Injection Stretch Blow Molding 시 성형 공정 변수 및 설계변수가 제품 두께에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

김종덕, 고영배*, 김정순**, 권창오***
*한국생산기술연구원, **아주자동차대학, ***동아정밀공업(주)
e-mail : jdkim@kitech.re.kr

Numerical Study on the Effect of Products thickness for Process Condition Variables and Design Parameters Using Injection Stretch Blow Molding

Jong-Deok Kim*, Young-Bae Ko*, Jeong-Soon Kim**, Chang-Oh Kwon***
*Korea Institude of industrial Technology, **Aju Motor College
***Dong-A Precision Ind. Co., Ltd.

요 약

본 연구는 성형해석 및 실험적 방법을 통하여 페트 패키징 제품의 두께편차를 최소화 하기 위하여 프리폼 설계 및 블로우 성형공정 변수를 변화보았다. 블로우 성형과정을 정확하게 묘사하기 위하여 쉘(shell) 모델을 이용하여 블로우 성형해석을 수행하였으며, 이 결과를 토대로 프리폼 설계변수 및 공정변수를 최적화 하였다. 제품 형상이 점점 복잡해지고 요구되는 제품의 품질이 높아질수록 실험적으로 최적의 결과를 도출하기가 어렵다. 이러한 문제점을 수치적 해석을 통하여 사전에 발생될 수 있는 파악함으로서 시행착오를 줄이고 최적의 금형을 제작함으로써 설계 불량, 제작시간 단축 및 비용 감소등 최적의 결과를 빠른 시간에 도출할 수 있음을 알 수가 있었다.

1. 서론

지난 수십년 간, 블로우 성형(blow molding)은 매우 급격한 성장을 가져 왔으며, 최근 엔지니어링 플라스틱의 개발이나 다차원 블로우 성형법 등 새로운 성형법의 개발에 의해 포장, 용기뿐만 아니라 자동차 부품이나 산업자재 관계에 응용되고 있는 추세이다. 다양한 블로우 성형 기법 중 사출-연신 블로우(injection-stretch blowing) 성형은 양방향 분자배향을 가지는 병(bottle)과 같은 중공 제품을 성형하는데 적용되며, 양방향의 배향은 강화된 물리적 상태량, 탄산음료병과 같은 제품에 중요한 가스 불 투과성 상태량을 제공한다. 사출-연신 블로우 성형 중 분리형(two-stage) 공정에서는 사출성형으로 생산된 프리폼을 적외선 heating 기구로 재 가열된다. 재 가열된 프리폼은 블로우 금형 안에 장착된 후 고압의 공기를 분사시켜 용기의 형상을 생성 및 유지하면서 완성시킨다. 그러나 블로우 성형은 연신율이 10배 이상이 되기 때문에 최종 두께 분포를 예측하는 것이 매우 어렵다. 따라서 균일한 두께를 가질 수 있는 프리폼 형상 최적화가 필요하다.

지금까지 대부분의 연구는 시행착오에 의존하였으며, 경제적인 비용 증가 및 시간 소요를 요구한다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 효율적이고 경제적인 방법을 찾아야 한다.

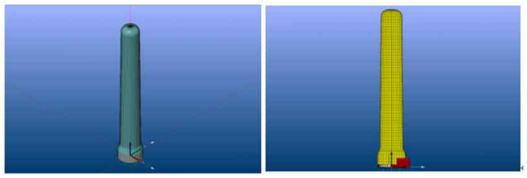
본 연구에서는 블로우 성형 시 공정변수가 용기 두께에 미치는 영향을 알아보고, 두께 균일화를 위한 블로우 공정 변수 설정 및 최종 생산제품인 PET 용기의 안정화 기술의 신뢰성을 향상시키는데 그 목적이 있다.

2. 프리폼 블로우 성형 수치해석

2.1 해석모델 설정

본 연구에서 상용 블로우 성형해석 프로그램을 이용하여 설계 인자와 블로우 성형조건이 성형품에

미치는 영향을 계산해 보고자 한다. 블로우 성형제품을 해석하기 위하여 CAD 프로그램을 사용하여 형상을 모델링하였다. 그러나 모델링한 제품 형상을 사용할 수 없기 때문에 중립 파일인 iges로 바꾸어 사용하였다. 블로우 성형 해석 프로그램에서 사용할 수 있는 모델은 두께를 고려한 쉘(shell) 모델만을 적용할 수가 있으며, 적용된 모델은 그림 1과 같다.



(a) Preform FEM model (b) Boundary condition
[그림 1] FEM 형상 모델링 및 경계조건

2.2 수치적 해석방법

해석적인 방법의 프리폼 형상 설계는 실제의 사출-연신 블로우 성형의 과정을 통하지 않고 초기의 프리폼 형상을 바탕으로 어떠한 블로우 성형이 이루어지는지를 예상하기 위한 수치적인 해석을 통한 설계를 의미한다. 이러한 일련의 과정을 토대로 프리폼의 형상 설계를 가능하게 할 뿐만 아니라 블로우 성형 공정 조건을 최적화할 수가 있다. 이를 위해서는 블로우 성형해석에 적용되는 다양한 물성치나 공정조건의 정확도 및 수치 해석의 알고리즘 적용 방법에 따라 많은 영향을 받는다. 블로우 성형을 하기 위한 성형해석 프로그램은 다른 해석 프로그램에 비하여 보편화되어 있지 않다.

플라스틱 성형 소프트웨어 중 하나인 SIMBLOW는 대변형 문제에 대하여 극히 안정적인 유체 해석 기술을 기반으로 개발된 구조 해석 프로그램으로 프리폼 등의 성형 중간체의 금형 내 구속 팽창 시의 거동을 묘사하고, 두께나 온도 분포의 시간 변화를 예측할 수 있다는 장점을 지니고 있으며, 본 계산에 사용된 지배 방정식과 constitutive 방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \nabla \cdot T + \rho g \quad (2)$$

$$\tau = 2\eta D \quad (3)$$

여기서

V : 속도	ρ : 밀도
g : 중력가속도	t : 시간
τ : 응력	η : viscosity
D : 변형률	

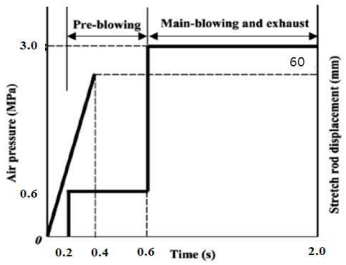
2.3 유한요소 모델, 경계조건 및 구속조건

블로우 성형 해석에 사용된 용기는 식용 저장하는 용도로 사용되는 주입구가 넓은 상압 페트 용기이다. 용기 형상은 축에 대해 대칭인 형상이므로 2차원 해석으로 충분이 가능하나, 해석의 정확성을 높이기 위하여 2.5 차원 해석을 수행하기 위하여 유한 요소 모델을 생성하였다.

프리폼 형상은 기존에 사용된 유사한 용기의 프리폼 외곽 형상을 이용하여 초기 프리폼 형상 설계에 적용하였다. 대부분의 프리폼 형상은 축에 대하여 대칭이므로 외곽 프로파일을 형성한 다음 축에 대하여 360도 회전하면서 격자를 생성하였다[그림 1 참조]. 또한 초기 프리폼의 두께는 일률적으로 동일하게 적용하였으며, 최적화를 통하여(Try error 방식) 용기가 균일한 두께를 가질 수 있도록 다시 설계하였다. 프리폼의 경계조건으로는 프리폼 전체가 균일하게 100℃로 가열이 된다고 가정하였으며, 용기의 목 부분은 블로우 성형기의 이송 장치에 고정되는 부분이므로 변위가 고정된다는 구속조건을 사용하였다.

(a) Bottle FEM model (b) Bottle Boundary condition
[그림 2] 최종형상 FEM 모델링 및 경계조건

프리폼을 연신-블로우 성형 시 변형은 연신 봉에 의한 축 방향, 공기압에 의한 반경방향으로 일어나고, 공기압을 이용한 성형공정은 다시 2가지의 세부 공정으로 나누어진다(예비 블로우와 메인 블로우). 예비 블로우는 연신 봉이 축 방향으로 이동시 가열된 프리폼이 연신되는 과정 중에 연신 봉에 점착을 막고, 1차적으로 병의 형상을 성형하는 공정으로 저압을 이용하여 블로잉 한다. 메인 블로우는 고압을 이용하여 최종적인 병의 형상을 성형하는 과정이다. 본 연구에서는 약 0.6초 동안 저압 블로잉 및 0.4초 동안 연신 봉이 축 방향으로 이동(60mm)하고, 2초 동안 30기압의 공기압을 이용하여 최종 형상을 성형하도록 공정 조건을 설정하였다.

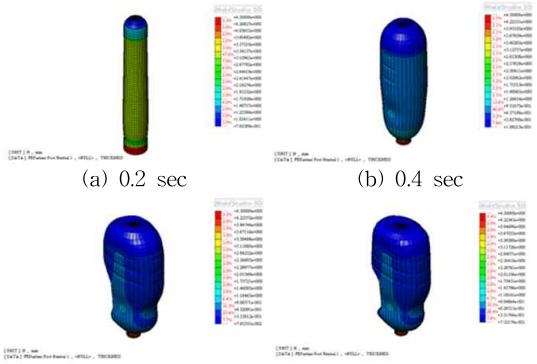


[그림 3] 공정 조건 : 연신봉의 이동, 예비 블로우와 메인 블로우 공기압 및 시간

3. 연구결과

2-stage 블로우 성형기에서는 프리폼이 성형기의 가열부를 지나면서, 가열부에 설치된 IR 램프에서 발산되는 열에 의해 가열된다. 그러나 프리폼의 균일 가열은 어렵기 때문에 어느 정도 온도 구배를 가지게 된다. 따라서 두꺼운 부분에서는 높은 온도로, 얇은 부분에는 낮은 온도로 가열하여 전체적으로 균일한 온도 분포를 가질 수 있도록 조절한다. 이렇게 가열된 프리폼은 금형 안으로 삽입되어, 일차적으로 연신봉에 의해 프리폼이 연신된 다음 저압의 공기압으로 성형되고, 그 후 완전한 용기 모양을 얻기 위해서 고압의 공기압으로 성형한다. 따라서 블로우 성형 공정 중 연신 및 블로우 과정이 성형품의 두께 변화에 미치는 변화를 수치적으로 알아보고자, 앞에서 언급된 모델을 이용하여 PET 용기의 사출-연신 블로우 성형 과정에 대한 해석을 진행하였다. 해석에는 블로우 성형 전용 해석 프로그램인 SIMBLOW를 이용하였다.

블로우 성형 해석은 3가지의 다른 경우로 수행되었다. 첫 번째는 프리폼이 연신 없이 블로우 되는 경우이고, 두 번째는 프리폼이 몰드의 하부까지 우선 연신된 다음 공압에 의해 블로우 되는 경우이다. 세 번째는 프리폼이 몰드의 하부로 연신되기 전에 공기를 분사시킴으로써 길이 방향으로는 연신에 의해 늘어나고 동시에 길이에 수직한 방향으로는 공기압에 의해 늘어나는 2축 연신이 되는 경우이다. 따라서 변형 모드는 성형공정 변수에 따라 각각 다르게 발생된다. 각 경우 연속된 변형 과정을 살펴보기 위하여 중간 단계의 프로파일을 선택하였다. 첫 번째 경우(그림 4 참조)는 성형 과정 초기의 프리폼이 길이방향으로는 성형되지 않고, 반경 방향으로 부풀려짐을 알 수 있다. 이것은 주위의 몰드 형상에 제약을 받기 때문이며, 고무풍선과 같이 변형하는 모습을 보여 주고 있다. 특히 금형 총 표면적의 30% 이상을 초기 프리폼의 외곽과 접촉하기 때문에, 접촉되지 않은 프리폼이 이후 블로우를 통하여 금형 표면으로 고착되며 용기 형상을 만든다. 따라서 두께가 매우 얇아지는 문제를 가지고 있다.

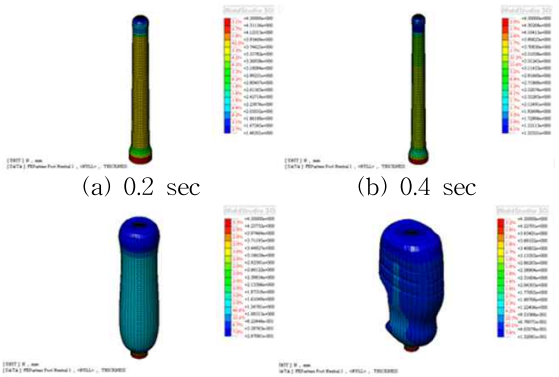


(a) 0.2 sec (b) 0.4 sec

(c) 0.6 sec (d) 3.0 sec

[그림 4] 연신과정을 배제한 성형 블로우 성형 과정

두 번째 경우는 프리폼이 연신되기 때문에, 반경 방향으로 명확하게 수축되는 것을 확인 할 수가 있다. 연신과정이 끝나면 프리폼의 총 길이는 초기 길이의 2.5배 이상이 된다. 블로우 단계에서는 상부와 하부 아래쪽에서 벌지(bulge)가 시작되며, 부풀려진 두 부분은 성형의 마지막 단계에서 만나게 된다.(그림 5 참조)



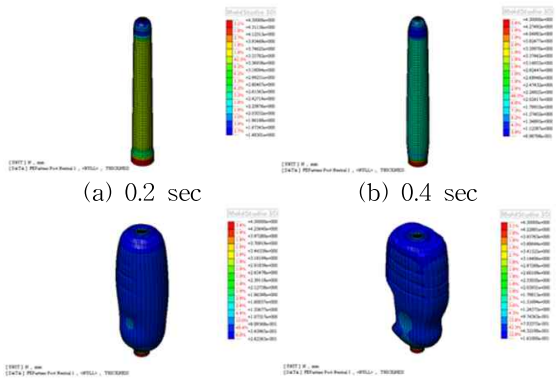
(a) 0.2 sec (b) 0.4 sec

(c) 0.6 sec (d) 3.0 sec

[그림 5] 연신과정 후 성형 블로우 성형 과정

세 번째 경우는 길이 방향으로 먼저 프리폼이 연신이 되고, 이후에 공기압이 프리폼 내부에 전달된다. 따라서 초기 팽창은 프리폼의 상부에서 진행되며, 그런 다음 점진적으로 하부로 내려오며 팽창 된다. 그러나 프리폼 하부는 팽창은 진행 되지만, 팽창 속도가 상부보다 상대적으로 느리기 때문에 두 번째 경우와 같이 상부와 하부에는 풍선 형상이 생기지 않는다. 3가지 경우의 최종 두께 구배는 그림 6과

같이 나타 낼 수가 있다. 첫 번째 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 용기의 중간 부분 격자가 심각할 정도로 뒤틀려져 있으며, 두께도 0.05mm로 감소되어 있다. 일반적으로 파열 기준을 FEM 모델에 적용하지 않지만, 두께 분포를 통하여 파열을 예측할 수 있었다.



(a) 0.2 sec (b) 0.4 sec

(c) 0.6 sec (d) 3.0 sec

[그림 6] 연신과정 중 성형 블로우 성형 과정

4. 결 론

본 연구에서는 블로우 성형 연신과정에 따라 페트 용기의 두께 변화를 알아보기 위하여 사출-연신 블로우 해석을 수행하였다. 그 결과를 이용하여 프리폼 초기 설계 및 블로우 성형 공정 시 미치는 영향을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 사출-블로우 성형 해석 결과를 이용하여 연신 및 블로우 과정이 용기에 미치는 영향을 수치적으로 모사하였다.
2. 사출-블로우 성형시 연신과정과 동시에 공기를 블로우하는 것이 용기 두께의 편차를 최소화시킴을 알 수 있다.

참고문헌

[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. THIBAULT, 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