

PET 병용 프리폼 사출성형에서 잔류응력과 수축 최소화를 위한 성형조건의 연구

조성환* · 홍진수** · 류민영†

서울과학기술대학교 제품설계금형공학과, * (주)삼양사 중앙연구소, ** 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원
(2011년 3월 17일 접수, 2011년 4월 11일 수정, 2011년 4월 11일 채택)

Investigation of the Molding Conditions to Minimize Residual Stress and Shrinkage in Injection Molded Preform of PET Bottle

Sung Hwan Cho*, Jin Su Hong**, and Min Young Lyu†

Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*Samyang Central R&D Center, 63-2 Hwaam-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-717, Korea

**Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received March 17, 2011; Revised April 11, 2011; Accepted April 11, 2011)

초록: PET병은 프리폼(preform)을 사출성형한 후 이를 블로우 성형기에 이송시켜 블로잉하여 성형된다. 내열을 요구하는 병 즉, 주스나 곡류음료용 PET병은 목 부분(neck 또는 thread 부분)에 내열성을 부여하기 위해 프리폼 성형 후 블로잉하기 전에 목 부분을 결정화시킨다. 그러나 사출성형품에 존재하는 잔류응력이 결정화를 방해하기 때문에 프리폼 목 부분의 충분한 결정화를 위해 사출 후 프리폼을 열처리(annealing) 한다. 이 열처리는 잔류응력을 해소시키기 위해서 수행하는데 사출 시 성형조건의 최적화를 통하여 잔류응력을 최소화한다면 열처리 시간을 단축시킬 수 있다. 본 논문에서는 사출 시 프리폼에 형성되는 잔류응력을 최소화하고 치수정밀도를 유지하기 위한 연구로 CAE 해석을 통하여 최적 사출조건을 제시하였다. 성형조건별 잔류응력 및 수축률의 변화를 관찰하고 이를 최소화시키는 성형조건을 찾기 위해 실험계획법을 적용하였다. 사출온도, 보압크기, 그리고 사출시간을 인자로 하여 최적의 성형조건을 결정하였다. 잔류응력에 영향을 주는 인자는 사출온도와 사출 시간 순으로 나타났고 수축률에 영향을 주는 인자는 사출온도로 나타났다. 본 연구에서 결정한 최적 조건에서 최대 잔류응력, 잔류응력의 분포, 그리고 수축률이 기존 조건에 비해 각각 22%, 40%, 그리고 25% 감소하였다.

Abstract: PET bottle is manufactured by blow molding the preform, which is molded by injection molding. The neck part of the preform of PET bottle for juice or grain-based beverage is crystallized before blowing to improve heat resistance at the entrance of the bottle. However, residual stress, developed during injection molding of preform, prevents the crystallization. In order to release the residual stress in the preform, the preform is annealed after the injection molding. If the residual stress is reduced by optimizing the injection molding conditions of preform the annealing time would be shortened. In this study, the optimum conditions for minimizing the residual stress and increasing dimensional accuracy of the injection molded preform are suggested through CAE analysis. In order to optimize the molding conditions, minimizing residual stress and shrinkage, computer simulations have been carried out with help of design of experiment scheduling. Injection temperature, initial packing pressure and filling time were selected for control parameters. Residual stress was affected by injection temperature and filling time. Shrinkage was affected by injection temperature. It was found that maximum residual stress, distribution of residual stress and shrinkage were decreased by 22%, 40% and 25%, respectively at an optimum molding condition compared with the results of previous molding condition.

Keywords: preform, injection molding, residual stress, shrinkage, design of experiment.

서론

PET병은 프리폼(preform)을 사출성형한 후 이를 블로우 성형기에 이송시켜 블로잉(blowing)하여 성형된다. 주스나 곡류 음료 등은 90 °C 이

상의 고온에서 살균처리하여 PET 병에 담기기 때문에 병의 목부분(Neck 또는 Thread부분)의 내열성이 매우 중요하다.^{1,2} 병 주입구 부분의 내열성을 부여하기 위해서는 프리폼을 성형한 후 블로잉하기 전에 목 부분을 결정화시켜야 한다. PET는 결정성 플라스틱으로 불투명한 성질을 가지고 있으나 투명한 프리폼을 얻기 위해 낮은 금형온도로 사출하여 결정화가 이루어지지 않도록 성형한다. 이 때 이렇게 성형된 프리폼

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

은 투명하지만 제품 내부에 잔류응력이 크게 존재하게 되고 이는 나중에 목 부분의 결정화도를 높이는데 방해가 된다. 따라서 프리폼을 사출성형한 후 열처리(annealing)를 수행하여 이러한 잔류응력을 해소시키는데 사출성형 시에 생성되는 잔류응력을 최소화한다면 열처리 시간을 단축시킬 수 있다.

현재까지 열처리 조건 및 결정화와 관련된 논문은 열처리 조건과 결정화도의 관계를 실험을 통하여 분석하거나,¹⁻³ 사출성형이나 박막증착 공정 시 수지의 결정화도를 높여 물성을 향상시키는 연구 등의^{4,5} 연구가 있다. 그러나 잔류응력 감소 및 수축률 감소를 위한 사출성형 조건에 관한 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 CAE를 통하여 프리폼의 사출성형조건에 따라 형성되는 잔류응력과 수축률을 관찰하였다. CAE 해석연구에서는 실험계획법을 적용하여 잔류응력 및 수축률에 영향을 미치는 인자를 파악하고 이를 최소화시키는 최적의 성형조건을 결정하였다. 또한 기존 조건과 최적 조건에서의 성형해석 결과를 비교하고 검토하였다.

실험 및 사출성형 해석

프리폼의 특징. 프리폼의 성형을 분석하기 전에 사출성형된 프리폼의 특성에 대해서 분석하였다. 투명한 사출성형품에서 잔류응력의 변화를 편광성 장치를 통하여 관찰할 수 있다.^{2,6,7} 사출성형한 표준 시편을 두 개의 편광판을 통해 보이는 복굴절을 Figure 1에 나타내었다. 이를 통해 볼 때 게이트 부의 잔류응력이 높고 게이트에서 멀어질수록 잔류응력이 감소함을 알 수 있다. 즉, 위치에 따라서 잔류응력의 분포가 다름을 알 수 있다. Figure 2는 열처리 시간에 따른 프리폼의 잔류응력 분포를 복굴절을 통해 관찰한 것으로 시간이 지남에 따라 시편의 잔류응력이 점차 감소됨을 알 수 있다.

사출성형품에 존재하는 잔류응력은 사출시 수지 흐름에 의한 잔류응력(flow induced residual stress)과 냉각시 냉각편차에 의한 잔류응

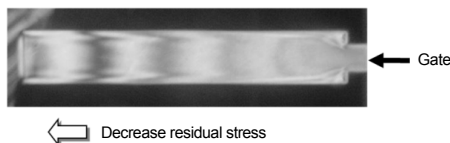


Figure 1. Distribution of birefringence in an injection molded specimen.

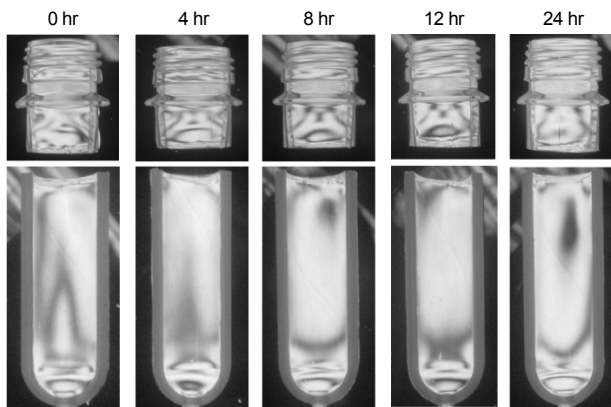


Figure 2. Distribution of birefringence according to annealing time.

력(thermal induced residual stress)으로 분류된다.^{2,8} 흐름에 의한 잔류응력은 충전시 발생하는 수지의 전단응력과 고분자 사슬의 배향에 의해 형성되는데 특히 고분자 사슬의 배향에 의한 잔류응력은 유리전이온도(T_g) 이상의 온도에서 열처리해야 제거할 수 있다. 이것은 고분자 사슬이 유리전이온도(T_g) 이하에서는 사슬의 움직임이 발생하지 않아 고분자 사슬 구조의 이완이 이루어지지 않기 때문이다. 반면, 열에 의한 잔류응력은 상온에서도 시간이 지남에 따라 해소된다. 이것은 고분자의 점탄성 거동에 의한 것으로 초기에 빠르게 진행되다가 그 이후에는 감소 속도가 늦어지게 되는데 열처리를 통하여 잔류응력이 해소되는 시간을 단축시킬 수 있다. 프리폼에 결정화가 이루어지지 않은 상태에서 행하는 열처리 조건은 유리전이온도 이하이므로 열에 의한 잔류응력을 해소하는 과정이라 볼 수 있다.

프리폼의 사출성형 해석.

모델링 및 성형조건. 프리폼의 성형과정을 분석하기 위해 성형해석을 수행하였다. 해석 소프트웨어는 Moldflow를 사용하였으며 해석모델은 500 mL PET 병용 프리폼으로 무게는 33.5 g, 두께는 평균 3.6 mm이다. 해석을 위한 메쉬 및 각부 명칭이 Figure 3에 나타나 있다. 해석에 사용한 수지는 EASTMAN의 EASTPAK 7352이며 I.V.는 0.80 dL/g이다. 실제 프리폼 사출은 48-Cavity로 이루어지고 있으나 본 해석에서는 하나의 캐비티만을 떼어서 해석하였다.

현장의 성형조건으로 해석하였으며 수지의 사출온도는 305 °C이고 냉각수 온도는 11 °C이다. 사출성형은 충전(filling), 보압(packing), 그리고 냉각(cooling)의 단계로 이루어지며 각 구간별 설정시간은 각각 3.5 초, 7.5초, 그리고 5.5초로 총 16.5초로 진행되었다. 여기서 보압은 다단 보압이 적용되며 초기보압 1150 psi에 2.0-2.5-3.0초로 나누어 수행되며 최종 보압의 크기는 680 psi이다.

해석 결과. 현장의 성형조건으로 CAE 해석을 통하여 프리폼의 부위별 잔류응력을 관찰하였다. Figure 4에 나타난 프리폼의 목 부에 세부명칭이 있는 이 네 곳은 실제로 치수를 관리하는 부분이다. 프리폼의 잔류응력은 프리폼의 게이트부터 목 부분의 E-Dia까지 그 분포가 다양하게 나타났으며 Figure 5에 나타나 있다. 특히, 목 부분 중 A-Dia의 잔류응력이 다른 부분보다 잔류응력이 크게 나타났다. 실제로 결정화 과정에서 결정화도와 수축률에 가장 문제가 되고 있는 부분이 A-Dia 부분이며 이는 해석결과를 통하여 볼 때 잔류응력과 관련되어 있다고 판단된다.

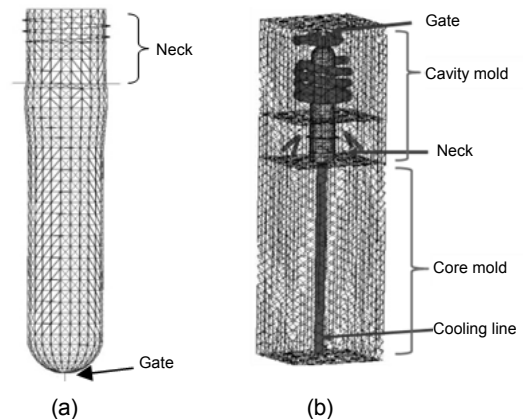


Figure 3. Mesh for computer simulation of injection molding of perform. (a) mesh in the preform; (b) mesh in the mold.

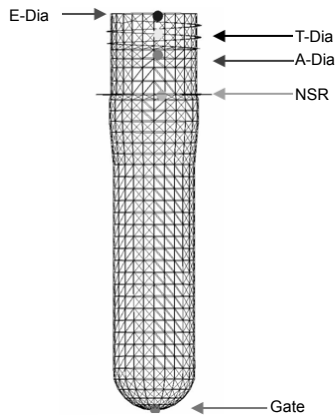


Figure 4. Part names in the preform.

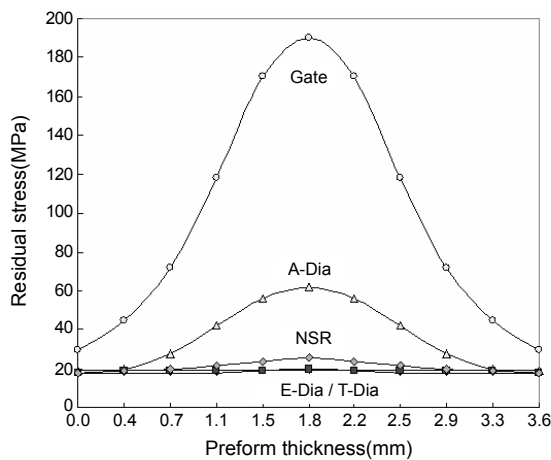


Figure 5. Residual stress at each point in the neck of preform.

A-Dia 영역은 나사형상이 시작되는 부분으로 흐름의 변화가 심하고 나사산을 흘려가기 위해 압력이 크게 소요되어서 잔류응력이 크게 나타났다. 따라서 A-Dia의 흐름특성을 바꾸어 잔류응력을 줄이고 치수안정성을 위해 수축률 또한 최소화하는 조건도 필요하다고 판단된다.

실험계획법에 의한 최적성형 조건 선정

실험계획법 적용. 프리폼의 요구 품질은 결정화도 향상을 위한 목 부분의 잔류응력 및 치수정밀도를 위한 수축률 최소화이다. 이를 만족하는 사출조건을 선정하기 위해 목 부분 중 잔류응력이 가장 높은 A-Dia에 대하여 직교배열표에 의한 실험계획법을 적용하였다.⁹ 사출온도, 최초보압, 그리고 사출시간의 세가지 인자를 각각 세가지 조건을 선정하였으며 각 인자는 독립적인 성형조건으로 교호작용이 없는 것으로 가정하였다. 실험변수, 실험수준 그리고 선정된 실험조건이 Table 1에 나타나 있다. 현장 조건은 $A_1B_1C_1$ 이며, 이 조건에서 사출온도는 $\pm 20^\circ\text{C}$, 최초보압은 $\pm 150\text{ psi}$, 사출시간은 $\pm 1\text{ sec}$ 로 하여 실험조건을 설정하였다.

잔류응력에 영향을 미치는 변수. Table 1과 같이 선정된 실험조건으로 해석한 잔류응력 결과가 Table 2에 나타나 있다. Table 2의 잔류응력은 A-Dia에 분포하는 최대 잔류응력을 나타낸다. Table 3은 잔류

Table 1. Molding Conditions Using Design of Experiments

Control Parameter	Control Level	Molding Conditions
Injection temperature ($^\circ\text{C}$)	A_0	285
	A_1	305
	A_2	325
Initial packing pressure (psi)	B_0	1000
	B_1	1150
	B_2	1300
Filling time (sec)	C_0	2.45
	C_1	3.45
	C_2	4.45

Table 2. Predicted Residual Stress according to Molding Conditions

No.	1	2	3	4	Molding condition	Residual stress
1	0	0	0	0	$A_0B_0C_0$	62
2	0	1	1	1	$A_0B_1C_1$	57
3	0	2	2	2	$A_0B_2C_2$	52
4	1	0	1	2	$A_1B_0C_2$	59
5	1	1	2	0	$A_1B_1C_0$	70
6	1	2	0	1	$A_1B_2C_1$	66
7	2	0	2	1	$A_2B_0C_1$	79
8	2	1	0	2	$A_2B_1C_2$	69
9	2	2	1	0	$A_2B_2C_0$	86
A B error C Total						600

Table 3. Analysis of Variance for Residual Stress

	S	Φ	V	F0	F(0.05)	F(0.01)
A	674	2	337	144.4	19.00	99.00
B	10.7	2	5.3	2.3	19.00	99.00
C	242.7	2	121.3	52.0	19.00	99.00
error	4.7	2	2.3			
Total	933	8				

Table 4. Analysis of Variance for Residual Stress Eliminating Parameter B(Initial Packing Pressure)

	S	Φ	V	F0	F(0.05)	F(0.01)
A	674	2	337	84.3	6.94	18
C	243	2	121.5	30.4	6.94	18
error	16	4	4			
Total	933	8				

응력에 대한 분산분석표이다. 각각의 변수들이 잔류응력에 미치는 정도를 통계처리를 통하여 계산하면 사출온도와 사출시간은 각각 99, 95% 신뢰구간까지 유효한 변수로 나타났으며 최초 보압은 유효한 변수로 나타나지 않았다. F0 값이 95%에서는 19.00을 넘으면 유효한 변수가 되며, 99%에서는 99.00을 넘으면 매우 유효한 변수임을 나타낸다.

최초 보압의 경우는 F0 값이 낮아 잔류응력에 영향을 덜 미치는 변수이므로 이를 오차항에 포함시켜 통계처리를 다시 실시하였다. 이렇게 함으로써 다른 두 가지 변수의 영향을 더욱더 세밀하게 분석할 수 있다. Table 4는 최초보압(B)을 오차항에 포함시킨 분산분석표를 나타낸다. 그 결과 사출온도와 사출시간 모두 99% 신뢰도에서 매우 유효한 변수로 나타났다.

실험변수간에 교호작용이 없으므로 Table 5와 같이 A, C인자의 표를 만들어 잔류응력을 최소로 하는 실험조건을 찾아 보았다. Table 5에서 수치는 각 인자의 수준에서의 잔류응력 해석결과와 합을 나타낸다. 잔류응력을 최소로 하는 조건은 A₀와 C₂로 나타났으며 이를 통계처리한 결과, A-Dia 부분에 분포하는 추정 최대 잔류응력 값은 50±3.76 MPa(90% 신뢰도)로 나타났다. 사출온도와 사출시간은 수지가 금형에 충전될 때 점도, 충전속도, 냉각 등에 영향을 미치기 때문에 성형 후 잔류응력 형성에 영향을 크게 미친다고 판단된다.

수축률에 영향을 미치는 변수. Tables 6과 7은 각각 실험 조건 별 A-Dia 부분의 최대 수축률 해석결과와 분산분석표를 나타낸다. 각각의 변수들이 수축률에 미치는 정도를 통계처리를 통하여 계산한 결과, 사출 온도만이 수축률에 매우 유효한 변수로 나왔으며 사출시간과 최초 보압은 유효한 변수로 나오지 않았다.

Table 7에서 최초보압은 F0 값이 매우 작아 유효하지 않은 변수로

Table 5. Sum of Residual Stresses according to Control Parameters

Experimental factor and level	A ₀	A ₁	A ₂	C ₀	C ₁	C ₂
Sum of residual stresses	171	195	234	218	202	180

Table 6. Predicted Shrinkage according to Molding Conditions

No.	1	2	3	4	Molding condition	Shrinkage
1	0	0	0	0	A ₀ B ₀ C ₀	8.47
2	0	1	1	1	A ₀ B ₁ C ₁	7.59
3	0	2	2	2	A ₀ B ₁ C ₂	6.73
4	1	0	1	2	A ₁ B ₀ C ₂	8.68
5	1	1	2	0	A ₁ B ₁ C ₀	9.17
6	1	2	0	1	A ₁ B ₂ C ₁	9.02
7	2	0	2	1	A ₂ B ₀ C ₁	11.7
8	2	1	0	2	A ₂ B ₂ C ₂	11.4
9	2	2	1	0	A ₂ B ₂ C ₀	12.2
A	B	error	C	Total		84.96

Table 7. Analysis of Variance for Shrinkage

	S	Φ	V	F0	F(0.05)	F(0.01)
A	27.13	2	13.57	93.55	19.00	99.00
B	0.15	2	0.08	0.52	19.00	99.00
C	1.53	2	0.77	5.28	19.00	
error	0.29	2	0.15			
Total	29.1	8				

Table 8. Analysis of Variance for Shrinkage Eliminating Parameter B(Initial Packing Pressure)

	S	Φ	V	F0	F(0.05)	F(0.01)
A	27.13	2	13.57	123.32	6.94	18
C	1.53	2	0.77	6.95	6.94	18
error	0.44	4	0.11			
Total	29.1	8				

Table 9. Sum of Shrinkages according to Control Parameters

Experimental factor and level	A ₀	A ₁	A ₂	C ₀	C ₁	C ₂
Sum of shrinkages	22.8	26.9	35.3	29.8	28.3	26.8

보고 오차 항으로 포함시켜 분산분석을 다시 실시하였고 그 표가 Table 8에 나타나 있다. 그 결과, 사출시간 역시 수축률에 유효한 변수로 확인되었다. Table 9는 수축률을 최소로 하는 조건을 찾기 위한 A, C 인자를 나타낸다. 최적 조건은 A₀와 C₂로 나타났고 이를 통계처리한 결과, 추정 수축률은 7.09±0.62%(90% 신뢰도)로 나타났다.

잔류응력에 비해 수축률에서 사출온도가 크게 영향을 미치는 변수로 나타난 것은 수지가 냉각될 때 온도 분포에 따라 수축의 정도가 달라지기 때문이다. 수축률은 곧 잔류응력 형성에 영향을 미치므로 프리폼 사출시 사출온도는 중요한 인자로 고려되어야 한다.

결과 및 토론

기존 및 최적조건에서 프리폼의 잔류응력 비교. Figures 6과 7은 잔류응력이 가장 큰 A-Dia 부분에서 원주방향으로 잔류응력의 분포를 보여주고 있다. 잔류응력이 위치 별로 차이를 보이고 있는데 목 부분의 나사형상이 시작되는 부분과 가장 멀리 떨어져 있는 부분의 흐름이나 냉각 특성이 다르기 때문이라 판단된다. 잔류응력이 가장 큰 부분은 나사가 시작되는 부분으로 관찰되었는데 수지의 흐름이 이곳에서 방향을 바꾸게 되고 나사형상이 시작되기 때문에 두께가 급격히 두꺼워져 냉각

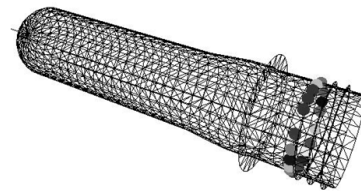


Figure 6. Measuring points of residual stress in A-Dia region.

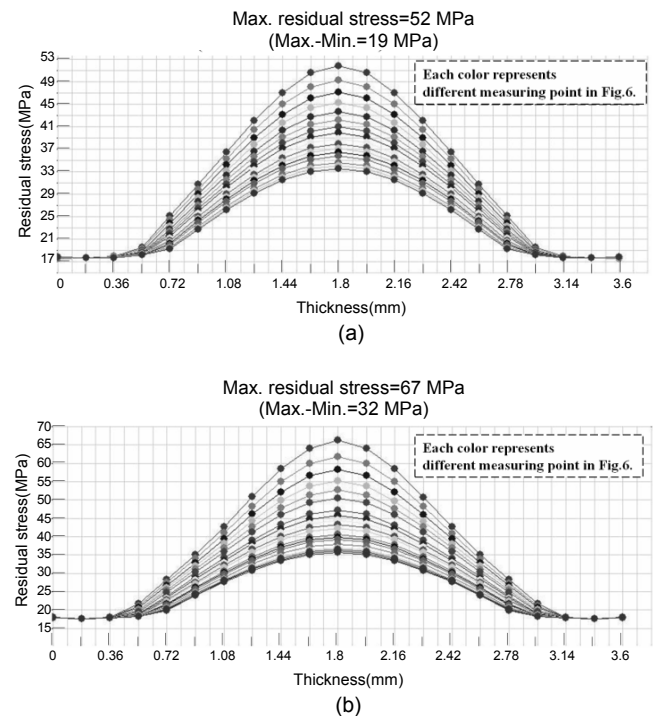


Figure 7. Comparison of residual stress at optimum molding condition (a); at previous molding condition (b).

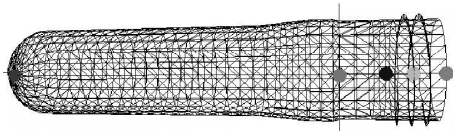


Figure 8. Measuring points of temperature in the preform.

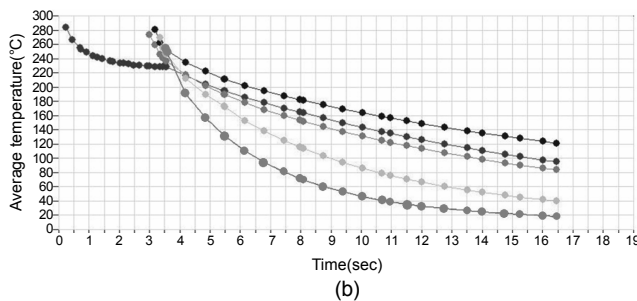
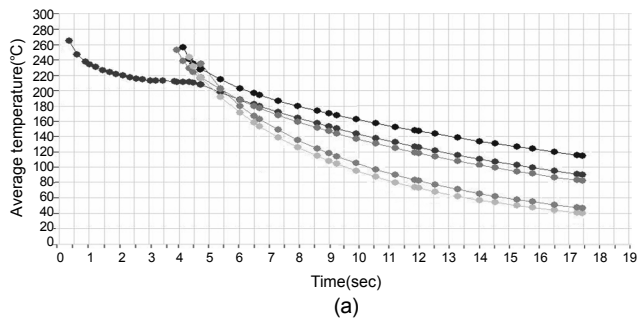


Figure 9. Comparison of temperatures at measuring points for optimum molding condition (a); for previous molding condition (b).

시 수축편차가 커져 발생된 것으로 판단된다. 해석결과 최적조건은 기존 조건에 비해 최대 잔류응력은 22%(최대 잔류응력: 67→52 MPa), 잔류응력 분포는 40%(최대 잔류응력과 최소 잔류응력의 차: 32→19 MPa) 정도 감소된 결과를 보였다. 최적조건이 기존조건에 비하여 사출시간이 길어 충전 시 발생하는 최대 충전압력 및 전단응력이 감소하여 잔류응력이 작게 형성된 것으로 판단된다.

Figures 8과 9는 프리폼 부위별 온도 분포를 보여주고 있다. NSR에서 E-Dia까지의 온도 분포가 목 부분의 잔류응력에 영향을 미치는데 그 온도 분포 차이에 따라 잔류응력이 달라지게 된다. 최적조건이 기존조건에 비하여 온도편차가 20 °C 정도 낮아 냉각 시 수축 차이가 작아서 잔류응력이 작게 형성된 것으로 판단된다.

기존 및 최적조건에서 프리폼의 수축률 비교. 기존조건과 최적조건에서 수축률과 수축률 분포가 Figure 10에 나타나 있다. 최적조건이 기존조건에 비해 최대 수축률의 경우 25% 감소하였으며 수축의 분포도 균일하게 분포하고 있다. 이러한 결과가 프리폼 목 부위의 균일한 치수로 이어져 나사부분의 치수 안정성이 좋아질 것으로 판단된다. 프리폼의 수축률은 A-Dia 부분에서 가장 크게 나타나는데 이것은 A-Dia가 가장 두꺼운 부분으로 사출 후 냉각과정에서 가장 늦게 냉각되기 때문이다.

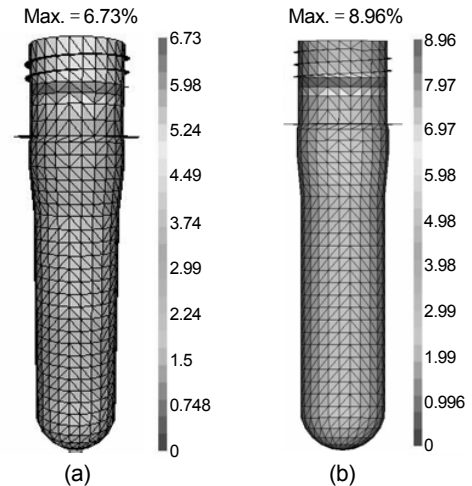


Figure 10. Predicted shrinkages in the preform at optimum molding condition (a); at previous molding condition (b).

결론

본 연구에서는 PET병 성형에 쓰이는 사출성형된 프리폼의 특성을 파악하고 프리폼의 사출성형에 대해서 연구하였다. 프리폼의 사출성형해석에 실험계획법을 적용하여 잔류응력과 수축률에 영향을 주는 인자를 도출하고 이를 최소화하는 성형조건을 제안하였다. 프리폼의 잔류응력에 영향을 미치는 주요 인자는 사출온도와 사출시간으로 나타났고 수축률에 영향을 미치는 주요 인자는 사출온도로 나타났다. 제안된 최적의 성형조건으로 해석한 결과, 최대 잔류응력과 최대 수축률이 기존 조건에 비해 각각 40%, 25% 감소한 것으로 나타났다. 본 연구는 프리폼의 사출성형 뿐만 아니라 다른 분야의 사출성형에서 최적의 성형조건과 영향인자 등을 찾기 위한 연구방법 중의 하나로써 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글: 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전력기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

참고문헌

1. M.-Y. Lyu and Y. Pae, *Polymer (Korea)*, **27**, 113 (2003).
2. M.-Y. Lyu, *Int. Polym. Process.*, **25**, 118 (2010).
3. G. M. K. Ostberg and J. C. Seferis, *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 29 (1987).
4. Y.-D. Lee, T.-Y. Wang, and S. Chang, *J. Chin. Inst. Chem. Eng.*, **14**, 347 (1983).
5. S. D. Park, C. H. Baeg, and J. W. Hong, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, **21**, 26 (2008).
6. K. Albrecht, *Photoelastic Stress Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1977.
7. J. W. Dally and W. F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1991.
8. M.-Y. Lyu and H.-Y. Kim, *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
9. C. R. Hicks and K. V. Turner, Jr., *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, 5th edition, Oxford University Press, USA, 1999.