압축하중시 PET병의 변형특성에 관한 수치해석 및 실험적 연구

조승현^a, 권창오^b, 박균명^c, 고영배^{c*}

Numerical analysis and Experiment to Determine Deformation Characteristics of PET Bottle under Compressive Load

S. H. Cho^a, C. H. Kwon^b, G. M. Park^c, Y. B. Ko^{c*}^a University of Dongyang Mirae, Seoul, Republic of Korea^b Dong-A PRECISION IND. Co., Ltd, Kyonggido, Republic of Korea^c Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	12	November	2013
Revised	5	February	2014
Accepted	7	February	2014

Keywords:

Compressive load
PET bottle
Buckling
Large deformation
FEA

ABSTRACT

Many have been performed to decrease the thickness of polyethylene terephthalate (PET) bottles to reduce the manufacturing cost. However, it is difficult to guarantee the mechanical strength under top-loading after decreasing the thickness. This paper investigates the large deformation characteristics of a PET bottle under a compressive load using experimental and finite element analysis (FEA) data. A round 1.65-L bottle is analyzed under a compressive velocity of 5 mm/min with a maximum load of 9,800 N in experiments. The arc length method is used in a nonlinear FEA to understand the buckling phenomenon of the PET bottle. From the analyzed results, a recommendation is made to restrict the top loading to less than 1,208 N, because the first buckling phenomenon occurred at a load of 1,208 N.

1. 서 론

페트를 이용한 패키징 산업은 가격이 저렴하고 사용이 편리하여 사용량이 증가하는 분야로서 가격경쟁력을 확보하기 위한 재료절감 기술, 프리폼 및 용기디자인 기술, 제조자동화 기술 등의 개발이 절실한 상황이다. 최근 관련업계에서는 원재료 절감, 물류에 필요한 연료 사용량 및 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해 용기의 두께를 감소시키는 연구를 수행하고 있다. 그러나 용기의 두께가 얇아지면 용기를 보관할 때 적층무게를 지탱하는 내력이 약해지는 문제가 발생할 수 있다.

PET 용기업계에서는 원재료와 물류비 절감을 위해 용기의 두께

를 감소시키기 위한 많은 연구개발을 수행하고 있는데 용기의 박판화는 Top loading에 대한 내구성 약화의 중요한 원인이 된다. 본 논문에서는 1.65 liters 용량의 원형 PET용기의 압축하중시 변형

Fig. 1 Bottles stored in warehouses^[1]

* Corresponding author. Tel.: +82-32-850-0321

Fax: +82-32-850-0320

E-mail address: kaiser74@kitech.re.kr(Youngbae KO).

거동 특성을 실험과 CAE 해석을 통해 분석하여 용기 경량화를 위한 기초연구를 수행하고자 한다.

2. 수치적 연구

2.1 좌굴

압축실험을 통해 PET용기가 순간적으로 내려앉는(collapse) 현상이 발생할 때 걸리는 하중은 좌굴해석을 통해 예측할 수 있다. 좌굴이 발생할 때 하중은 power sweep 이나 Lanczos 법에 의해 계산되는 고유모드(eigenvalue)값을 기초로 계산된다. 본 논문에서는 초기 일정한 하중에 의한 PET용기의 좌굴거동을 일으키는 좌굴임계하중(P_{cr} , buckling critical load)을 해석하기 위해 선형좌굴(Linear buckling)해석이 적용되었다^[2,3]. 기둥의 굽힘-변형 평형방정식에서 유도된 좌굴임계하중은 다음의 식 (1)로 계산된다. 이때 E는 탄성계수, I는 최소 관성모멘트, L은 양단이 지지되지 않은 기둥의 길이이다.

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, n=1,2,3, \dots \quad (1)$$

P_{cr} 은 $n=1$ 일때 최소값을 가지게되고 이러한 최소값을 좌굴임계하중이라고 할 수 있다. 따라서, PET용기의 최소 관성모멘트를 구하게 되면 이론적으로 좌굴임계하중을 식 (1)에 의해 계산할 수 있다.

2.2 Arc length method

Fig. 2는 PET용기의 비선형-대변형 거동에서 발생하는 snap-through과 snap-back 거동을 나타낸 그림이다. 시간에 대한 하중과 변위 증분이 일정한 조건의 선형해석은 PET용기의 압축실험에서 존재하는 이러한 현상을 모사할 수 없다. Arc length method는 유한요소법을 사용한 비선형해석에 사용되는 Incremental load-displacement method로서 비선형-대변형 거동을 수치해석하기 위해서 하중과 변위를 동시에 조절하는 변위법에 기초한 하중 증분법이다. 이것은 Risk의 극점을 극복하는 새로운 해법을 유한요소법에 적용할 수 있도록 수정한 것으로 비선형 궤적에 일정반경의 구속 조건을 추가하여 보다 안정된 해를 구할 수 있다^[3-5].

Fig. 3(a),(b)는 각각 실험과 해석에 사용된 원형 PET용기와 유한요소법에 의한 해석모델을 보여주고 있다. 유한요소해석에 사용된 프로그램은 MSCsoftware MARC2013이며, 3각형 3차원 셀요소를 사용하고 Fig. 3(a)와 같이 PET용기의 두께를 두께측정기를 사용하여 측정하여 6개 구간의 셀두께로 입력하였다. 또한, 압축조건을 모사하기 위해서 Fig. 3(b)와 같이 접촉모델(contact model)을 사용하였다. PET용기는 접촉 변형체(contact deformable body)

Fig. 2 Snap-through (① → ②) and snap-back (② → ③) behavior

Fig. 3 Modeling of finite element analysis

Fig. 4 Stress-strain property of the PET

1)로 설정한 후 강체(rigid body)로 가정한 판(contact rigid body 3)위에 올려져있고 또 다른 강체(rigid body 2)에 의해 압축길이 300 mm를 1,00초 동안 0.25 mm/sec의 속도로 압축되었다. Fig. 4는 유한요소해석에 사용한 PET소재의 응력-변형률 곡선이다^[6]. PET의 기계적 특성값은 탄성계수가 3 GPa이고 포아송비가 0.4이다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 실험적 연구

본 논문에서는 Fig. 5의 압축시험기를 이용하여 실제 PET용기에서 예상되는 압축하중을 적용하였다. 최대 9,806 N 로드셀의 장착된 압축시험기에서 용기의 주입구를 5 mm/min의 속도로 좌굴이 발생할 때까지 강제변위를 주었다.

Fig. 6은 1차 대변형이 발생한 압축실험과 해석 결과를 보여주고 있다. 실험에 의하면 약 2.4 mm 압축에 의해 약 68.6 N의 하중이 발생할 때 용기에서 1차 좌굴이 발생한 후 다시 하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 유한요소 해석에 의하면 PET용기는 약 5.9 mm 압축 후 약 165 MPa의 등가 코쉬응력이 발생하면서 1차 좌굴이 발생하였다. 실험과 해석결과는 정확하게 일치하지 않는데 이것은

Fig. 5 Experimental setup

Fig. 6 1st. Large Deformation of the PET bottle under compressive load

PET특성입력값과 실제 특성값의 차이와 PET두께의 해석입력값과 실제값의 차이 때문으로 판단된다.

3.2 해석적 연구

Fig. 7(a)-(d)는 1,300 N의 하중이 가해질 때 PET용기에서 발생하는 선형좌굴 해석에 의한 1차-4차 모드와 좌굴하중계수를 나타낸 그림이다. PET병과 같이 top-loading에 의한 내구력이 요구되는 조건에서는 좌굴은 1차 모드가 가장 중요하며 좌굴하중계수도 1차모드에서 계산된 0.9293이 된다. 따라서, 좌굴임계하중(Pcr)은 하중과 좌굴하중계수의 곱인 1,208 N으로 계산되었다.

Fig. 8(a)-(j)는 5 mm/min.속도로 20분간 압축될 때 PET용기에서 발생하는 대변형거동을 순차적으로 나타낸 그림이다. PET병은 압축초기에는 Fig. 8(a)와 같이 용기의 아랫부분과 윗부분의 굴곡의 경계근처에서 변형이 크게 발생하고 이후 Fig. 8(b)와 같이 아랫부분의 함몰형태의 변형이 약간 진전되면서 윗부분에서 1차 좌굴이 발생하였다. PET병은 Fig. 8(c)와 같이 다시 아랫부분의 함몰이 진행되는데 함몰이 진행되면서 Fig. 8(d)와 같이 함몰형태의 변형이 서로 부딪히게 되면 윗부분의 좌굴이 진전된다. 윗부분의 좌굴이 어느정도 진행된 후 Fig. 8(e)와 같이 아랫부분에서 함몰이 더욱 진행되고 이후 Fig. 8(f)와 같이 용기의 주입구가 넓어지는 변형이 발생하였다. 윗면의 변형이 진전된 후 Fig. 8(g)와 같이 중간부분에서 좌굴이 다시 진행되고 이후 Fig. 8(h)와 같이 용기의 아랫부분도 동시에 좌굴이 진행하였다. Fig. 8(i)는 압축이 완료된 후 PET용기의 최종 변형상태를 보여주고 있다.

이와 같은 해석결과로부터 PET용기는 압축하중에 의해 아랫부분과 윗부분이 번갈아가면서 대변형이 발생하는 것을 알 수 있고 초기 대변형은 약 90도 간격으로 발생하였다. 이와 같은 해석결과

Fig. 7 Buckling modes of the PET bottle under load of 1300N

Fig. 8 Large deformation of the PET bottle under a compressive load

를 바탕으로 압축하중에 대한 지지력 향상을 위해서는 대변형이 발생하는 위치에 변형방지를 위한 형상설계를 하는 것이 바람직하다. 즉, 좌굴이 시작한 위치가 두께가 가장 얇은 아랫부분(0.56 mm)과 윗부분(0.63 mm)이므로 PET용기의 두께가 균일하게 제작하는 것이 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용한 좌굴해석과 대변형해석을 통해 PET용기의 압축거동을 상세히 분석하였다. 해석결과에 의하면 압축하중에 의해 PET용기의 아랫부분과 윗부분의 좌굴이 교차하며 발생하였다. 또한 좌굴의 시작이 두께가 가장 얇은 위치에서 발생하였기 때문에 지지력향상을 위해 좌굴이 발생한 위치의 두께를 보강하거나 용기두께를 균일하게 제작하는 것이 필요하다.

Fig. 9는 실험과 유한요소해석결과를 비교한 그림으로 용기는 사각형태로 변형이 되었고 실험과 해석의 변형형태가 유사하였다. 본 논문의 실험과 해석에 의해 PET용기의 압축하중에 대한 안전성을 판단하기 위해서는 두가지를 고려해야 한다. 첫째, 해석에 사용된 PET용기는 Fig. 3과 같이 높이방향으로 두께가 다르고 원주방향으로 균일한 형상으로 모델링되었지만 실제 PET용기는 사출 과정에서 두께가 불균일할 것으로 예상된다. 이 때문에 실험과 해석 결과와의 차이를 고려하여야 할 것이다. 둘째, PET용기에서 1차 대변형이 발생하면 적재시 균형을 잃고 적재용기가 무너질 수 있기 때문에 1차 대변형 결과가 안전성 기준이 된다. 이러한 측면에서 PET용기의 최대 허용 압축하중은 Fig. 6의 실험결과에 의한 좌굴하중 1,208 N을 기준으로 안전율을 고려하여 하향설계를 하는 것이 바람직하다.

후 기

이 연구는 중소기업기술개발사업(SE-13-0008)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Vaidya, R., 2012, Structural analysis of poly ethylene terephthalate bottles using the finite element method, Master Thesis, Oklahoma State University, USA, 85-112.
- [2] MSC/MARC, 2013, MSC/MARC User's Manual Volume A, MSC Software Corporation.
- [3] Hibbeler, R. C., 1994, Statics and Mechanics of Materials 2nd. Prentice Hall, USA.
- [4] Lee, D. H., Choi, J. K., 1996, Nonlinear Analysis Method by the Arc Length Method, Comput. Structural Eng. Inst. of Kor., 9:3 107-114.
- [5] Riks, E., 1979, An Incremental Approach to the Solution of Snapping and Buckling Problems, Int. J. Solids Structures, 15 524-551.
- [7] Elton, L. G., Denardin, T. S., Samios, D., 2005, Stress-Strain Behaviour of PET during Large Plastic Deformation by Plane Strain Compression : The Relation between Stress-Strain Curve and Thermal History Temperature and Strain Rate, Rheol. Acta, 45 142-150.

Fig. 9 Comparison Large deformation of the PET bottle by a experimental and a FEA result under compressive load