

세라믹 단열 게이트를 이용한 블로우성형용 PET 프리폼의 백화현상 저감 기술

곽태수*, 황덕상*, 강병욱*, 김태규*^{#,}

*경남과학기술대학교 기계공학과

Improving the Whitening Phenomenon Technology for Preform PET Injection Molding by Using a Ceramic Insulation Gate

Tae-Soo Kwak*, Deok-Sang Hwang*, Byung-Ook Kang*, Tae-Kyu Kim*^{#,}

*Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University of Science and Technology

(Received 26 September 2017; received in revised form 28 November 2017; accepted 6 December 2017)

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the whitening phenomenon around the PET preform gate for blow molding. CAE analysis of plastic injection molding has been applied to design of preform shape and select the injection molding conditions. A ceramic insulation gate with lower thermal conductivity than metal is applied to improve the whitening phenomenon created around the gate in the injection molding process. According to the results of CAE analysis, the warpage deformation at the square corner was estimated to be about 0.34 mm at the bottom. From the results of the temperature history analysis, it was confirmed that the resin near the gate cooled more rapidly than the cavity. Ceramic insulated gates were fabricated to reduce the cooling rate and experiments were conducted to confirm the effectiveness of the whitening phenomenon improvement. As a result of the ceramic insulation gate experiment, it was confirmed that the whitening phenomenon was significantly reduced around the gate.

Key Words : Preform(프리폼), Injection Molding(사출성형), Residual Stress(잔류응력), Whitening Phenomenon(백화현상), CAE Analysis(CAE해석)

1. 서 론

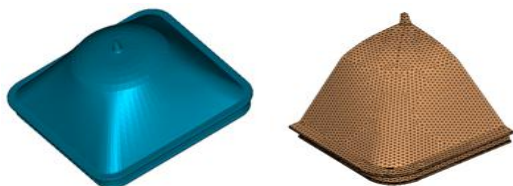
사출 연신 블로우 성형 공정은 프리폼을 사출 성형으로 제작하고 일정온도로 가열한 후 공기압으로 연신시켜 중공품을 성형하는 기술이다. 블로우 성형 공정은 연신봉의 이동에 의한 연신 공정과 공기압에 의한 팽창 공정의 두 단계로 나눌 수

가 있다. 이와 같은 공정은 큰 용량의 PET 병을 성형하는 공정에 적용되고 있다. PET는 테레프탈산과 에틸렌글리콜을 중축합하여 얻을 수 있는 포화폴리에스테르이다. 포화폴리에스테르는 일반적으로 표면 평활성이 우수하므로 광택이 있는 외관을 만드는데 사용된다. PET는 비교적 융점 높고 열팽창 계수가 낮기 때문에 뛰어난 치수안정성을 나타낸다. 수지의 결정화 특성은 성형성과 물성에 크게 영향을 끼친다. PET는 결정성 플라스틱으로 결정화도가 높은 재료이며 결정화도가 높아지면

Corresponding Author : tkkim@gntech.ac.kr
Tel: +82-55-751-3313, Fax: +82-55-751-3319

투명도가 크게 저하된다. 결정화 온도는 120~220°C이며 특히 190°C 부근에서 최대 결정화속도를 나타내며 폴리아미드나 폴리아세탈에 비해 결정화가 늦다.[1] 한편, 투명성 수지의 사출성형에 관한 연구를 살펴보면 C. Kwon^[2] 및 J. Kim^[3]은 블로우 성형시 PET용기의 두께를 균일화하기 위하여 해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과를 프리폼 설계 및 금형 제작에 응용한 바 있으며, S.H. Cho^[4]는 CAE를 통하여 프리폼의 사출성형 조건에 따라 형성되는 잔류응력과 수축율을 관찰하고 이에 영향을 미치는 인자를 파악함으로써 최적의 성형조건을 결정하는데 활용하였다. M. Yamanoi^[5]는 CAE 기술을 이용하여 게이트의 크기와 레이아웃이 광학 렌즈의 편광 및 복굴절에 미치는 영향을 예측하고 금형 설계에 응용하였다. 이와 같은 연구는 해석 결과를 이용한 설계 또는 최적 성형조건을 결정하는데 제한적으로 활용되었다. S. Choi^[6]는 PET 소재의 결정화도를 낮추어 빛의 투과도를 높이기 위해 압축성형법을 제안하고, 유체 해석 프로그램을 이용하여 성형 중 수지의 유동현상을 분석하였으며, 광탄성 측정 장비를 이용하여 사출성형 프리폼의 게이트에서 나타나는 백화 현상이 잔류응력과 관련이 있음을 확인하였다. 프리폼 사출 성형에서 백화 현상은 냉각속도에 따라 백색 결정이 발생하여 나타난다^[1]. 사출성형 후 게이트에서의 백화 현상은 열처리를 수행하여 해소시킬 수 있으나 사출성형 공정에서 최소화한다면 후열처리 공정을 생략할 수 있다.

본 연구는 CAE 해석을 통해 게이트와 캐비티 내부의 냉각속도 차이를 확인하고, 세라믹 단열 게이트를 적용하여 후열처리 공정없이 프리폼 게이트 부근에서 나타나는 백화 현상을 최소화하고자 하였다.



(a) STL 3D model (b) Mesh model

Fig. 1 3D model and mesh generation

2. CAE 해석 및 실험 방법

프리폼 사출성형 과정을 이해하고 게이트 및 캐비티의 냉각 속도를 분석하기 위하여 3D TIMON(Toray co. ltd.) CAE 해석 프로그램을 이용하였다. 해석 모델은 Fig. 1 (a)와 같이 3D CAD 프로그램을 이용한 CAD모델링 작업과 CAE해석을 위한 최소단위로 모델을 분할하는 요소생성(Mesh modeling) 작업을 수행하였다. CAE 해석을 위한 3D 모델의 요소 수는 37,498 개이며 부피는 8,029mm³ 이다. 사용된 모델은 식품 및 세제용 용기로 사용되는 사각 PET 용기이다. 프리폼의 형태는 상하, 좌우 대칭이므로 해석 시간을 단축하기 위하여 Fig. 1 (b)와 같이 1 캐비티 중 1/4 캐비티 만을 모델링하여 대칭 해석 모델을 사용하였다. 3D TIMON의 지배방정식^[7]은 유체역학 기초식을 이용한 연속식과 운동방정식, 에너지방정식으로 구성되어 있으며 압축항과 관성항, 중력항은 무시하고 정상 상태로 가정하여 해석한다. 유속의 각 성분은 압력구배에 비례하는 포텐셜 유동을 적용하고 있다. 실험 및 해석을 위해 사용된 수지는 아사히(주)의 3300G(PET, GF30%)이며, 성형조건은 PET 수지의 물성데이터와 기존 공정 데이터를 활용하여 사출온도 285°C, 금형온도 30°C, 사출시간 1sec, 냉각시간 15sec, 보압시간 5sec, 보압력 100MPa로 하였다.

3. 해석 및 실험 결과

3.1 CAE 해석 결과

프리폼 사출성형 CAE 해석을 이용하여 수지의 흐름을 파악하고, 캐비티 내부의 압력, 온도 분포와 성형 후 뒤틀림 현상 및 변형량 등을 검토하였다. Fig. 2는 수지의 충전 해석 결과이다. 충전 완료까지 0.99초가 소요되었으며, 게이트에서부터 유동 말단부인 사각형 테두리의 코너에 도달할 때까지 균일하게 유동할 것으로 예상되었다. 웰드라인 및 미충진(short shot)과 같은 유동 불량은 없을 것으로 예상된다. Fig. 3은 사출 성형 과정에서 게이트와 캐비티 내부의 압력변화 이력을 보여주

고 있다. 게이트에서 최대 100MPa정도의 압력이 소요되며 충전 완료 후 보압 유지 시간까지는 압력 변화가 나타나지 않았다. 캐비티 내부에서는 충진이 완료된 직후부터 압력은 감소하였으며 12 초 후에 고화되어 더 이상 압력 변화는 나타나지 않았다. 게이트와 캐비티 내부의 최대 온도차는 4°C로 온도 편차에 따른 불균일한 수축은 크지 않을 것으로 예상된다. Fig. 4 는 게이트와 캐비티 내부의 시간 변화에 따른 온도 변화 이력을 보여주는 그래프이다. PET 수지의 고화온도가 150°C 임을 고려하면 캐비티 내부는 약 10초 이후에 고화될 것으로 예상되는 반면에 게이트에서는 충전이 완료될 때부터 급격히 냉각되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 해석 결과는 앞서 서술한 바와 같이 게이트에서 급속 냉각에 따른 빠른 결정화가 백화 현상의 원인이 될 수 있음을 보여준다. 즉, 게이트에서의 급속 냉각에 의해 잔류 응력이 발생함과 동시에 수지의 결정화도를 높여 백화 현상이 유발되는 것으로 사료된다. 세라믹 게이트 사출성형 금형제작에 앞서 CAE해석을 이용하여 프리폼의 뒤틀림 및 변형량을 분석하였다. Fig. 5는 PET 수지의 섬유 배향과 각 방향으로의 뒤틀림 및 변형 해석 결과이다. Fig. 5 (a) 에서 수지의 흐름을 살펴보면, 섬유의 방향이 복잡하게 흩어지거나 만나는 부분은 나타나지 않고 단조롭게 나타났다. 한편, Fig. 5 (b)에서와 같이 수지의 유동 방향과 동일한 Y방향으로 배향이 이루어지고 있으므로 Y 방향으로의 수축이 X, Z 방향에 비해 많은 것을 알 수 있었다. 각 방향별 최대 변위는 X, Y, Z 방향으로 각각 0.423mm, 0.776mm, 0.407mm로 나타났다. X방향과 Z방향으로의 최대 변위는 유사하나, Y방향으로는 45%이상 크게 변형하는 것으로 나타났다. Fig. 6은 변형 해석 결과에 따라 사출성형 후 프리폼의 형태 변화를 시각화한 것이다. 사각 코너부에서 Y방향으로 들림 현상이 가장 크게 나타날 것으로 예상된다. Fig. 7은 Fig. 6과 같이 사각 코너부 주변을 따라 Y방향으로의 변형량을 예측한 그래프이다. 사각 코너부에서 바닥면으로부터 최대 0.34mm 들림 현상이 발생할 것으로 예상되므로 실험 금형 제작 시 반영하였다.

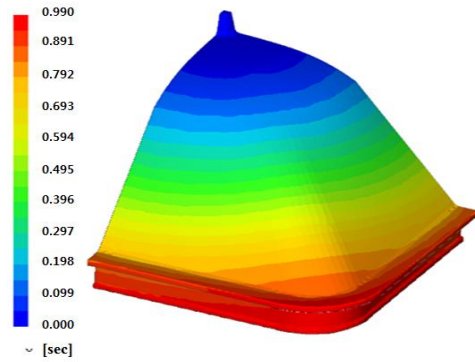


Fig. 2 Analysis results of flow pattern

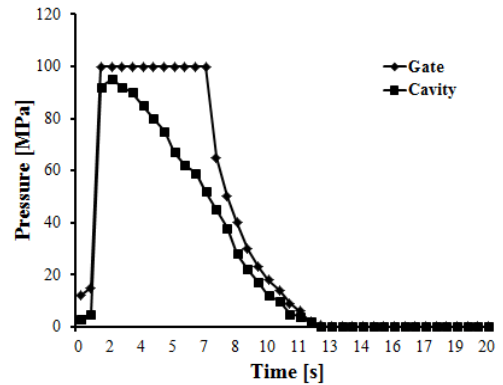


Fig. 3 Pressure history at gate and in cavity

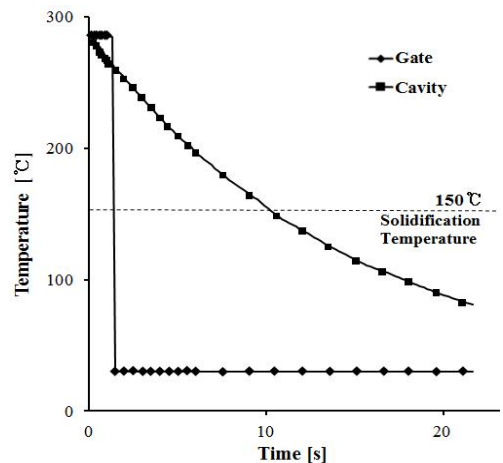


Fig. 4 Temperature history at gate and in cavity

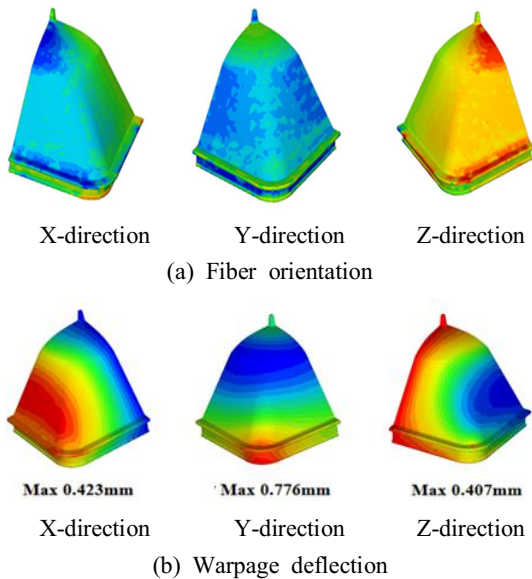


Fig. 5 Analysis results of fiber orientation and warpage deflection

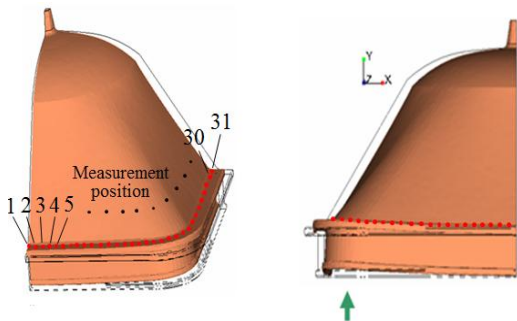


Fig. 6 Prediction result of warpage deflection

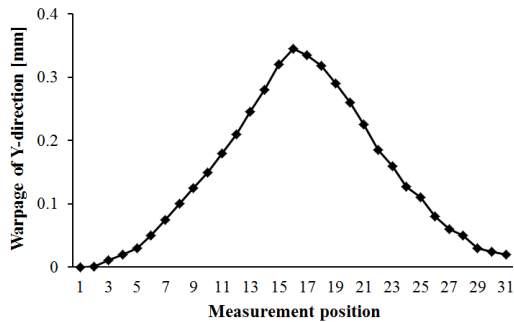


Fig. 7 Analysis results for warpage deformation

3.2 실험 결과 및 고찰

프리폼 사출성형 실험을 위한 성형조건은 PET 수지의 물성데이터와 기존 공정 데이터를 활용하였다. 온도 해석 결과에서와 같이 수지가 캐비티 내부를 완전히 채운 뒤에 캐비티 내부는 서서히 냉각되나 게이트에서는 충전 됨과 동시에 급격히 냉각된다. 따라서 게이트에서의 냉각속도를 줄이기 위해서 금형강에 비해 열전도율이 낮은 세라믹 단열 게이트를 적용하였다. 본 실험에서 사용된 사출성형기는 1 스테이지 블로우 성형기를 사용하였다. 사각 프리폼 금형의 캐비티 부는 프리폼을 형성하는 캐비티와 네크를 형성하는 립 캐비티부로 나누었으며 립 캐비티 부는 슬라이드 구조를 이용하여 금형을 개폐할 때 반개하는 구조로 제작하였다. 세라믹 게이트를 금형에 적용하기 위하여 금형의 게이트 부를 재설계하고 금형을 수정 제작하였다. Fig. 8은 실험을 위해 사용된 금형 사진이다. 세라믹 게이트 소재는 지르코니아(ZrO_2) 및 알루미나(Al_2O_3)를 선정하였다. 몰드 금형강의 열전도율은 $40 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인데 비해 지르코니아는 $2 \sim 4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, 알루미나는 $8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로써 금형강의 5~20% 이내로 매우 낮다. 따라서 세라믹 게이트는 수지의 급격한 온도 손실을 방지함으로써 게이트 주변의 잔류응력을 최소화하여 백화 현상을 저감할 수 있다.

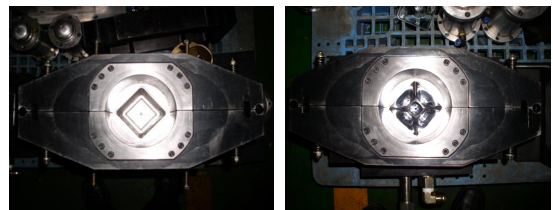


Fig. 8 Photograph of cavity core and core lip for preform injection



(a) $ZrO_2(3Y)$ (b) $ZrO_2(8Y)$ (c) Al_2O_3
Fig. 9 Photograph of sintered ceramic specimens

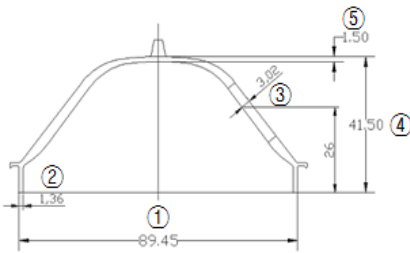


Fig. 10 Preform drawing and measurement location

Table 1 Measurement results for preform samples

Measured position	Dimension	
	Designed	Measured
①	89.45	89.17
②	1.36	1.44
③	3.02	2.00
④	41.50	41.23
⑤	1.50	1.56

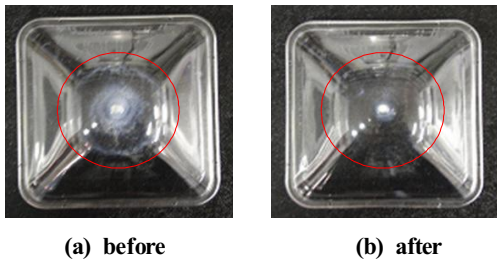


Fig. 11 Photograph of preform samples before and after application of ceramic gate

Fig. 9 는 소결하여 제작한 세라믹 게이트의 사진으로서 세라믹 게이트는 외경 $\phi 30\text{mm}$, 게이트 직경 $\phi 3\text{mm}$, 두께 1mm 로 설계하였다. Fig. 9 (a) 와 (b)는 지르코니아 3Y 및 8Y이며, Fig. 9(c)는 알루미늄으로 제작된 게이트 시편이다. 세라믹 게이트는 가압성형용 금형에 분말을 넣고 프레스로 가압한 후 소결하여 제작하였다. 세라믹 단열 게이트를 적용한 금형을 이용하여 사출성형 실험을 수행하고, 프리폼의 치수를 측정하여 설계 치수와 비교하였다. Fig. 10은 주요 치수 측정 위치를 표기한 설계도이며, Table 1은 실험 결과를 설계도와 비교한 것이다. Fig. 11은 세라믹 게이트 적용

전후 결과 사진이다. Fig. 11 (a)는 기존 금형으로 사출 성형한 사각 프리폼 사진이다. 게이트 주변에 백화 현상이 뚜렷하게 나타난 것을 볼 수 있다. 반면에, Fig. 10 (b)는 세라믹 단열 게이트를 적용한 프리폼 시편으로써 게이트 주변에서 백화 현상이 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구는 CAE 해석을 통해 게이트와 캐비티 내부의 냉각속도 차이를 확인하고, 세라믹 단열 게이트를 적용하여 프리폼 게이트 부근에서 나타나는 백화 현상을 개선할 수 있는지 여부를 확인하기 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 압력변화에 대한 CAE해석 결과, 게이트에서는 충전 완료 후 보압 유지 시간까지 압력 변화가 나타나지 않았으나, 캐비티 내부에서는 충진이 완료된 직후부터 압력은 감소하였으며 12초 후에 고화되어 더 이상 압력 변화는 나타나지 않았다.
2. 온도변화 이력에 대한 CAE 해석 결과에 따르면, 게이트에서 수지는 충전 직후 급격히 냉각되지만, 캐비티 내부에서는 비교적 서서히 냉각되는 것을 확인하였다.
3. 프리폼 사출성형 실험 결과, 동일한 성형 조건에서 기존 금형으로 사출성형한 시편에서는 백화현상이 뚜렷하게 나타났으나, 세라믹 단열 게이트를 적용한 시편에서는 게이트 주변에서 백화 현상이 나타나지 않았다.

본 연구는 열전도율이 낮은 세라믹 단열 게이트가 게이트 주변의 백화현상 개선에 효과적임을 실험적으로 확인하였다는데 의의가 있다.

후 기

이 논문은 경남과학기술대학교 2016년도 대학 회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Plastic technology association and Ohsaka municipal industrial research institute, Plastic technology, Sungandang, pp. 182-185, 2005
2. Kwon, C., Kim, J. and Kim, J., "Numerical Study on Preform Injection Molding for the PET Bottles Manufacturing" The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 10, No. 4, pp. 285-289, 2007
3. Kim, J., Kim, J., Kim, O. and Kwon, C., "Study on numerical analysis and experiment of the injection / blow molding of a preform of PET Bottle", Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 9, No. 5, pp.1119-1124, 2008
4. Cho, S., Hong, J. and Lyu, M., "Investigation of the molding conditions to minimize residual stress and shrinkage in injection molded preform of PET bottle", The Polymer Society of Korea, Vol. 35, No. 5, pp.467-471, 2011
5. Yamanoi, M., Kwak, T. and Jung, J., "Application of birefringence CAE in Mould design of Optic Lens Injection Molding Process", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp.1-6, 2012
6. Choi, S. H., Min, H. K. and Lyu, M. Y., "A study on the Molding Technology for the Preform of Blow Molding Through Compression Molding" The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 16, No. 1, pp. 3-8, 2007
7. Toray CAE software division, "3D TIMON reference manual version 7.0," Toray Industries Inc. pp.2, 2002