

사출/압축 성형 Center-gated 디스크에서의 잔류 응력과 복굴절의 수치 해석 (II) - 공정조건의 영향 -

이영복* · 권태현† · 윤경환**

(2002년 3월 16일 접수, 2002년 8월 8일 심사완료)

Numerical Analysis of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-gated Disks (II) - Effects of Processing Conditions -

Young Bok Lee, Tai Hun Kwon and Kyunghwan Yoon

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Birefringence(복굴절), Injection Molding(사출성형), Injection/Compression Molding(사출압축성형), Free Volume Theory(자유체적이론), Viscoelasticity(점탄성), Photoviscoelasticity(광점탄성)

Abstract

The accompanying paper, Part I, has presented the physical modeling and basic numerical analysis results of both the flow-induced and thermally-induced residual stress and birefringence in injection molded center-gated disks. The present paper, Part II, has attempted to investigate the effects of various processing conditions of injection/compression molding process on the residual stress and birefringence. The birefringence is significantly affected by injection melt temperature, packing pressure and packing time. Birefringence in the shell layer increases as melt temperature gets lower. The inner peak of birefringence increases with packing time and packing pressure. On the other hand, packing pressure, packing time and mold wall temperature affect the thermally-induced residual stress rather significantly in the shell layer, but insignificantly in the core region. Injection/compression molding has been found to reduce the birefringence in comparison with the conventional injection molding process. In particular, mold closing velocity and initial opening thickness in the compression stage of injection/compression molding process have significant effect on the flow-induced birefringence, but not on the thermal residual stress and the thermally induced birefringence.

1. 서론

본 논문의 (1)에서는 사출성형 center-gated 디스크 형상의 유동과 열에 의한 잔류응력과 복굴절에 관하여 적절한 물리적 모델링과 수치해석 결과를 제시하였다. 한편, 사출/압축 성형공정은 CD, DVD와 다양한 광학 렌즈의 생산하는 정밀생산업계에

의하여 유용하게 사용되어지고 있다. 첨단기술 산업이 급속히 발전함에 따라 정밀 광학 제품의 요구치는 갈수록 높아지고 따라서 잔류응력과 복굴절의 제어와 관리는 이런 경쟁적인 산업에서 더욱 중요해 지고 있다. 이러한 관점에서 사출성형 및 사출/압축 성형에서 최종제품의 복굴절과 잔류응력에 대한 공정조건의 영향은 상당히 중요하다. 따라서 본 연구에서는 사출 및 사출/압축 성형공정 조건의 영향을 연구함으로써 복굴절과 잔류응력의 제어인자를 구하고자 노력하였다.

잔류응력과 복굴절에 대한 이론적 수치적 연구는 많이 진행되어 왔다. 하지만 많은 연구들이 유동에 의한 부분 또는 열에 의한 부분에 한정되었

* 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : thkwon@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2843 FAX : (054)279-5899

† 포항공과대학교 기계공학과

** 회원, 단국대학교 기계공학과

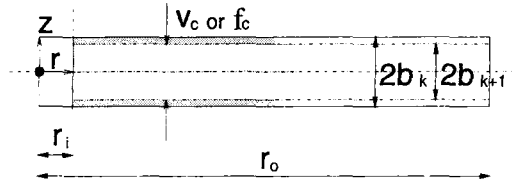


Fig. 1 Schematic diagram of mold cavity for compression stage. (r and z are the coordinate representing the radial and thickness direction, r_i and r_o are inner radius and outer radius of a center-gated disk, V_c and f_c are closing velocity and closing force, and b_k , b_{k+1} are half-gap thickness at current and next step, respectively)

다. Flaman^(1,2)과 Chen 등^(3,4)은 비선형 Leonov 모델을 사용하여 사출성형공정 조건의 영향을 알고자 하였다. 권태현 등⁽⁵⁻⁸⁾ 또한 center-gated 디스크 형상에서 Leonov 모델을 사용하여 유동에 의한 복굴절을 연구하여 보압 시간, 수지 온도, 금형 온도, 유량 등등에 대한 복굴절의 영향을 논의하였다. 특별히 권태현 등^(6,8)은 사출/압축 성형이 사출성형에 비하여 유동에 의한 복굴절을 감소시킴으로서 정밀 광학 제품 생산에 더 적당하다고 추천하였다. 최근에 사출성형품에서의 열적 잔류응력에 대한 많은 이론적 연구⁽⁹⁻¹¹⁾가 진행되어 왔다. 하지만 대부분의 연구는 열적잔류응력의 예측에 한정되어 있어 잔류응력을 제어하는 공정조건의 연구는 최종제품의 치수정밀도를 향상시키는데 큰 가치가 있을 것이다.

최근에 여러가지 발전에도 불구하고 사출/압축 성형으로 인한 열적 잔류응력과 복굴절의 분포가 아직까지 분명히 인식되지 못하고 있다. 물론, 사출/압축 성형에서 전체 잔류응력과 복굴절의 예측과 또는 감소시키는 것은 상당히 중요하다. 이러한 관점에서 본 연구는 (1)에서 개발된 수치해석 시스템을 사출 또는 사출/압축성형의 다양한 공정 조건에 대한 영향을 연구하였다.

2. 이론

2.1 사출/압축 성형공정

사출성형공정과 관계된 이론에 대해서는 본 논문 (1)에 자세히 제시되어 있다. 따라서 사출성형으로 압축성형에 대한 차이점만 여기서 언급하고자 한다.

사출/압축성형공정은 보통 다음의 과정으로 작동한다. 첫째, 캐비티 속으로 들어가는 양이 최종제품의 부피에 도달할 때까지 열려있는 금형 캐비티 속으로 용융수지를 채우는 사출과정, 금형이 닫히면서 용융수지가 캐비티 내부를 완전히 채우는 압축과정, 그리고 용융 수지의 수축을 보상하

기 위하여 보압이 가해지는 보압과정으로 이루어진다.

본 논문 (1)에서 제시된 충전과 보압과정에 적용된 지배방정식들은 압축성형과정에서도 동일한 방법으로 적용할 수 있다. 하지만 압축성형동안 금형단합속도가 Fig. 1처럼 도입되었으며, 유동량 (Q) 과 금형단합속도(V_c) 는 다음과 같이 관계한다

$$Q = \pi (r_{fill}^2 - r_i^2) V_c \quad (1)$$

여기서 r_i 는 안쪽 반경이며 r_{fill} 는 현재의 유동선단의 반경이다. 식 (1)의 유동량에 대한 새로운 식으로 압축과정에 대한 수치해석은 권태현 등^(6,8)에 의한 것과 동일하다. 다음의 관계에 의해 유동선단과 두께변화, 시간간격을 결정하고 갱신할 수 있다.

$$\Delta t_{adv} = \frac{2b_k}{V_c} \left[1 - \left(\frac{r_k}{r_{k+1}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$b_{k+1} = b_k - \frac{V_c \Delta t_{adv}}{2} \quad (3)$$

여기서 Δt_{adv} 현재 유동선에서의 유동선단전진에 필요한 시간이며, r_k , r_{k+1} 은 각각 전시간 단계와 현재에서의 유동선단의 반경 위치이며, b_k , b_{k+1} 는 전시간 단계와 현재에서의 두께의 절반을 표시한다.

압축성형과정에서도 열적잔류응력과 복굴절에 관하여는 본 논문 (1)에서 제시된 수치적 모델링과 알고리즘은 고화된 영역에 유효하다. 그러므로 압축성형에 대한 상세한 수치적 모델링과 알고리즘을 생략한다. 이러한 부분에 대하여는 권태현 등^(6,8)과 본 논문의 (1)을 참조할 수 있다.

압축과정의 제어에 대해서는 금형단합은 기본적으로 두 가지 방법에 의해 달성할 수 있다. 금형단합속도를 제어하거나 금형단합력을 제어하는 것이다. 물론 최상의 광학특징과 잔류응력을 생산하기 위하여 두 가지 제어를 병합하여 멀티 스텝 제어를 시도해 볼 수도 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 사출성형조건에의 영향

이 부분에서는 본 논문 (1)에서 개발된 시스템을 사용하여 사출성형된 center-gated 디스크에서의 복굴절과 잔류응력에 대한 사출성형조건에의 영향을 조사하였다. 다양한 사출성형조건에의 영향을 연구하기 위하여 기준으로서 다음의 공정조건을 선택하였다. 23.8 cm^3/sec 의 충전과정동안 일정한 유량, 220 $^{\circ}C$ 의 사출온도, 40 $^{\circ}C$ 의 금형온도, 16.5 MPa 의 보압 압력, 6 sec 의 보압시간.

3.1.1 보압시간의 영향

Fig. 2와 3은 동일한 16.5 MPa 의 보압력이지만

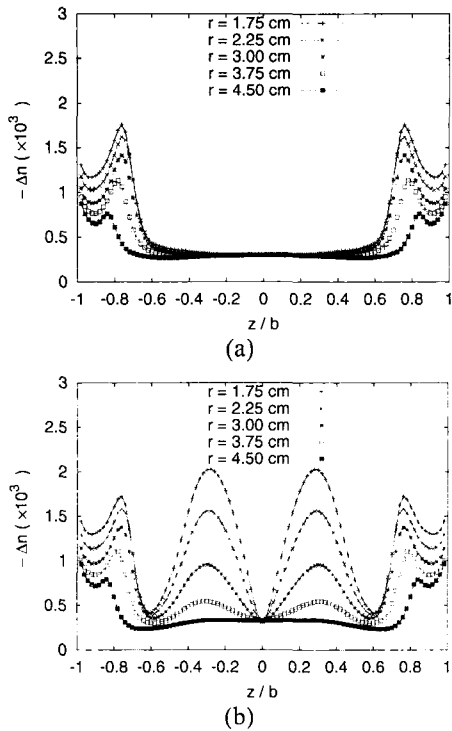


Fig. 2 Effect of packing time on birefringence at various radial locations at the equilibrated state (a) packing time of 1 sec (at $t = 18.64$ sec); (b) packing time of 4 sec (at $t = 28.44$ sec) (Note that Δn represents the residual birefringence in the r - z plane)

보압시간이 각각 1초와 4초인 경우에 복굴절과 열에 의한 잔류응력의 분포이다. Fig. 2에서 보듯이 보압 시간이 4초인 경우는 분명히 안쪽의 정점이 보이지만 1초인 경우에는 안쪽의 정점이 보이지 않는다. 하지만 표면 부근의 복굴절의 모양과 크기는 보압 시간에 따라 거의 변화가 없다. 이는 보압과정이 시작되기 전에 이며 표면 부근에서는 온도가 유리전이온도이하로 떨어져 유동에 의한 응력이 굳게 되어 표면 부근의 복굴절이 크게 변화하지 않게 된다. 하지만 반대로 보압 과정동안 캐비티 내부로의 추가 유동에 의해 고분자의 배양이 생겨나 이로 인해 복굴절의 안쪽의 정점을 발생시키나 중심에서는 충분히 높은 온도로 인하여 이완화가 가능하다. 보압시간이 증가할수록 캐비티 내부로의 더 많은 추가 유동과 온도 하강으로 방향성의 이완화를 막으며 이로 인하여 더욱 큰 안쪽의 정점이 생기게 된다. 이러한 효과는 이미 전 연구^(5,7)에 의해 관찰된 결과이다.

중심과 표면부근에서의 복굴절의 증가는 열에 의한 복굴절 때문임을 밝혀둔다. 그런 까닭에 보압시간의 증가는 열적 복굴절에 크게 영향을 끼치지 않는다고 말할 수 있다. 이러한 사실은 열적 잔류응력의 관찰로부터 확인할 수 있다.

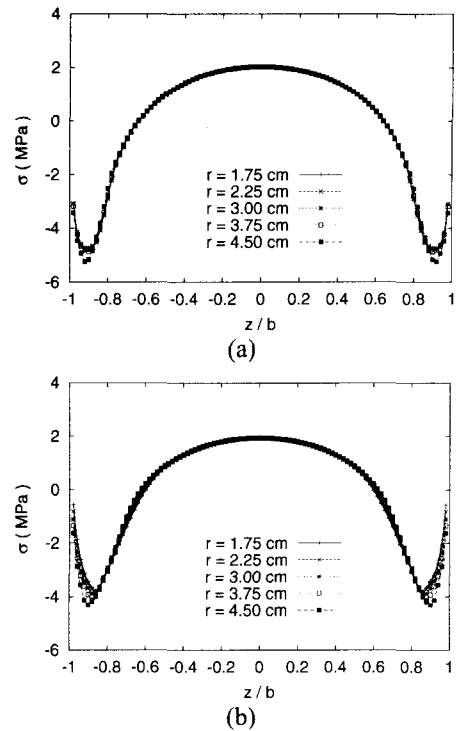


Fig. 3 Effect of packing time on thermal residual stresses at various radial locations at the equilibrated state (a) packing time of 1 sec (at $t = 18.64$ sec); (b) packing time of 4 sec (at $t = 28.44$ sec) (Note that σ represents the lateral residual stress)

한편 Fig. 3에서 보듯이 보압시간이 증가함에 따라 구속냉각시간이 길어져 표면에서의 잔류응력이 증가하였다. 그러나 중심에서의 잔류응력은 보압 시간에 따라 변화하지 않았다. 이는 중심부분의 잔류응력이 보압과정 이후에 생겨나기 때문이다(이러한 사실은 논문 (1)의 Fig. 13(a)에서 확인할 수 있다). Center-gated 디스크의 압력이 영이 되면 추가 유동과 구속냉각이 유효하지 않음을 주지하여야 한다. 따라서 보압 시간이 4초 이상 증가하더라도 열적잔류응력에는 거의 변화가 없을 것이다. 이것은 본 논문 (1)의 Fig. 13에서 수직응력이 3.5 초 정도에 영이 되기 때문에 Fig. 3의 보압시간 4초의 결과와 본 논문 (1)의 Fig. 13(b)의 보압시간 5초의 결과를 비교함으로써 확인할 수 있다.

3.1.2 보압력의 영향

Fig. 4와 5는 여러 가지 보압력(8.25 MPa, 33.0 MPa)에 따른 복굴절과 열적잔류응력의 분포를 보여주고 있다. Fig. 4의 복굴절의 분포에서 보압 압력이 증가함에 따라 안쪽의 정점이 증가함을 볼 수 있다. 이는 보압 압력의 증가는 보압과정동안 더 많은 추가 유동으로 인한 더 큰 속도구배를 발생시켜서 안쪽의 정점의 증가를 일으킨다. 게다가

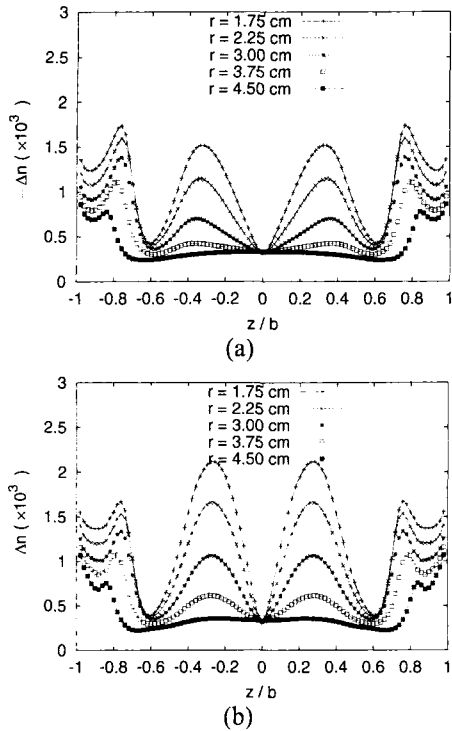


Fig. 4 Effect of packing pressure on birefringence at various radial locations at the equilibrated state (a) packing pressure of 8.25 MPa (at $t=34.66$ sec); (b) packing pressure of 33.0 MPa (at $t=44.73$ sec)

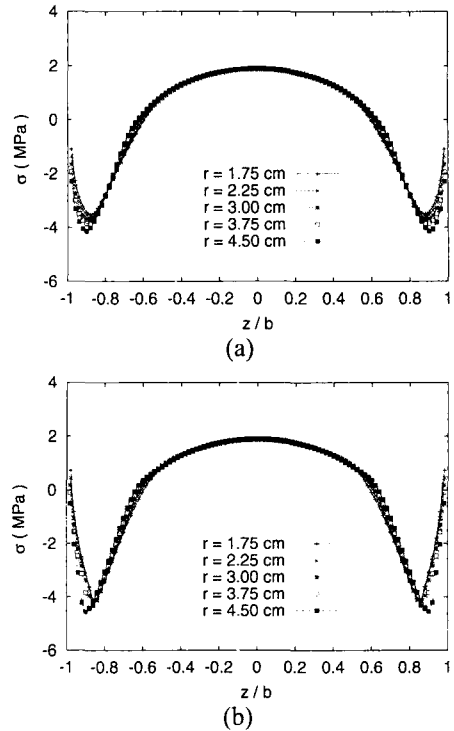


Fig. 5 Effect of packing pressure on residual stress at various radial locations at the equilibrated state (a) packing pressure of 8.25 MPa (at $t=34.66$ sec); (b) packing pressure of 33.0 MPa (at $t=44.73$ sec)

표면에서의 복굴절의 크기도 압력의 증가함에 따라 약간 증가하였다. Fig. 5에서 지적하듯이 표면에서의 열적잔류응력은 보압 압력의 증가에 따라 증가하나 중심부분의 인장응력은 보압 압력이 증가하더라도 거의 변화가 없었다. Fig. 6에서 보듯이 보압 압력이 증가함에 따라 캐비티의 압력이 영으로 떨어지는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이것은 각각의 사출성형공정에서 같은 보압시간이라고 할지라도 보압 압력이 증가함에 따라 구속시간이 길어짐을 의미한다. 또한 이러한 구속시간의 증가로 인하여 표면에서의 잔류응력이 증가하게 되었다. 또한 각각의 지점에서 표면에서의 잔류응력의 분포의 약간의 차이는 구속시간의 차이에서 생기는 것을 언급한다. 반지름이 증가할수록 압력이 더 빨리 떨어지고 따라서 반지름이 증가할수록 구속시간이 줄어들게 된다. 이것은 Fig. 3과 5에서 보듯이 짧은 구속시간이 표면에서 더 낮은 응력을 가짐을 알 수 있다.

이러한 관점에서 보압시간과 보압 압력이 표면 부근의 잔류응력과 복굴절에 끼치는 영향에 대하여는 구속시간의 개념으로 조직적으로 설명되어질 수 있다.

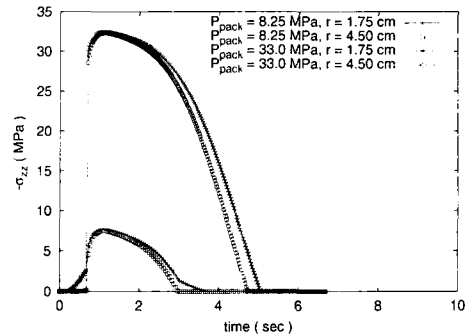


Fig. 6 Predicted normal stress($-\sigma_{zz}$) versus time at the radius of 1.75 cm and 4.50 cm with packing pressure of 8.25 MPa and packing pressure of 33.0 MPa.

3.1.3 사출온도의 영향

Fig. 7에서는 240 °C 와 200 °C 의 사출온도에서의 각각의 반지름에서의 복굴절의 분포를 나타내고 있다. 복굴절의 분포는 사출온도에 민감하게 나타났다. 낮은 사출온도에서는 높은 바깥쪽 정점이 나타났으나 안쪽의 정점은 크게 변화가 없었다. 앞에서 언급한대로 충전과정동안 유동에 의한 변형에 의해 생겨나고 이후의 중간 영역에서는 이완화하며 표면에서는 굳어지게 된다. 사출온도가 높

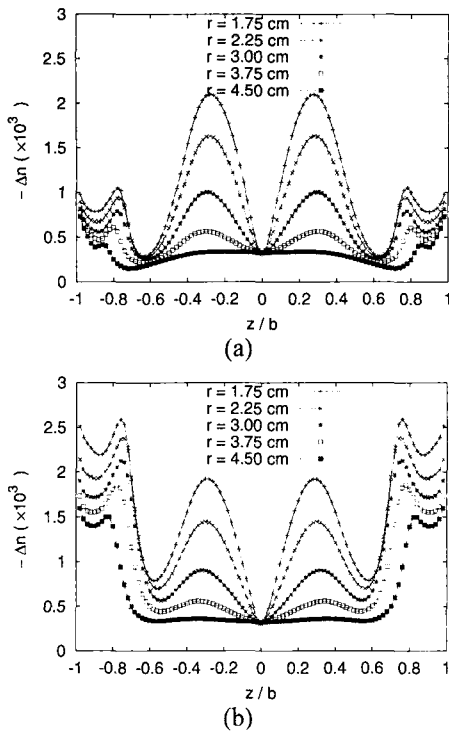


Fig. 7 Effect of melt temperature on birefringence at various radial locations at the equilibrated state (a) melt temperature of 240 °C (at $t=35.73$ sec); (b) melt temperature of 200 °C (at $t=33.34$ sec)

을수록 주어진 유량에서 더 작은 전단응력과 수직 응력차가 생겨나고 또한 더욱 빠른 이완화 과정을 거치면서 유동에 의한 바깥쪽 정점은 사출온도가 높아지면서 감소하게 된다.

한편, 중심면에서의 복굴절의 크기가 Fig. 7(a)와 (b)가 거의 동일하여 사출온도가 열에 의한 복굴절에는 크게 영향을 끼치지 않음을 보여준다. 열에 의한 부분과 유동에 의한 복굴절을 따로 보여주지 않고 단지 전체 복굴절을 보여주기로 하였다. 같은 맥락에서 사출온도에 대한 열적 잔류응력의 영향은 크지 않아 Fig. 없이 단지 관찰을 언급하였다.

3.1.4 금형온도의 영향

금형온도가 복굴절에 미치는 영향은 거의 없어 관련된 Fig.은 생략하였다. 하지만 전체적인 크기가 금형 온도가 낮아질 때 약간 커지는 경향을 보였으며 특히 표면에서의 복굴절이 금형온도가 낮아질 때 충전과정동안 더 적게 이완화 되어 약간 더 큰 값을 보였다.

Fig. 8(a)에서 보듯이 60 °C 와 20 °C 의 각각 다른 금형온도에서의 잔류응력의 분포를 보여준다. 사출온도의 영향과는 반대로 금형 온도가 감소할 때 잔류응력은 모양은 변화 없지만 크기는 굉장히

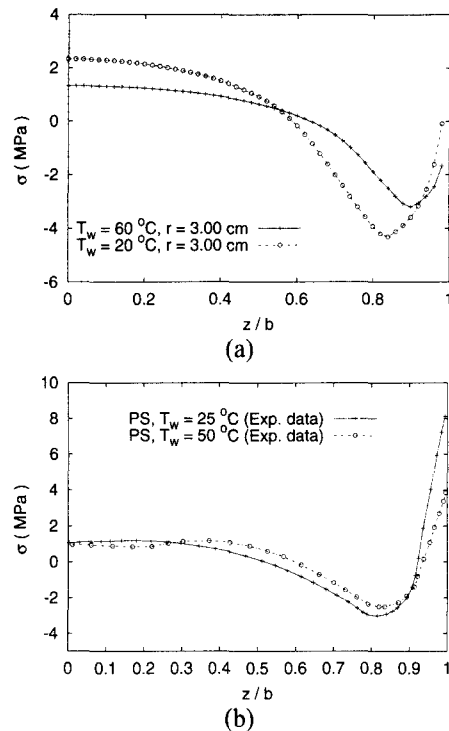


Fig. 8 Effect of mold wall temperature on residual stresses (a) numerical results at the radius of 3.00 cm with T_w of 60 °C and 20 °C (b) experimental data duplicated from Hastenberg et al.⁽¹⁰⁾

증가하였다. 좀더 자세히 서술하면 중심에서 인장 응력이 증가하였고 중간 영역에서도 압축응력의 크기가 증가하며 표면 부근의 셀 레이어에서도 압축 응력에서 인장응력방향으로 증가하였다.

잔류응력에 대한 금형온도의 영향은 Hastenberg 등⁽¹²⁾에 의해 관찰된 실험결과와 일치하는 것으로 보인다. Fig. 8(b)는 Hastenberg 등⁽¹²⁾에 의해 관찰된 폴리스티렌 평판에 대하여 금형온도에 따른 잔류응력 분포를 복제한 것이다. Fig. 8(a)의 수치적 결과와 실험적 결과인 Fig. 8(b)를 비교하면 높은 금형온도에서 낮은 금형온도로의 잔류응력 분포의 변화에 있어 유사한 경향성을 보여주고 있다. 가장 작은 잔류응력(즉 가장 큰 압축 응력)의 위치가 중심쪽으로 이동하는 것을 실험적으로나 수치적으로 관찰할 수 있는 것은 흥미롭다.

이 시점에서, 높은 보압 압력과 낮은 금형 온도의 경우 사이의 표면에서의 인장 응력의 물리적 거동을 비교하는 것은 주목할 만 하다. 고압이 가해진 경우에는 구속시간의 연장으로 인하여 표면의 인장 응력이 유발된 반면에 낮은 금형온도의 경우 응력완화의 방해로 인하여 응력이 보다 먼저 굳어져 생겨나게 된다.

다양한 사출성형공정에 대한 수치해석 결과 금형온도는 잔류응력에 영향을 끼치는 가장 중요한

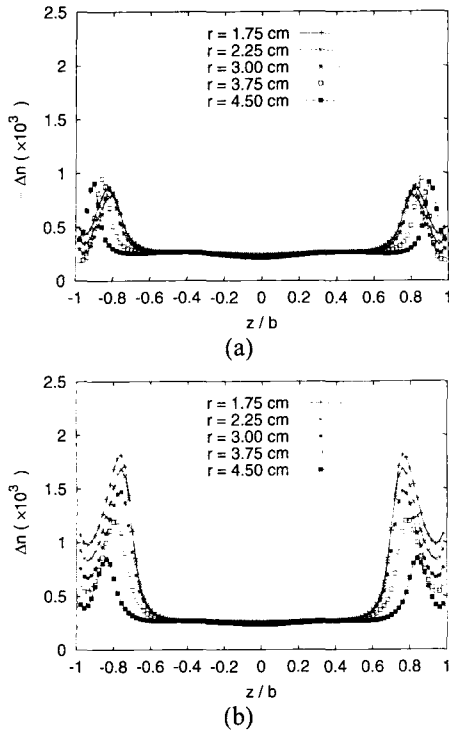


Fig. 9 Effect of compression stage on birefringence at various radial locations at the equilibrated state (a) injection/compression (at $t=15.37$ sec); (b) injection only (at $t=17.58$ sec)

요소중의 하나이다. 잔류응력을 제어하기 위한 목적에서 실험적으로나 수치적 방법으로 표면의 온도를 정확히 측정 또는 계산하는 것이 바람직하다.

3.2 사출/압축 성형 공정의 영향

이 부분에서는 압축과정의 영향과 사출/압축 성형에서 관계된 공정조건의 영향을 연구하였다. 충전과정에 대한 공정조건은 이전 장에서 제시된 것과 동일하며 다른 공정조건은 각각의 경우에 대하여 설명되어 있다.

3.2.1 압축과정의 영향

사출/압축과정에서 압축과정의 영향을 고려하기 위하여 의도적으로 보압과정을 제외하였다(즉 영의 보압 압력이 가해졌다). 사출/압축 성형공정조건은 다음과 같다. 3.25 mm의 초기 두께(2b)와 23.8 cm³/sec의 유량(Q)으로 유동 선단이 반지름 4.0 cm에 도달할 때까지 부분적으로 채워진 후에 1.0 cm/sec의 금형단속도로 금형이 완전히 닫힐 때까지 압축과정이 수행되었다. Fig. 9와 10은 사출/압축성형과 사출에 의한 복굴절과 열적잔류응력을 비교하였다.

Fig. 9에서 보듯이 압축과정을 도입함으로써 표

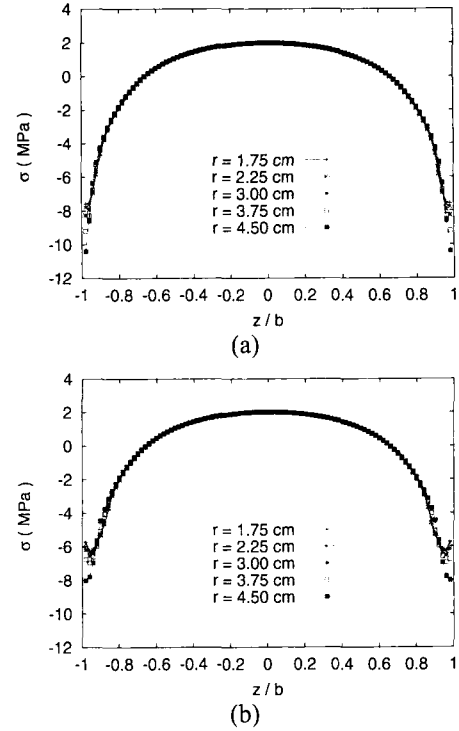


Fig. 10 Effect of compression stage on residual stresses at the radius of 3.00 cm at the equilibrated state (a) injection/compression (at $t=15.37$ sec); (b) injection only (at $t=17.58$ sec)

면의 복굴절의 값이 상당히 줄어들었다. 특별히 사출성형의 복굴절의 정점은 반지름이 감소함에 따라 커지지만, 사출/압축공정의 복굴절의 정점은 다양한 반지름 지점에서 전체적으로 동일한 값을 지니고 있었다. 이러한 유동에 의한 표면에서의 복굴절의 감소는 전의 권태현 등⁽⁶⁾에 의해 이미 상세하게 설명되어져 있다. 이러한 작은 반경에서 복굴절의 감소이유는 속도가 반지름에 반비례하는 사출성형의 충전과정과는 반대로 압축과정에서는 속도가 반지름에 비례하기 때문이다. 대조적으로 유동에 의한 부분과는 반대로 열에 의한 복굴절의 영향은 중심에서의 복굴절의 값에 의해 나타났듯이 크게 영향을 미치지 않았다.

동일하게 Fig. 10에서 보듯이 잔류응력의 분포에 있어서도 표면 근처를 제외하고는 사출성형과 사출/압축성형의 결과가 거의 동일하게 보인다. 사출/압축의 경우 잔류응력의 분포가 본 논문 (1)의 Fig. 7의 자유냉각의 결과와 아주 유사하게 보이는 것에 주목해야 한다. 이러한 경향은 다음과 같이 설명되어진다. 일반적으로 보압과정이 없는 경우 고분자 재료를 아주 짧은 시간 구속시간을 거친다 그러므로 이런 경우에는 사출 또는 사출/압축공정은 충전과정이라는 비교적 짧은 시간동안 구속냉각을 거치고 충전 후부터 상대적으로 훨씬 오랫동안

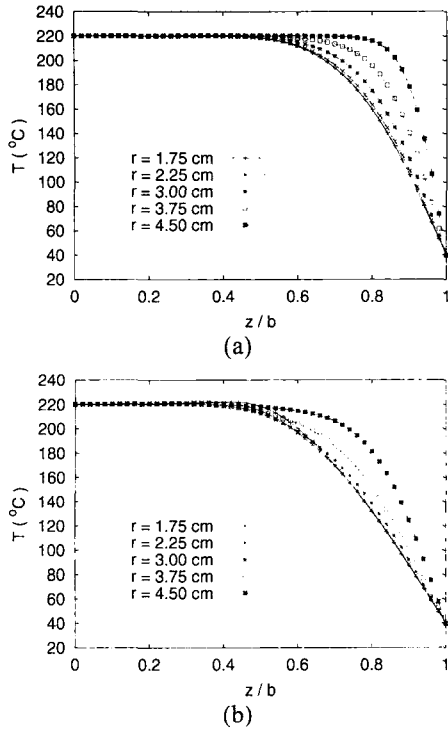


Fig. 11 Gapwise distribution of temperature at the end of cavity filling process (a) injection/compression (at $t = 0.813 \text{ sec}$); (b) injection only (at $t = 0.678 \text{ sec}$)

안 자유냉각과정을 거치게 된다. 이러한 이유로 인하여 보압과정이 없는 경우의 사출 또는 사출/압축 성형의 잔류응력의 분포가 자유냉각의 결과와 비슷하게 된다.

한편, Fig. 11에서 보듯이 사출/압축성형에서 충전과정이 끝났을 때의 표면부근의 온도가 사출 만으로의 경우보다 더 높음을 볼 수 있다. 사출/압축 과정에 의한 성형 제품이 높은 온도에서 자유냉각을 거치게 때문에 사출/압축에 의한 표면부근의 잔류응력이 사출 만으로의 경우보다 더 압축응력이 크게 된다. 결과적으로 후충전 동안의 자유냉각 조건은 사출성형의 경우보다 사출/압축 성형이 좀 더 우세하다고 볼 수 있다.

3.2.2 금형닫힘속도의 영향

사출/압축성형공정에서 압축과정동안 금형닫힘속도는 유동장과 고분자 재료의 변형에 큰 영향을 끼친다. 금형닫힘속도가 증가할 때 속도와 속도구배 또한 증가하게 된다. Fig. 12는 금형닫힘속도의 복굴절에 대한 영향을 보여주고 있다. 이 경우의 공정조건은 다음과 같다. $23.8 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 의 유량과 3.25 mm 의 초기 두께(2b)로써 유동 선단이 반지름 4.0 cm 에 도달할 때까지 부분적으로 채워진 후에 2.0 cm/sec 과 0.5 cm/sec 의 두 가지 다른 속도로 금형닫힘속도로 금형이 완전히 닫힐 때까지

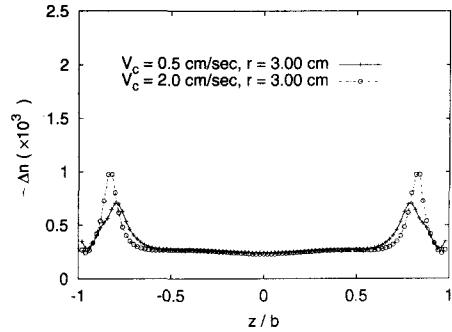


Fig. 12 Effect of mold closing velocity on birefringence at the radius of 3.00 cm at the equilibrated state with closing velocity of 2.0 cm/sec and 0.5 cm/sec

압축과정이 수행되었다. 이미 Fig. 9(a)에서 금형닫힘속도 1.0 cm/sec 에 대한 결과는 보여주었다. 닫힘속도가 증가할수록 표면에서의 복굴절이 증가하고 있는데 이는 닫힘속도의 증가로 인하여 캐비티 내부의 속도장의 증가에 따른 고분자 체인의 변형량이 증가하기 때문이다. 하지만 대조적으로 열에 의한 복굴절은 중심과 중간 영역에서 크게 영향을 받지 않았다. 이는 동일한 영역에서 잔류응력에 대해서도 동일하다. 한편, 금형닫힘속도는 표면부근의 열적잔류응력에 대하여 약간의 영향을 가지고 있는 것으로 판명되었다. 이에 대한 Fig.은 생략하지만 표면부근의 압축응력의 크기가 금형닫힘속도가 증가할수록 커졌고 이는 Fig. 10(b)의 결과와 비교하여 Fig. 10(a)의 결과를 해석할 때와 같은 방식으로 설명되어 질 수 있다. 즉 빠른 닫힘속도는 표면에서 물질을 높은 상태로 유지하고 이는 높은 온도에서 자유냉각을 거치는 경우와 유사하여 압축응력의 증가로 이어진다.

3.2.3 압축시작점의 영향

사출/압축성형에서 압축과정의 시작점은 복굴절과 잔류응력에 있어 또한 중요한 역할을 한다. Fig. 13은 캐비티가 반경 (a) $r=4.50 \text{ cm}$ (초기 두께 2.56 mm)와 (b) $r=3.50 \text{ cm}$ (초기 두께 4.26 mm)까지 각각 채운 후에 압축과정을 수행하였다. 이 때 $23.8 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 의 유량과 1.0 cm/sec 일정한 닫힘속도를 적용하였다. 이 결과로부터 넓은 두께를 여는 것은 복굴절을 감소시키는 결과를 보였다. 이는 초기 캐비티의 두께가 두꺼우면 충전과정동안 속도구배가 줄어들고 압축과정이 더욱 우세하게 된다. 일반적으로 말하자면 두꺼운 캐비티가 더 작은 유동에 의한 응력을 유발하게 된다. 하지만 이후의 압축과정은 반지름이 큰 부분에서 높은 속도와 속도구배를 가지면서 이 지점에서 높은 복굴절을 유발하게 된다. 사출/압축성형은 사출 만의 성형보다 유동을 균일하게 하며 표면 부근의 온도를 충전과정 직후에 더욱 높임으로 인하여 이 부분에서 복굴절의 분포를 감소시키고 균일하게 한다.

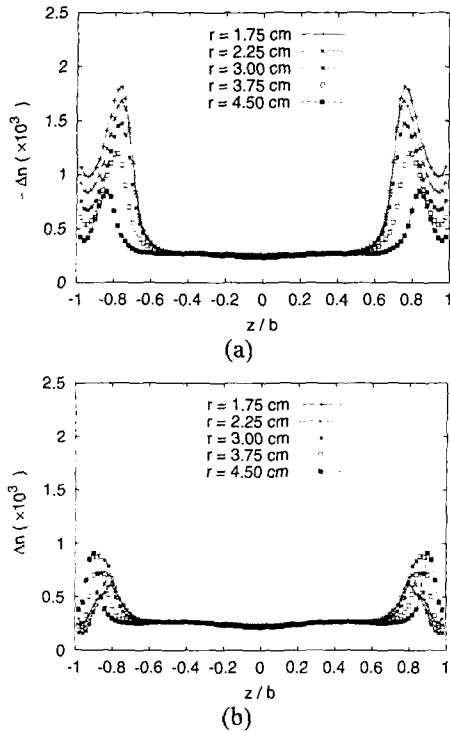


Fig. 13 Effect of starting position of compression stage on birefringence at various radial locations at the equilibrated state (a) compression start at the radius of 4.5 cm (at $t = 15.28$ sec); (b) compression start at the radius of 3.5 cm (at $t = 15.46$ sec)

잔류응력에 있어서는 보압과정 시작 위치에 크게 영향을 받지 않았다. 초기의 두께가 증가할수록 표면에서의 압축 응력이 약간 증가하였는데 이러한 경향은 전 부분에서와 같이 동일한 방식으로 설명될 수 있다.

3.2.4. 보압과정의 영향

사출성형과 같이 수축을 보상하기 위하여 압축 과정 후에 보압과정이 뒤따르게 된다. 본 논문 (1)에서 사출성형에서의 보압과정은 복굴절의 분포에서 안쪽의 정점을 유발하고 잔류응력에 있어서는 표면부근에서 오목한 압축응력을 생겨나게 하였다. 사출/압축의 성형조건으로는 3.25 mm의 초기 두께(2b)와 23.8 cm³/sec의 유동으로 반지름 4.0 cm을 채운 후에 1.0 cm/sec의 닫힘속도로 2.01 mm의 최종두께까지 급형을 단아서 캐비티를 채운다. 이후 16.5 MPa의 보압과 6.0 sec의 보압시간을 가하여 보압과정을 수행하였다.

보압과정을 포함한 사출/압축성형의 복굴절과 잔류응력의 분포가 Fig. 14에 제시되었다. 무엇보다도 복굴절에 관한 Fig. 9(a) 또는 9(b)와 같이 보압과정이 없는 경우의 결과와는 상당히 다른 결과를 볼 수 있다. 두번째는 복굴절의 안쪽 정점의

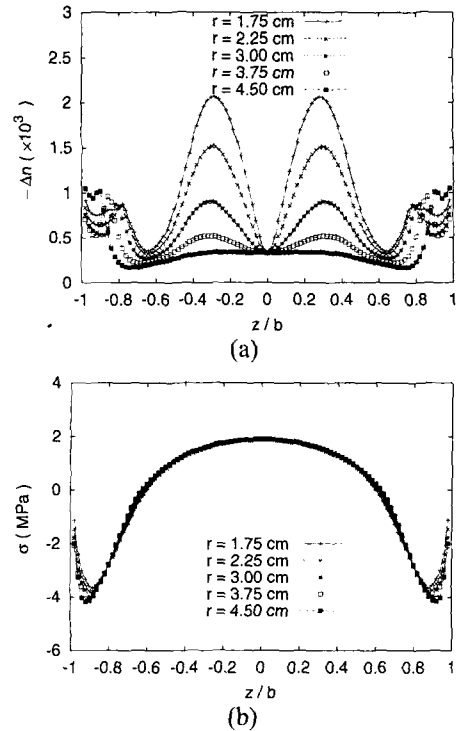


Fig. 14 Effect of packing stage in injection/compression molding on (a) birefringence (b) thermal residual stresses at various radial locations at the equilibrated state (at $t = 34.43$ sec, Packing pressure = 16.5 MPa)

모양과 크기는 본 논문 (1)에서 제시된 Fig. 15(b)의 동일한 보압시간과 보압 압력의 경우와 거의 동일하다.

최종적으로 잔류응력 분포에 대한 보압과정의 영향을 언급하고자 한다. 중심에서는 Fig. 10의 일반적으로 포물선의 인장응력을 가지며 표면부근에서는 보압과정을 포함하는 사출성형의 결과(본 논문 (1)의 Fig. 13(b)를 참조)와 흡사한 오목한 압축응력을 가진다. Fig. 14(b)의 표면 부근의 오목한 잔류응력의 형상은 비교적 긴 시간의 구속시간에 의해 응력 이완화를 방해하여 얻어진 결과이다.

위에서 언급했듯이 보압과정은 사출과 사출/압축성형에서 복굴절과 잔류응력에 흥미로운 영향을 끼치며 이는 구속시간과 응력 이완화 현상으로 조직적으로 설명되어 질 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 center-gated 디스크 성형에서 복굴절과 잔류응력에 대한 사출 및 사출/압축 성형 공정의 다양한 공정조건의 영향을 조사하기 위하여 광범위한 수치해석 연구를 수행하였다. 본 연구에 의한 결과는 다음과 같이 정리되어 진다.

(1) 사출온도, 보압시간, 보압 압력은 복굴절에 크게 영향을 미치는 공정조건이다. 사출온도가 높을수록 복굴절이 감소하였다. 또한 보압시간이나 보압압력이 높아질수록 복굴절 분포에서 안쪽의 정점이 증가하였다.

(2) 열에 의한 잔류응력은 사출성형공정에서 보압시간, 보압압력과 금형온도에 크게 영향을 받았다. 사출시간이나 사출압력이 증가할 때 표면에서 잔류응력이 증가하였다. 특별히 금형온도가 감소할 때 중심에서의 인장응력의 중간영역에서 압축응력이 크게 증가하였다.

(3) 사출/압축성형공정은 복굴절의 바깥쪽 정점을 크게 감소시킨다. 금형 닫힘속도가 느릴수록 초기 캐비티의 두께가 두꺼울수록 복굴절은 감소하였다. 하지만 보압과정을 포함함 사출/압축성형으로 인한 안쪽의 정점은 사출성형의 결과와 거의 동일하였다.

(4) 사출/압축성형에서 잔류응력의 분포는 사출성형공정의 결과와 유사했다. 따라서 사출/압축성형의 압축과정은 잔류응력이 아닌 복굴절에 훨씬 더 큰 영향을 끼친다. 이런 관점에서 사출/압축성형공정을 사출성형공정에 비교하였을 때 잔류응력과 변형에 큰 영향을 끼침 없이 광학제품의 광학특성을 향상시키는데 유용하다.

후 기

이 연구는 과학 기술부에 의한 국가지정연구실 프로그램(2000-N-NL-01-C-148)에 의한 과제로서 관계당국에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Flaman, A. A. M., 1993, "Buildup and Relaxation of Molecular Orientation in Injection Molding. Part I: Formulation," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 33, pp. 193~201.
- (2) Flaman, A. A. M., 1993, "Buildup and Relaxation of Molecular Orientation in Injection Molding. Part II: Experimental Verification," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 33, pp. 202~210.
- (3) Chen, S. C. and Chen, Y. C., 1995, "Effect of Process Conditions on Birefringence Development in Injection-Molded Parts. I. Numerical Analysis," *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 55, pp. 1757~1769.
- (4) Chen, S. C. and Chen, Y. C., 1996, "Effect of Process Conditions on Birefringence Development in Injection-Molded Parts. II. Experimental Measurement," *Polymer International*, Vol. 40, pp. 251~259.
- (5) Kim, I. H., Park, S. J., Chung, S. T., and Kwon, T. H., 1999, "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk: Part I. Injection Molding With Viscoelastic Compressible Fluid Model," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 39, pp. 1930~1942.
- (6) Kim, I. H., Park, S. J., Chung, S. T., and Kwon, T. H., 1999, "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk: Part II. Effect of Compression Stage," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 39, pp. 1943~1951.
- (7) Kim, I. H., Park, S. J., Chung, S. T., and Kwon, T. H., 1998, "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk (Part I) -Injection Molding with Viscoelastic Compressible Fluid Model-," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, pp. 289~301.
- (8) Kim, I. H., Park, S. J., Chung, S. T., and Kwon, T. H., 1998, "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk (Part II) -Effect of Compression Stage-," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, pp. 302~310.
- (9) Santhanam, N., 1992, "Analysis of Residual Stresses and Post-Molding Deformation in Injection-Molded Components," *Ph. D. Thesis*, Cornell university, Ithaca, New York.
- (10) Shyu, G. D. and Isayev, A. I., 1995, "Residual Stresses And Birefringence In Injection Molded Disks," *SPE ANTEC Tech. Papers*, Vol. 41, 2911~2917.
- (11) Ghoneim, H., and Hieber, C. A., 1997, "Incorporation of Density Relaxation in the Analysis of Residual Stresses in Molded Parts," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 37, pp. 219~227.
- (12) Hastenberg, C. H. V., Wildervanck, P. C., Leenen, A. J. H., and Schennink, G. G. J., 1992, "The Measurement of Thermal Stress Distributions Along the Flow Path in Injection-Molded Flat Plates," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 32, pp. 506~515.