

유한요소법을 이용한 PET병의 성형 공정 해석

주성택* · 김용환* · 류민영**

(2001년 2월 5일 접수)

Analysis of Forming Processes of PET Bottle using a Finite Element Method

S.T. Joo, Y.H. Kim and M.Y. Lyu

Abstract

PET bottles are mainly manufactured by the stretch blow-molding process. In order to improve the thickness distribution to avoid crack generation at bottom region of one-piece PET bottle, process analysis of stretch blow-molding using a finite element method has been carried out. Finite element analysis has been carried out using ABAQUS/Standard. CREEP user subroutine provided in ABAQUS has been used to model PET behavior that is rate sensitive. Among the process parameters, the effect of plunger movement to thickness distribution of bottle has been considered by axisymmetric analysis. A modified process of plunger movement, which yields more uniform thickness distribution, has been proposed. 3D FE analysis has been done to confirm the validity of the proposed process.

Key Words : PET Bottles, Stretch Blow-molding Process, Finite Element Method, Plunger Movement, ABAQUS /Standard

1. 서론

PET(polyethylene terephthalate)병은 유리병에 비해 생산비가 저렴하고 가벼우며 높은 충격에 견딜 수 있는 장점 때문에 상업적으로 많이 쓰이고 있다.

상업적으로 사용되는 PET병은 저장되는 내용물의 특성에 따라 상압병, 내압병, 내열병, 내열압병 등으로 그 종류를 나눌 수 있으며, 이 중에서 탄산음료 등을 저장하

기 위하여 내압특성을 가져야하는 내압병은 초기에는 블로잉(blowing) 공정에 의해 성형된 몸체와 기초부(base cup)의 두 부분으로 나누어진 조립형 병(two-piece bottle)이었으나 1970년대 초기에 바닥부를 발(foot)과 골짜기(valley)의 꽃잎 모양으로 설계하여 하나의 몸체로서 병을 구성하는 일체형 병(one-piece bottle)의 설계가 시작되었고 이는 공정을 줄일 수 있다는 장점 때문에 1980년대 중반 이후에 상업적으로 널리 이용되고 있다.

* 충남대학교 기계설계공학과

** 서울산업대학교 압형설계학과

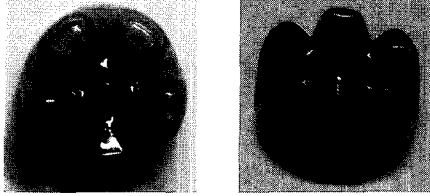


Fig. 1 Photo of crack propagation at bottom region of one-piece PET bottle

그러나 이러한 꽃잎 모양의 설계에서는 성형특성상 바다부의 복잡한 형상부위의 두께분포가 불균일하게 되어 Fig. 1에서 보듯이 내압에 의한 응력집중에 의해 크랙이 발생하는 문제가 생겼다. 이 문제를 해결하기 위해 바다부의 기하학적 형상 설계, 두께분포를 개선하기 위한 공정 개선, 성형 전 초기 재료인 예비성형체(preform)의 형상 및 두께분포 개선, 소재 중심의 연구 및 현장경험 위주의 설계가 이루어지고 있다.

PET병의 성형은 인장 블로 성형(stretch blow-molding) 공정에 의해 이루어지는데 이 공정은 사출 공정으로 성형된 예비성형체의 형상 및 두께분포, 플런저(plunger)의 형상과 이동거리 및 이동속도, 성형 압력의 시간에 따른 구배 등의 많은 변수를 가진다. 최종 성형 후 병의 최적의 두께분포를 얻기 위해 현재까지 대부분의 경우 위에서 언급한 여러 변수들의 조합에 의한 실험적인 시행착오법에 의해 설계가 이루어졌다. 이는 많은 시간과 비용을 필요로 하며, 다른 형상이나 다른 두께분포를 원하는 병에 적용하기가 비효율적이다. 따라서 유한요소법(finite element method : FEM)을 이용하여 성형 공정해석을 대체함으로써 시간과 비용을 절약할 수 있으며 성형 공정의 이해에 도움을 얻을 수 있다. 즉 최종 두께분포를 예측할 수 있으며 또한 각각의 물질요소가 어떠한 경로로 변형하는지 알 수 있으며 이는 예비성형체의 특정 부분이 성형 후 어느 부분에 위치하는 지를 보일 수 있다.

많은 변수를 가지는 인장 블로 성형 공정의 특성상 유한요소해석에서도 마찬가지로 시행착오법을 시행한다. 만약 성형 후의 두께분포가 만족스럽지 않다면 성형 공정의 변수를 수정한 후 다시 해석하는 방법으로 만족스러운 두께분포를 얻을 때까지 반복할 수 있다.

본 문에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Standard⁽¹⁾를 이용하여 PET병 성형에 있어서 성형 후 두께분포에 영향을 주는 여러 변수들 중에서 플런저의 이동에 의한 영향에 대하여 고찰하였다. 두께분포에 영향을 주는 다른 변수들은 고정하고, 즉 동일한 예비성형체의 형상

및 동일한 압력 조건 하에서 플런저의 이동거리 및 이동속도가 두께분포에 미치는 영향을 고려하여 최적의 두께분포를 위한 새로운 공정을 제시하였다. 본 연구에서의 최적의 두께분포란 바다부에서 내압에 견딜 수 있는 정도로 가능한 균일한 두께분포를 갖는 것을 말한다. 성형시 변형 경화와 변형률속도 경화를 고려한 PET 거동의 구성방정식의 적용은 CREEP 사용자 서브루틴(user subroutine)⁽²⁾을 이용하였다.

우선 기하학적으로 축대칭 문제와 3차원 문제에서 동일한 조건을 가지는 골짜기 부분에 대하여 현 공정에 대한 축대칭 해석을 수행하여 현 공정(current process)에서 성형된 병의 두께분포와 해석 결과와의 비교를 통하여 유한요소해석에 타당성을 부여하고 플런저 이동에 대한 새로운 공정을 제시하였다. 제시된 개선 공정(modified process)에 대하여 3차원 해석을 수행하여 실제 형상에 대해 개선 여부를 확인하였다.

2. 관련 이론

2.1 인장 블로 성형

PET병의 성형은 인장 블로 성형 공정에 의해 이루어진다. 우선 블로 성형(blow molding) 공정은 재료에 가스에 의한 압력을 가하여 재료가 주형에 접촉하도록 하여 성형을 하는 공정으로서 기존의 박판 성형 공정에서 주로 사용되었던 펀치가 필요없으므로 펀치 형상에 제한을 받았던 복잡한 형상을 성형할 수 있으며 또한 펀치 등의 성형 도구가 줄어서 비용을 절약할 수 있는 장점이 있으나 성형 시간이 다른 성형 공정에 비해 길다는 단점이 있다.

인장 블로 성형 공정은 블로 성형 공정에 플런저의 이동에 의한 인장 성형이 추가된 공정으로서 블로 성형 공정에 비해 성형 시간이 절약된다는 장점이 있으며 비교적 복잡한 모양의 성형에 적합한 공정이다. 이 공정은 Fig. 2에서와 같이 플런저의 이동에 의한 인장 공정과 가스압에 의한 팽창 공정의 두 단계로 나눌 수 있으며 그림과 같은 세부 공정을 거친다. (a)는 사출 공정에 의해 예비성형체가 성형, (b)는 예비성형체가 성형에 적당한 온도로 가열램프에 의해 가열, (c)는 성형의 초기 단계로서 예비성형체를 다이의 입구에 고정, (d)는 플런저의 이동에 의해 인장되면서 성형되는 것을 보이며 이 공정에서 예비블로(pre-blow)라 하여 작은 가스압을 가하는데 이는 플런저와 예비성형체의 과도한 접촉을 방지하기 위한 공정이며, (e)는 가스압에 의한 팽창 공정에 의

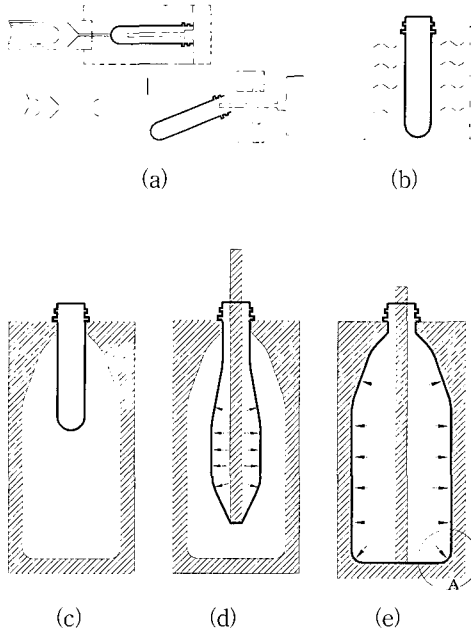


Fig. 2 General processes of stretch blow-molding : (a) injection molding of preform, (b) preform heating, (c) mold closing, (d) stretch process and (e) blowing process

해 예비성형체가 모두 주형에 접촉하여 성형이 완료된 형상을 보인다.

2.2 성형 온도와 고착조건(sticking condition)

인장 블로 성형 공정에서 재료를 압력에 의해 팽창시키기 위해 적당한 온도로 가열한다. 이때의 성형온도는 고분자 중합체(polymer)의 유리 천이 온도(glass transition temperature) T_g 와 용융 온도(melting temperature) T_m 사이이다. 고분자 중합체가 T_g 이상으로 가열되면 역학적 성질이 변하여 유동이 보다 자유로워져서 성형에 용이한 상태가 된다⁽³⁾. PET의 T_g 는 75°C이며 성형 온도는 그보다 약간 높은 온도인 약 100°C 정도이고 예비성형체를 부분별로 온도분포를 다르게 하여 성형하는 공정의 경우에는 대략 80°C~120°C의 온도분포를 가진다. 이렇게 고온으로 가열된 예비성형체가 팽창하는 과정에서 상온의 주형과 접촉하게 되면 재료는 급격히 온도가 내려가면서 더 이상 유동을 하지 않는 현상을 보인다. 이를 고착조건 또는 no-slip 조건이라 하며 주형에 나중에 접

촉하는 부분이 먼저 접촉하는 부분보다 상대적으로 더 많이 변형하여 두께가 얇아져 성형 후 재료의 두께분포가 불균일한 이유가 된다. Fig. 2(e)에서 주형의 구석 부분인 A영역이 나중에 접촉하므로 두께가 얇아지는 현상이 발생한다. 이는 박판 성형에서의 초소성 성형⁽⁴⁾에서도 나타나는 현상이다. 이러한 고착조건은 플런저와 예비성형체 사이에서도 마찬가지로 적용되며 이로 인해 플런저와 접촉하는 병 바닥면의 중앙부에서는 A영역과는 반대로 성형 후 상대적으로 두꺼운 두께분포를 보인다.

2.4 구성방정식

일반적으로 고분자 중합체의 변형 경화는 변형률속도에 비례하고 온도에는 반비례한다. 따라서 변형률속도에 의존하는 PET의 경화 거동은 Mises의 등방성 소성이론과 등방성 경화를 적용하여 다음과 같은 구성방정식으로 표현한다.

$$\bar{\sigma} = B \bar{\epsilon}^m \quad (1)$$

여기서 B 는 강도계수(strength coefficient), m 은 변형률속도 민감도(strain rate sensitivity)이며 이들은 각각 유효 변형률 $\bar{\epsilon}$ 의 함수이다. 그리고 $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률속도이다⁽⁵⁾.

B 값과 m 값은 실제 공정에 사용된 온도와 속도조건에 대해 실험적으로 구하여 사용하여야 하나 본 연구에서는 실제 물성치 실험을 수행하지 못하여 유사한 참고문헌⁽⁵⁾의 값들은 사용하였으며, 사용된 값이 Fig. 3에 주어져 있다.

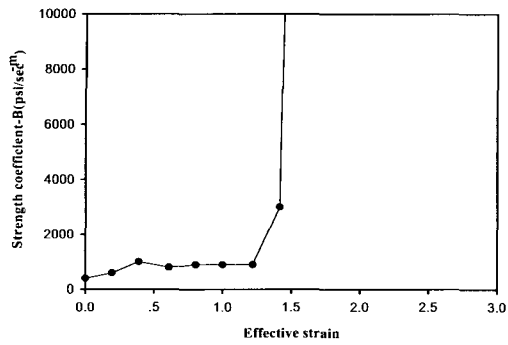
2.5 ABAQUS/Standard CREEP 사용자 서브루틴

성형 공정에서 PET의 거동을 표현하기 위한 식 (1)의 구성방정식을 적용하기 위해 ABAQUS/Standard에서는 CREEP 사용자 서브루틴을 이용하였다. CREEP 사용자 서브루틴은 변형률속도에 영향을 받는 물질의 거동, 즉 점소성 거동을 표현한다. 구성방정식을 사용자 서브루틴에서 이용하기 위해 다음과 같이 변환한다.

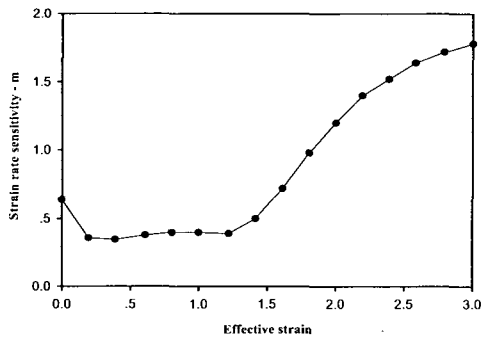
$$\bar{\epsilon} = A \bar{\sigma}^n \quad (2)$$

여기서 $n = 1/m$, $A = 1/B^n$ 이다.

구성방정식의 $\bar{\epsilon}$ 은 사용자 서브루틴에서는 $\bar{\epsilon}^{cr}$ 를 의미하므로 식 (2)는 다음과 같이 유효 크립 변형률 증분의 형태로 표현된다.



(a)



(b)

Fig. 3 Variation of (a) strength coefficient, B , and (b) strain rate sensitivity, m , with effective strain of PET used for analysis⁽⁵⁾

$$\Delta \bar{\epsilon}^{cr} = A \bar{\sigma}^n \Delta t \quad (3)$$

식 (3)은 사용자 서브루틴 안에서의 내연적 적분을 위해 다음과 같은 형태로 변환한다.

$$\frac{\delta \Delta \bar{\epsilon}^{cr}}{\delta \bar{\sigma}} = n A \bar{\sigma}^{n-1} \Delta t \quad (4)$$

식 (3), (4)를 서브루틴 내에서 적분함으로써 PET의 점소성 거동을 정의한다.

3. 축대칭 유한요소해석

현재의 공정에 대한 축대칭 유한요소해석을 수행하여 현 공정에서 성형된 병에서의 두께분포와 해석 결과와의 비교를 통해 해석에서의 해의 타당성을 검토하

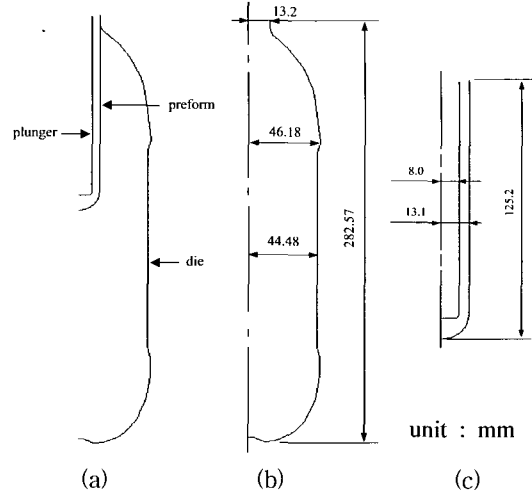


Fig. 4 FEM models for stretch blow-molding : (a) assembled, (b) die and (c) preform and plunger

고 성형 후 두께분포 개선을 위한 플린저 이동에 대한 개선 공정을 제시하였다.

3.1 해석 모델

본 연구에 사용된 바닥부가 꽃잎 모양인 일체형 병은 주로 탄산음료를 저장하는 용도로 쓰이는 용량이 1.5ℓ 인 내압 PET병이다. 병이 축대칭 형상이 아니므로 3차원 해석이 필요하나 계산의 효율을 위해 현 단계에서는 골짜기 부분에 대해서 축대칭 해석을 수행하였다. 골짜기 부분은 병의 기하학적 특성상 축대칭 해석과 3차원 해석이 동일한 조건을 가지므로 실제 PET 병과 비교하여 해석 결과에 타당성을 부여할 수 있다.

축대칭 유한요소해석 모델은 예비성형체, 플린저, 다이로 구성되며 Fig. 4에 도시되었다. 다이와 플린저는 각각 2절점 선형 축대칭 강체 요소인 RAX2를 이용하여 모델링 하였으며 예비성형체는 2절점 선형 축대칭 쉘 요소인 SAX1을 사용하였으며 사용된 요소의 수는 105개이고 두께방향으로는 5개의 적분점을 사용하였다.

해석에 쓰인 PET의 물성치는 탄성계수 2.7GPa, 포아송 비는 0.34를 사용하였다. 예비성형체는 실제 성형 과정동안에 온도의 변화를 보이나 본 연구에서는 성형 과정동안 동일한 온도를 유지하며 동일한 온도분포를 가진다고 가정하였으며 고착조건을 적용하기 위해 예비성형체와 다이 그리고 예비성형체와 플린저 사이의 쿨롱 마찰계수는 1.0으로 처리되었다.

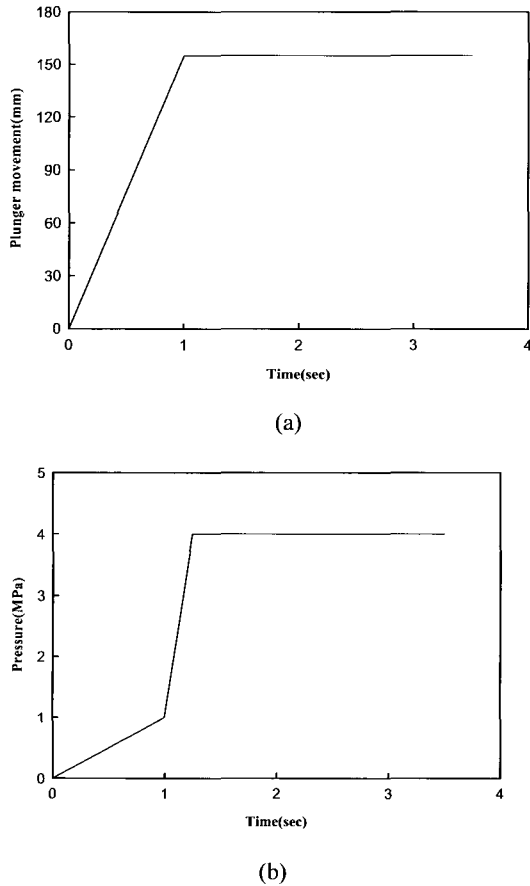


Fig. 5 Variation of current process variables: (a) plunger movement and (b) blow pressure

3.2 기존 공정의 해석

현재 공정의 변수는 (주)삼양사⁽⁶⁾에서 제공한 값을 사용하였으며 Fig. 5에서 보이고 있다. 플런저에 의한 인장 공정은 1초 동안에 이루어지며 인장 공정동안 가해지는 예비블로 압력은 인장에 의해 예비성형체의 내부 부피 증가로 인해 내부 압력이 일시적으로 저하하는 현상을 보이기 때문에 시간에 따른 압력을 측정하기가 어렵다. 이 현상을 유한요소해석에 적용하기 위해 예비블로 압력은 서서히 증가해서 인장 공정의 끝에서 최대값인 1.0MPa를 가진다고 가정하였다. 팽창 공정의 블로 압력은 예비블로 압력의 최대값인 1.0MPa에서 0.25초 동안 점차적으로 증가하여 최고값인 4.0MPa에 도달한 후 그 값을 유지하는 것으로 해석하였다.

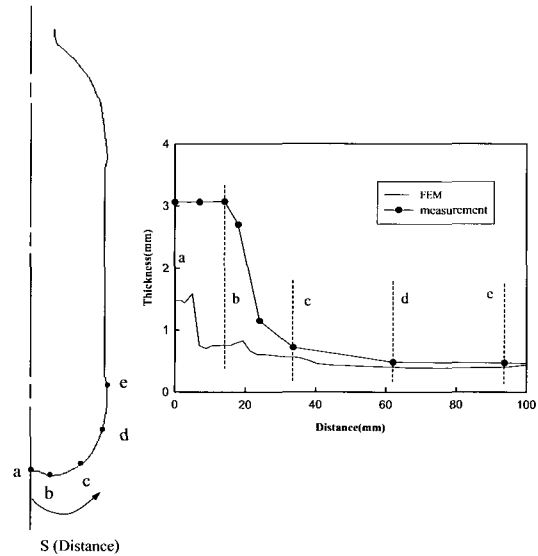


Fig. 6 Comparison of measured thickness distribution for the current process and FE result at the bottle bottom region

Fig. 6에서는 현 공정에서 얻어진 제품의 두께분포와 해석 결과에서의 두께분포를 바닥면의 중앙에서의 거리에 따라 비교하였다. 병 바닥의 중앙부에서의 두께가 제품과 해석 결과가 많은 차이를 보이고 있으나 나머지 부분에서는 인정할만한 결과를 얻었다. 바닥의 중앙부에서 두께분포가 차이가 발생하는 이유는 다음과 같이 예상된다.

(1) 유한요소해석에서는 예비성형체를 동일한 성형온도라고 가정하였으나 실제 공정에서는 부분별로 다른 온도분포를 가지는 것을 들 수 있다. 실제 공정에서의 온도분포는 바닥부가 몸체부분에 비해 상대적으로 낮은 온도분포를 가진다. 따라서 온도가 낮아질수록 변형강도가 증가하는 고분자 중합체의 특성상 상대적으로 온도가 낮은 바닥부에서 몸체부분에 비해 적은 변형을 하여 동일한 온도를 가지는 유한요소해석에 비해 실제 공정에서 바닥부에서 두꺼운 두께분포를 가진다.

(2) 쿨롱 마찰계수를 1.0으로 정의함으로써 접촉문제, 즉 고착조건을 적용하였다. 그러나 유한요소해석에서는 예비성형체가 플런저와 접촉 후에도 유동이 발생하였다. 결과적으로 마찰계수를 1.0으로 하여 고착조건을 구현하는데 문제가 있음을 의미한다.

(3) 해석에 사용된 구성방정식의 PET 물질치인 B 와 m 의 값은 87°C의 온도에서 변형률속도가 0.0025/s와

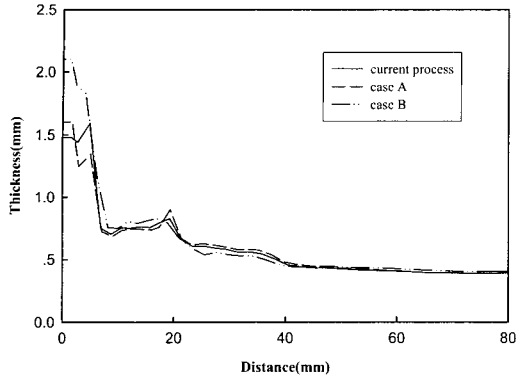


Fig. 7 Comparison of thickness distribution for the different plunger movement velocities

0.05/s 사이에서 측정된 것이나 실제 성형 공정에서는 약 100℃의 높은 온도, 0.01/s와 1/s 사이의 높은 변형률 속도 상태에서 변형한다. 따라서 PET 거동에 대한 구성방정식의 적용에 있어서 오차가 발생한 것으로 예상된다. 따라서 구성방정식의 정확한 적용을 위해서는 보다 정확한 PET의 물성치가 필요함을 의미한다.

3.3 공정 변수 조정

현 공정에 대한 해석을 바탕으로 플런저의 이동속도와 이동거리에 대한 영향을 고려하기 위해 각각의 변수를 조정하면서 해석을 수행하였다.

3.3.1 플런저의 속도 조정

현 공정의 인장 공정의 소요 시간은 1.0초이며 플런저의 속도는 0.155m/s이다. 플런저의 이동 속도가 두께분포에 미치는 영향을 검토하기 위해 인장 공정의 소요 시간이 0.5초인 A 경우와 2.0초인 B 경우에 대하여 해석을 수행하였으며 이때 각각의 플런저의 속도는 0.31m/s와 0.078m/s이다. 예비블로 입력은 서서히 증가해 인장 공정의 끝에서 최대값을 가지므로 예비블로 소요 시간은 각각 0.5초와 2.0초로 하였으며 최대값의 크기는 동일하게 1.0MPa으로 정의하였다.

Fig. 7은 성형이 끝난 후 각각의 경우에 대한 바닥부에서의 두께분포를 보이고 있다. 해석 결과에서 어느 경우가 균일한 두께분포를 가진다고 규정하기는 힘들지만 현 공정, 즉 인장 공정을 1.0초 동안 실시하는 경우가 다른 경우에 비해 보다 비교적 균일한 두께분포를 가진다고 하겠다. 따라서 플런저의 속도는 현 공정의 값인 0.155m/s을 유지하기로 하였다.

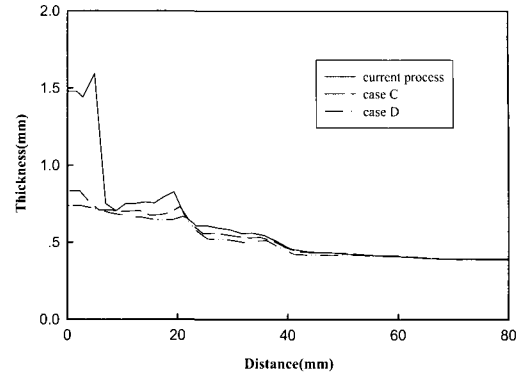


Fig. 8 Comparison of thickness distribution for the different plunger movement displacements

3.3.2 플런저의 이동거리 조정

플런저의 이동거리가 성형 후 최종 두께분포에 주는 영향을 고려하기 위해 플런저의 이동속도를 현 공정에서의 속도인 0.155m/s로 고정하고 이동거리를 조정하면서 그 영향을 고려하였다. 현 공정에서 플런저의 이동거리는 155mm이며 이는 플런저의 이동이 끝났을 때 다이와 플런저 사이가 5mm가 되는 거리이다. 이에 대해 플런저의 이동거리가 150mm인 경우(C 경우)와 145mm인 경우(D 경우)에 대하여 해석을 수행하였다. 플런저의 이동 속도를 고정하였으므로 인장 공정에 소요되는 성형시간은 각각 0.968초 와 0.935초이다.

Fig. 8은 성형이 끝난 후 각각 경우에 대한 성형 후 두께분포를 보이고 있다. 1.5ℓ 병의 경우 내압에 견디기 위해 바닥면의 중앙부(Fig. 6에서의 a~b영역)의 두께는 1.3mm이상이어야 한다⁽⁷⁾. 따라서 최적의 두께분포란 바닥면의 중앙부의 두께가 1.3mm이상인면서 바닥면에서는 전체적으로 균일한 두께분포를 가지는 것이다. 해석의 결과 모든 경우가 이를 만족하지 못하나 해석의 결과가 실제 공정의 값보다 작게 나오는 것을 감안하면 경우 C, D 모두 현 공정에 비해 비교적 균일한 두께분포를 가지는 개선 공정으로 인정할만하다. 그러나 사출에 의해 성형되는 예비성형체는 그 끝 부분에 결함을 가지게 되며 이 결함부분이 블로 공정동안 팽창하면서 병의 중심에서 벗어나는 현상이 생길 수 있으며 이는 바닥면에서 크랙이 발생하는 또 하나의 원인이 될 수 있다. 이러한 이유로 현 공정에서는 플런저를 가능한 한 다이와 근접한 거리까지 이동하여 팽창 공정동안 결함부가 병의 중심에서 벗어나는 것을 방지하고 있다. 따라서 비교적 균일한 두께분포를 가지며

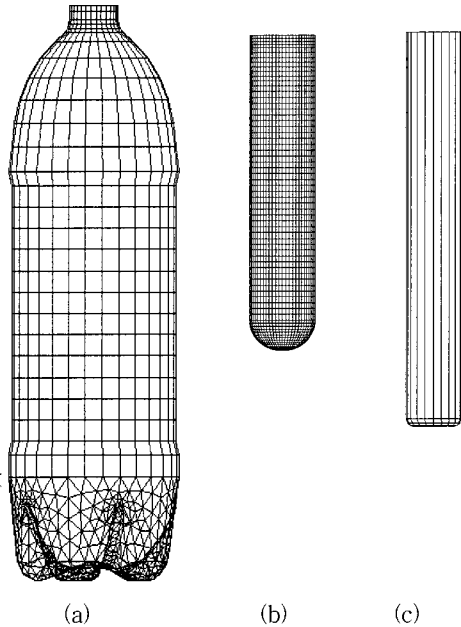


Fig. 9 3D FEM models for the forming of PET bottle : (a) die, (b) preform and (c) plunger

플런저 이동 후 다이와의 거리가 가까운 경우 C의 경우를 개선 공정으로 제시한다. 개선공정은 플런저의 이동 속도는 0.155m/s, 이동 거리는 150mm로 성형 공정을 수행함으로써 성형 후 바닥 중앙부의 두께는 얇아졌지만 급격한 두께 변화가 없어서 현 공정에 비해 크랙에 견디는 성질이 증가할 것으로 예상된다.

4. 3차원 유한요소해석

축대칭 유한요소해석에서 제시된 플런저 이동 공정에 대한 개선 공정을 바탕으로 현재의 공정과 개선 공정에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 개선 공정을 검증하였다.

4.1 해석 모델

축대칭 해석에서는 용량이 1.5ℓ인 일체형 내압 PET 병의 골짜기 부분에 대하여 해석을 수행하였으나 3차원 해석에서는 발과 골짜기부를 포함한 모든 형상에 대하여 해석을 수행한다. 병(성형 해석시 다이)과 예비성형체, 그리고 플런저의 유한요소해석 모델은 Fig. 9에 보였다.

다이의 유한요소 모델은 복잡한 형상을 가지는 바닥부

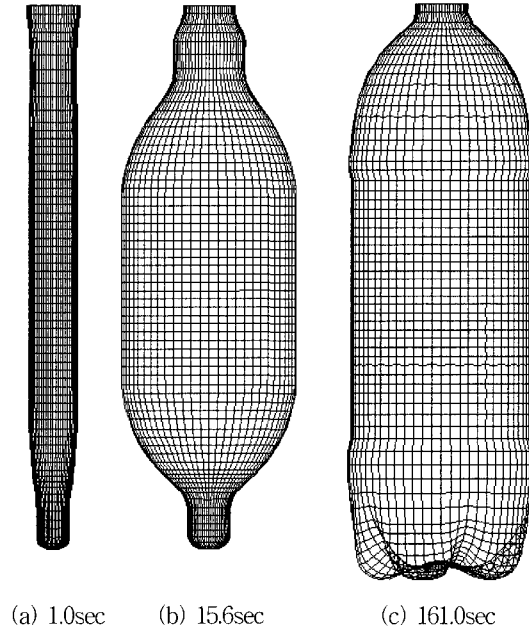


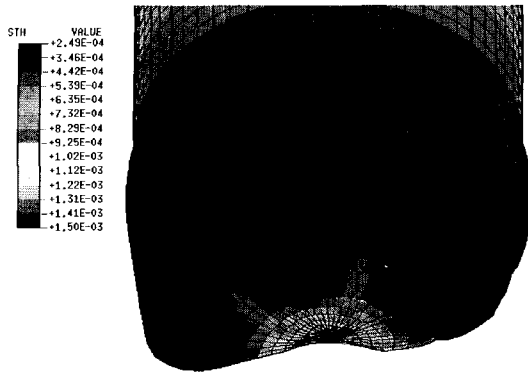
Fig. 10 Evolution of deformed shapes during the modified process

에서는 3절점을 사용한 3차원 강체 삼각형 요소인 R3D3, 880개를 사용하였으며 나머지 부분에 대해서는 4절점을 사용한 3차원 강체 사각형 요소인 R3D4, 459개를 사용하였으며 플런저는 R3D3, 10개와 R3D4, 50개를 사용하여 모델을 작성하였다. 예비성형체의 유한요소 모델은 일반적인 쉘 요소이며 감차적분을 사용한 유한 박막 변형률의 성질을 가지는 4절점 요소인 S4R, 2010개와 3절점 요소인 S3R, 30개를 사용하였으며 두께방향으로의 적분점은 S4R과 S3R이 동일하게 5개를 사용하였다. 각각의 유한요소 모델은 형상이 중심축에 대하여 대칭이므로 1/2 형상만을 모델링하였다. 예비성형체의 물성치, 온도, 그리고 마찰조건 등의 해석조건은 축대칭 해석과 동일하게 해석을 수행하였다.

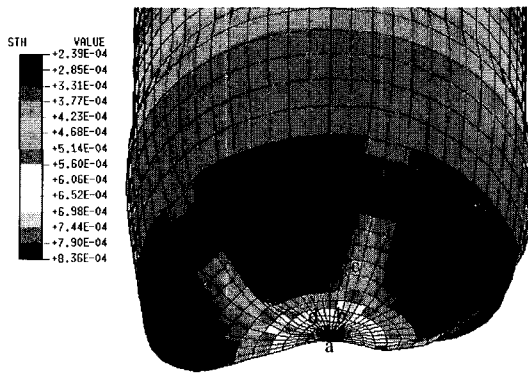
해석에 사용된 컴퓨터는 Pentium III로서 CPU는 500MHz, 메모리는 512MB이며 해석시간(CPU time)은 현 공정과 개선 공정에서 비슷하게 298시간 정도가 소요되었다.

4.2 해석 결과

플런저의 이동속도 0.155m/s, 이동거리 155mm의 현재의 공정과 축대칭 해석에서 제시한 플런저의 이동속도 0.155m/s, 이동거리 150mm의 개선 공정에 대하여 해석을



(a)



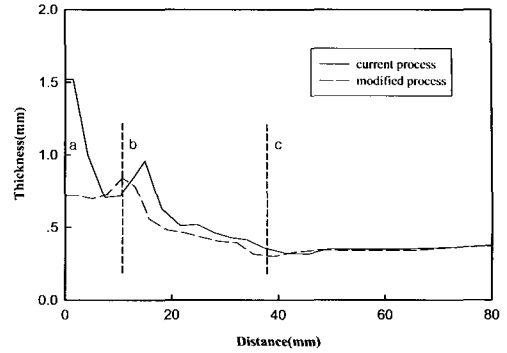
(b)

unit : m

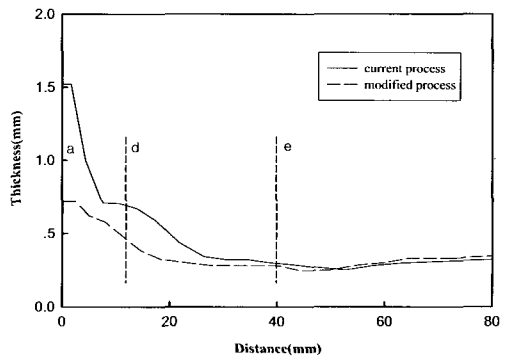
Fig. 11 Final thickness distribution : (a) current process and (b) modified process

수행하였다. Fig. 10에서는 개선 공정에서의 예비성형체의 변형 형상을 보이고 있다.

Fig. 11는 블로 성형 후, 즉 최종 성형 후의 두께분포를 보이며 Fig. 12에서는 Fig. 11(b)에 표시한 a~e점을 기준으로 골짜기와 발 부위에서의 현 공정과 개선 공정의 두께분포를 바닥면의 중앙에서부터 길이에 따라 비교하였다. 3차원 유한요소해석에서도 축대칭 해석에서의 결과와 마찬가지로 현 공정의 경우 바닥면의 중앙부에서 급격한 두께 변화를 보인 반면 개선 공정에서는 비교적 균일한 두께분포를 보였고, 이는 제품의 사용 중 크랙 발생을 억제할 것으로 예상된다.



(a)



(b)

Fig. 12 Comparison of thickness distributions of current and modified processes : Along (a) valley region and (b) foot region

5. 결론 및 향후과제

PET병 성형 공정인 인장블로 성형 공정에 대하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/ Standard을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 성형공정동안 변형 경화와 변형률속도 경화를 고려한 구성방정식으로 표현되는 PET의 거동은 ABAQUS 내에서 CREEP 사용자 서브루틴을 이용하여 적용하였으며 플런저의 이동거리와 이동속도 등의 이동조건이 성형 후 두께분포에 미치는 영향을 고려하여 플런저 이동 공정에 대하여 새로운 공정변수값을 제시하였다.

현 공정에 대한 해석을 바탕으로 플런저 이동에 대하여 제시된 새로운 공정은 현 공정에 비해 급격한 두께의 변화없이 비교적 균일한 두께분포를 가졌다. 따라

서 개선 공정은 바닥면에서의 크랙생성을 억제할 것으로 예상된다.

유한요소해석은 성형 공정을 이해하고 공정변수의 영향을 고려하기에는 충분한 값을 제공하였다. 따라서 종래의 시행착오법에 의해 행해지던 공정 변수의 영향에 대한 평가가 유한요소해석으로 대체됨으로서 많은 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

지금까지의 연구와 PET의 정확한 물성 실험을 바탕으로 앞으로 고착조건의 보다 정확한 적용, 예비성형체에서의 온도분포를 고려한 성형, 다른 성형 변수의 영향을 고려한 해석 등에 대하여 계속 연구가 수행되어야 할 것이며, 본 연구에서 제안된 공정변수를 이용한 실험을 통한 검증이 시도될 것이다.

후 기

본 연구는 수당장학회의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) ABAQUS/Standard 5.8, 1998, Hibbit, Karlsson

& Sorensen Inc.

- (2) ABAQUS/Standard User's Manual, 1998, vol. III, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., pp. 25.2-1~25.2-12.
- (3) P.G. Llana and M.C. Boyce, 1999, "Finite Strain Behavior of Poly Ethylene Terephthalate above the Glass Transition Temperature", Polymer, Vol. 40, pp. 6729~6751.
- (4) Y.H. Kim, S.S. Hong, J.S. Lee and R.H. Wagoner, 1996, "Analysis of Superplastic Forming Processes Using a Finite Element Method", J. Material Processing Technology, Vol. 62, pp. 90~99.
- (5) M. Schrank, 1998, "Numerical Modeling of A Large Deformation Thermoforming Process", Proc. of ABAQUS User Group Meeting, pp. 439~452.
- (6) 주식회사 삼양사, 대전.
- (7) 신희철, 이재식, 김학철, 류민영, 2000, "Petaloid PET병의 바닥면 Crack 방지를 위한 고찰", 한국고분자학회 연구논문초록집, 제 25권, 제 1호, pp. 14,