타나게 되는데 이를 광탄성이라 한다.¹³

Figure 4는 이러한 광탄성을 이용하여 투명한 제품의 잔류응력을 평가하는 원리를 나타내고 있다. 두 개의 편광판(polarizer, analyzer) 사이에 시편이 위치하게 된다. 시편은 잔류응력이 존재하여 축방향에 따라 다른 굴절률을 갖게 되며 이러한 굴절률의 차이는 식 (1)과 같이 변형을 또는 응력의 차이와 비례한다(Rheo-optic Law).¹⁴

$$(n_x - n_y) = K(\epsilon_x - \epsilon_y) \tag{1a}$$

$$(n_x - n_y) = C_B(\sigma_x - \sigma_y) \tag{1b}$$

여기서, n_x 와 n_y 는 *x*와 *y* 방향의 굴절률이고, ϵ_x 와 ϵ_y 는 *x*와 *y* 방향

변형률이고, σ_x 와 σ_y 는 x 와 y 방향의 응력이다.

식 (1a)에서 상수 K 는 “Strain-optical” 상수로 재료의 물성을 나타내며 식 (1b)에서 상수 C_B 는 “Stress-optical” 상수로 Brewster 상수라 하고 단위는 Pa의 역수이다. C_B 의 값은 재료의 종류와 온도에 따라 다르며, 성형 중 받은 이력에도 의존한다. 본 실험에서는 PC 수지의 25 °C에서의 값인 $83 C_B(1 C_B=10^{-12} m^2/N)$ 을 사용하였다.¹⁵ 편광된 빛이 두께 t 그리고 주응력방향 x 와 y 축을 가진 투명한 시편을 통과할 때 빛의 성분은 x 평면과 y 평면으로 각각 진동하는 두 개의 파장으로 나뉜다. 각 축방향에 따른 빛의 속력을 V_x 와 V_y 라 하면 각각의 축방향에 대하여 빛이 통과하는데 걸린 시간은 각각 t/V_x 와 t/V_y 가 되고 두 파 사이의 지체량 δ 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\delta = C \left(\frac{t}{V_x} - \frac{t}{V_y} \right) = t(n_x - n_y) \quad (2)$$

식 (2)에서 식 (1)을 고려하면 식 (3a)와 (3b)와 같이 된다. Analyzer를 통과한 빛의 세기(intensity, I)는 편광판의 축과 시편의 잔류응력의 주응력 축 사이의 각도 α 와 지체량 δ 의 함수로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\delta = tK(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (3a)$$

$$\delta = C_B t(\sigma_x - \sigma_y) \quad (3b)$$

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi\delta}{\lambda} \quad (4)$$

각도 α 를 45°로 고정하여 나타난 복굴절 패턴별 지체량 수치는 Table 1과 같다. 보정기(compensator)를 사용하여 지체량을 측정할 수 있으며 이를 이용하여 잔류응력을 정량적으로 구할 수 있다.¹⁶

측정절차. 광탄성 원리를 이용하여 PS-100의 장치를 기준으로 다음과 같이 잔류응력을 측정할 수 있다.

- a) Analyzer는 회전할 수 있는데 Knob를 조절하여 두 편광판의 축이 서로 수직이 되게 한다(Figure 5(a)).
- b) 두 편광판 사이에 시편을 놓는다(Figure 5(b)).
- c) 잔류응력을 측정할 부분을 표시하고, 표시한 부분이 검게 어두워

질 때까지 시편을 돌린다. 이것은 시편의 주응력 축과 편광판 축을 일치시키는 과정이다(Figure 5(c)).

- d) 편광판 축방향대로 시편에 십자(+)표시를 하고, 시편을 시계방향으로 45° 회전시킨다(Figure 5(d)). 그러면 주응력 방향과 편광 축과는 45°가 된다.
- e) 보정기를 측정할 부분에 일치시킨 후 보정기 없이 보이는 색과 보정기를 통하여 본 색이 같아지도록 보정기의 노즐을 돌리고 값을 읽는다(Figure 5(e)).
- f) 그 위치에서 다시 보정기의 노즐을 돌려, 측정할 부분이 어두운 검은색이 되도록하여 이때의 값을 읽는다(Figure 5(f)).
- g) (e)와 (f)에서 읽은 값의 차(ΔR)를 이용하여, 식 (5)와 같이 지체량을 계산한다. 식 (3b)는 식 (6)과 같이 쓸 수 있어 식 (5)와 (6)을 이용하여 주응력의 차를 계산할 수 있다.

$$\delta_{nm} = \Delta R \times b_{nm} / \text{division} \quad (5)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta_{nm}}{t_{nm} \times C_B} \quad (6)$$

여기서, b 는 보정기의 calibration 상수(본 연구에서 사용한 보정기의 경우 눈금당 5.57 nm)이다.

- h) 각 주응력 성분의 값(σ_1, σ_2)을 알기 위해 측정할 부분의 제1 주응력 혹은 제2 주응력 방향으로 절단하여(slitting) 하나의 주응력

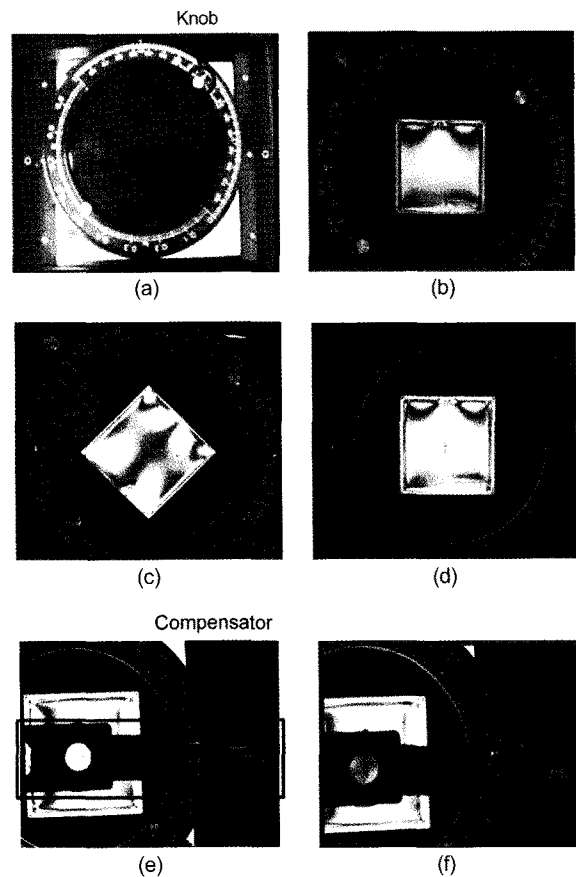


Figure 5. Procedures for measurement of retardation.

Table 1. Color Sequence According to Retardation¹⁵

Color	Retardation δ (nm)	Retardation Wavelength(fringes)	Retardation δ with full-wave plate
Black	0	0	570
Gray	150		450
White-Yellow	250		300
Yellow	300		200
Orange(dark-yellow)	450		100
Red	500		50
Indigo-violet	570	1	0
Blue	600		50
Blue-green	650		100
Green-yellow	750		220
Yellow	850		(-)270
Orange(dark-yellow)	950		400
Red	1050		480
Indigo-violet	1140	2	570
Green	1300		
Green-yellow	1400		
Pink	1500		
Violet	1700	3	
Green	1750		

성분을 해소시킨다. 전단면에 수직으로 작용하는 주응력 성분이 해소된다(Figure 6). 본 연구에서 절단을 위해 기계톱(band saw)을 이용하였다.

- i) 절단 후 다시 광탄성 측정(e~g)을 하여 식 (5)와 (6)을 적용하면 독립된 하나의 주응력 성분이 측정된다.
- j) g에서 구한 주응력 차이값과 i에서 구한 주응력 값을 이용하여 각각의 주응력 값을 구한다.

측정결과 및 분석. Figure 7은 두 편광판을 통해본 복굴절 사진을 보여주고 있고 실험에서 잔류응력을 측정할 위치를 나타내었다. 각 측정 포인트에 따른 잔류응력 측정값은 Figure 8에 나타나 있다. 여기서 측정된 잔류응력은 주응력의 차이($\sigma_1 - \sigma_2$)를 의미한다. 측정 1과 측정 2는 각기 다른 사람이 측정한 것이며 한 측정포인트 당 5회 측정하여 평균값을 이용하였다. 측정 1과 측정 2의 표준편차는 각각 0.04 MPa과 0.08 MPa을 보였는데 이것은 측정자의 시각적인 차이로 인하여 나타난 것이라 판단된다. 측정 1,2의 평균 잔류응력 값은 0.8 MPa 내외를 보이고 있다.

Figure 9는 측정 포인트 2에서 제1 주응력 방향으로 절단하여 제2 주응력을 해소시킨 후 독립된 제1 주응력을 측정하는 과정과 결과를 보여주고 있다. 절단 전에 측정된 잔류응력($\sigma_1 - \sigma_2$)은 0.76 MPa 이고, 절단 후에 측정된 잔류응력($\sigma_1 - \sigma_2$)은 1.09 MPa이다. 그런데 절단 후의 σ_2 는 0이기 때문에 σ_1 은 1.09 MPa가 되고, 식 (7)에 의

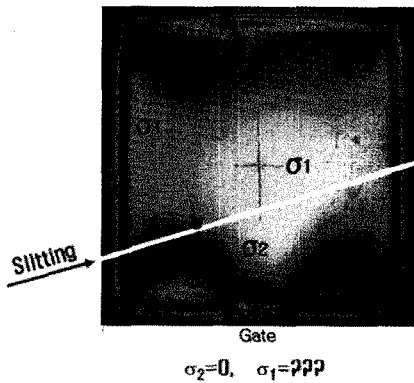


Figure 6. Eliminating one of the principal stresses by slitting at a measurement point.

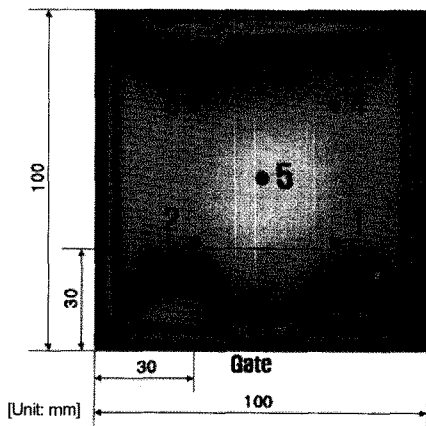


Figure 7. Measurement points of experimental specimen.

해 σ_2 는 0.33 MPa이 된다.

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 \tag{7}$$

시편의 대칭성을 고려하여 게이트에 근처(포인트 2), 중앙(포인트 5), 게이트로부터 먼 부분(포인트 4), 이렇게 세 포인트의 주응력 성분을 알아보았으며 그 결과를 Figure 10에 나타내었다. 측정된 주응력의 크기는 포인트 2와 4가 비슷하게 나왔고, 중앙부 포인트 5의 주응력 값이 가장 높게 측정되었다. 중앙부 포인트 5는 포인트 2와 4부분에 비해 복굴절 색이 밝아 응력이 큼을 알 수 있다. 제2 주응력 측정 방향은 게이트 부를 향하고 있으며 이것은 게이트를 중심으로 방사형으로 충전되는 수지의 흐름이 반영된 결과로 보인다. 제1 주응력의 크기로 볼 때 포인트 5에서 가장 컸고 포인트 4, 포인트 2 순으로 갈수록 작아졌다.

컴퓨터 모사 및 분석. 본 연구에서 사용한 시편에서의 광탄성 특성을 모사하기 위해 사출성형 해석프로그램인 Moldex3D를 사용하였다. Figure 11은 해석을 위한 메쉬를 나타내고 있다. 3차원으로 해석하기 위해 평판 부분에서는 육면체 요소를 사용하였는데 게이트 부는 육면체와 사면체의 3차원 복합 요소를 사용하였다. 해석조건은 시편 사출 성형조건과 동일하게 설정하였다.

Figure 12는 시간에 따른 충전 패턴을 보여 주고 있는데 게이트를 중심으로 방사방향으로 충전되고 있다. Figure 13은 컴퓨터 모사로 나타난 광학 특성을 보여주고 있다. 복굴절, 지체량 및 fringed order가 유사하게 나타났으며 게이트 부에서 높게 나타났고 이를 중심으로 충전패턴과 유사하게 방사형상으로 변해갔다. 또한 시편의 가장자

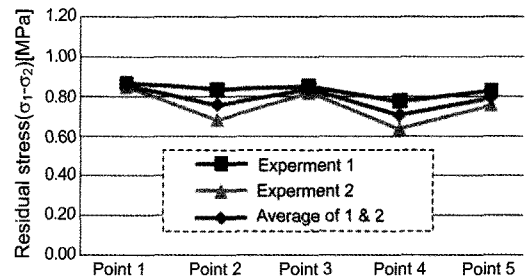


Figure 8. Results of residual stresses for two measurements.

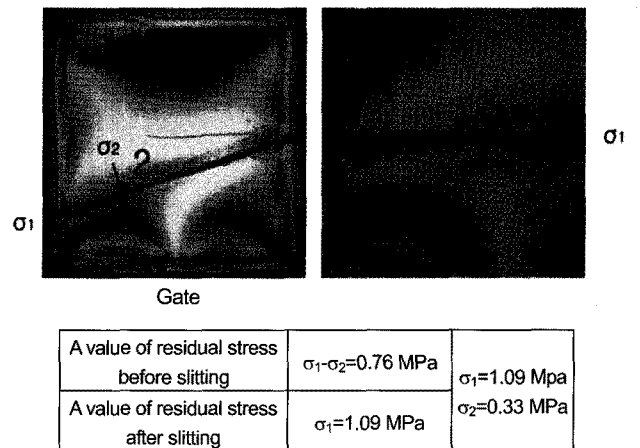


Figure 9. Measurement of residual stresses at point 2 after slitting.

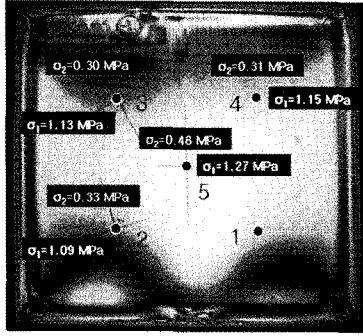


Figure 10. Principal stresses at each measuring point.

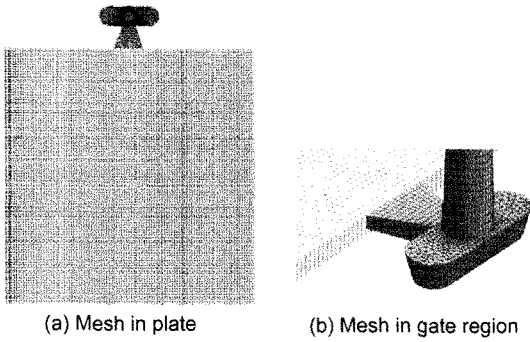


Figure 11. Mesh for computer simulation using Moldex3D.

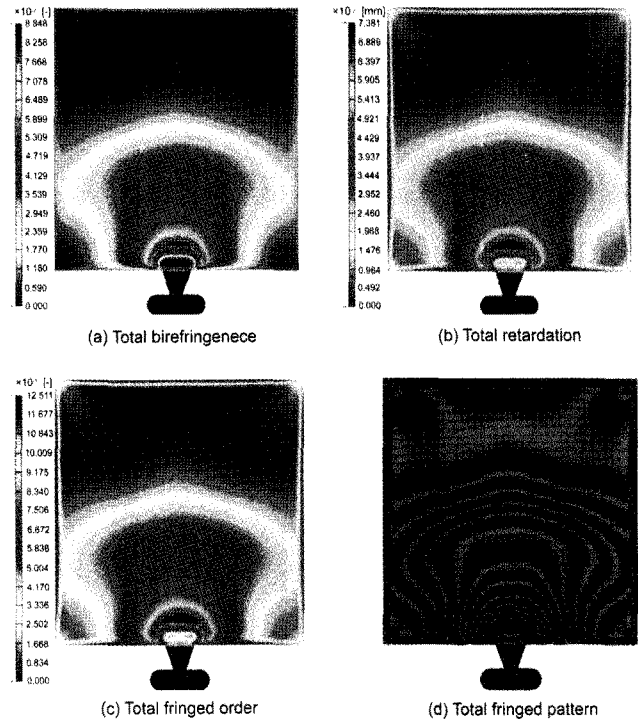


Figure 13. Predicted optical characteristics by computer simulation.

결론

본 연구에서는 광탄성을 이용하여 사출성형품의 잔류응력을 평가하였다. 잔류응력에서 주응력의 차이 뿐만 아니라 각각의 주응력의 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하고 측정하였다. 잔류응력의 주응력 차이는 0.8 MPa 전후로 측정되었고, 제1 주응력은 1.09~1.27 MPa의 분포를 보였고, 제2 주응력은 0.30~0.48 MPa의 분포를 보였다. 평판의 중앙부분이 가장 큰 잔류응력을 보였고 충전 말단 부분이 가장 작은 잔류응력을 보였다. 또한 해석을 통해 사출성형품의 광학적 특성을 예측하였고 이를 실험결과와 비교하였다. 해석에서는 게이트 부의 복굴절이 실험결과보다 높게 나왔지만 게이트를 중심으로 방사형 복굴절 패턴과 충전 말단 부분 및 가장자리의 광학적 패턴의 경향이 일치하였다. 플라스틱 재료는 대형이나 소형제품은 물론 평판제품에까지 매우 다양하게 응용되고 있으며 제품품질 평가를 위한 측정기술의 중요성은 커지고 있다. 본 연구에서 사용한 잔류응력 측정과 광학특성의 예측은 정밀 플라스틱 제품의 품질평가 및 향상에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

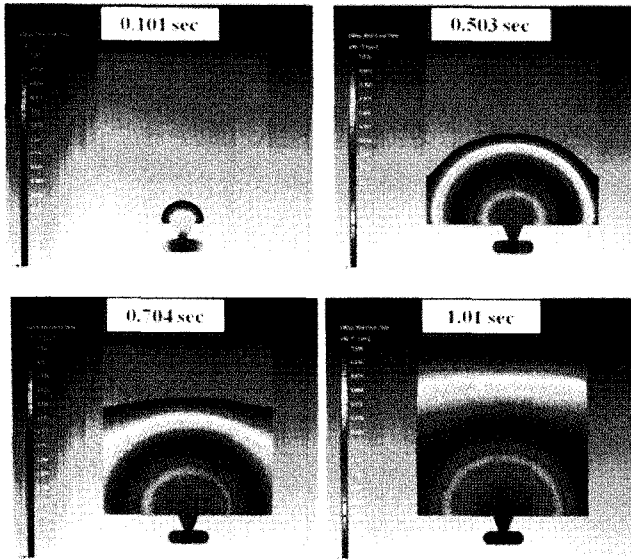


Figure 12. Filling pattern of resin in the cavity.

리를 따라 약간 높은 광학 수치를 나타내고 있는데 이는 가장자리 벽면에서 전단응력을 크게 받아 나타난 것으로 보인다.

Figure 7의 복굴절 사진과 Figure 13(a)의 복굴절 그리고 Figure 13(d)의 fringed pattern을 비교해 보면 해석 결과에는 게이트 부의 복굴절이 다소 과도하게 예측되었다. 그러나 게이트를 중심으로 방사형의 복굴절 패턴 경향이나 제품의 가장자리 및 충전 말단부의 fringed order 패턴은 사진과 해석 결과가 매우 흡사하게 나타났다.

감사의 글: 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다. 시편을 제공해 주신 LG 화학 Tech Center에 감사드립니다.

참고 문헌

1. D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. G. Rosato, *Injection Molding Handbook*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
2. M. A. Kang and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **32**, 501 (2008).

3. C. Liu and L. T. Manzione, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 1 (1996).
4. V. Pitotter, K. Mueller, K. Plewa, R. Ruprecht, and J. Hausselt, *Microsyst. Technol.*, **8**, 387 (2002).
5. S. S. Yang and T. H. Kwon, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, **26**, 340 (2002).
6. M.-Y. Lyu and H.-Y. Kim, *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
7. J. H. Jung and J. R. Youn, *The Korean Journal of Rheology*, **9**, 16 (1997).
8. H. S. Kim, J. G. Kim, and J. W. Lee, *The Korean Journal of Rheology*, **8**, 58 (1996).
9. C. Kim, S. Kim, H. Oh, and J. R. Youn, *Annual Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, 1982~1985 (2005).
10. S.-H. Bang, S.-W. Kim, and E.-S. Lee, *Proceedings of the KSME 2006 Fall Annual Meeting*, 7~10 (2006).
11. H. Aben, L. Ainola, and J. Anton, *Opt. Laser. Eng.*, **33**, 49 (2000).
12. C.-H. Ma, J.-H. Huang, and H. Chen, *Thin Solid Films*, **418**, 73 (2002).
13. *Photoelasticity Principles and Measuring Techniques (IM-100)*, Strainoptic Technologies, Inc.
14. J. L. S. Wales and W. Philippoff, *Rheol. Acta*, **12**, 25 (1973).
15. M.-Y. Lyu, J. S. Hong, J. I. Goo, and K. H. Hwang, *Fall Meeting of the Polymer Society of Korea*, **34**, 101 (2009).
16. *Instructions for using PS-100-SF Polarimeter*, Strainoptics, Inc.