사출성형 조건이 디스크의 복굴절에 미치는 영향

박민규*(충주대 대학원), 이동호 (충주대 대학원), 이호상(충주대 기계설계학과)

Influences of Injection Molding Conditions on the Birefringence of a Disk

M. G. Park(Dept. Mech. Design, CNU), D. H. LEE(Dept. Mech. Design, CNU),
H. S. Lee(Dept. Mech. Design, CNU)

ABSTRACT

A computer code was developed to simulate all three stages of the injection molding process ? filling, packing and cooling by finite element method. The constitutive equation used here was compressible Leonov model. The PVT relationship was assumed to follow the Tait equation. The flow-induced birefringence was related to the calculated flow stresses through the linear stress-optical law. Based on the simulation, the Taguchi method was used to investigate the influences of injection molding conditions on the birefringence of a center gate disk. In addition, the optimal processing conditions were selected to minimize the birefringence and the birefringence difference along the positions of the disk.

Key Words : birefringence(복굴절), viscoelasticity(점탄성), injection molding(사출성형), polystyrene(폴리스티렌)

1. 서론

광디스크의 광학적 특성은 저장데이터의 고정밀, 고밀도에 큰 영향을 주고 있으며 사출성형 공정에서 발생하는 복굴절은 광학 성능을 좌우한다. 복굴절은 유동에 의한 부분과 열에 의한 부분으로 나눌 수 있다. 유동에 의한 복굴절은 케비티의 충전과정 동안 발생하며 분자배향 체인을 생성하는 전단응력 및 법선응력의 결과이다. 그리고 열에 의한 복굴절은 밀도와 수축의 불균형 변화와 유리 전이 온도를 통한 불 균일 냉각에 의하여 발생한다.

유동에 의한 복굴절 해석을 위하여 많은 연구자들이 Leonov 모델을 적용하였다[1-5]. Isayev 와 Hieber[1]는 평판 사이에서 Leonov모델을 도입하여 충전과 냉각과정에서의 복굴절을 예측하였다. Baaijens[6]과 Flaman[7]은 압축성 Leonov 모델을 사용하여 얇은 평판형태의 유동에 의한 복굴절을 예측하였으며 그 결과를 실험 결과와 비교하였다. Kwon et.al [8,9]는 유한차분법을 사용한 수치해석 시스템을 개발하고, 중앙게이트 방식 디스크에 대한 복굴절의 분포를 연구하였다.

본 논문에서는 중앙게이트 방식 디스크의 사출성형 과정(충전, 보압과 냉각)에 대하여 유한요소법을 사용한 수치해석 프로그램을 통하여 복굴절을 시뮬레이션 하였으며 사용되는 구성방정식은 압축성 Leonov 모델[10,11]이었다. PVT 관계는 Tait 방정식을 사용하였고 디스크의 유동에 의한 복굴절을 해석하였다. 해석적인 방법에 기초하고 실험계획법을 적용하여 사출성형 공정 조건이 복굴절에 미치는 영향을 연구하였으며 복굴절을 최소화 시키고, 위치별 복굴절 차이를 줄일 수 있는 공정조건을 도출하였다.

2. 본론

2.1 공정조건이 복굴절에 미치는 영향

본 논문에서는 디스크에 대한 사출성형 조건이 복굴절에 미치는 영향을 연구하고, 복굴절을 최소화, 균일화하기 위한 공정조건을 도출하기 위하여 실험계획법을 적용하였다. 성형조건과 복굴절의 관계 규명 및 최적화에 사용될 실험 방법은 실험횟수를 최소화하여 시간과 경제적 부담을 줄여야 하며, 실험에서 결정되는 성형조건이 잡음에 대하여 강건하여야 한다. 이러한 실험 요구 조건을 만족시키기 위한 대표적인 실험계획법으로 다구찌 방법을 사용하였다.

사용된 수지는 폴리스티렌(Styron 615 APR/DOW) 이며 디스크 게이트의 위치는 중앙게이트 방식으로 직경과 두께는 각각 10.16cm, 0.2cm 이다. 최적의 공정조건과 비교하기 위한 기존의 공정조건으로는 참고문[12]의 조건과 동일한 금형온도 40℃, 수지온도 225℃, 유량 5.95 ㎤/s, 보압시간 6 초 그리고 보압크기는 15MPa 였다. 시뮬레이션에서 사용된 PS의 물성치는 참고문헌[12] 에 나타나 있다. 디스크의 모델링에서는 대칭성을 고려하여 184 개의 절점과 315 개의 요소로 이루어진 ¼ 디스크로 모델링하였다. 점탄성 모델을 사용한 사출성형공정 지배방정식과 수치해석 이론은 참고문헌[12]에 자세히 언급되어 있다.

복굴절 해석에 사용된 제어인자는 그 영향이 클 것으로 예상되는 금형온도, 수지온도, 유량, 보압시간, 보압크기 등 5 가지 사출조건이며, 각 인자에 대하여 3 수준을 사용하였다. 실험에 사용된 인자와 각각의 수준은 Table1 과 같다.

Table 1 Factors and levels uesd in experiments

factors	unit	level		
		1	2	3
A. Mold temp	℃	40	50	60
B. Melt temp	℃	205	225	245
C. Flow rate	㎤/sec	4.95	5.95	6.95
D. Packing time	sec	5	6	7
E. Packing pre.	MPa	10	15	20

다구찌 방법의 L18 직교배열표에 따라 18 번의 사출성형 시뮬레이션을 수행하고 복굴절의 크기를 계산하였으며 망소특성으로 간주하여 다음 식에 따라 SN 비를 계산하였다.

$$\eta_i = -10\log_{10}\frac{1}{5}\sum_{j=1}^{5} y^2_{ij} \qquad (1)$$

여기서 η_i 는 각 실험별 SN 비 값이며 y_{ij} 는 각각의 i 번째 실험에 대하여 Fig.1 에서 나타난 j 지점에서 계산한 평균 복굴절 값이다. 복굴절의 크기와 위치에 따른 복굴절 차이를 기초로 하여 SN 비를 계산한 결과는 Table 2 와 같다.

서로 다른 인자들이 복굴절에 영향을 주는 효과는 Table 1 에서 나타낸 각 인자수준에 대해 SN 비로부터 판단할 수 있다. 이 상대적 효과는 분산을 분해함으로 보다 잘 파악할 수 있는데 이 기법을 일반적으로 분산분석(ANOVA)이라고 하며, 이들 값들은 다양한 파들의 세기와 유사한 것으로, SN 비를 변동시키는데 있어 인자사이의 상대적 중요성에 대한 척도가 된다. 복굴절 및 복굴절차이에 대한 인자 수준별 평균을 도시하면 각각 Fig 2, Fig 3 과 같다.

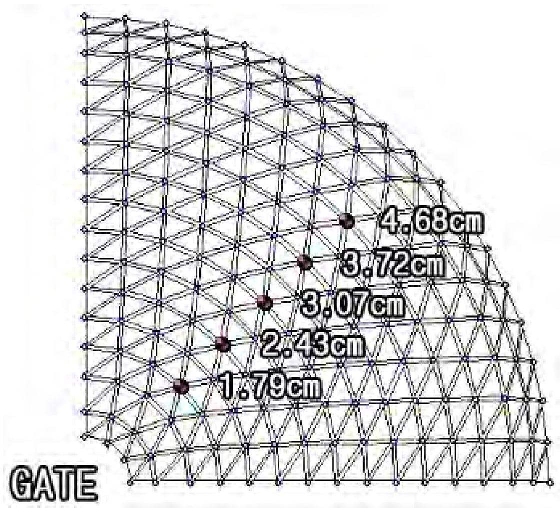


Fig.1 The finite element mesh

Table 2 SN ratio for birefringence

no	column no.								S/N (dB)	
	e	e	e	A	B	C	D	E	Bire.	Diff.
1	1	1	1	1	1	1	1	1	59.05	57.08
2	1	1	2	2	2	2	2	2	61.64	58.17
3	1	1	3	3	3	3	3	3	63.41	59.69
4	1	2	1	1	2	2	3	3	61.24	57.70
5	1	2	2	2	3	3	1	1	67.28	64.33
6	1	2	3	3	1	1	2	2	58.85	56.60
7	1	3	1	2	1	3	2	3	58.67	56.36
8	1	3	2	3	2	1	3	1	62.62	59.07
9	1	3	3	1	3	2	1	2	65.51	62.67
10	2	1	1	3	3	2	2	1	65.38	61.88
11	2	1	2	1	1	3	3	2	58.84	56.15
12	2	1	3	2	2	1	1	3	62.29	59.33
13	2	2	1	2	3	1	3	2	63.24	59.35
14	2	2	2	3	1	2	1	3	59.47	57.04
15	2	2	3	1	2	3	2	1	62.57	59.42
16	2	3	1	3	2	3	1	2	64.09	61.21
17	2	3	2	1	3	1	2	3	63.03	59.46
18	2	3	3	2	1	2	3	1	59.59	57.41

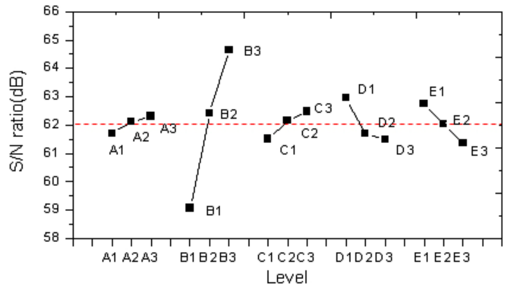


Fig.2 SN ratio graph for birefringence

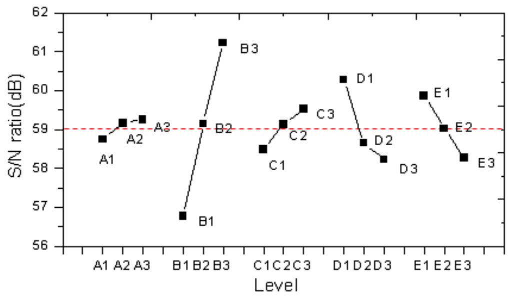


Fig.3 SN ratio graph for birefringence difference

복굴절의 크기와, 복굴절 차이에 가장 영향을 많이 주는 공정조건은 수지온도(B) 와 보압시간(D) 그리고 보압크기(E) 순서임을 알 수 있다. 수지온도가 높을수록 캐비티 내에서 수지점도가 낮아지고 잔류응력 및 분자배향이 감소되어, 결과적으로 복굴절의 크기 및 균일도가 향상되는 것으로 판단된다. 또한 보압유지시간이 짧고 보압크기가 작을수록 복굴절을 감소시키고, 그 차이도 감소시킴을 알 수 있다. 결과적으로 최적의 인자수준 조건은 복굴절 최소화, 균일화의 경우 모두 $A_3B_3C_3D_1E_1$ 이 될 것이다. 기존공정조건은 $A_1B_2C_2D_2E_2$에 해당되므로 가법모델에 의한 추정으로 기존공정조건[12] 및 최적조건에 대한 SN비는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{old} = m + (m_{A1} - m) + (m_{B2} - m) + (m_{C2} - m) + (m_{D2} - m) + (m_{E2} - m) \quad (2)$$

$$\eta_{opt} = m + (m_{A3} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C3} - m) + (m_{D1} - m) + (m_{E1} - m) \quad (3)$$

기존공정조건[12]에 비해 최적공정조건을 적용한 경우 복굴절의 크기는 4.145 dB 복굴절 차이는 5.543 dB 향상됨을 알 수 있었다.

2.2 복굴절 분포

다구찌 방법을 적용하여 복굴절의 크기와 복굴절 차이를 최소화시키는 최적 공정조건인 $A_3B_3C_3D_1E_1$ 에 대하여 해석을 수행하였다. 충전과정에 대한 시뮬레이션 결과 여러 반경위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 결과는 Fig4 와 같다. 최적조건을 적용한 경우 기존조건[12]에 비하여 복굴절의 크기가 약½ 정도로 크게 감소하였으며, 위치별 복굴절의 차이도 크게 감소함을 볼 수 있었다. 또한 흥미 있는 사실은 기존 조건의 경우 복굴절의 최대 지점이 z/h≈0.7~0.8 인 반면 최적조건의 경우에는 z/h≈0.8~0.85 사이에서 최대값이 존재함을 볼 수 있다. 이유는 최적 공정조건의 경우는 기존조건에 비하여 사출온도와 금형온도가 높기 때문에 고화층 두께가 감소한데 기인한 것으로 판단된다.

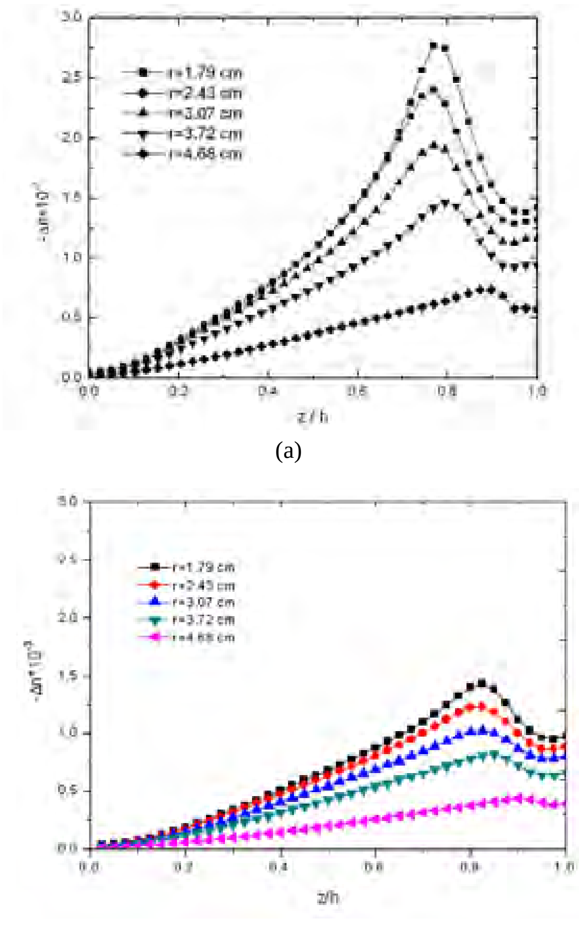
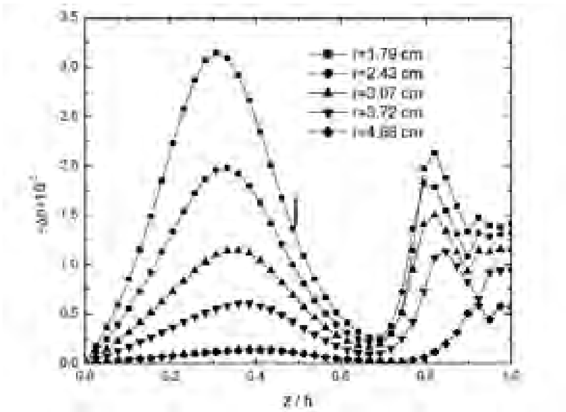


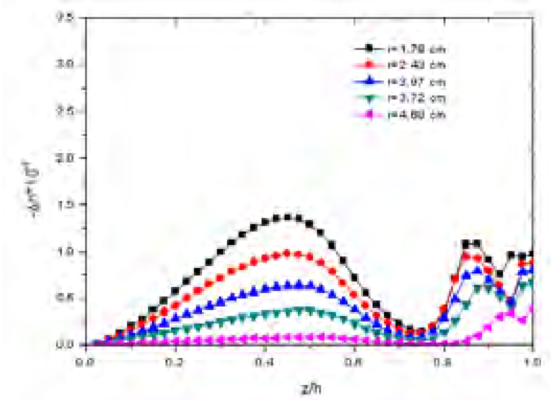
Fig.4 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial position at the end of filling under (a) reference conditions used in ref. [12] and (b) optimized conditions

충전과정을 포함한 보압과정까지의 여러 반경위

치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 결과는 Fig.5 와 같다. 최적조건의 경우는 기존조건 12 에 비하여 첫 번째 발생하는 최대값이 약 40% 정도로 작고 위치별 복굴절 차이도 크게 감소된 것을 볼 수 있는데, 이는 사출온도 및 금형온도가 높다는 이유이외에 보압유지 시간과 보압의 크기가 상대적으로 작아 추가적인 유동효과가 작게 나타나기 때문이다.



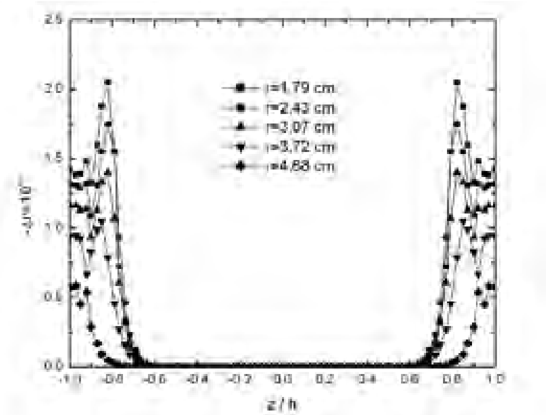
(a)



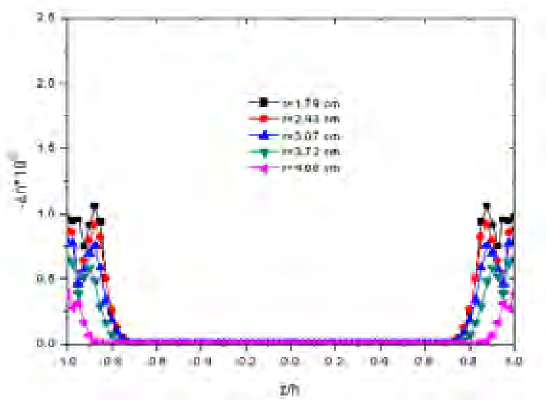
(b)

Fig.5 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at radial position at the end of packing under (a) reference conditions used in ref. [12] and (b) optimized conditions

보압이 없는 상태에서 냉각과정까지의 여러 반경위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 그래프는 Fig.6 과 같다. 충전과정이후 냉각되면서 유동으로 인한 복굴절은 디스크의 중심부에서 분자배향의 빠른 이완 때문에 0 임을 알 수 있다. 특히 최적 조건의 경우 최대 복굴절은 기존조건에 비하여 ½이하로 감소됨을 볼 수 있다. 그리고 게이트에서 멀어짐에 따라 최대값의 위치는 벽면쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.



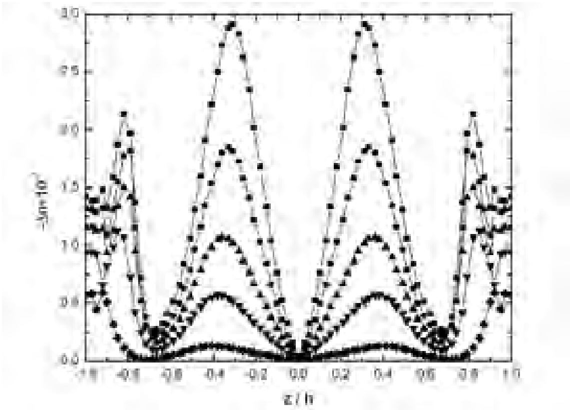
(a)



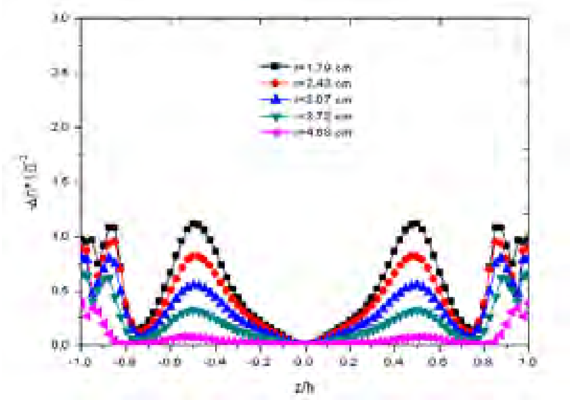
(b)

Fig.6 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial position at the end of cooling with no packing under (a) reference conditions used in ref. [12] and (b) optimized conditions

보압과정을 포함한 냉각과정까지의 여러 반경위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 그래프는 Fig.7 과 같다. 최적조건을 적용한 경우 복굴절의 최대치는 기존조건에 비하여 ⅓정도로 크게 감소되고 있으며, 위치에 따른 복굴절 차이도 매우 작아 비교적 균일한 복굴절 분포를 보이고 있다. 특히 사출온도 증가, 보압시간 및 보압크기의 감소 영향으로 보압에 의해 발생하는 복굴절 크기와 1 차 충전에 의하여 발생하는 크기가 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig.7 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial position at the end of cooling with packing under (a) reference conditions used in ref. [12] and (b) optimized conditions

3. 결론

사출성형 광디스크에 대한 시뮬레이션을 통하여 복굴절을 계산하였다. 시뮬레이션 결과를 기초로 실험계획법을 적용하여 사출성형 조건이 복굴절에 미치는 영향을 관찰하고 복굴절의 최소화 및 균일도를 극대화 시킬 수 있는 최적의 사출성형 조건을 도출하였다. 디스크의 복굴절에 영향을 크게 주는 사출성형 조건은 수지온도, 보압시간, 보압크기의 순서임을 알 수 있었다. 실험계획법에 의하여 도출한 성형조건을 적용한 경우 기존조건에 비하여 보압에 의한 복굴절은 ⅓, 1 차 충전에 의한 복굴절은 ½정도 감소하였으며, 위치에 따른 복굴절 차이도 크게 감소하였다.

참고문헌

1. Isayev, A.I. and Hieber, C.A., "Toward a viscoelastic modeling of the injection molding of polymers," Rheol. Acta. 19, 168 ?182, 1980.Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
2. Isayev, A. I., "Orientation Development in the Injection Molding of Amorphous Polymers," Polym. Eng. Sci. 23, 271-284, 1983.
3. Isayev, A.I., Ed., "Injection and Compression Molding Fundamentals," Marcel Dekker, New York, 1987.
4. Isayev, A. I., Ed., "Modeling of Polymer Processing," Recent Development, Hanser, Munich, 1991.
5. Wimbereger-Friedl R., "Assessment of orientation, stress and density distributions in injection-molded amorphous polymers by optical techniques," Prog. Polym. Sci. 20, 369-401, 1995.
6. Baaijens, F.P.T., "Calculation of residual stresses in injection molded products," Rheol. Acta.. 30, 284-299, 1991.
7. Flaman, A.A., "Buildup and Relaxation of Molecular Orientation in Injection Molding," Part I: Formulation, Polym. Eng. Sci. 33, 193-201, 1993.
8. Kim, I.H., S.J. Park, S.T. Chung and Kwon, T.H., "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk Part 1: Injection Molding With Viscoelastic Compressible Fluid Model," Polym. Eng. Sci. 39, 1930-1942, 1999.
9. Lee, Y. B., Kwon, T.H and Yoon, K., "Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk. Part 1: Basic Modeling and Results for Injection Molding," Polym. Eng. Sci. 42, 2246-2272, 2002.
10. Shyu, G.D., "Birefringence and Residual Stresses in Molded Articles of Amorphous Polymers," Ph.D. Dissertation, The University of Akron, 1993.
11. Shyu, G.D. and Isayev, A.I., "Residual Stresses and Birefringence in Injection Molded Disks," SPE ANTEC Tech Papers 41, 2911-2917, 1995.
12. Shyu, G.D., Isayev, A.I and Lee, H.S., “Numerical simulation of flow-induced birefringence in injection molded disk,” Korea-Australia Rheology Vol.15, pp. 159-166, 2003.