

블로우 성형 공정 변수가 PET 용기의 두께 편차에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

김정순* · 김종덕**

<국문초록>

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) 공정은 사출 성형으로 생산된 프리폼을 적외선 히팅 기구로 재 가열하고 재 가열된 프리폼을 블로우 금형 안에 장착한 후 고압의 공기를 분사시켜 병의 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.

본 연구에서는 블로우 성형 연신 과정에 따라 페트 용기의 두께 변화를 알아보기 위하여 사출연신 블로우 성형시 두께 편차에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과 첫째 사출-블로우 성형 로우 결과를 이용하여 프리폼 초기 설계를 최적화하였고, 연신 및 블로우 과정에서 공정 편차에용기 두께며, 그 결과 을 수치적으로 로우하여 공정 편를 최적화하였다.

둘째, 사출-블로우 성형시 연신 과정과 동시에 공기를 블로우하는 방법이 용기 두께의 편차를 최소화하였으며, PET용기 제작 기술의 안정화 및 신뢰성을 향상시킬 수 있었다.

주제어 : 프리폼 설계, 사출-연신 블로우 성형, PET 용기 , 두께 편차

* 교신저자 : 김정순(jskim@motor.ac.kr), 아주자동차대학 교수, 010-9976-4324

** 김종덕, 한국생산기술연구원 정밀금형팀, 010-9127-2431

I. 서 론

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 사출연신 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 불투과성 상태량을 제공한다. 사출-연신 블로우 성형 중 분리형(two-stage) 공정은 사출 성형으로 생산된 프리폼을 적외선 히팅 기구로 재 가열하고, 재 가열된 프리폼을 블로우 금형안에 장착한 후 고압의 공기를 분사시켜 병의 형상을 생성 및 유지 하면서 완성시킨다. 그러나 블로우 성형은 연신율이 10배 이상이 되기 때문에 최종 두께 분포를 예측하는 것이 매우 어렵다(MCEVOY, ARMSTRONG, and CRAWFORD, 1998; PHAM, THIBAUT, and LIM, 2004). 따라서 균일한 두께를 가질 수 있는 프리폼 형상 최적화가 필요하다. 지금까지 대부분의 연구는 시행 착오에 의존하였으며, 경제적인 비용 증가 및 시간 소요를 요구한다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 효율적이고 경제적인 방법을 찾아야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구자들은 블로우 성형 과정에 대한 수치적 묘사를 진행하였다. Haessly과 Ryan은 사출-블로우 성형과정의 자세한 실험적 연구를 진행 시켰으며 그것을 묘사하는데 네오후크 구성 방정식을 도입하였다(Haessly and Ryan, 1993). 그러나 재료의 변형된 모양을 정확히 묘사 하는데는 실패하였다. Hartwig은 상용 FEM 프로그램인 ABAQUS/STANDARD를 이용하여 연신 블로우 성형해석을 수행하였다(Hartwig and Michaeli, 1995; SONG WANG and AKITAKE MAKINOUCI 1998; Z. J. Yang, E. Harkin-Jones, G. H. Menary, C. G. Armstrong 2004).

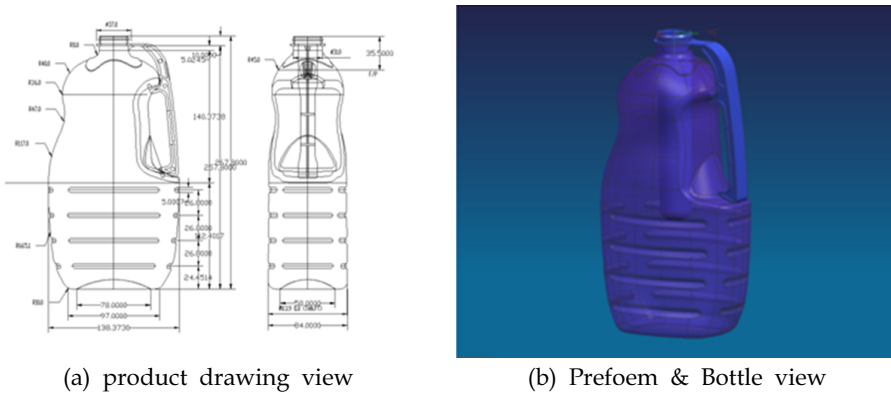
본 연구에서는 블로우 성형 시 공정 변수가 용기 두께에 미치는 영향을 알아보고, 두께 균일화를 위한 블로우 공정 변수 설정 및 최종 생산 제품인 PET 용기 제작 기술의 안정화 및 신뢰성을 향상시키는데 그 목적이 있다.

II. 이론적 배경

1. 사출-연신 블로우 성형 해석

가. 블로우 성형을 위한 모델 설정

본 연구에서 상용 블로우 성형 해석 프로그램을 이용하여 설계 인자와 블로우 성형조건이 성형품에 미치는 영향을 계산해 보고자 한다. 블로우 성형 제품을 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 shell 모델만을 적용할 수가 있으며, 적용된 모델은 그림 1과 같다.



[그림 1] 형상 모델링

나. 수치적 해석방법

해석적인 방법의 프리폼 형상 설계는 실제의 사출연신 블로우 성형의 과정을 통하지 않고 초기의 프리폼 형상을 바탕으로 어떠한 블로우 성형이 이루어지는지를 예상하기 위한 수치적인 방법을 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 안정적

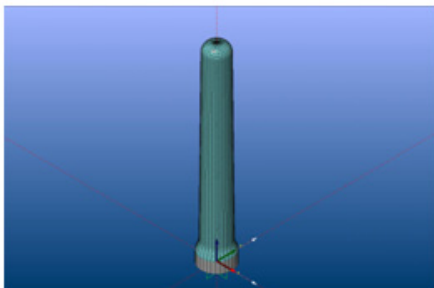
인 유체 해석 기술을 기반으로 개발된 구조 해석 프로그램으로 프리폼 등의 성형 중간체의 금형 내 구속 팽창 시의 거동을 묘사하고 두께나 온도 분포의 시간 변화를 예측할 수 있다는 장점을 지니고 있으며 본 계산에 사용된 지배 방정식과 constitutive 방정식은 아래와 같다.

$\nabla \cdot V = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$	V (Velocity Vector) g (Gravitational Acceleration) T (Stress) ρ (Density) t (Time) η (Viscosity) D (strain rate)
$\rho \frac{DV}{Dt} = \nabla \cdot T + \rho g \quad \dots\dots\dots (2)$	
For visco-plasticity	$T = 2\eta D$

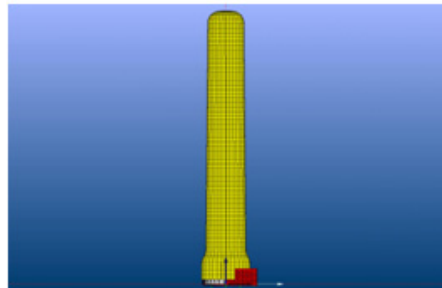
다. 유한요소 모델, 경계조건 및 구속조건

블로우 성형해석에 사용된 모델은 생활 용기 용도로 사용되는 타원(oval)형태의 페트 용기이다. 프리폼 형상은 기존에 사용된 유사 용기의 외곽 형상을 이용하였으며, 이를 초기 프리폼 형상 설계에 적용하였다. 프리폼의 두께는 일반적으로 상부에서 하부로 내려 갈수록 얇아지는 두께 분포를 가지고 있지만 여기에서는 두께(4.5mm)는 균일하다고 가정하였다. 프리폼 하부는 연신봉의 헤드와 맞닿기 때문에 성형과정 중 거의 변형이 일어나지 않는다. 그러므로 프리폼 하부의 두께는 2.5mm 설계하였다. 대부분의 프리폼 형상은 축 대칭이므로, 외곽 프로파일을 형성한 다음 축에 대하여 360도 회전하면서 격자를 생성하였다.

해석에 사용된 경계조건으로는 프리폼 전체가 균일하게 100℃로 가열이 된다고 가정하였으며 로 가2 (b)의 노란색 부분), 용기의 목 부분은 블로우 성형기의 이송 장치에 고정되므로 변위가 고정된다는 경계조건을 사용하였다(로 가2 (b)의 빨간색 부분).



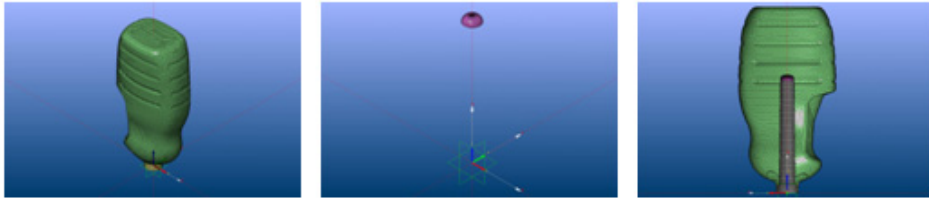
(a) FEM model



(b) Boundary Condition

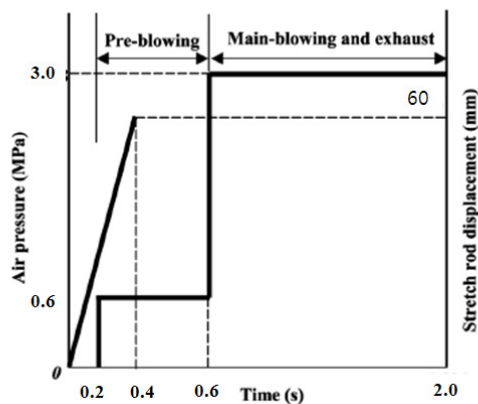
[그림 2] 블로우 성형용 프리폼 유한 요소 모델링 및 경계 조건

페트 용기의 경우 블로우 금형 형상, 연신봉(stretch-rod) 및 목(neck) 형상에 대한 유한요소 모델로 구성된다(그림3). 블로우 금형의 유한요소모델은 먼저 3D 캐드 프로그램을 이용하여 형상 모델링을 한 후 격자 구성 전용 프로그램Hyper Mesh 7.0)을 이용하여 격자를 구성하였다. 연신봉의 유한요소 모델은 연신봉 머리 부분만 모델링 하였으며, 이 형상 역시 프리폼과 같은 방법으로 격자를 구성하였다



[그림 3] 블로우 성형 해석을 위한 유한 요소 모델링

프리폼을 연신블로우 성형시 변형은 연신봉에 의한 축 방향 공기압에 의한 반경 방향으로 일어나고, 공기압을 이용한 성형공정은 예비 블로우와 메인 블로우 공정으로 나누어진다. 예비 블로우는 연신봉이 축방향으로 이동시 가열된 프리폼이 연신되는 과정 중에 연신봉에 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 연신봉이 축 방향으로 이동(60mm)하고, 2초 동안 30기압의 공기압을 이용하여 최종 형상을 성형하도록 공정 변수를 설정하였다.



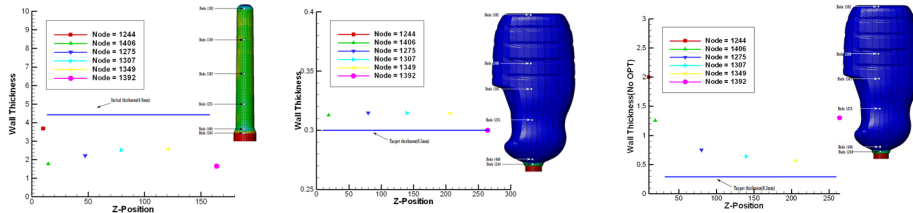
[그림 4] 공정 변수 : 연신봉의 이동, 예비 블로우와 메인 블로우 공기압 및 시간

III. 블로우 성형 해석 결과 및 고찰

1. 프리폼 형상 최적화

현재 프리폼 설계 및 공정에 대한 검증은 하기 위하여 블로우 성형 프로그램을 이용하여 블로우 해석을 수행해 보았다. 사용된 모델은 그림 1에 나타난 프리폼을 사용하였다. 초기 설계 단계에서는 높이에 따른 프리폼 두께를 4.5mm로 균일하게 설정하여 해석을 진행하였으며, 제품 최종 목표인 두께가 0.6 ~ 0.7mm 편차 안에 들어갈 수 있도록 최적화 해석을 통하여 설계를 변경하였으며 해석에 적용된 블로우 공정 변수는 그림 4와 같다.

그림 5는 프리폼 두께 최적화 및 최적화된 프리폼을 이용하여 블로우 성형을 하였을 때 결과를 나타낸 그림이다. 최적화된 결과는 약 2.6mm(그림 5(a) 참조)로 이 결과를 토대로 다시 프로토타입을 설계하여 블로우 성형 해석을 한 결과 두께 편차가 목표치인 0.3mm(그림 5(c) 참조)에 근접한 결과를 얻을 수가 있었다.



(a) 프리폼 두께(최적화)

(b) 제품 두께(초기)

(c) 제품 두께(최적화)

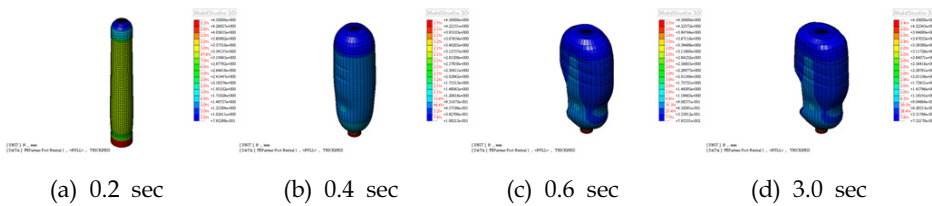
[그림 5] 높이 방향에 따른 두께 변화

2. 블로우 성형 공정에 따른 해석

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 언급

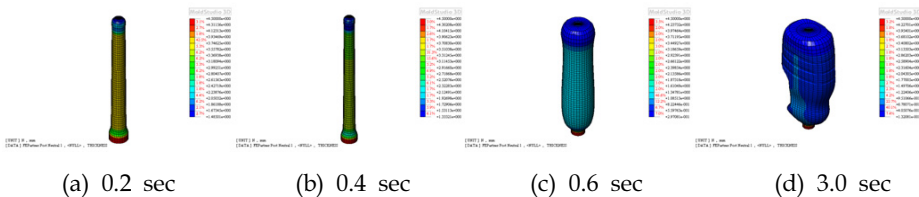
된 모델을 이용하여 PET 용기의 사출-연신 블로우 성형 과정에 대한 해석을 진행하였다. 해석에는 블로우 성형 전용 해석 프로그램인 SIMBLOW를 이용하였다.

블로우 성형 해석은 3가지의 다른 경우로 수행되었다. 첫 번째는 프리폼이 연신 없이 블로우 되는 경우이고, 두 번째는 프리폼이 몰드의 하부까지 우선 연신된 다음 공기압에 의해 블로우 되는 경우이다. 세 번째는 프리폼이 몰드의 하부로 연신되기 전에 공기를 분사시킴으로써 길이 방향으로의 연신에 의해 늘어나고 동시에 길이에 수직한 방향으로의 공기압에 의해 늘어나는 2축 연신이 되는 경우이다. 따라서 변형 모드는 성형 공정 변수에 따라 각각 다르게 발생된다. 각 경우 연속된 변형 과정을 살펴보기 위하여 중간 단계의 프로파일을 선택하였다. 첫 번째 경우(그림 6 참조)는 성형 과정 초기의 프리폼이 길이 방향으로의 성형되지 않고 반경 방향으로 부풀려짐을 알 수 있다. 이것은 주위의 몰드 형상에 제약을 받기 때문이며 고무 풍선과 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.



[그림 6] 연신 과정을 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 7 참조)

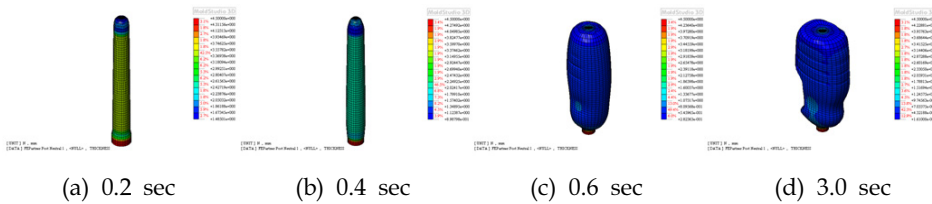


[그림 7] 연신 과정 후 성형 블로우 성형 과정

세 번째 경우는 길이 방향으로 먼저 프리폼이 연신이 되고 이후에 공기압이 프리폼 내부에 전달된다. 따라서 초기 팽창은 프리폼의 상부에서 진행되며 그런 다음 접

진적으로 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.

세번째 경우의 최종 두께 구배는 그림8과 같다. 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.



[그림 8] 연신 과정 중 성형 블로우 성형 과정

그림 7에서 나타난 변형된 격자 형상은 매끄러우며, 상하부 풍선 모양 사이에서의 격자는 주위의 파트들 보다 변형이 적음을 볼 수가 있다 결과적으로 이러한 영역에서의 두께는 주위 영역에서 보다 더 두꺼워진다. 그림 8에서는 하부 영역을 제외하고는 변형된 격자 형상은 매우 규칙적이며, 상부에서부터 하부까지 매끄러운 두께 분포를 가짐을 알 수가 있다.

IV. 결론

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 공정시 미치는 영향을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 사출-블로우 성형 해석 결과를 이용하여 프리폼 초기 설계를 최적화하고 연신 및 블로우 과정에서 공정 변수가 용기 두께에 미치는 영향을 수치적으로 해석하여 공정 변수를 최적화하였다.
2. 사출-블로우 성형시 연신 과정과 동시에 공기를 블로우하는 방법이 용기 두께의 편차를 최소화하였으며, PET용기 제작 기술의 안정화 및 신뢰성을 향상시킬 수 있다

참 고 문 헌

- 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
- 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
- W. P. Haessly and M. E. Ryan, *J. Polym. Eng. Sci.* 33, 1279(1993)
- K. Hartwig and W. Michaeli, *Simul. Mater. Proc. Numiform 95*, 1029(1995)
- SONG WANG and AKITAKE MAKINOUCI " Three-Dimensional Viscoplastic FEM Simulation of a Stretch Blow Molding Process " *Advancds in Polymer Technology*, Vol.17, No. 3, 189-202, 1998
- Z. J. Yang, E. Harkin-Jones, G. H. Menary, C. G. Armstrong " Coupled temperature-displacement modelling of injection stretch-blow moulding of PET bottles using Backley model " *Journal of Materical Processing Technology* 153-154 (2004) 20-27
- 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.

<Abstract>**Numerical study on the effect of the PET bottle thickness difference for blow molding process conditions****Jeong-soon Kim* · Jong-duck Kim****

This study presents the blow molding of injection stretch-blow molding process for PET bottle. The numerical analysis of the blow molding of PET bottle is considered in this paper using CAE with a view to minimize the thickness difference. In order to determine the design parameters and processing conditions in blow molding, it is very important to establish the numerical model with physical phenomenon.

In this study, a shell model with thickness has been introduced for the purpose and blow simulations with 3-type blow process condition are carried out.

The simulations resulted in the thickness distribution in good agreement with the physical phenomenon. Also, from the result of numerical analysis, we appropriately predicted the thickness distribution along the PET bottle wall and Using the result of numerical analysis we apply the preform design and blow molding process condition for optimization

Keywords : Injection stretch-blow molding, preform design, thickness difference

* Correspondence : Professor, Ajou motor college, jskim@motor.ac.kr

** KITECH, Bucheon digital molds and dies technology center