

급속 금형가열에 의한 사출성형품의 복굴절특성 개선에 관한 연구

박 근#. 김병훈¹

A Study on Improvement of Birefringence Characteristics of Injection-Molded Plastic Parts by Rapid Mold Heating

Keun Park, Byung H. Kim

(Received May 10, 2007)

Abstract

The present work focuses on the prediction of birefringence in injection-molded part and its improvement by rapid mold heating. To calculate birefringence, flow-induced residual stress is computed through a fully three-dimensional injection molding analysis. Then the stress-optical law is applied from which the order of birefringence can be evaluated and visualized. The birefringence patterns are predicted for a rectangular plate with a variation of mold temperature, which shows that the amount of molecular orientation and birefringence level decreases with an increase of mold temperature. The effect of mold temperature on the order of birefringence is also studied for a thin-walled rectangular strip, and the relevant results are compared with experimental measurements. Both predicted and experimental patterns of birefringence are in agreements on the observation that the birefringence level diminishes significantly when the mold temperature is raised over the glass transition temperature.

Key Words : Injection Molding, Birefringence, Rapid Mold Heating, Finite Element Analysis

1. 서 론

사출성형 과정에서 고온의 수지 내부에서 상대적으로 온도가 낮은 금형면으로 열전달이 발생하고, 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편측 0.25mm 정도로 알려져 있다[1]. 이러한 응고층의 두께는 일반 사출성형에서는 전체 두께에 비해 상대적으로 적은 부분으로 전체적인 유동에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 두께가 매우 얇은 제품의 경우 고화층의 상대적인 비율이 증가하게 되고, 결과적으

로 수지 유동의 저하를 초래할 뿐 아니라 성형품 표면의 분자 배향(molecular orientation)을 증가시키게 된다. 이러한 고분자 배향의 증가는 제품의 잔류응력을 유발함으로써 이형후의 변형을 초래함은 물론, 투명한 광학제품의 경우 복굴절을 발생시키는 원인이 된다.

사출성형품의 잔류응력은 유동에 의한 잔류응력(flow-induced residual stress)과 열에 의한 잔류응력(thermally-induced residual stress)으로 구분하여 생각할 수 있다. 이중 복굴절 특성은 유동에 의한 잔류응력의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며[2], 이를 줄이기 위해 사출성형시 금형 온도를 유리

1. Dept. Mechanical & Industrial Engineering, University of Massachusetts Amherst, USA

교신저자: 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부,
E-mail: kpark@snut.ac.kr

전이온도 이상으로 가열하는 방법이 연구되어 왔다. Kim과 Roth[3]는 금형 가열시에 복굴절이 감소됨을 실험적으로 입증하였으며, Jansen과 Flaman[4]은 복굴절 감소를 위한 급속 가열 기법을 제시하였다. Chen 등[5]은 1초에 100°C이상의 속도로 금형을 가열하는 급속 반응 사출성형(Rapid Thermal Response molding; RTR molding) 공정을 개발하여 잔류응력 및 복굴절을 감소시키기 위한 연구를 수행하였다. Yao와 Kim[6]은 급속 가열을 적용하여 박육 사출성형의 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구를 수행하였고, Park 등[7]은 수치해석 기법을 사용하여 급속 가열에 의한 유동특성 개선효과를 검증하였다.

한편 최근들어 사출성형품의 복굴절의 예측에 관한 연구가 진행되어 왔다. Mackawa 등[8]은 3차원 사출성형 해석을 통해 계산된 잔류응력이 제품의 복굴절패턴과 유사함을 확인하였다. Lee 등[9]은 점탄성 거동을 고려한 광디스크의 복굴절을 수치적으로 예측하고 실험결과와 비교하였다. Park 등[10]은 3차원 유한요소해석을 통해 사출성형품의 잔류응력을 계산하고, 광탄성법칙을 적용하여 복굴절특성을 정성적으로 가시화하였다. 본 연구에서는 이러한 연구결과를 바탕으로 급속 금형가열시 복굴절의 개선 정도를 수치해석을 통해 예측하고, 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 검증해보고자 한다.

2. 사출성형품의 복굴절특성 예측

2.1 사출성형품의 복굴절 계산

복굴절은 물질에 입사한 빛이 방향이 다른 2개의 굴절광으로 갈라지는 현상으로, 사출성형품의 경우 금형 벽면에서의 고화층의 영향으로 발생하는 유동저항에 의한 수지 배향 및 잔류응력이 복굴절의 주된 원인으로 작용한다. 복굴절은 광탄성법칙에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta n = C [(t_1 - t_2)^2 + 4t_1 t_2^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$n_2 - n_3 = C (t_2 - t_3) \quad (2)$$

$$n_1 - n_3 = C (t_1 - t_3) \quad (3)$$

윗 식에서 아래첨자 1, 2, 3 은 각각 유동방향, 두께방향 및 유동의 수직방향에 해당되며, C는 재료의 광탄성계수를 의미한다.

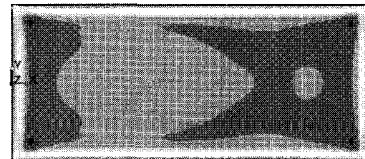
2.2 복굴절의 3 차원적 가시화

사출성형 과정의 수치해석을 통해 성형과정중에 발생하는 잔류응력을 계산할 수 있다. 계산된 잔류응력 성분을 식 (1)~(3)에 대입하면 각 절점에서의 복굴절 성분을 얻을 수 있으며, 이를 3 차원적으로 가시화할 수 있다. 예제로서 길이 80mm, 폭 35mm, 두께 3mm 의 사각 평판의 성형에 대해 해석을 수행하였다. 해석은 3D TIMON[®]을 사용하였으며, 두께방향으로 6 층의 육면체 요소로서 격자를 구성하였다. 수지는 투명 수지인 Monsanto Lustrex Polystyrene 를 사용하였고, Table 1 에 사출성형 조건을 요약하였다.

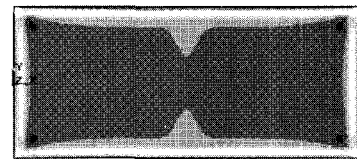
유동의 방향에 따른 복굴절 특성을 고찰하기 위해 수지를 좌측에서 주입한 경우(Fig. 1(a))와 양측에서 주입한 경우(Fig. 1 (b))에 대해 각각 해석을 수행하였다. Fig. 1(b)의 경우 양측에서 수지를

Table 1 Molding conditions for a rectangular strip

Material	PS
Stress-optical coefficient (Pa ⁻¹)	4.8 x 10 ⁻¹¹
Transition temperature (°C)	96
Injection temperature (°C)	220
Injection time (sec.)	0.5
Packing time (sec.)	4.5
Cooling time (sec.)	30.0

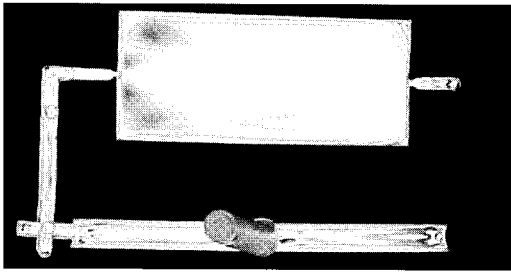


(a)

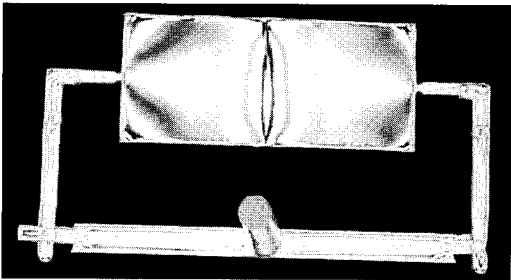


(b)

Fig. 1 Estimated birefringence patterns obtained from simulation: (a) single gate and (b) double gates



(a)



(b)

Fig. 2 Experimentally measured fringe patterns [5]: (a) single gate and (b) double gates

주입함으로 인해 좌우 대칭적인 복굴절 패턴이 예측된 반면, Fig. 1 (a)의 경우는 비대칭적인 특성을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 2의 실험결과[5]와 유사함을 알 수 있으며, 결과적으로 복굴절 계산결과의 신뢰성을 정성적으로 입증할 수 있었다.

3. 급속 금형가열시 복굴절특성 개선

3.1 급속 금형가열시 복굴절패턴 가시화

본 연구에서는 직접식 고주파 가열에 의한 급속 금형가열 기법을 사용하였다. 원리를 살펴보면 고주파 전류가 도체에 흐를 때 전류가 도체 표면 가까이 집중하여 흐르는 현상, 즉 표피 효과 (skin effect)가 발생하는데, 이러한 표피 효과를 이용하여 금형의 표면만을 순간적으로 가열하는 방법이다. 금형 표면만이 순간적으로 가열되기 때문에 금형의 냉각에 소요되는 시간도 여타 금형 가열 방법에 비하여 크게 감소하여, 생산성을 저하시키지 않으면서도 유동특성을 향상시킬 수 있다 [6~7].

금형을 유리전이온도 이상으로 급속 가열하였

을 경우 복굴절 특성을 비교하기 위해 해석을 수행하였다. 제품의 치수 및 성형조건은 2.2절과 동일하게 설정하였으며(Table 1 참조), 금형 온도를 각각 30°C와 150°C로 설정한 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 3에 계산된 복굴절 패턴을 도시하였다. 급속금형가열의 경우, 즉 금형의 온도가 150°C인 경우 상온에서의 경우에 비해 복굴절이 획기적으로 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 4에 도시된 Chen 등의 실험결과[5]와 유사함을 확인할 수 있었다.

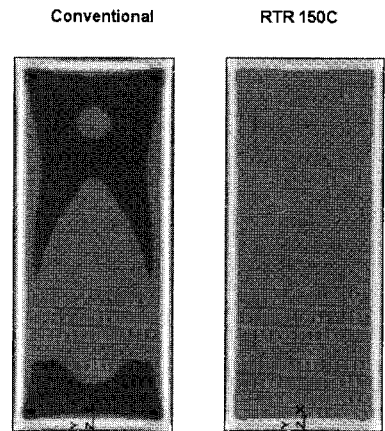


Fig. 3 Estimated birefringence patterns at mold temperature 30°C(Conventional) and 150°C (RTR 150°C)

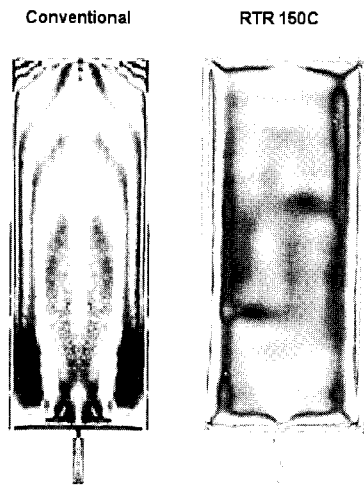


Fig. 4 Comparison of birefringence patterns [5] at mold temperature 30°C(Conventional) and 150°C (RTR 150C)

3.2 박육 사출성형에서의 복굴절 개선

박육 사출성형에서는 고화층의 상대적 비율 증가로 인해 복굴절이 더욱 심각하게 발생된다. 본 절에서는 박육 사출성형에서의 복굴절특성을 고찰하기 위해 길이 80, 폭 30, 두께 0.5mm 인 박육 평판에 대해 유동해석을 수행하였다. 수지는 Bayer社의 CD2000(Polycarbonate)을 사용하였고, Table 2에 성형조건을 요약하였다. 금형온도에 따른 유동특성을 비교하기 위해 금형온도를 각각 25, 115, 155, 190, 228℃로 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 해석은 금형의 급속 가열과정을 효과적으로 고려하기 위해 금형의 열전달 해석과 사출성형 해석을 연계하여 진행하였다[7].

Fig. 5에 금형온도에 따른 유동패턴을 비교하였다. 금형온도가 228℃인 경우를 제외하고는 대부분 미성형이 발생하였음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 제품의 두께가 얇은 만큼 고화층의 비율이 상대적으로 크기 때문으로 분석된다. Fig. 6은 동일한 조건에서의 실험결과이며, 복굴절 측정을 동시에 수행하였다. 유동패턴을 살펴보면 전반적으로 해석결과와 일치하는 것으로 판단되어 제안된 해석기법의 신뢰성을 입증할 수 있었다.

Fig. 7에 열전달해석과 연계된 온도별 복굴절 분포를 도시하였다. 해석 결과를 보면 금형온도가 150℃ 이상인 경우, 즉 수지의 유리전이온도 이상인 경우 복굴절이 상당부분 절감됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6의 실험결과와도 일치하여 제안된 해석기법의 신뢰성을 입증할 수 있었다. 상기 결과로부터 급속 금형가열에 의해 금형온도를 수지의 유리전이온도 이상으로 가열하였을 때 수지의 고화층이 제거되어 결과적으로 성형품의 복굴절 특성이 향상됨을 알 수 있다.

Table 2 Molding conditions for a thin wall strip

Material	PC
Stress-optical coefficient (Pa ⁻¹)	7.7 × 10 ⁻¹¹
Transition temperature (°C)	150
Injection temperature (°C)	265
Injection time (sec.)	1.0
Packing time (sec.)	4.5
Cooling time (sec.)	20.0

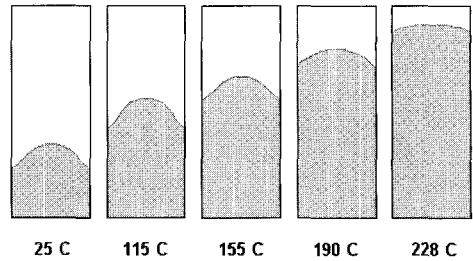


Fig. 5 Estimated flow patterns in various mold temperatures

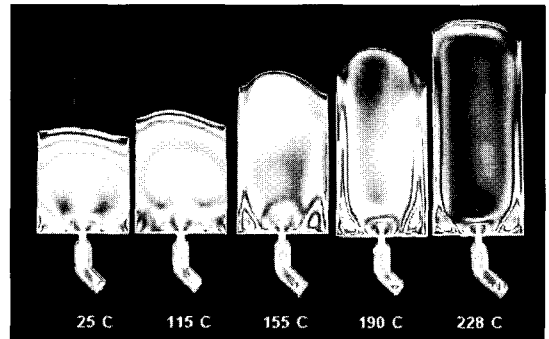


Fig. 6 Measured fringe patterns in various mold temperatures

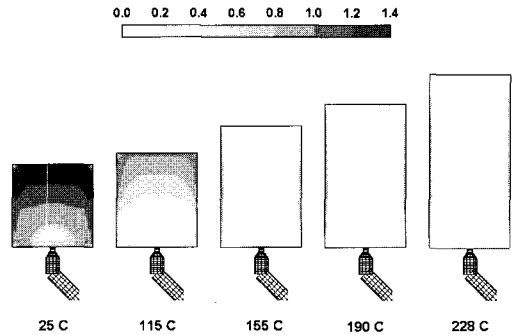


Fig. 7 Estimated birefringence distributions in various mold temperatures

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 급속 반응 사출성형 기법을 사용하여 사출성형품의 복굴절 특성을 개선하기 위한 제반 연구를 수행하였다. 이러한 내

용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 사출성형품의 복굴절 패턴을 수치해석을 통해 정성적으로 예측하고, 3차원적으로 가시화하기 위한 제반 연구를 수행하였다.

(2) 금형의 급속 가열시 성형품의 복굴절 특성이 획기적으로 향상됨을 확인할 수 있었다.

(3) 급속 가열기법을 박육제품 사출성형에 적용하여 금형의 온도에 따른 유동특성 및 복굴절의 변화를 비교하였으며, 이러한 결과로부터 금형온도를 수지의 유리전이온도 이상으로 가열하였을 때 성형품의 복굴절이 상당부분 감소됨을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단(과제번호: M01-2004-000-10140-0) 및 서울시 산학연 협력산업(과제번호 : 11114)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] R. Seldén, 2000, Thin wall molding of engineering plastics-a literature survey. *J Injection Molding Tech.*, Vol. 4, pp. 159~166.
- [2] A. I. Isayev, C. A. Hieber, 1980, Toward a viscoelastic modeling of the injection molding of polymers. *Rheol. Acta*. Vol. 19, pp. 168~182.
- [3] B. Kim, C. Roth, 1988, Critical J-integral value of molded polycarbonate using a low thermal injection mold. *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 27, pp. 467~485.
- [4] K. M. B. Jansen, A. A. M. Flaman, 1994, The influence of surface heating on the birefringence distribution in injection molded part, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, pp. 898~904.
- [5] M. Chen, D. Yao, B. Kim, 2001, Eliminating flow induced birefringence and minimizing thermally induced residual stresses in injection molded parts. *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 40, pp. 491~503.
- [6] D. Yao, B. Kim, 2002, Increasing flow length in thin wall injection molding using a rapidly heated mold. *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 41, pp. 897~902.
- [7] K. Park, B. Kim, 2006, A study improvement of flow characteristics for thin-wall injection molding by rapid mold heating. *Trans. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 15, pp. 819~832.
- [8] Y. Maekawa, M. Onishi, A. Ando, S. Matsushima, F. Lai, 2000, Prediction of birefringence in plastics optical elements using 3D CAE for injection molding. *Proc. SPIE*, Vol. 3944, pp. 935~943.
- [9] Y. B. Lee, T. H. Kwon, K. H. Yoon, 2002, Numerical prediction of residual stresses and birefringence in injection/compression molded center-gated disk, Part I: Basic modeling and results for injection molding. *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp.2246~2272.
- [10] K. Park, B. Kim, D. Yao, 2006, Numerical simulation for injection molding with a rapidly heated mold, Part II: Birefringence prediction. *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 41, pp. 903~909.