

사출압축성형에서 복굴절을 통한 성형조건에 따른 성형특성 고찰

이단비 · 남윤호* · 류민영**†

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과,

*(주)우진플라임, **서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2013년 10월 4일 접수, 2013년 11월 4일 수정, 2013년 12월 7일 채택)

Investigation of Molding Characteristics in Injection Compression Molding According to Molding Conditions through Birefringence

Dan Bi Lee, Yun Hyo Nam*, and Min-Young Lyu**†

Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*WOOJIN PLAIMM CO., 673-3, Gyeongseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-170, Korea

**Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received October 4, 2013; Revised November 4, 2013; Accepted December 7, 2013)

초록: 렌즈 그리고 DVD 등과 같은 성형품들은 우수한 광학적 특성을 필요로 한다. 일반사출성형 공정은 캐비티 내에 압력이 높고 큰 온도변화를 포함하게 되어 성형품에 큰 잔류응력이 남아 광학적 품질이 저하된다. 따라서 이와 같은 제품들은 성형 시 잔류응력을 최소화하기 위해 캐비티 내의 압력을 낮게 그리고 균일하게 조절할 수 있는 사출압축성형 공정을 사용하는 경우가 많다. 본 연구에서는 실험을 통하여 사출압축 성형품에 영향을 주는 성형인자를 분석하였다. 다수 캐비티 금형을 이용하여 캐비티 간 품질편차도 고찰하였다. 실험에 사용한 재료는 투명수지인 PC와 PS이었다. 사출압축성형의 실험에서 공정변수로는 압축거리, 압축속도, 압축력 그리고 압축지연시간을 이용하였다. 실험결과, 사출압축성형 공정 변수 중 압축력과 압축지연시간 그리고 압축거리가 광학적 특성에 크게 영향을 미쳤으며 그 정도는 수지에 따라 다르게 나타났다. 이러한 현상은 사출압축성형 시 수지마다 유동성에 따라 최적의 성형조건이 있음을 의미하는 것이다.

Abstract: Lens and DVD require high quality of optical property. Conventional injection molded products contain high residual stress and this invokes birefringence since high cavity pressure and high temperature variation are involved in a molding process. Thus these products are often molded by injection compression molding in order to minimize the residual stress through reducing cavity pressure and uniform cavity pressure. In this study, molding parameters affecting molding quality such as property uniformity in injection compression molding were investigated through experiment. Molding quality deviations among the cavities in multi-cavity mold were also studied. Transparent resins, PC and PS were used in this study. Compression gap, compression speed, compression force, and compression delay time for processing variables in injection compression molding were applied in experiment. Compression force, compression delay time, and compression gap significantly affected the optical property of product. The degree of influence of process variable on the product quality was different in different resins. This implies that the optimal operational conditions in injection compression molding existed for each resin according to flow property.

Keywords: injection compression molding, compression gap, compression force, compression delay time, compression speed.

서 론

사출성형공정은 고분자 성형공정 중 생산성이 높으며 정밀도가 가장 높은 공정으로 알려져 있다. 그러나 일반사출성형

에서 실현되는 이상의 치수 정밀도나 균일품질이 요구되면서 사출압축성형의 활용도가 증가되고 있다. 일반사출성형품은 캐비티 내에서 높은 압력과 큰 온도 변화를 거치면서 성형되기 때문에 잔류응력을 갖게 되는데 이는 시간이 지남에 따라 후 변형을 일으켜 제품의 정밀도를 저하시킨다. 잔류응력은 투명 성형품이 빛을 통과시키면서 복굴절을 일으키는 원인이 되어 광학적 물성을 저하시킨다. 또한 일반사출성형은 한 제

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

품 내에서 물성의 편차를 보일 뿐 아니라 다수 캐비티 사출성형인 경우에는 캐비티간 품질편차를 보인다.^{1,3} 렌즈, 조명 그리고 광 저장매체의 쓰임이 증대됨에 따라 투명한 수지의 쓰임이 확대되고 있는데 사출압축성형 방법은 투명수지의 성형에서 나타나는 문제들을 해결하기 위한 방법으로 대두되고 있다.⁴

사출압축성형 방법은 압축방법에 따라 두 가지 형태가 있다. 첫 번째 방법은 사출기의 형체기구를 이용한 방법이다. 이 방법은 형폐 시 금형을 약간 개방한 상태에서 캐비티에 부분적으로 수지를 충전한 후 금형을 닫으면서 압축하여 성형한다. 다른 방법은 금형에 별도로 압축코어를 설치하여 이용하는 방법이다. 금형이 완전히 닫힌 상태에서 압축코어만 일부 열리게 하여 부분적으로 수지를 사출한 후 압축코어를 닫히게 하여 사출된 수지에 압축을 주어 최종성형을 완성하는 것이다.^{5,6} 사출압축성형 공정은 성형품 전체에 균일하게 압축력이 작용하여 균일한 물성의 제품을 얻을 수 있고 잔류응력이 적어 복굴절과 같은 광학적 문제를 크게 줄일 수 있다. Michaeli와 Lee 등은 사출압축성형을 적용하여 두께가 두꺼운 렌즈의 수차에 대한 연구와 카메라용 렌즈의 광학적 정밀도에 영향을 주는 인자를 분석하였다.^{7,8} 그러나 광학적 물성의 변화는 고려하지 않았으며,⁷ 사출압축성형에서 단지 압축거리에 따른 복굴절을 분석하였다.⁸ Yang은 사출압축성형 공정으로 렌즈를 성형하면서 렌즈형상의 정밀도를 분석하였으나 광학적 물성은 분석하지 않았다.⁹ Chen은 사출압축성형 공정을 해석할 수 있는 수치적 알고리즘을 개발하여 사출압축공정이 성형수축을 줄이고 균일한 두께의 제품을 얻을 수 있음을 피력하였다.¹⁰⁻¹² 또한 사출압축성형 공정이 유동에 의한 잔류응력을 감소시킨다는 연구 결과도 있다.¹³ 그러나 대부분의 연구들은 사출압축성형과 형상정밀도와 관련된 논문들이며 광학적 물성의 변화와 관련한 논문은 매우 제한적이다. 따라서 광학적 특성을 요구하는 제품의 사출압축성형 공정에서 다양한 압축성형 조건에 따른 제품의 광학적 물성변화에 대한 연구가 필요하다. 또한 작은 제품들은 다수 캐비티 금형을 이용하기 때문에 이의 연구나 수지에 따른 비교 연구도 필요한 실정이다.

본 연구에서는 투명한 비결정성 수지인 polycarbonate(PC)와 polystyrene(PS)에 대하여 사출압축성형에서 압축조건에 따른 복굴절 현상을 비교하며 성형특성을 연구하였다. 사출압축성형에서 일반사출성형의 보압단계를 압축공정으로 실현하는 방법으로 압축인자로써 압축거리, 압축력, 압축속도, 그리고 압축지연시간 등을 적용하였다. 또한 다수 캐비티 금형을 이용하여 사출압축성형이 캐비티간 품질편차에 미치는 영향을 분석하였다.

실험 및 해석

수지 및 사출성형기. 본 연구에서 사용한 수지는 PC와 비

보강 PS(general purpose PS, GPPS)로서 PC는 삼양사의 TRIREX 30221R(01), PS는 바스프의 PS 158K이다.

사출실험을 위한 사출성형기는 (주)우진플라임의 전동사출성형기(TE 150)를 사용하였으며, 사출기의 형체력은 150 ton이며, 최대 사출 속도는 200 mm/sec이다. 사출압축성형의 압축공정은 형체압축으로 수행하였다.

실험 모델 및 복굴절 관찰. 본 연구에서 사용한 실험 모델은 평판형상으로 20 mm×50 mm의 크기에 두께는 2 mm이다. 시편성형을 위한 금형은 Figure 1과 같이 8개 캐비티 금형으로 설계하였다. 8개의 캐비티가 상하 대칭이므로 그림과 같이 윗 측의 4개 캐비티를 ①~④의 번호를 부여하여 구별하였다. 성형 후 제품의 광학적 특성을 파악하기 위해 복굴절을 관찰하였다. 잔류응력은 복굴절을 일으키기 때문에 광학적 품질 향상을 위해서는 이의 조절이 필요하다. 복굴절 패턴을 측정하기 위하여 Strianoptic사의 광탄성 측정장치 PS-100을 사용하였다. PS-100은 조명원, 편광기 그리고 검광기로 구성되어 있으며 시편은 편광기와 검광기 사이에 위치시킨다. 투명 시편에 잔류응력이 있으면 이에 비례하여 복굴절이 발생하여 검광기를 통하여 이를 관찰할 수 있다.^{1,14-16}

성형 조건. 수지 별 사출압축성형 조건이 Table 1에 나타나 있다. 사출압축성형에서 압축단계의 인자를 분석하기 위하여 압축거리(compression gap), 압축속도(compression speed), 압축력(compression force) 그리고 압축지연시간(compression delay time)을 변경하였으며, Table 2에 본 연구에서 적용한

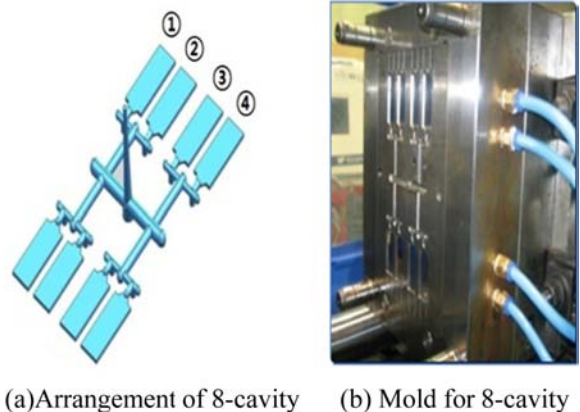


Figure 1. Arrangement of 8-cavity and mold for injection compression molding.

Table 1. Temperature Setting and Injection Speed for PC and PS in Injection Compression Molding

	PC	PS
Injection temperature (°C)	300	250
Mold temperature (°C)	70	50
Injection speed (mm/s)	14	14

Table 2. Compression Conditions in Injection Compression Molding

Gap (mm)	Speed (mm/s)	Force (ton)	Delay time (sec)
0.01	10, 20, 30	100, 120, 130	0
0.1	10, 20, 30	120	0, 0.5, 1
0.2	10, 20, 30	120	0, 0.5, 1

조건을 요약하였다. 압축속도와 압축력은 동시에 제어할 수 없기에, 압축력이 작용될 때의 속도는 임의의 속도가 되고 압축속도가 작용될 때의 압축력은 임의의 압축력이 된다.

결과 및 토론

압축력에 따른 결과 비교. Figure 2는 PC의 사출압축성형에서 Figure 1의 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축 지연시간 0 sec, 압축거리 0.01 mm 그리고 압축속도 20 mm/s의 상태에서 압축력 100, 120 그리고 140 ton에 대한 복굴절을 비교하였다.

압축거리가 매우 작아서 충전단계에서 캐비티가 대부분 충전되기 때문에 일반사출성형과 매우 유사한 경우이다. 즉, 캐비티가 열려져 있는 틈이 매우 작아서 정해진 양이 대부분 사출공정에서 캐비티에 채워진다. 이러한 관점에서 사출성형과 유사하다는 의미이다. 압축력이 140 ton일 경우에는 복굴절이 가장 적으며 100 ton일 때에는 복굴절이 가장 큰 것으로 나타났다. 즉 압축력이 클수록 복굴절이 적어지는 것을 알 수 있다. 압축력이 클수록 캐비티 내에서 수지의 유동을 균일하게 하여 복굴절이 작게 나타난 것으로 판단된다. PC의 경우 매우 적은 양의 압축거리에서 큰 압축력으로 성형품의 물성을 균일하게 할 수 있음을 보여주고 있다. 캐비티간 편차는 압축력 100과 120 ton에서 거의 나타나지 않았으나 140 ton에서는 중앙의 시편(②, ③)보다 외곽의 시편(①, ④)이 다소 높게 나타났다. 그러나 압축력 140 ton의 시편에서 전체적으로 복굴절이 작아서 시편간 편차는 작은 것으로 간주할 수 있다.

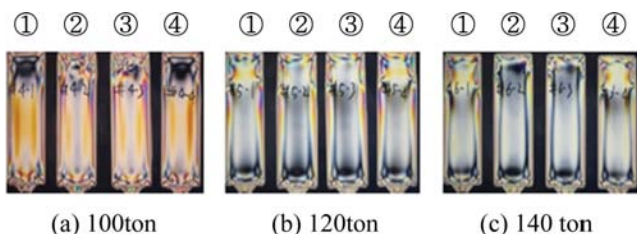
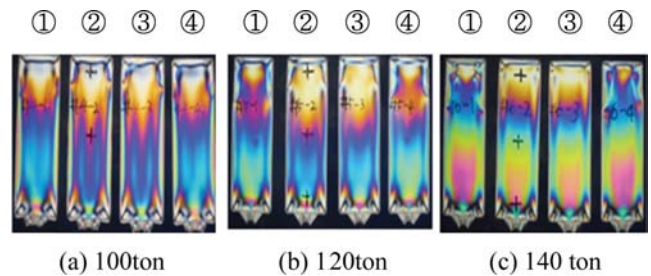
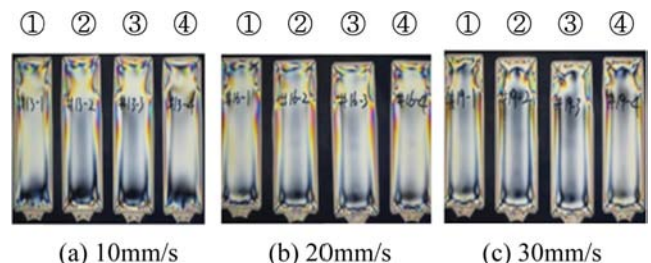
**Figure 2.** Birefringence patterns of PC specimens according to compression force for compression delay time: 0 sec, compression gap: 0.01 mm, and compression speed: 20 mm/s in injection compression molding.**Figure 3.** Birefringence patterns of PS specimens according to compression force for compression delay time: 0 sec, compression gap: 0.01 mm, and compression speed: 20 mm/s in injection compression molding.

Figure 3은 PS의 사출압축성형에서 Figure 1의 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축지연시간 0 sec, 압축거리 0.01 mm 그리고 압축속도 20 mm/s의 상태에서 압축력 100, 120 그리고 140 ton에 대한 복굴절을 비교하였다. PC와 달리 압축력이 가장 큰 140 ton일 경우에 복굴절이 가장 컸으며, 100 ton일 때 복굴절이 가장 적은 것으로 나타났다. 즉 PS는 압축력이 클수록 성형품에 복굴절이 크게 나타나고 있었다. PS는 PC에 비해 유동성이 좋아 작은 압축력에 수지가 캐비티에 완전 충전되며 더 이상의 큰 압축력이 작용되면 캐비티 전체에서 받는 압력이 높아져 전체적으로 잔류응력이 더 커지기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 압축력이 클수록 한 시편에서의 복굴절 편차 및 캐비티간 복굴절의 편차가 더 커진 것으로 관찰되었다. 이는 PC와는 다른 현상이며 수지에 따라 적절한 압축력이 존재함을 의미한다.

캐비티간 복굴절의 편차가 다소 나타났다. 즉, 중앙의 ②와 ③의 시편이 양쪽 끝에 있는 ①과 ④번 시편에 비해 복굴절이 다소 높게 나타났다. 이는 충전 시 발생된 편차에 의한 것으로 판단되며 사출압축성형 공정으로 그 편차가 작게 나타난 것이다.¹⁷

압축속도에 따른 결과 비교. Figure 4는 PC의 사출압축성형에서 Figure 1의 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축지연시간 0 sec, 압축거리 0.1 mm 그리고 압축력 120 ton

**Figure 4.** Birefringence patterns of PC specimens according to compression speed for compression delay time: 0 sec, compression gap: 0.01 mm, and compression force: 120 ton in injection compression molding.

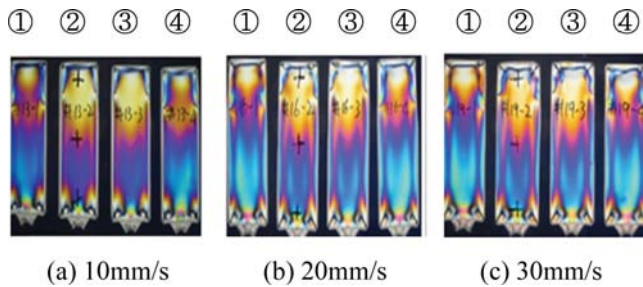


Figure 5. Birefringence patterns of PS specimens according to compression speed for compression delay time: 0 sec, compression gap: 0.01 mm, and compression force: 120 ton in injection compression molding.

의 상태에서 압축속도 10, 20 그리고 30 mm/s에 대한 복굴절을 비교하였다. 압축속도가 작을 때와 클 때 즉, 10과 30 mm/s에서 복굴절이 다소 낮게 관찰되었지만 그 차이는 미미하여 압축속도에 따른 복굴절의 차이가 거의 없는 것으로 판단된다. 모든 속도에서 캐비티간 편차는 거의 없었다.

Figure 5는 PS의 사출압축성형에서 Figure 1의 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축지연시간 0 sec, 압축거리 0.1 mm 그리고 압축력 120 ton의 상태에서 압축속도 10, 20 그리고 30 mm/s에 대한 복굴절을 비교하였다. PC와 마찬가지로 압축속도에 따라 복굴절의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 압축속도는 사출압축성형에서 성형품의 품질에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 모든 속도에서 캐비티간 편차는 매우 작게 나타났다.

압축지연시간에 따른 결과 비교. Figure 6은 PC의 사출압축성형에서 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축거리 0.1 mm, 압축력 120 ton, 그리고 압축속도 20 mm/s의 상태에서 압축지연시간 0, 0.5 그리고 1 sec에 대한 복굴절을 비교하였다.

압축지연시간이 0 sec일 때는 복굴절이 가장 컸으며 1 sec일 때는 복굴절이 가장 작았다. 이는 충전단계가 끝난 후 압축지연시간이 길수록 충전 시에 형성된 잔류응력의 이완이

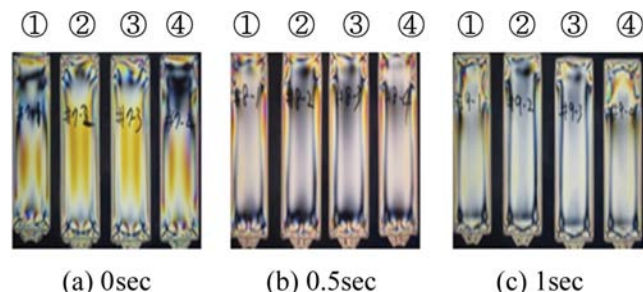


Figure 6. Birefringence patterns of PC specimens according to compression delay time for compression gap: 0.1 mm, compression force: 120 ton, and compression speed: 20 mm/s in injection compression molding.

커져서 나타난 현상이라 판단된다. 사출성형 시 형성된 잔류응력은 시간에 지나감에 따라 이완되는데 사출온도와 금형온도가 높을수록 이완이 크게 일어난다.¹⁸

압축거리 0.2 mm, 압축력 120 ton, 그리고 압축속도 20 mm/s의 상태에서 압축 지연시간에 대한 PC의 복굴절이 Figure 7에 나타나 있다. 압축거리 0.1 mm일 때와 마찬가지로 압축지연시간이 길수록 복굴절이 작게 나타났다. 압축지연시간에 따른 영향은 압축거리에 관계없이 같다고 판단된다. PC시편에서 캐비티간 편차는 거의 나타나지 않았다.

Figure 8은 PS의 사출압축성형에서 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축거리 0.1 mm, 압축력 120 ton, 그리고 압축속도 20 mm/s의 상태에서 압축 지연 시간 0, 0.5 그리고 1 sec에 대한 복굴절을 비교하였다. 압축지연시간이 1 sec일 때는 복굴절이 가장 컸으며 0 sec일 때는 복굴절이 가장 작았다. 이는 PC 수지와는 다른 결과이다. PS 수지는 PC에 비해 흐름성이 좋은데 압축지연시간이 길수록 수지가 고화되는 양이 증가한다. 수지가 고화되면 흐름성이 급격히 나빠져 압축으로 인한 흐름이 일어날 때 전단응력이 커지고 이것이 잔류응력으로 남게되어 복굴절이 크게 나타난 것으로 판단된다. 이 결과 역시 수지에 따라 캐비티의 압축지연시간이 존재함을 의미한다.

압축거리 0.2 mm, 압축력 120 ton, 그리고 압축속도 20 mm/s

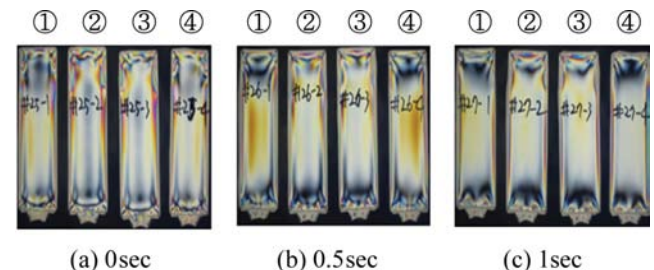


Figure 7. Birefringence patterns of PC specimens according to compression delay time for compression gap: 0.2 mm, compression force: 120 ton, and compression speed: 20 mm/s in injection compression molding.

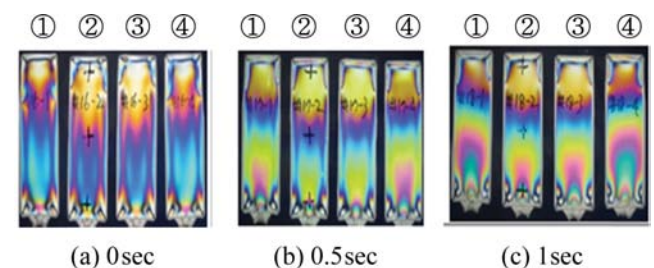


Figure 8. Birefringence patterns of PS specimens according to compression delay time for compression gap: 0.1 mm, compression force: 120 ton, and compression speed: 20 mm/s in injection compression molding.

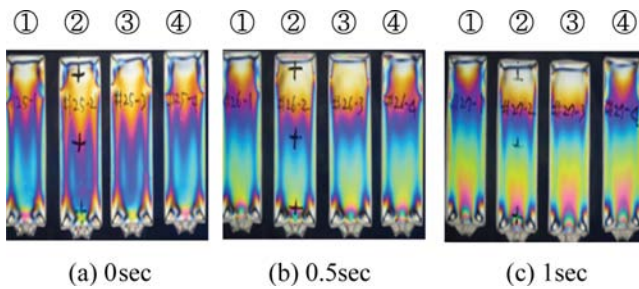


Figure 9. Birefringence patterns of PS specimens according to compression delay time for compression gap: 0.2 mm, compression force: 120 ton, and compression speed: 20 mm/s in injection compression molding.

의 상태에서 압축지연시간에 대한 PS의 복굴절이 Figure 9에 나타나 있다. 이 결과 역시 압축거리 0.1 mm일 때와 같은 결과이다. 즉, 압축지연시간이 길어지면서 잔류응력이 증가되었는데 이는 수지의 고화가 주도적인 역할을 한 것으로 판단된다.

압축거리에 따른 결과 비교. Figure 10(a)과 10(b)는 PC의 사출압축성형에서 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축지연시간 0 sec, 압축력 120 ton의 상태에서 압축속도 10과 30 mm/s일 때 압축거리 0.01, 0.1 그리고 0.2 mm에 대한 복굴절을 비교하였다. 압축속도가 10 mm/s일 때 압축거리가 가장 큰 0.2 mm일 경우에 복굴절이 가장 컸으며, 압축거리가 가장 작은 0.01 mm일 때는 복굴절이 가장 적었다. 압축거리가 클수록 금형이 열린 거리가 길어서 수지의 온도 저하가 일어나 압축시 흐르면서 큰 전단응력이 크게 작용되어 나타

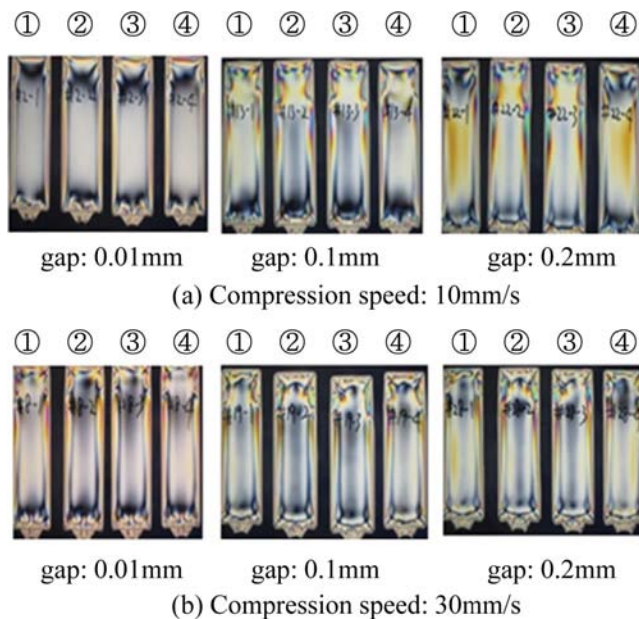


Figure 10. Birefringence patterns of PC specimens according to compression gap for compression delay time: 0 sec and compression force: 120 ton in injection compression molding.

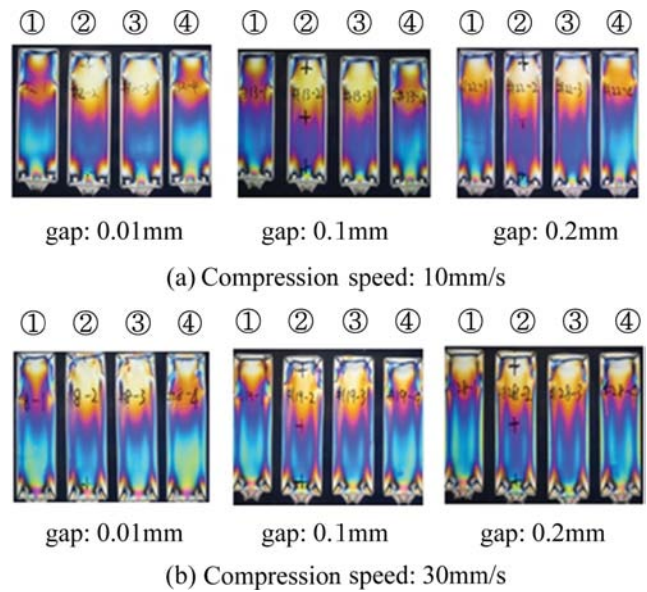


Figure 11. Birefringence patterns of PS specimens according to compression gap for compression delay time: 0 sec and compression force: 120 ton in injection compression molding.

난 현상이라 판단된다. 압축속도가 30 mm/s 일 때의 결과는 압축속도 10 mm/s 때의 결과와 유사한 것으로 나타났다.

Figure 11(a)와 11(b)는 PS의 사출압축성형에서 캐비티 ①, ②, ③, 그리고 ④에 대하여 압축지연시간 0 sec, 압축력 120 ton의 상태에서 압축속도 10과 30 mm/s일 때 압축거리 0.01, 0.1 그리고 0.2 mm에 대한 복굴절을 비교하였다. PC와 달리 압축거리에 따른 복굴절 차이는 매우 작았다. 압축속도에 따른 압축거리의 영향은 매우 작게 나타났다.

결론

본 연구는 PC와 PS를 이용하여 사출압축성형 공정에서 성형조건에 따른 복굴절을 조사하였으며, 본 실험에서 사용한 금형의 구조, 사출기, 그리고 성형조건하에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

사출압축성형 공정에서 압축조건에 따라 영향을 주는 인자는 압축력, 압축지연시간, 그리고 압축거리였다. 압축속도는 성형에 큰 영향을 주지 않았는데 이는 압축거리가 매우 작아서 나타난 것으로 판단된다. PC를 사용한 사출압축성형 공정에서는 압축력, 압축지연시간 그리고 압축거리 순으로 영향이 컸다. 압축력이 크거나 압축지연시간이 클수록 그리고 압축거리가 짧을수록 균일하고 작은 잔류응력으로 인해 복굴절이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

PS를 사용한 사출압축성형 공정에서는 압축력과 압축지연시간이 주요 인자이며 압축력과 압축지연시간이 감소할수록 복굴절이 적어지는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 수지의 흐름성에 따라 사출압축성형의 최적조건이 달라져야 함을 보여주었고, 사출압축성형의 최적조건을 찾는데 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 논문(연구)은 지식경제부의 지식경제 기술혁신사업(WC-300) 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

1. J. S. Hong, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **35**, 1 (2011).
2. S. H. Cho, J. S. Hong, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **35**, 467 (2011).
3. J. H. Cho, S. R. Park, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **36**, 131 (2012).
4. Y. H. Chun, H. G. An, and M.-Y. Lyu, *Elastomers and Composites*, **47**, 341 (2012).
5. H. Ae, Y. Shibata, and T. Tanaka, U.S. Patent 7,691,314 (2010).
6. D. E. Polk, U.S. Patent 8,070,471 (2011).
7. W. Michaeli, S. Hesner, F. Klaiber, and J. Forster, *Annals of CIRP*, **56**, 545 (2007).
8. H. S. Lee, W. T. Jeon, and S. W. Kim, *Trans. KSME A*, **37**, 39 (2013).
9. S. Y. Yang and Y. C. Chen, *Adv. Polym. Technol.*, **17**, 353 (1998).
10. S. C. Chen, Y. C. Chen, and H. S. Peng, *J. Appl. Polym. Sci.*, **75**, 1640 (2000).
11. S. Y. Yang, Y. C. Chen, H. S. Peng, and L. T. Huang, *Adv. Polym. Technol.*, **21**, 177 (2002).
12. S. C. Chen, Y. C. Chen, and N. T. Cheng, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **25**, 907 (1998).
13. Y. B. Lee, T. H. Kwon, and K. H. Yoon, *Trans. KSME A*, **26**, 2342 (2002).
14. Strainoptic Technologies, Inc., "Photoelasticity principles and measuring techniques (IM-100)," in *Operation Manual for PS-100*.
15. J. L. S. Wales and W. Philippoff, *Rheo. Acta*, **12**, 25 (1973).
16. M.-Y. Lyu, J. S. Hong, J. I. Goo, and K. H. Hwang, *Fall Meeting of the Polymer Society of Korea*, **34**, 101 (2009).
17. M. Kang and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **32**, 501 (2008).
18. H. S. Kim, J. G. Kim, and J. W. Lee, *The Korean Journal of Rheology*, **8**, 58 (1996).