

PET 용기 제작을 위한 프리폼 사출 성형에 대한 수치적 연구 Numerical Study on Preform Injection Molding for the PET Bottles Manufacturing

권창오*, 김종덕**, 김정순***

Chang-Oh Kwon*, Jong-Deok Kim**, Jeong-Soon Kim***

<Abstract>

This study presents the preform injection molding of the injection stretch-blow molding process for PET bottles. The numerical analysis of the injection molding of a preform is considered in this paper using CAE with a view to minimize the warpage. In order to determine the design parameters and processing conditions in injection molding, it is very important to establish the numerical model with physical phenomenon. In this study, a three dimensional model has been introduced for the purpose and flow simulations of filling, post-filling and cooling process are carried out. The simulations resulted in the warpage in good agreement with the measurements. Also, from the result of numerical analysis, we appropriately predicted the warpage, deformation and thickness distribution along the preform wall.

Keywords : Preform, Injection molding, PET bottles

1. 서 론

프리폼 사출 성형에서 발생하는 문제점을 해결하는 방법으로 전통적으로 금형 설계자의 축적된 경험과 시행착오에 의존하였다. 이러한 경우 많은 시간과 비용을 필요하게 되며 또한 제품의 형상이 복잡해지고 요구되는 품질의 수준이 높아짐에 따라 최적의 결과를 얻기가 어렵다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 실제 금형을 제작하기 전에 발생될 문제점들을 파악하기 위하여 사용되고 있는 방법으로 상용

해석 프로그램을 이용하여 시행착오를 줄이고 짧은 시간에 금형을 제작할 수 있게 되었으며, 이러한 과정을 이용하여 최적화를 수행하면 설계자의 작업량이 축소되며 더 좋은 결과를 더 빠른 시간에 도출할 수 있다. 지난 수십년 간, 블로우 성형은 매우 급격한 성장을 가져 왔으며, 최근 엔지니어링 플라스틱의 개발이나 다차원 블로우 성형법 등 새로운 성형법의 개발에 의해 포장, 용기 뿐만 아니라 자동차 부품이나 산업자재 관계에 응용되고 있는 추세이다. 다양한 블로우 성형 기법 중 사출-연신 블로우

* 정회원, 동아정밀공업주식회사 부설 연구소장

** 정회원, 한국생산기술연구원 정밀금형팀 수석연구원

*** 교신저자, 정회원, 아주자동차대학 자동차계열 교수, 工博,
E-mail:jskim@motor.ac.kr

* Dong-A Precision Ind. Co. Ltd.,

** Korea Institute of Industrial Technology

*** Corresponding Author, Ajou Motor College, Prof., Ph. D.

(injection- stretch blowing) 성형은 강화된 물리적 상태량, 탄산음료병과 같은 제품에 중요한 가스 불투과성 상태량을 요구하는 양방향 분자배향을 가지는 병과 같은 중공 제품을 성형하는데 적용되며, 성형의 상대적인 높은 가격과 설비 때문에 탄산음료병과 같은 큰 용량의 병을 제작하는데 가장 적합하다. 그러나 PET 용기를 성형하는데 있어 가장 어려운 것은 연신율이 크게 되면 최종 두께 분포를 예측하는 것이 매우 어렵기 때문에 균일한 두께를 가질 수 있도록 프리폼 형상을 최적화 하는 것이다. 지금까지는 시행착오에 의존하며, 경제적인 비용의 증가 및 시간 소요가 요구되었다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 효율적이고 경제적인 방법을 찾아야 한다. 본 연구에서는 블로우 성형시 PET 용기의 두께를 균일화하기 위하여 수지의 온도 및 특성을 고려한 균일한 두께의 프리폼 성능 향상을 최대화할 수 있는 공정 기술 및 신뢰성을 향상시키는데 그 목적이 있다.

2. 프리폼 사출 성형 해석

2.1 사출 성형 관련 인자 및 모델 설정

본 연구에서 상용 프로그램을 이용하여 설계 인자와 사출 성형 조건이 성형품에 미치는 영향을 조사하기 위하여 크게 두 가지 영역을 이용하여 접근하였다(그림 1). 상용 사출 해석

프로그램을 이용하여 사출 제품을 해석하기 위하여 CAD 프로그램인 Unigraphics를 사용하여 형상을 모델링하였다. 그러나 모델링한 제품 형상을 직접 사출 해석용 프로그램에 사용할 수 없기 때문에 Unigraphics NX 버전의 모델 파일을 중립 파일인 iges로 바꾸어 사출 성형 해석 프로그램의 모델 파일로 사용하였다.

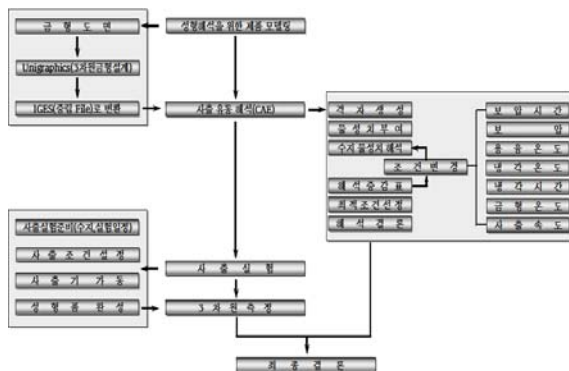


그림 1. 성형 실험 및 성형 해석 흐름도.

사출 성형 해석 프로그램에서 사용할 수 있는 모델은 3차원 솔리드 모델, 표면만 인식하는 fusion 모델, 두께를 고려한 mid-surface 모델을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 형상 자체가 높지 않으므로 두께의 변화가 일정하지 않기 때문에 두께에 대한 유동 및 냉각 현상을 고려하기 위하여 3차원 모델을 이용하여 해석을 수행하였다.



(a) Front view (b) Iso view (c) Half-section view
그림 2. preform 형상 모델링.

사출 성형 및 설계 인자가 성형품에 미치는 영향을 파악하기 위하여 설계 인자 및 사출 성형 인자를 선정하고 이들 관계를 체계적으로 조사하기 위하여 컴퓨터 원용 수치 해석(CAE)을 이용한 계산을 수행 하였으며 이 데이터를 분석함으로써 최적의 조건을 설정하였다. 이와 같은 작업으로 유도된 결과는 실제 금형을 제작하고 시험 사출을 통하여 비교함으로써 신뢰성을 제공 하고자 하였다.

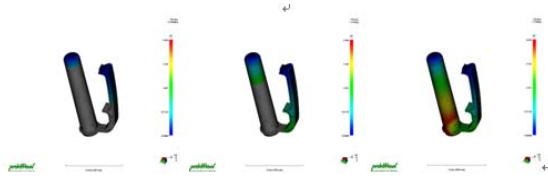
사출 성형 해석에 사용된 유한 요소 모델은 그림 3과 같다. 프리폼에 사용된 유한 요소 모델은 3D 격자를 사용하였으며, 사용된 격자수는 약 267,000 개이다. 프리폼 몸체 부분에서 스파이럴 모양의 냉각 채널을 사용하여 최대한 빨리 냉각이 이루어질 수 있도록 설계하였으며, 프리폼 안쪽 부분은 버블 형태의 냉각 채널로 구성하였다. 러너는 핫 러너를 이용하여 프리폼 아래부와 손잡이 부분에 2 점의 게이트를 구성하여 충전 평형을 유지하도록 설계 하였다.



(a) 전체조립도 (b) 프리폼 (c) 냉각 채널
그림 3. 프리폼, 주입기구 및 냉각채널 유한요소 모델링.

3. 사출성형 해석 결과

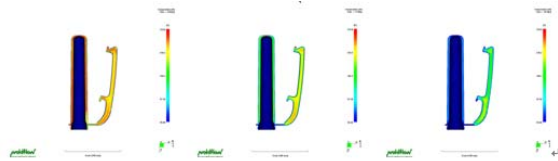
사출 성형에서 사용된 수지는 SK 케미칼에서 생산되는 PET 수지를 사용하였으며 사출 시간 2.0 sec, 금형 온도 25°C, 용융 온도 290°C, 보압 시간 10 sec 및 보압은 최고 사출압력의 80%로 설정하였다. 그림 4은 프리폼 형상을 충전하는 수지의 흐름을 나타낸 그림이다. 완전 충전 까지 약 2.03초 정도 시간이 소요되었으며 게이트에서 유동의 말단까지 수지가 균일하게 충전 되고 있는 것을 알 수가 있다.



(a) 0.45 sec (b) 1.0sec (c) 2.0 sec
그림 4. preform 형상에서 충전 과정 결과.

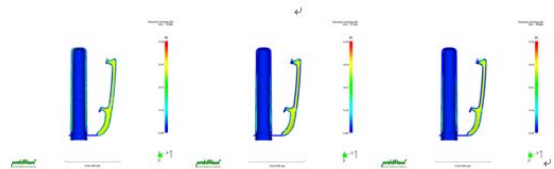
그림 5은 프리폼 형상을 충전하는 수지의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 금형 안으로 유입된 고온의 수지는 금형 벽면에 접촉과 동시에 거의 금형 온도까지 낮아지며 중심부에서는 고온을 유지하며 충전되는 유동 분포를 보여 주고 있다. 완전 충전 후 고화된 수지와 금형의 벽면으로부터 금형 냉각 효과에 대해서도 영향을 받으며 서서히 냉각되고 있는 것을 보여 준다. 점성에 의해 발생된 마찰열은 고화층을 통하여 금형 표면을 통하여 대기로 방출된다. 초기의 고화층은 얇으나 열전달에 의해 열이 금형 밖으로 방출되므로 수지의 온도는 낮아지게 되고 수지의 고화층의 두께는 두꺼워진다. 고화층이 가지는 열전도계수(약 0.17 W/m·°C)는 금형이 가지는 열전도계수(약 36.5 W/m·°C)보다 약 4% 밖에 되지 않기 때문에 열유동 차단 효과를 가진다. 고화층은 열전달에 의한 열손실이 수지 유동에 의한 마찰열과 같아지는 두께에 도달 하게 되어 평형 상태를 이룬다. 사출 시간이 길어지면 사출 속도가 느려지고 유동에 의한 열유입이 적어지고 유로에서 발생하는 마찰열도 작아진다. 또한 금형으로의 열손실도 동시에 높아지고 고화층에 대한 열유입이 작아지므로 고화층의 두께는 두꺼워진다. 그러므로 이는 보다 제한된 유동 경로를 만들기 때문에 더

높은 사출 압력이 요구된다. 시간에 따른 온도 분포는 프리폼과 손잡이 부가 근접한 부분에서 냉각수가 유입되면서 수지 열플럭스가 냉각수로 전도되면서 다른 부분에 비해 온도가 낮아지는 것을 알 수가 있다. 온도의 편차로 인하여 프리폼의 두께가 달라지며 블로우 성형시 용기의 두께 편육을 야기 시킬 수 있다. 손잡이 부는 다른 부분에 비해 제품의 두께가 두꺼우므로 부가적인 냉각 설계가 필요하다.



(a) 2.0 sec (b) 7.6sec (c) 24.8 sec
그림 5. preform 형상에서 용융수지의 온도 변화.

그림 6은 수지의 수축률을 나타낸 그림이다. 수축은 수지의 밀도가 냉각으로 인하여 온도가 변화할 때 발생된다. 제품이 성형되는 동안 전체적인 수축 차이와 제품 두께 방향으로의 수축 차이에 의하여 성형품의 내부에서 응력이 발생된다. 이는 외부에서 작용하는 응력과 비슷하므로 성형 중에 발생하는 내부 응력이 성형품의 형상을 변형시킬 정도로 크면 금형으로 취출 될 때 휨이 발생하거나 약한 외부의 충격에 대해서도 파손될 위험이 있다. 게이트 부근에서 수축률은 수지의 온도가 높고 캐비티의 압력이 높기 때문에 냉각에 의한 수축량을 보압과정에서 수축량 만큼 보상하기 때문에 수축률이 작다. 성형품의 중간부에서는 두께가 다른 부분에 비해서 상대적으로 많이 두껍고, 낮은 압력과 보압 과정 중 수축된 양 만큼 수지를 충전하기 전에 고화되기 때문에 상대적으로 게이트 부근에서 보다 큰 수축을 보여 주고 있다. 프리폼 보다 손잡이 부위에서 더 큰 수축율을 보여 주고 있다.



(a) 7.6 sec (b) 19.1sec (c) 30.0 sec
그림 6. preform 형상에서 수지의 수축율.

그림 7는 냉각 채널에서 냉각수 온도 분포를 나타낸 그림이다. 냉각수는 스파이럴 형상(프리폼 바깥쪽)의 냉각 채널 형상과 preform 안쪽은 배플을 따라 유동하면서 고온의 수지를 급형 밖으로 열을 전달하며 그림에서 보는 것과 마찬가지로 약 0.4℃의 온도차이를 보이며, 효율적으로 열을 전달하고 있는 것을 알 수가 있다.

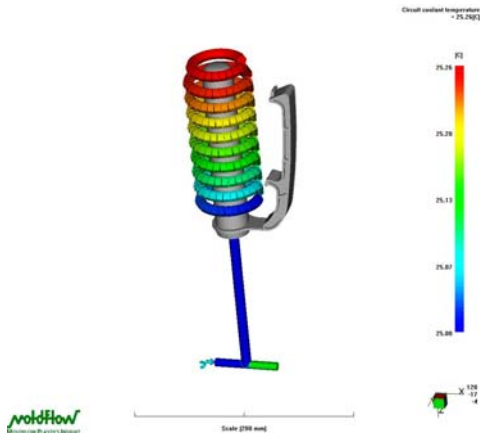
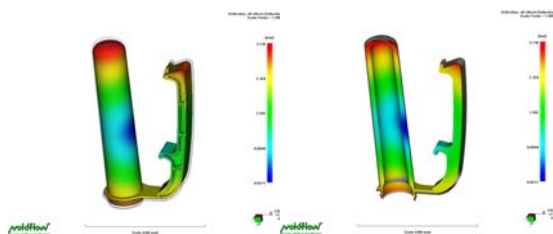


그림 7 냉각 채널에서 냉각수 온도 분포

그림 8는 프리폼에서 발생하는 변형량을 나타내는 그림이다. 이러한 변형량의 차이는 내부 잔류 응력의 형태로 나타나고 이러한 잔류 응력은 제품의 휨을 유발시키는 원인이 되므로 성형 공정에서 발생하는 수축률의 차이를 되도록 적게 하는 것이 휨을 발생시키는 원인을 줄일 수 있다. 특히 이러한 프리폼 형상에서는 좌우 두께 편차에 의해 최종 제품인 PET 용기 두께의 균일화에 큰 영향을 미치므로 사출 성형할 때 이와 같은 불량을 미리 방지할 수 있도록 설계에 반영되어야 한다.



(a) 전체 형상 (b) Section 단면도

그림 8. preform 변형 분포.

4. 사출 성형 금형 제작 및 실험

프리폼 사출 금형의 설계를 위하여 상기에서 진행된 해석을 토대로 하여 적용하였다. 해

석에서 도출된 결과와 지원 업체의 실제 적용되고 있는 설계 데이터를 조합하는 방향으로 진행되었으며 지원 업체의 요구를 충분히 반영하여 설계 및 제작하였다. 사출 성형 실험은 동신 550톤 프리폼 전용 사출기를 이용하였다.



(a)금형의 cavity부 (b)금형 core부 (c) 사출성형제작
그림 9. 프리폼 금형 제작 및 사출 성형품 제작.

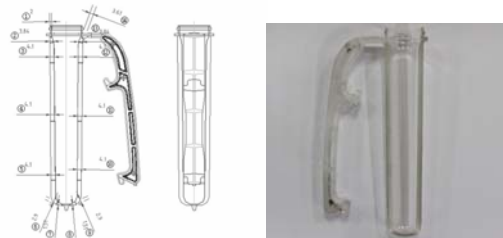


그림 10. 프리폼 도면 및 사출 성형품.

표 1. 샘플링된 프리폼 두께 편차 측정표

	도면치수	(a)실측치수(좌)	(b)실측치수(우)
1	3.84	② : 3.83	⑬ : 3.94
2	4.10	③ : 4.02	⑫ : 4.08
3	4.10	④ : 3.99	⑪ : 4.06
4	4.10	⑤ : 4.05	⑩ : 4.12
5	2.90	⑥ : 3.12	⑨ : 3.04
6	1.51	⑦ : 2.27	⑧ : 2.26

5 결 론

본 연구에서는 PET 용기의 두께를 균일하게 하기 위하여 사출성형 해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 프리폼 설계 및 금형을 제작하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 프리폼 금형 설계 시 경험에 의한 데이터를 이용하여 설계에 반영하고 있으나, 이번 지원 사업을 통하여 해석 프로그램을 통한 결과를 바탕으로 체계적인 설계를 도출하여 설계 최적화를 이룩할 수가 있었다.
2. 프리폼 사출 성형해석을 통한 예측 결과와 실험 결과를 비교했을 때 손잡이 부분이 반대편 두께 보다 수축이 작아짐에 따라 약 2.7% 두께 편차를 보여 줌을 알 수가 있었다.
3. 본 연구에서 진행된 방법은 휨, 변형, 두께

분포등을 적절히 예측함으로써, 사출 및 블로우 성형시 공정에 대한 기본 자료를 제공할 수 있는 방법으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) J. P. MCEVOY, C. G. ARMSTRONG, and R. J. CRAWFORD " Simulation of the Stretch Blow Molding Process of PET Bottles " *Advancds in Polymer Technology*, Vol.17, NO.4, 339-352, 1998
- 2) X. -T. PHAM, F. THIBAUT, and L-T. LIM " Modeling and Simulation of Stretch Blow Moulding of Polyethylene Terephthalate " *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, AUGUST 2004, VOL.44, NO.8, pp 1460~1472
- 3) SONG WANG and AKITAKE MAKINOUCHI " Three-Dimensional Viscoplastic FEM Simulation of a Stretch Blow Molding Process " *Advancds in Polymer Technology*, Vol.17, No. 3, 189-202, 1998
- 4) Z. J. YANG, E. HARKIN-JONES, G.H. MENARY, and C. G. ARMSTRONG " A Non-Isothermal Finite Element Model for Injection Stretch-Blow Molding of PET Bottles With Parametric Studies " *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, JULY 2004, VOL.44, NO.7, pp.1379-1390

(2007년 9월 5일 접수, 2007년 11월 23일 채택)