

투명 사출품에서 성형조건에 따른 복굴절 및 잔류응력의 분석

우정우 · 홍진수* · 김현구** · 류민영**†

서울과학기술대학교 대학원 제품설계공학공학과, *한국타이어 중앙연구소

**서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2015년 8월 3일 접수, 2015년 10월 22일 수정, 2015년 11월 1일 채택)

Analysis of Residual Stress and Birefringence in a Transparent Injection Molded Article for Molding Condition

Jeong-Woo Woo, Jin-Su Hong*, Hyun-Ku Kim**, and Min-Young Lyu**†

Department of Product Design Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

*Hankook Tire Central R & D Center, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34111, Korea

**Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received August 3, 2015; Revised October 22, 2015; Accepted November 1, 2015)

초록: 사출성형품에 형성된 잔류응력은 시간이 지남에 따라 제품에 변형이나 휘어짐을 일으키고 투명한 제품의 경우 복굴절을 일으킨다. 사출성형 중에 형성되는 잔류응력은 성형온도, 금형온도, 냉각조건, 보압조건과 같은 사출성형 조건에 의해 다르게 나타난다. 잔류응력의 측정방법 중 광탄성을 이용한 측정법은 다른 방법들에 비해 간편하고 쉽게 측정할 수 있는데 투명한 제품에만 적용이 가능한 방법이다. 복굴절 분포와 잔류응력의 크기를 PC, PS, 그리고 PMMA를 이용한 사출성형 시편을 통해 연구하였다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 복굴절 패턴을 모사하고 실험결과와 비교하였다. PS 시편은 가장 높은 복굴절을 나타냈고 PMMA는 가장 낮은 복굴절을 보였다. 제품의 잔류응력은 게이트 근처에서 가장 컸고 게이트에서 멀수록 작았다. 사출성형에서 냉각시간이 길고, 사출온도가 높고, 보압시간이 길수록 제품 내에 잔류응력은 줄어들었다.

Abstract: Residual stresses are developed during injection molding process and these cause a warpage and invoke a birefringence in a molded article. The levels of residual stresses are dependent of molding conditions, such as melt temperature, mold temperature, cooling condition, and packing condition. Among the residual stress measurement methods, the photoelasticity method is simple and convenience to measure compared with other methods. However this method can be utilized only for a transparent product. Birefringence and residual stress have been observed in injection molded polycarbonate (PC), polystyrene (PS), and polymethylmethacrylate (PMMA) specimens according to injection molding conditions. Computer simulation has been performed and compared with experimental observation of birefringence. PS specimen showed the highest birefringence whereas PMMA showed the lowest birefringence among them. Locations close to the gate showed higher residual stress than locations far from the gate. Long cooling time, high injection temperature, and long packing time reduced residual stress.

Keywords: residual stress, birefringence, injection molding, molding condition, transparent material.

서 론

사출성형공정은 고분자 성형공정 중 생산성과 성형 정밀도가 높기 때문에 플라스틱 제품의 성형에서 가장 많이 사용되

고 있다.¹ 최근 정밀사출성형에 대한 요구가 증가하고,^{2,3} 그 중 렌즈, 조명, 그리고 광 저장매체의 쓰임이 증대됨에 따라 투명한 수지의 쓰임이 확대되고 있다. 또한 사출금형의 정밀도는 측정 정밀도에 이를 만큼 높아져 있다.⁴ 하지만, 사출성형 제품은 성형 중 생성된 잔류응력에 의하여 후변형을 일으켜 제품의 품질을 저하시킨다. 그리고 투명한 사출성형품의 경우 빛의 투과성이나 굴절률과 같은 광학적 특성이 요구되

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

는데 잔류응력에 의한 복굴절 때문에 광학적 물성을 저하시킨다.^{5,6}

이러한 잔류응력은 사출성형공정 중 고온의 수지가 고속, 고압으로 금형에 주입되고 시간이 지남에 따라 고온의 수지가 냉각되면서 제품에 열과 압력의 이력이 남아서 형성되게 된다.^{7,8} 따라서 적절한 사출성형 조건을 통해 잔류응력을 최소화하는 것이 중요하다. 잔류응력을 최소화하는 방법으로 주로 보압 및 냉각과정, 또는 사출압력과 온도와 같은 성형조건을 조절하는 방법이 있다.⁹⁻¹³ 그리고 잔류응력을 정량적으로 측정하는 방법으로는 hole-drilling method와 layer removal method,^{14,15} 광탄성,¹⁶ X-ray회절법¹⁷ 등이 연구되고 있다. 본 실험실에서도 투명한 제품의 복굴절 패턴을 분석하여 잔류응력을 측정하는 방법에 관한 연구도 진행했었다.^{13,18,19}

본 연구에서는 이전 연구의 응용으로 사출성형품의 성형조건에 따른 성형품의 잔류응력 변화를 복굴절 패턴을 통해 관찰하였다. PC(polycarbonate), PS(polystyrene) 및 PMMA(polymethylmethacrylate) 세 가지 투명한 수지를 이용한 사출성형품에서 성형조건에 따라 성형된 제품의 복굴절과 잔류응력을 관찰하고 측정하였다. 또한 이러한 사출성형조건을 적용하여 컴퓨터모사를 수행하였고, 해석 결과를 실험과 비교하였다.

실험 및 컴퓨터 해석

실험모델. 본 연구에서 사출성형실험, 복굴절 및 잔류응력 측정을 위한 시편은 Figure 1과 같다. 시편은 평판 형상으로 평판두께가 1.5 mm이며 일반 사출성형을 통해 제작이 가능한 형상이다.

실험재료. 시편의 사출성형을 위한 재료는 투명한 수지인 PC, PS 그리고 PMMA를 선정하였다. 이 세 수지는 투명 플라스틱에 대표적인 수지로 광학용 및 산업용으로 많이 사용되고 있다. 각 수지마다 광학적 물성이 달라서 성형후에 보이는 복굴절이 다를 것으로 예상된다. Table 1에 각 수지의 제조사 및 그레이드가 나타나 있다.

성형조건. 사출성형에 사용된 사출성형기는 (주)우진플라임의 Woojin Selex NE 80이었다. 최대 형체력은 80 ton, 최대 사출속도는 116 mm/sec, 최대 사출압력은 294 MPa이다. 사출성형 실험을 위한 성형조건인 사출온도, 냉각시간, 보압시간은 Table 2와 같다. 각 조건의 범위는 제조사에서 추천하

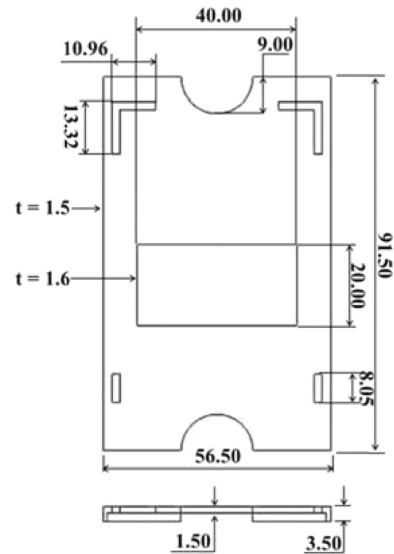


Figure 1. Experimental model.

Table 1. Three Transparent Resins

Resin	PC	PS	PMMA
Supplier	Sam Yang Co.	LG Chemical	LG MMA
Grade	TRIEX 3022IR	GPPS 15NF	LGMMA IF850

는 최소, 중간, 최대값을 사용했다. 각 수지별 충전단계에서 스트로크에 따른 사출속도를 Figure 2에 나타내었다.

컴퓨터 해석. 사출성형 시편에서 나타나는 광탄성 특성을 모사하기 위해 Moldex3D를 이용하여 사출성형 해석을 수행하였다. Figure 3은 스프루, 런너 게이트 그리고 해석모델의 mesh를 나타내고 있다. Mesh는 육면체와 사면체의 3차원 복합 요소를 사용하였다. 해석조건은 시편 사출의 성형조건과 동일하게 설정하였다.

복굴절 관찰. 사출성형 후 제품의 광학적 특성을 파악하기 위해 복굴절을 측정하였다. 빛은 전자파의 형태로 된 두 파가 서로 직교하면서 진행한다. 빛이 편광자(polarizer)를 통과하고 시편을 통과한 후 검광자(analyzer)를 통과하면 두 파의 위상차 때문에 간섭된 파가 여러가지 색의 패턴으로 나타난다.^{11,13} 이 색의 패턴으로 시편에 존재하는 복굴절의 크기를 구별할 수 있다. 잔류응력은 복굴절을 일으키기 때문에 광학적 품질 향상을 위해서는 제어해야 할 항목이다. 복굴절 패

Table 2. Molding Conditions

Resin	Melting temperature (°C)			Cooling time (sec)			Packing time (sec)	
PC	270	282	295	7	11	15	1	2
PS	210	225	240	7	11	15	1	2
PMMA	200		220	17		22	1	2

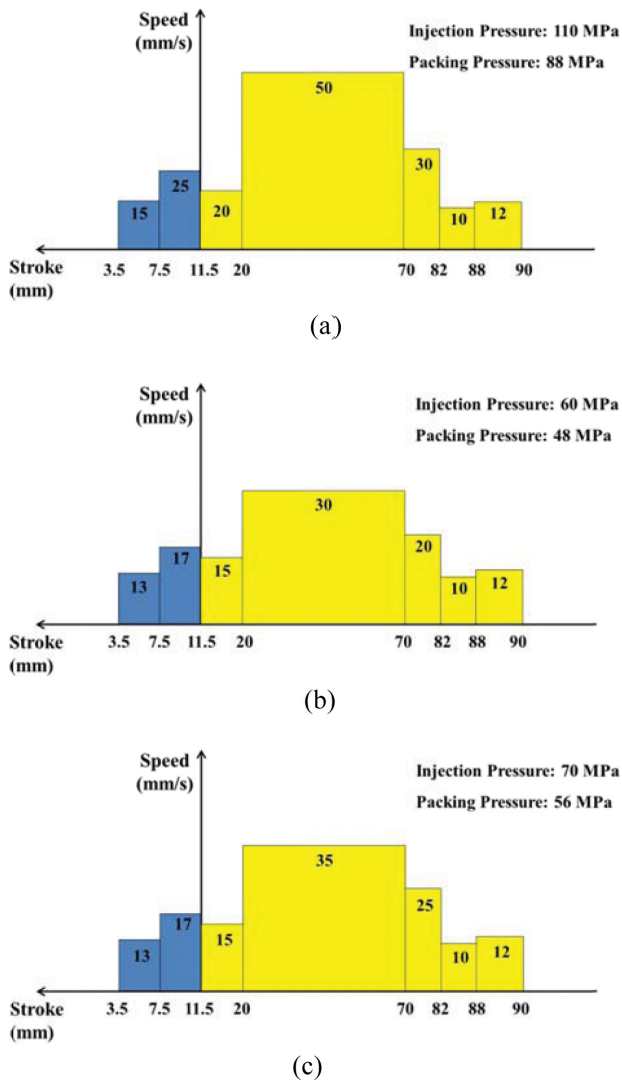


Figure 2. Injection speed profile according to stroke: (a) PC; (b) PS; (c) PMMA.

턴을 측정하기 위하여 Strianoptic 사의 광탄성 측정장치 PS-100을 사용하였다.

결과 및 토론

충전 패턴. PS의 사출실험과 해석의 충전 패턴이 Figure 4에 나타나 있다. 시편에 수지가 시간에 따라 충전되는 패턴을 알 수 있는 미성형 실험(short-shot test)과 시간에 따른 유동선단의 컴퓨터 해석 결과이다. 실험과 컴퓨터해석의 충전 패턴 비교 결과 수지의 흐름 경향이 대부분 일치하고 있다. 실험에서 보면 게이트부터 수지가 방사형으로 충전이 시작되고 게이트로부터 가장 먼 곳인 흐름 방향으로 볼 때 우측 하단부가 가장 늦게 충전되었다. 해석도 실험과 유사하나 충전

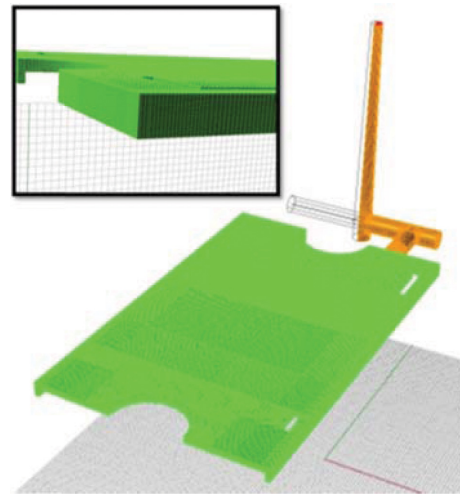


Figure 3. Simulation model for injection molding.

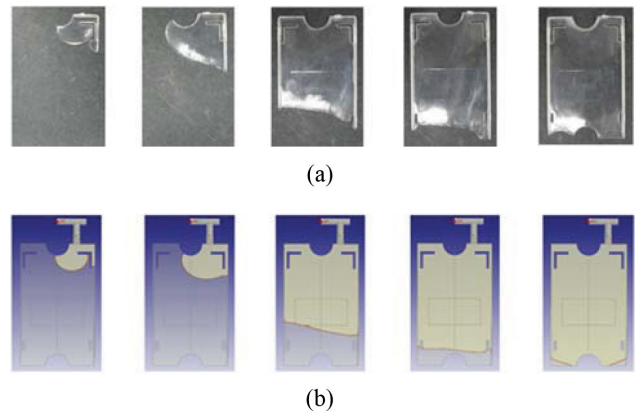


Figure 4. Short-shot experiment and simulation melt front for the injection molding of PS: (a) experiment; (b) simulation.

마지막 부분에서 실험결과와 다소 다르게 하단 좌우 부분이 거의 동시에 수지가 충전되고 있다.

복굴절 분포. Figure 5는 두 편광판을 통해본 시편의 복굴절 분포를 보여주고 있다. 투명 시편에 나타난 복굴절은 재료의 광학적 성질에 따라 차이가 있으며 사출성형 중 형성된 잔류응력과 비례하여 나타난다. 따라서 복굴절 패턴을 이용하여 잔류응력을 정량적으로 구할 수 있게 된다.²⁰ PS로 성형한 제품의 경우 복굴절 분포가 다소 크게 관찰되었으나 PMMA의 경우 재료의 광학적 특성에 의해 매우 낮게 관찰되었다.

Figures 6, 7, 8은 각각 PC, PS, PMMA를 사용한 시편의 해석으로 예측한 복굴절 분포, 프링지 패턴(fringed pattern), 그리고 실험으로 관찰한 복굴절 분포를 보여주고 있다. Figure 6에 나타나 있는 PC 시편의 해석과 실험에서 복굴절 크기는 작게 분포하고 있다. 게이트 부분에서는 복굴절이 크고 충전

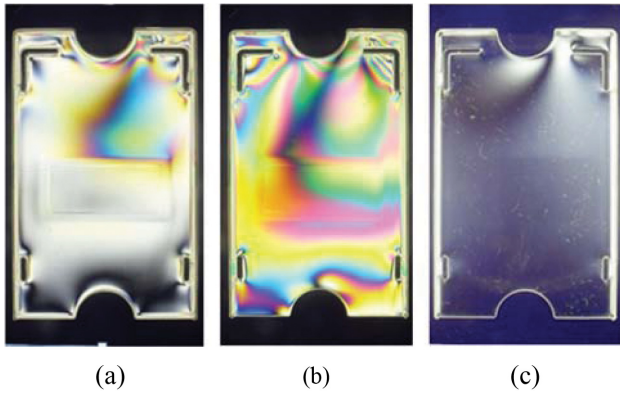


Figure 5. Birefringence patterns in injection molded specimens: (a) PC; (b) PS; (c) PMMA.

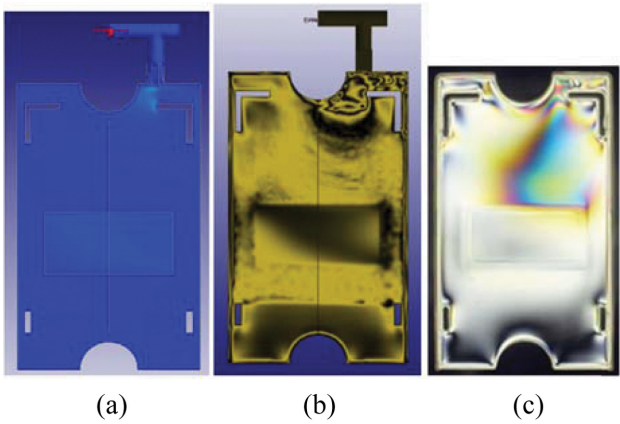


Figure 6. Optical characteristics of PC specimen: (a) birefringence by simulation; (b) fringed pattern by simulation; (c) birefringence by photoelastic device.

말단 부분은 복굴절이 매우 적게 나타났다. 시편 중앙의 경우 두께가 두꺼운 사각형상 때문에 불균일한 흐름이 나타났으며 이로 인해 사각형상 부분에서 복굴절 분포가 크게 나타났다. 컴퓨터 해석으로 예측한 프린지 패턴은 두 편광 필름을 통한 복굴절 패턴과 매우 유사하게 나타났다. Figure 7에 나타나 있는 PS 시편의 경우 해석과 실험에서 복굴절 크기가 다소 크게 나타났다. 게이트 부분에서 복굴절이 크고 패턴이 복잡하게 나타났으며 충전 말단 부분에서도 복굴절이 크게 나타났다. 시편 중앙부 또한 복굴절이 크게 분포하고 있다. 컴퓨터 해석으로 예측한 프린지 패턴과 실험을 통한 복굴절은 값 차이는 크지만 그의 패턴은 유사하게 나타났다. PS 시편이 PC 시편에 비해 복굴절이 크게 나타났는데 이는 소재의 광학적 특성이 달라 나타난 현상이다.²¹ 해석에서 사용한 stress-optical 상수(C_B , Brewster Number)는 PC 경우, flow-induced stress-optical 상수는 $1.95 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{dyne}$, thermally-induced stress-optical 상수는 $4.5 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ 를 사용하였다.

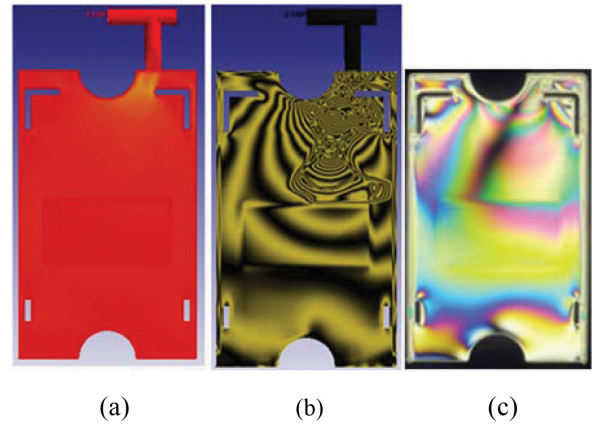


Figure 7. Optical characteristics of PS specimen: (a) birefringence by simulation; (b) fringed pattern by simulation; (c) birefringence by photoelastic device.

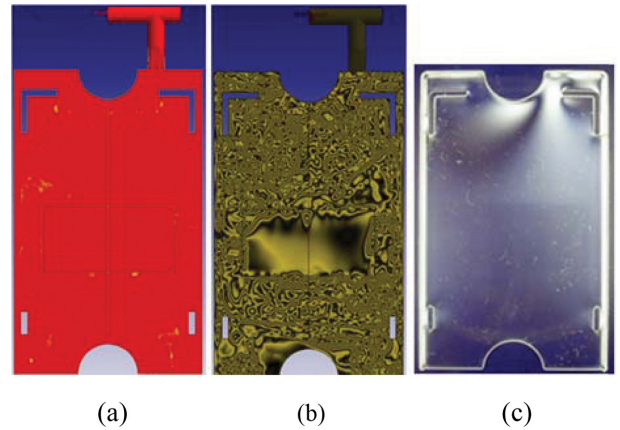


Figure 8. Optical characteristics of PMMA specimen: (a) birefringence by simulation; (b) fringed pattern by simulation; (c) birefringence by photoelastic device.

PS의 경우, flow-induced stress-optical 상수는 $-5.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{dyne}$, thermally-induced stress-optical 상수는 $9.2 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ 를 사용하였다. 해석에서 사용한 값들은 해석 프로그램에 내장되어 있는 값들이다. 실험에서 사용한 값은 PC의 경우 $8.3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$, PS의 경우 $4.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ 이다.¹³ 본 연구의 해석과 실험에서 사용한 상수값의 차이가 PC보다 PS에서 차이가 더 커서 PC와 PS의 해석결과에 차이가 크게 발생한 것으로 판단된다. Figure 8에 나타나 있는 PMMA시편의 경우 해석과 실험에서 복굴절 크기가 매우 작게 나타났으며 시편 중앙부, 충전 말단 부분 역시 작게 나타났다. 다만 게이트 주위에서 복굴절이 미소하게 분포하고 있다.

잔류응력. 복굴절을 이용하여 잔류응력을 평가하기 위해 광탄성 장치인 Strainoptic사의 PS-100을 사용하였다. 측정방법은 두 개의 편광판 사이에 시편이 위치하고 제품의 잔류응력

에 따라 다른 굴절률을 나타나게 되는데, 굴절률에 따른 색과 지체량을 계산하여 잔류응력을 측정하는 방법이다.^{13,20} 복굴절을 이용한 잔류응력을 평가하기 위한 실험시편의 측정위치는 Figure 9에 나타나 있으며, 측정위치에 따른 PS와 PC의 잔류응력 값을 Figure 10에 나타내었다. 측정한 잔류응력은 주응력의 차이($\sigma_1 - \sigma_2$)를 의미한다. PMMA의 경우 재료특정상 복굴절의 크기가 너무 작아 정량적으로 측정이 불가능하여 측정에서 제외하였다. 잔류응력은 측정위치당 5회 측정하여 평균값을 이용하였고 PS는 11~26 MPa, PC는 1~9 MPa로 전체적으로 PS의 잔류응력 값이 더 크게 나타났다. 이는 PS의 점도가 PC보다 높기 때문에 흐름에 의한 잔류응력이 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다. 잔류응력의 크기는 PC와 PS 모두 게이트 근처에서 크고 게이트에서 멀어질수록 잔류응력이 작아지는 경향을 보였다.

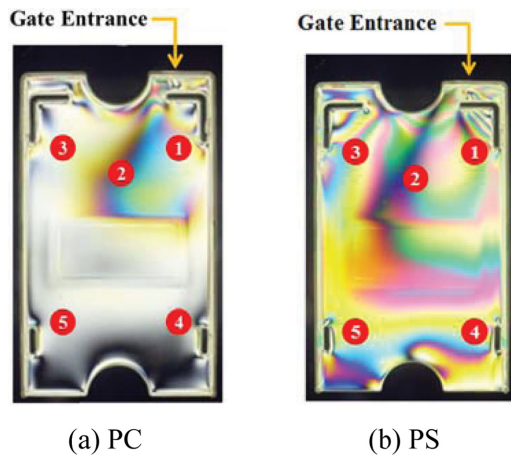


Figure 9. Measurement points of residual stress in injection molded specimens.

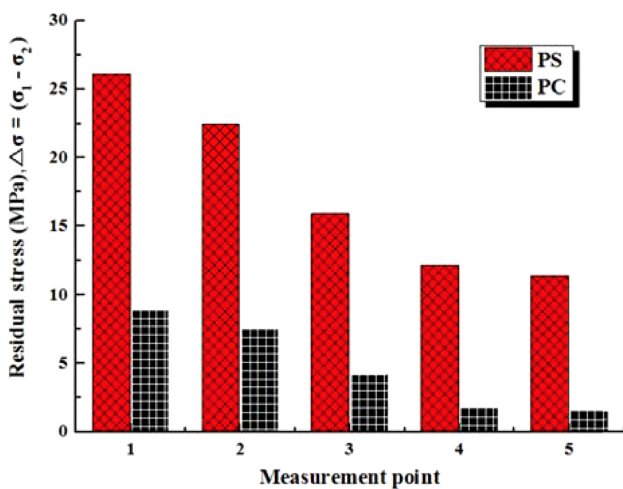


Figure 10. Residual stresses in PC and PS specimens.

성형조건별 잔류응력 변화. 잔류응력 변화를 관찰하기 위해 사출온도, 보압시간 및 냉각시간을 달리하여 사출하였다. 그리고 PC와 PS 시편에서 게이트와 가까운 측정위치 Figure 9의 ①에서 잔류응력을 측정했다.

사출온도에 따른 PC와 PS 시편의 잔류응력이 Figure 11에 나타나 있다. 시편 성형을 위한 수지 사출온도가 높아질수록 PC 및 PS 시편 모두 잔류응력이 감소했다. 사출온도가 높으면 작은 압력으로 제품의 성형이 가능하기 때문에 시편에 나타나는 잔류응력은 작게 나타난 것으로 판단된다. 냉각시간에 따른 시편의 잔류응력 변화가 Figure 12에 나타나 있다. 시편의 사출공정 후 금형 내에 체류하는 냉각시간이 증가할수록 시편의 잔류응력은 감소했다. 이는 냉각시간이 길어질수록 시편 내의 잔류응력이 이완되는 시간이 길어져 잔류응력이 작아진 것으로 판단된다. 보압시간에 따른 시편의 잔류

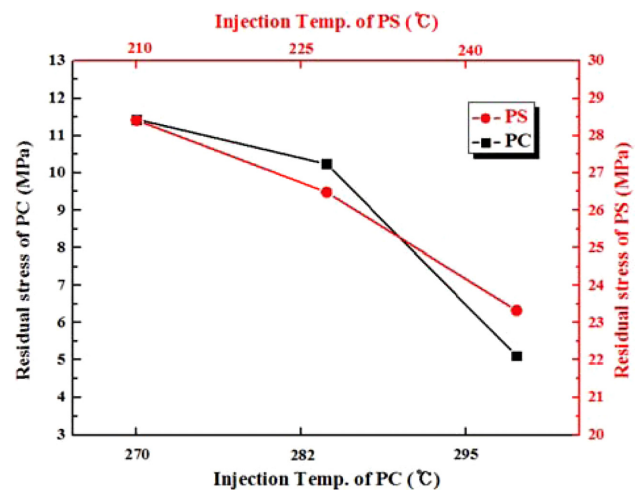


Figure 11. Residual stresses according to injection temperature.

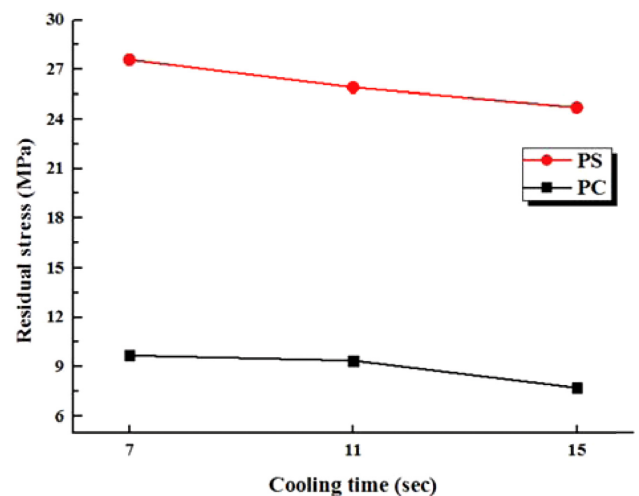


Figure 12. Residual stresses according to cooling time.

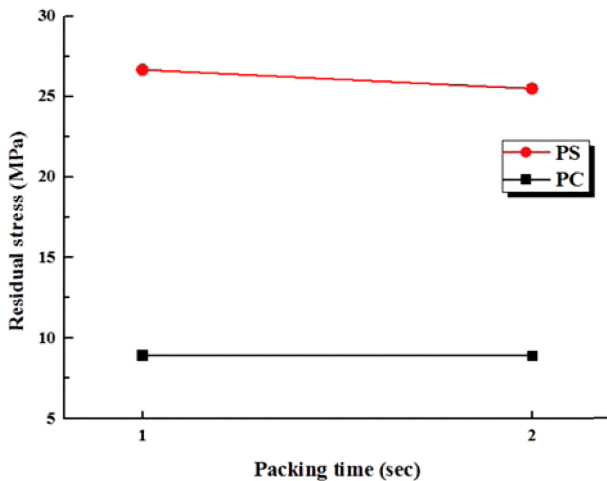


Figure 13. Residual stresses according to packing time.

응력 변화는 Figure 13에 나타나 있으며 보압시간이 증가할수록 잔류응력은 미소하게 감소했다. 냉각시간이 긴 것과 유사한 효과로 인한 잔류응력 이완으로 판단된다.

결 론

본 연구는 PC, PS 그리고 PMMA를 이용한 사출성형품의 성형조건에 따른 성형품의 잔류응력 변화를 복굴절 패턴을 통해 관찰하였다. 그리고 컴퓨터 모사를 통한 결과와 비교하였다. 충전패턴 관찰결과 사출성형과 컴퓨터 해석을 통한 흐름 경향이 대부분 일치하였다. 복굴절 패턴은 실험과 해석에서 모두 PS에서 가장 크게 나타났고 PMMA에서 가장 작게 나타났다. 또한 PC와 PS로 성형한 제품의 복굴절 분포가 해석으로 예측한 복굴절분포 그리고 프린지패턴과 유사하게 나타났다. 위치에 따른 잔류응력은 PC와 PS 시편 모두 게이트 근처에서 잔류응력이 컸고 게이트에서 멀어질수록 작아지는 경향을 나타냈다. 수지 사출온도, 보압시간 그리고 냉각시간과 같은 성형조건을 조절하여 성형품에 발생하는 잔류응력을 최소화할 수 있었다. 수지 사출온도가 높을수록, 냉각시간이 길수록 잔류응력은 감소하였다. 투명한 플라스틱 재료는 광학제품에 다양하게 응용되고 있기 때문에 본 연구를 통해 투명한 제품의 품질평가와 성형조건에 따른 품질향상에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 논문은 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10051680, 3D 프린팅용 친환경 고강도 고분자 소재 개발).

참 고 문 헌

1. D. V. Rosato and M. G. Rosato, *Injection molding handbook*, Springer Science & Business Media, 2012.
2. C. Liu and L. T. Manzione, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 1 (1996).
3. V. Piottter, K. Mueller, K. Plewa, R. Ruprecht, and J. Hausselt, *Microsyst. Technol.*, **8**, 387 (2002).
4. S. S. Yang and T. H. Kwon, *Tran. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **26**, 340 (2002).
5. W. Dietz, J. L. White, and E. S. Clark, *Polym. Eng. Sci.*, **18**, 273 (1978).
6. H. Janeschitz-Kriegl, *Rheol. Acta*, **16**, 327 (1977).
7. H. Y. Kim and M.-Y. Lyu, *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
8. A. I. Isayev, "Thermal Stresses", in *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, Vol **16**, p 747 (1989).
9. J. H. Jung and J. R. Youn, *Korean J. Rheol.*, **8**, 16 (1997).
10. H. S. Kim, J. G. Kim, and J. W. Lee, *Korean J. Rheol.*, **8**, 58 (1996).
11. J. H. Cho, S. R. Park, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **36**, 131 (2012).
12. S. H. Cho, J. S. Hong, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **35**, 467 (2011).
13. J. S. Hong, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **35**, 1 (2011).
14. C. Kim, S. Kim, H. Oh, and J. R. Youn, *Annual Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, **3**, 1982 (2005).
15. S.-H. Bang, S.-W. Kim, and E.-S. Lee, *Proceedings of the KSME 2006 Fall Annual Meeting*, **1**, 7 (2006).
16. H. Aben, L. Ainola, and J. Anton, *Opt. Laser. Eng.*, **33**, 49 (2000).
17. C.-H. Ma, J.-H. Huang, and H. Chen, *Thin Solid Films*, **418**, 73 (2002).
18. S. W. Lee, H. H. Joh, J. S. Hong, and M.-Y. Lyu, *Trans. Mater. Process.*, **20**, 54 (2011).
19. D. B. Lee, Y. H. Nam, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **38**, 193 (2014).
20. J. L. S. Wales and W. Philippoff, *Rheol. Acta*, **12**, 25 (1973).
21. I. K. Min and K. H. Yoon, *Korea-Aust. Rheol. J.*, **24**, 73 (2012).