

## 후육 벽 PET 용기에 대한 사출 블로우 성형의 유한요소해석

홍석관<sup>1</sup> · 송민재<sup>1</sup> · 고영배<sup>1</sup> · 차백순<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>1,†</sup>

### Finite element analysis of a injection blow molding process for the thick-walled PET bottle

Seok-Kwan Hong<sup>1</sup> · Min-Jae Song<sup>1</sup> · Young-Bae Ko<sup>1</sup> · Baeg-Soon Cha<sup>†</sup>

Korea Institute of Industrial Technology, Molds & Dies R&D Group<sup>1,†</sup>

(Received October 30, 2018 / Revised November 22, 2018 / Accepted December 01, 2018)

**Abstract:** Plastic containers which provides the opportunity to reduce transportation costs are lighter and less brittle than glass containers. As a results, efforts to replace glass with plastic are ongoing. The blow molding method is a typical approach in producing plastic containers. Single-stage injection blow molding (ISBM) is one of the blow molding methods. However, the difficulty in controlling the temperature during the injection molding process is considered its main disadvantage. In this study, ISBM process analysis of relatively thick walled containers such as cosmetic containers is carried out. The initial temperature distribution of the preform is deemed to be the most influential factor in the accuracy of blow molding for the thick vessel. In order to accurately predict this, all heat transfer processes of the preform are considered. The validity of this analytical procedure is verified by comparing the cross-sectional thickness with the actual product. Finally, the validated analytical method is used to evaluate the factors affecting the thickness of the final molded part. The ISBM analysis technique for thick walled vessels developed through this study can be used as an effective predictor for preform design and blow process.

**Key Words:** Blow molding, FEM, Injection molding, ISBM

## 1. 서 론

사출 블로우 성형(Injection Blow Molding, IBM)은 프리폼(preform)이라고 불리는 중공 성형품을 예열한 후 기체의 압력으로 성형하는 공법으로 음료수 병뿐만 아니라 다양한 용기를 제조하기 위한 공정으로 사용된다. 이러한 사출 블로우 성형은 크게 2 가지 공정으로 구분 되고 있다. 먼저, 1단계 블로우 성형(single-stage blow molding, SBM)은 프리폼을 사출성형에 의해 성형한 후 완전히 냉각하지 않고 곧바로 블로우 금형으로 이송하여 블로우 성형을 진행하는 공정이다. 이에 반해 2단계 블로우 성형(two-stage blow molding, TBM) 공정은 미리 사출 성

형된 프리폼을 재가열한 후 블로우 금형으로 이송하여 스트레칭 로드를 사용하여 프리폼을 축 방향으로 연신(stretch)하면서 블로우 성형을 하는 공정이다<sup>1)</sup>. 2단계 블로우 성형은 비교적 길이가 긴 중공품을 성형할 수 있고 프리폼의 두께 분포를 정밀하게 설계하여 성형할 수 있는 장점이 있지만 1단계 블로우 성형에 비하여 공정시간이 길고 생산 비용이 증가하는 단점이 있다.

이러한 블로우 성형 공정에서 최종 용기의 두께를 결정짓는 프리폼의 형상과 두께를 결정하는 것은 많은 시간과 비용이 소모된다. 이에 따라 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 프리폼 설계가 보편화 되었으며 해석의 정확성을 높이기 위한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.

Schmidt et al.은 점탄성(visco-elastic) 모델을 사용하여 용기의 두께분포를 비교적 정확히 예측하였다<sup>2)</sup>.

1. 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
E-mail: bscha@kitech.re.kr

Wang et al.은 음료용기 모델에 대한 변형 속도 민감도, 온도 의존성 등을 고려한 점소성(visco-plastic) 모델을 사용하여 3D TBM을 수행하였고, 변형 형상 및 두께 분포를 비교적 정확히 예측하였다<sup>3)</sup>. Yang et al.은 glass rubber model을 이용하여 TBM 공정에 대하여 상용프로그램 ABAQUS를 사용하여 축대칭 해석을 수행하였다<sup>4)</sup>. 프리폼과 금형사이의 열전달 효과를 고려한 블로우 해석을 수행하여 제품을 비교한 결과 용기 두께 및 중량 분포를 비교적 정확히 예측하였다. Haessly and RYAN은 초탄성(hyper elastic)모델을 적용하여 축대칭 용기 형상에 대한 블로우 해석을 수행하고 두께 분포를 제품과 비교하였다<sup>5)</sup>. 공정 조건 중 온도 불균일이 용기의 두께 분포에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단하였다. Pham et al은 PET재료에 대하여 온도와 변형률 속도(stain rate)에 따른 biaxial stretching test를 수행하였다<sup>6)</sup>. 이 실험결과를 점초탄성(visco-hyper elastic) 모델을 적용하여 두 가지 용기에 대하여 TBM공정에 대한 3차원 해석을 BLOWSIM 소프트웨어로 수행하였다. Cosson et al은 축대칭 용기에 대하여 microstructure evolution을 고려한 단순 점소성(simple visco-plastic)모델을 적용하여 두 가지 형상에 대한 해석을 수행하여 각 단계에 대한 분자방향(molecular orientation) 및 결정화도(crystallinity)를 계산하였다. 그리고 free blow 실험을 통하여 두께 분포를 비교 검증하였다<sup>7)</sup>. McEVOY et al.은 TBM 공정에 대하여 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석하였다<sup>8)</sup>. Shell 요소와 solid 요소를 사용한 결과를 비교하였고 스트레치 로드의 효과를 분석하였다. 물성모델은 탄점소성(elasto-viscoplasticity)를 사용하였다. Chung은 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 다양한 공정변수에 대한 최적조건을 찾기 위한 블로우 해석을 수행하였다<sup>9)</sup>. 모델은 축대칭으로 공정은 TBM 그리고 탄점소성(elasto-viscoplasticity) 모델을 사용하였다. Debbaut et al.은 HDPE재료에 대하여 점탄성(viscoelastic fluid) 모델을 사용하여 복잡한 형상의 용기에 대해서 3차원 블로우 해석을 수행하였다<sup>10)</sup>. 이 공정에서는 초기 패리슨(parison) 형상이 성형성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. Biglione et al.은 SBM 공정에 대하여 POLYFLOW를 이용하여 PP재료에 대하여 Cross 모델을 사용하였다<sup>11)</sup>. 그리고 두께 균일화를 위한 최적화 기법을 도입하여 해석을 수행하였다. Gupta et al.은 PET재료에 대하여 2D 축대칭 형상에 대하여

해석을 수행하였다<sup>12)</sup>.

최근에 화장품 유리 용기(cosmetic glass container)를 플라스틱 재료로 대체하기 위한 STM 공정 개발이 진행되고 있다. 이때 유리 소재가 가지는 중량감과 광택 등을 가지기 위해 일반적으로 생산되는 플라스틱 용기보다 수 배 이상의 두께로 설계하게 된다. 하지만 후육(thick wall)으로 인한 벽 표면과 내부의 온도 차가 크게 나타나게 된다. 그리고 이러한 온도차는 두께가 얇은 용기보다 두께를 예측하기 어려운 원인이 된다.

이러한 후육 용기의 SBM 공정에서 두께 분포 및 변형 특성을 예측하기 위하여 전 공정에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 블로우 성형 전 초기 온도 분포를 정확하게 예측하기 위하여 사출 성형해석 결과의 온도 분포를 블로우 성형 해석의 입력값으로 맵핑(mapping)하는 과정을 추가하였다.

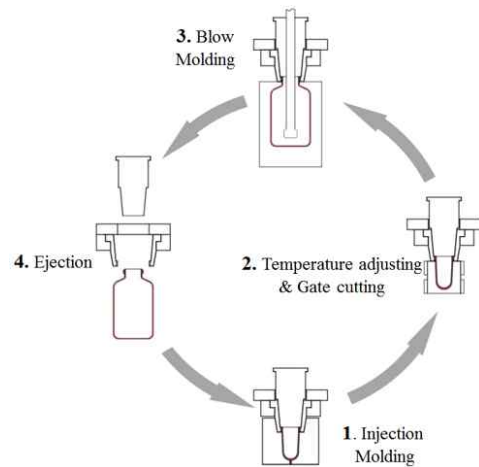


Fig. 1 Single-stage blow molding process

## 2. SBM 공정

SBM 공정은 일반적으로 Fig. 1과 같이 상측 코어가 90도 간격으로 회전하면서 하나의 기계에서 사출과 블로잉이 연속적으로 한 번에 이루어지는 공정이다. 즉, 프리폼을 사출성형에 의해 성형하고 금형이 열린 후, 상측 코어가 프리폼을 그대로 블로우 금형으로 이송 및 결합한다. 이때 블로우 금형으로 공기를 공급하여 블로우 성형을 하게 된다. 특히 사출성형 직후에 잔존하는 프리폼 내부의 열을 이용하여 블로우 성형하기 때문에 TBM 공정처럼 재가

열 과정이 필요가 없다. 따라서 사출성형 후 남아 있는 프리폼의 온도분포를 정확하게 예측하는 것이 성형성 측면에서 매우 중요하다.

### 3. 사출 성형 해석

사출 성형 후 남아 있는 프리폼의 온도를 예측하기 위하여 먼저 사출 성형 해석을 수행하였다. 사출 성형 해석은 사출 성형 전용 해석 코드인 MOLDFLOW로 수행하였으며 Fig. 2에 해석을 수행하기 위한 프리폼 모델을 나타내었다. 성형 대상은 화장품 크림병 용기이며 용량은 85ml로 총 캐비티는 2개이며 냉각 채널은 스파이럴 형상의 냉각 채널을 적용하였다. 사출 성형에 사용된 수지는 Eastman Chemical Products의 PETG를 사용하였다. PETG는 기존의 PET수지로서 제조하기 어려운 투명하고 두꺼운 용기나 sheet에 적합하도록 CHDM (1,4-cyclohexanedimethanol)을 첨가하여 공중합한 비결정성 수지이다. 비결정성 PETG 수지는 결정화로 인한 백화현상이 없어 두껍고 투명한 제품을 생산할 수 있으며, 이외에도 맑은 색상과 우수한 광택을 지니고 내충격성, 내화학성이 뛰어난 장점이 있다<sup>13)</sup>.

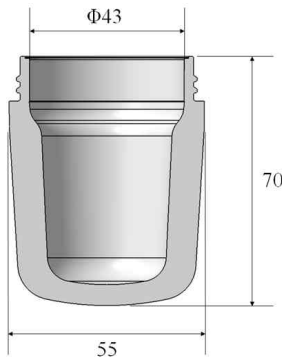


Fig. 2 Schematic diagram of the thick walled preform

사출 성형 해석에 적용한 공정조건은 수지 온도 270℃, 금형온도 20℃, 보압은 최대 사출압력에 80%적용, 보압시간은 4초를 적용하였다. 사출시간은 현장에서 적용중인 사출조건을 참고하여 1.7초를 적용하였다. Table 1에 사출조건을 정리하여 나타내었다.

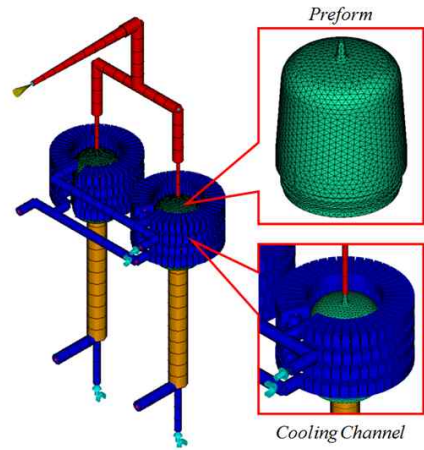


Fig. 3 Finite element model for Injection molding

Table 1 Injection molding conditions.

Conditions	Value	
Mold temp	26	
Melt temp	260	
Injection time (sec)	1.7	
Packing control method	time (sec)	4
	ratio (%)	80
Cooling time (sec)	46	

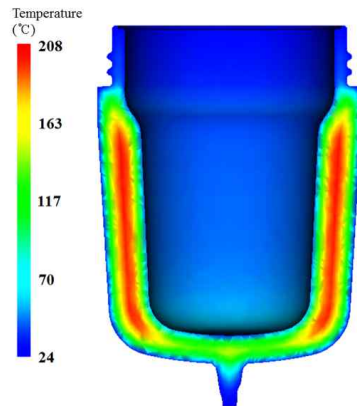


Fig. 4 Temperature contour of preform

Fig. 4는 냉각공정까지 완료한 프리폼 단면의 온도 분포이다. PET 용기 내부 중앙을 중심으로 208℃의 높은 온도를 유지하고 있으며, 이는 원활한 블로우 성형을 유도할 것으로 예상된다.

#### 4. 자연 냉각 해석

사출 성형이 완료되고, 프리폼이 취출되면 그 다음 공정으로 불필요한 게이트(gate)를 잘라내고 상온에서 자연 냉각 과정을 거치게 된다. 자연 냉각 공정은 상용 해석 툴인 ANSYS에서 수행하였다. 사출 성형 해석결과와 온도 분포를 초기 온도분포로 설정하기 위하여 맵핑(mapping)하는 작업을 수행하였다. Fig. 5는 3차원 온도분포 해석결과를 2D-축대칭 해석모델로 맵핑하는 과정과 결과를 나타낸 것이다.

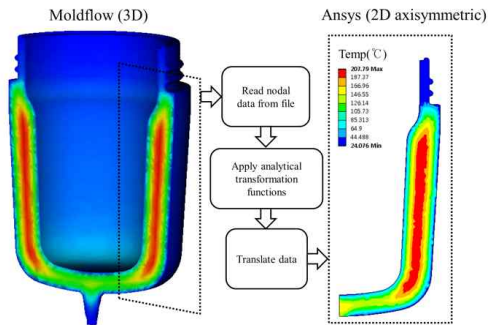


Fig. 5 Mapping procedure of temperature data for preform

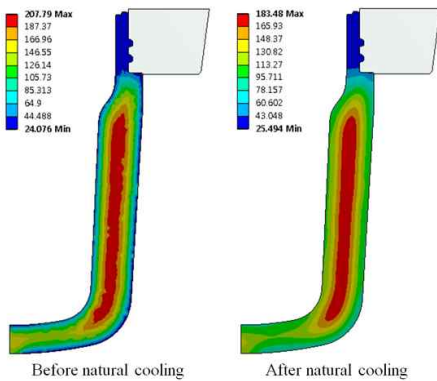


Fig. 6 Temperature contour of preform during natural cooling

냉각 시간은 13초 동안 이루어지며, 자연 대류 열전달계수는 일반적으로 사용되고 있는 10 W/m<sup>2</sup>을 적용하였다. Fig. 6은 자연 대류 해석의 온도분포 결과를 나타낸 것이다. 상온에서 자연 냉각 과정을 거친 프리폼은 최고온도 207.

8℃에서 183.5℃까지 떨어져 24.3℃의 냉각효과가 발생하였다.

#### 5. 블로우 성형 해석

##### 5.1. Material data

블로우 성형 해석은 POLYFLOW를 이용하여 해석하였다. 프리폼 재료는 Eastman Chemical products사의 Easter Copolyester 6763으로 유리전이 온도는 약 81℃ 알려져 있다. 물성은 non-Newtonian viscosity 거동을 묘사하는 modified Cross law 모델을 사용하였다<sup>14)</sup>. 여기서 사용하는 계수들은 MOLDFLOW의 데이터베이스에서 제공하는 값을 참고하였다<sup>15)</sup>.

본 연구에 사용된 modified Cross law는 아래와 같다.

Shear rate에 의존하는 항은

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

온도에 의존하는 항은

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)}\right] \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서,  $\eta$ 은 점도,  $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률 속도, T는 절대온도, T\*는 유리전이온도,  $\tau^*$ 는 뉴턴 특성에서 비뉴턴 특성으로 전이될 때의 전단응력이며, n은 전단속도 민감도 상수,  $\eta_0$ 는 전단속도가 0에 가까워질 때의 점도, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, D<sub>1</sub>은 상수이다. 사용된 상수값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Constants for Modified Cross viscosity model

Description	Value	Unit
n	0.1926	
$\tau^*$	563860	Pa.
D1	9.9606e11	Pa.s
D2	355.8	K
A1	26.554	
A2	51.7	K

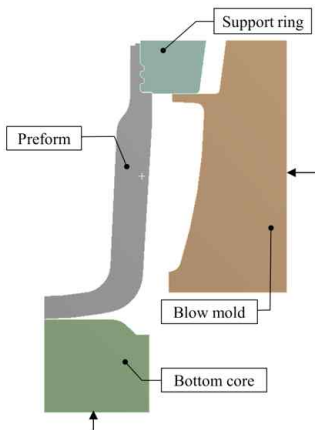


Fig. 6 Single-stage blow molding system for thick walled bottle.

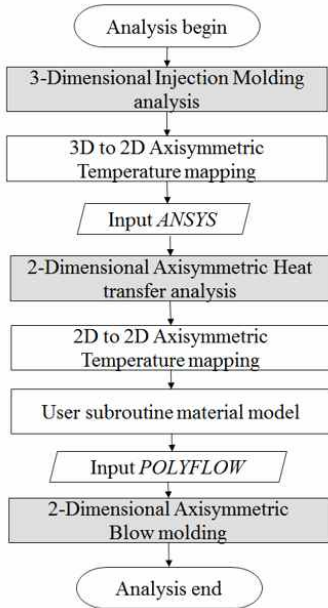


Fig. 7 Analysis procedure of blow molding process for thick walled bottle

### 5.2. 블로우 성형 해석 모델 및 경계 조건

블로우 성형 해석 모델은 Fig. 6과 같이 구성 되어있다. 먼저 게이트 절단(gate cutting) 및 자연 냉각 과정을 거친 프리폼은 지지링(support ring)을 통해 블로우 성형 금형으로 이송 된다. 이때 하코어(bottom core)는 상승하여 블로우 성형을 하기 전 프리폼의 바닥면을 평탄하게 해주는 역할을 한다. 이어서 블로우 금형이 공압 성형을 위해 밀폐되고 공압이 가해지면서

성형하게 되고 동시에 냉각 과정을 거친 후 취출하게 된다.

### 5.3. 연성해석 절차

지금까지 설명한 해석과정을 정리하면 Fig. 7과 같다. 사출 성형 해석과 공냉 해석 그리고 블로우 성형 해석 공정으로 구분된다. 이 과정에서 해석 툴 간에 온도 데이터를 연결하는 맵핑 과정은 사출 단계에서 공냉 단계, 공냉 단계에서 블로우 단계로 넘어갈 때 이루어진다.

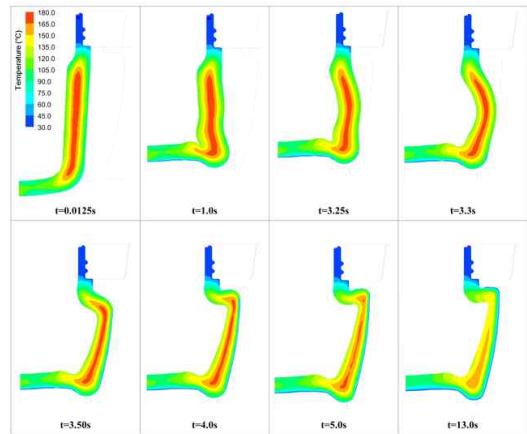


Fig. 8 Simulated evolution of preform

### 5.4. 블로우 성형 해석 결과

Figure 8은 블로우 해석 결과를 보여준다. 공정시간 0초부터 1초까지 bottom core가 상승하고 1초부터 3초까지는 블로우 금형이 닫히게 되며 닫히는 순간부터 블로우를 위한 공기 압력이 가해지게 된다. 3.3초부터 성형이 되는 형상을 살펴보면 온도가 가장 높은 프리폼의 중심 영역부터 블로우 금형에 먼저 접촉하게 되며 이후로 점진적으로 금형 벽면 위아래로 접촉하면서 성형이 된다. 금형의 바닥부분과 어깨부분을 비교하여 보면 상대적으로 온도가 높은 바닥부가 먼저 채워지고 어깨부가 나중에 채워지는 것을 확인 할 수 있다. 특히 어깨부의 두께가 국부적으로 얇아지는 것을 볼 수 있다. 이는 프리폼 입구부 주변의 온도가 과냉각되어 소재 유동성이 억제되고 형상도 90도 정도로 급격하게 꺾이면서 과도한 변형이 유발되기 때문인 것으로 판단된다.

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1. 해석 검증

앞 절에서 수행한 해석결과를 Fig. 9와 같이 실제 제품의 용기 두께와 비교하였다. 측정부위는 넥(neck)부위 부터 bottom까지 총 12 point를 지정하여 0.01 mm 단위로 측정하였다. Fig. 10은 측정된 두께를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 두께의 분포가 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

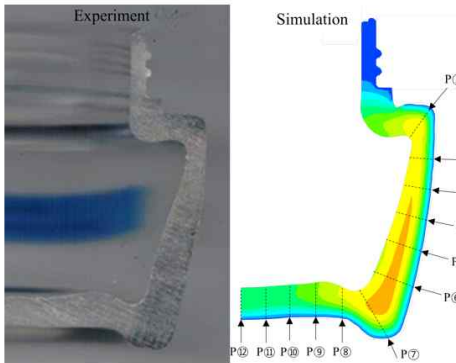


Fig. 9 Measuring point of thickness for comparison between experiment and simulation.

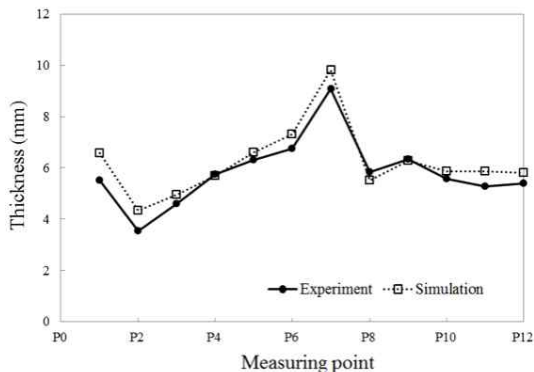


Fig. 10 Comparison thickness between experiment and simulation.

### 6.2. 파라미터 연구

SBM 공정에서 최종 제품의 두께를 결정하는 공정변수는 Fig. 11과 같이 사출 성형 공정과 블로우 공정으로 구분하여 생각할 수 있다. 본

연구에서는 이들 공정 변수들의 영향도를 파악하기 위해 다양한 조건으로 해석을 수행하였다. 먼저 사출 시간(injection time)과 보압 전환 시점(Velocity/Pressure switchover), 보압 압력(Packing pressure)에 대한 파라미터 해석을 수행하였다. 해석결과 두께분포는 큰 차이가 나타나지 않았다(결과 생략). 이는 벽 두께가 두꺼운 경우 사출 시 유동저항에 부담이 적어서 유동선단의 온도가 균일해지고 온도 차이가 크게 발생하지 않았기 때문으로 판단된다.

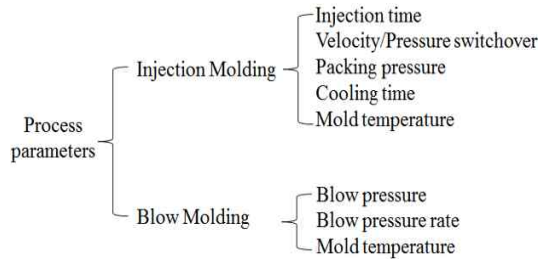


Fig. 11 Process parameters of 1-stage blow molding.

다음은 사출 성형에서 냉각시간 차이에 따른 두께 분포 차이를 비교하였다. 냉각시간 26초, 36초, 46초(초기조건), 56초의 4가지 경우를 해석하여 두께 분포를 비교하였다. Fig. 12 ~ Fig. 14에 각각의 해석 결과를 표시하여 비교하였다. Fig. 12와 같이 26초로 냉각시간이 짧은 경우는 이전 성형해석과 비교하여 보면 어깨부위가 비교적 완만하게 성형이 되었다. 이는 재료의 온도가 충분히 높아서 블로우 성형이 원활하게 진행되었다고 할 수 있다. 그리고 벽의 중간부위에서부터 바닥부위 두께분포는 초기 해석 결과와 비교하여 보면 두께편차가 크지 않았다. 냉각시간이 56초인 경우 Fig. 14와 같이 어깨부는 급격이 꺾이면서 미성형(화살표 표시)이 발생하고 바닥부로 갈수록 벽두께는 더 두꺼워지는 것을 알 수 있다. 해석결과를 보면 사출 냉각시간이 짧을수록 프리폼의 온도분포가 높아서 원활히 성형되는 것을 알 수 있지만, 온도가 높을수록 블로우 금형으로 이송과정에서 이송장치의 관성력과 프리폼의 자중에 의해서 큰 변형이 발생되기 때문에 적절한 사출 냉각시간을 고려하는 것이 중요하다고 판단된다.

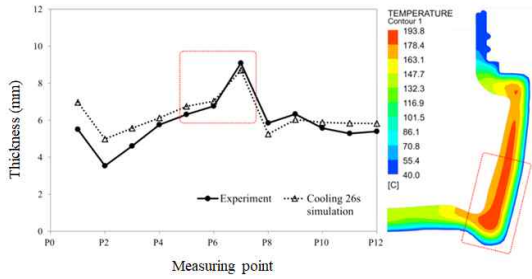


Fig. 12 Comparison thickness between experiment and simulation (injection cooling time 26s).

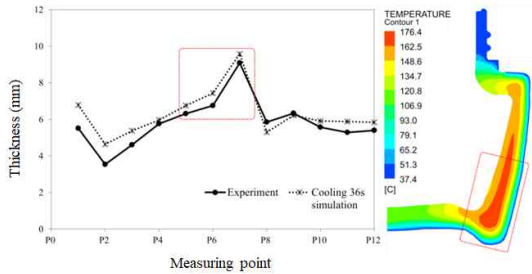


Fig. 13 Comparison thickness between experiment and simulation (injection cooling time 36s).

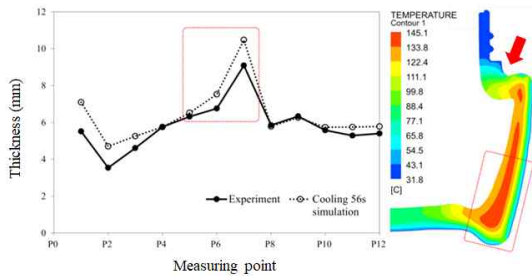


Fig. 14 Comparison thickness between experiment and simulation (injection cooling time 56s).

다음은 블로우 압력 상승 속도(blow pressure rate)에 대한 해석결과를 Fig. 15에 나타내었다. 초기 해석결과는 1.5MPa/0.5s로 압력 상승 속도를 적용하였고, 1.5MPa/0.05s와 1.5MPa/1.0s의 두 가지 경우를 해석하여 비교하였다. 초기 해석과 두께 분포의 큰 차이는 미미하였다. 다음은 블로우 금형 온도(blow mold temperature) 변화에 따른 해석결과를 Fig. 16에 나타내었다. 두께 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 해석결과를 종합해 보면 고찰하여 보면 다양한 공정 변수에서 후육 용기 성형을 위한 가장 중요한 인자는 초기 프리폼의 온도분포임을 확인하였다.

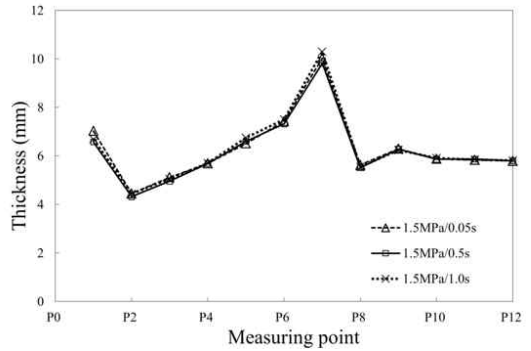


Fig. 15 Comparison thickness according to blow pressure rate changes

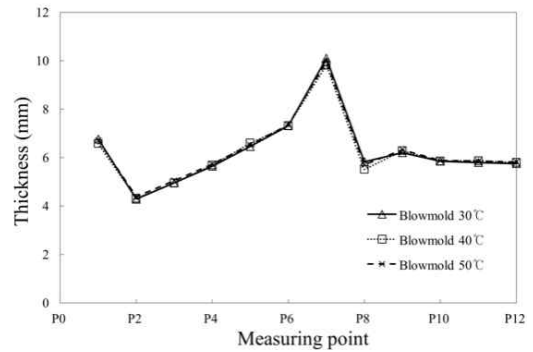


Fig. 16 Comparison thickness according to blow mold temperature changes

#### 4. 결론 및 토의

유리병 용기를 플라스틱으로 대체하기 위한 후육 용기에 대하여 SBM 전 공정 해석을 수행하였다. 블로우 성형성에 가장 큰 영향을 주는 프리폼의 온도를 정확하게 예측하기 위하여 사출 성형해석의 온도 분포 결과를 자연 냉각 해석으로 맵핑하고 자연 냉각 해석에서 블로우 성형 해석으로 맵핑하는 방법으로 블로우 성형 전 공정에서 열전달 과정을 고려하였다. 실제 제품과의 두께를 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 또한 SBM 공정에 대한 성형성에 영향을 주는 공정 변수를 선택하여 성형해석을 수행하였다. 사출 시간, 블로우 압력 상승 속도, 블로우 금형 온도는 두께 변화에 크게 영향을 주지 않았으며 프리폼의 사출 냉각시간이 짧을수록 비교적 두께가 고르게 분포되었지만 온도가 높을수록 이송 중 프리폼의 변형이 크게 발

생활 수 있기 때문에 최적의 사출 냉각시간을 도출하는 것이 중요하다. 또한 후육벽 용기의 경우 블로우 성형 후의 최종 벽두께 분포 예측을 위해서는 사출성형 후의 프리폼 온도분포를 고려하는 것이 매우 중요하다는 것을 제시하였다. 이러한 SBM 공정의 유한요소 기법으로 후육 용기의 두께를 비교적 정확히 파악하여 향후 제품개발 및 공정 최적화에 기여할 수 있다고 판단된다.

## 후기

본 연구는 “기술료지원사업”의 “유리소재 대체를 위한 후육 PET 용기용 ISBM 기술개발” 과제(과제번호: 10048348)의 일환으로 수행되었으며, 블로우 성형시험 결과를 제공해 준 (주)몰텍코리아에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Seung-Hyun Chol, Min-Jae Song, Dong-Won Lee, Young-Bae KO, “Numerical study on the blowing deformation characteristics of a square shaped preform”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.9 No.3, 2015.
- 2) F.M schmidt, J. F. Agassant, M Bellet, “Experimental study and Numerical Simulation of the injection stretch/blow molding process.”, Polymer Eng. Sci. 38, 1399, 1998.
- 3) S. Wang, A. Makinouchi, M. Okamoto, T. Kokata, M. Maeshima, N. Ibe, and T. Nakagawa, Int. Polymer Processing 166, 2000.
- 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, 1379-1390, vol. 44. No.7
- 5) W.P. Haessly and M.E. Ryan, “Experimental study and finite element analysis of the Injection blow molding process.”, Polymer engineering and science, vol.33, no.19, pp. 1279-1287, 1993.
- 6) X. -T, Pham, F. Thibault and L. -T, Lim, “Modeling and simulation of stretch blow molding of polyethylene Terephthalate”, Polymer engineering and science, pp. 1460-1472, vol.44, no.8, 2004.
- 7) Benoit Cosson, Luc Chevalier, Gilles Régnier, “Simulation of the stretch blow moulding process: from the modelling of the microstructure evolution to the end-use elastic properties of polyethylene terephthalate bottles”, International Journal of Material Forming , Volume 5, Issue 1, pp 39-53, March 2012.
- 8) J. P. McEvoy, C. G. Armstrong, R. J. Crawford, “Simulation of the stretch blow molding process of pet bottles”, Advances in polymer technology, Vol. 17, No. 4, 339-352, 1998.
- 9) Kwansoo Chung, “Finite Element Simulation of PET Stretch/Blow-Molding Process”, J. Materials Shaping Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 229-239, 1989.
- 10) BENOIT DEBBAUT and OLMER HOMERIN and NOOR JIVRAJ, “A Comparison Between Experiments and Predictions for the Blow Molding of an Industrial Part”, POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, Vol. 39, No. 9, pp. 1812-1822, 1999.
- 11) J. Biglione, Y. B'ereaux, J.-Y. Charneau, J. Balcaen, S. Chhay, “Numerical simulation and optimization of the injection blow molding of polypropylene bottles - a single stage process”, Int J Mater Form, Volume 9, Issue 4, pp. 471-487, 2016.
- 12) Shubham Gupta, Vikram Uday, Amit Singh Raghuvanshi, Samarth Chowkshey, Shakti Nath Das, S. Suresh, “Simulation of Blow Molding Using Ansys Polyflow”, APCBEE Procedia, Volume 5, pp. 468-473, 2013.
- 13) Luciano Piergiovanni, Sara Limbo, “Food Packaging Materials”, SPRINGER, pp. 41-42, 2016.
- 14) Shubham Gupta, Vikram Uday, Amit Singh Raghuvanshi, Samarth Chowkshey, Shakti Nath, S. Suresh, “Simulation of Blow Molding Using Ansys Polyflow”, APCBEE Procedia, Volume 5, pp. 468-473, 2013.
- 15) MoldFlow Plastic Insight User Manual, 2013.