

CAE 해석을 통한 500 ml 경량 사각 PET병의 형상 최적화

정의철¹ · 이성희¹ · 이현승¹ · 오정길² · 홍석관^{1,*}

한국생산기술연구원 금형성형연구부문¹
(주)동아정밀공업연구소²

A Study on Geometric Optimization of a 500 ml Lightweight Square PET Bottle with CAE Analysis

Eui-Chul Jeong¹ · Sung-Hee Lee¹ · Hyunn-Seung Lee¹ · Jung-Gil Oh² · Seok-Kwan Hong^{1,*}

Digital Manufacturing Division, Korea Institute of Industrial Technology¹
Dong-A Prec. Co. Ltd²

(Received June 15, 2024 / Revised June 17, 2024 / Accepted June 30, 2024)

Abstract: Lightweight of plastic containers is becoming an important issue due to increasing environmental legislation and consumer awareness. In this study, the CAE analysis was conducted to optimize the shape of a 500 ml lightweight square polyethylene terephthalate(PET) bottle. First, the linear buckling analysis using the finite element method was performed to analyze the correlation between the primary geometric parameters of the bottle and the buckling critical load. Then, the optimal geometry parameters were derived, and the actual buckling load was predicted by non-linear buckling simulation. The validity of the simulation results was verified by top-loading tests of PET bottles molded with the optimized geometry. The elastic modulus and tensile yield strength of PET through tensile tests were measured to improve the accuracy of the simulation. As a result of the tensile tests, the modulus of elasticity of PET increased from 2,900 MPa to 4,275 MPa, and the tensile yield strength increased from 52.4 MPa to 88.1 MPa. Finally the buckling load of the optimized PET bottle was found to be approximately 236 N, which is very similar to the simulation precision of 238 N. This study shows the feasibility and accuracy of the CAE analysis approach for the lightweight design of PET bottles, and will provide useful guidelines for the design of PET bottles.

Key Words: Buckling, CAE analysis, Geometric optimization, Lightweight, PET bottles

1. 서론

최근 환경 관련 법규가 엄격해지고 소비자의 환경 의식이 높아짐에 따라 액체 용기 포장 산업에서 제조 비용, 생산성, 경량화 측면에서 유리보다 우수한 PET(polyethylene terephthalate) 및 PP (polypropylene) 등의 플라스틱 사용이 점점 증가하고 있다¹⁾. 특히, 용기의 경량화는 운송 비용 절감 및 에너지 소비 감소로 탄소 배출 저감에 직접적으로 기여하여 탄소 중립 목표 달성에 중요한 역할을 하고 있다. 용기의 경량화를 달성하는 가장 쉬운 방법은 용

기의 외벽 두께를 줄이는 것이지만, 이 방법은 용기의 강성을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 경량 용기 설계 시 용기의 구조적 강성을 유지하면서도 경량화를 이룰 수 있는 경량 용기 디자인의 최적 설계가 필요하다.

탑로드(top-load)에 대한 용기의 좌굴(buckling) 하중은 용기의 강성을 판단하는 중요한 성능 지표 중 하나로 좌굴 하중을 이용한 용기의 최적 설계에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다²⁻⁴⁾. Rosato⁵⁾는 병의 중요한 디자인 파라미터를 경험으로 파악하여 탑로드 하중에 대한 좌굴 및 진공 저항에 관련된 병의 설계 가이드라인을 제시하였다. Van⁶⁾은 유한요소법을 활용한 좌굴 해석을 통해 리브로 보강된 원통형 셸(shell)의 기하학적 파라미터가 좌굴 성능에

† 교신저자: skhong@kitech.re.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

미치는 영향을 분석하였으며, Tsiourvas 등⁷⁾은 다양한 디자인과 벽 두께 분포를 가지는 원형 병에 대한 좌굴 및 패널링(paneling) 시험을 수행하였다. 용기 형상 설계에 있어서 용기의 기능적 목표 뿐만 아니라 디자인 및 소비자 선호도와 같은 심미적 목표도 중요하기 때문에 대부분의 용기 형상 설계 및 관련 선행 연구들은 숙련된 설계자의 경험에 의존하거나 구조적 강성을 높이는 방법으로 리브 보강을 제시하고 있다. 그러나 적절하지 못한 리브의 적용은 용기의 무게와 생산 비용을 증가시킬 수 있다⁸⁾. 따라서 리브 설계와 함께 용기 형상의 최적화도 병행된다면 용기의 경량화 효과를 극대화시킬 수 있다⁹⁾.

이에 본 연구에서는 경량 용기의 보강 리브 구조 설계에 앞서 CAE 해석을 활용한 500 ml 경량 사각 PET병의 형상 최적화를 수행하였다. 경량 용기 형상 최적화의 성능 지표인 용기의 좌굴 하중을 예측하기 위해 탑로드에 대한 경량 용기의 공학적 분석을 실시하였고, 형상 파라미터 분석 및 최적화를 통해 최적 형상을 도출하고 좌굴 시뮬레이션을 수행하였다. 이후 성형된 경량 용기의 탑로드 시험을 통해 본 연구에서 수행한 공학적 분석 및 CAE 해석기반 최적화 설계 접근법의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1. 재료 및 방법

탑로드(top-load) 시험은 용기의 강도를 측정하기 위해 포장업계에서 널리 사용되는 시험으로써, 본 연구에서는 경량 용기 디자인 최적화 성능 평가 수단으로 탑로드 시험을 적용하였다. 압축 하중에 대하여 용기가 순간적으로 내려앉는 형상이 발생할 때의 하중을 좌굴임계하중(P_{cr} , critical buckling load)이라고 하며, 급힘-변형 평형방정식으로부터 유도된 좌굴임계하중은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

이 때, E는 재료의 탄성계수(modulus), I는 최소 관성모멘트, L은 양단이 지지되지 않은 기둥의 길이에 해당되며, n은 고유모드(eigenvalue)로 고유모드 값에 따라 좌굴형상과 임계하중 크기가 달라진다. 사각 PET병의 경우 위치에 따라 용기의 단면 형상

이 달라지기 때문에 유한요소법을 활용한 CAE 해석을 통하여 좌굴임계하중을 예측하였으며, 본 연구에서는 고유모드 값이 1일 때($n=1$)의 좌굴임계하중을 사용하였다.

성형 과정에서 과도한 연신(extension)이 발생하는 블로우 성형공정 특성 상 고분자 구조의 배향(orientation)으로 인한 재료의 물성 변화는 필연적으로 발생한다. 따라서 CAE 해석에 사용되는 기본적인 재료의 물성은 해석 프로그램(Ansys Material Library)에서 제공하는 PET 물성을 사용하였지만, 재료의 물성 중 좌굴임계하중에 영향을 주는 탄성계수 및 항복응력은 실제 실험을 통해 성형된 제품에서 절취한 표준인장시편의 인장시험을 통하여 얻어진 값을 사용하였다. 재료의 물성을 Table 1에 나타내었으며, 측정된 인장시험 결과로부터 재료의 연신으로 인한 탄성계수 및 항복응력의 증가를 확인할 수 있다. 효율적인 해석을 위해 PET병은 셸(shell)형태로 모델링하였고, 다양한 형상 조건에 대한 파라미터 해석을 수행하기 위하여 최적화 과정에서는 선형좌굴해석(linear buckling analysis)를 이용하였다. 형상 최적화를 통해 도출된 경량 용기에 형상에 대하여 비선형 좌굴해석(non-linear buckling analysis)을 수행하여 실제 좌굴이 발생하는 좌굴임계하중을 예측하였으며, 성형된 경량 용기의 탑로드 시험과의 비교를 통하여 CAE 해석 결과의 신뢰성을 검증하였다.

Table 1 Properties of PET material

| Property | Unit | Value |
|---------------------------|-------------------|-----------------|
| Density | g/cm ³ | 1.34 |
| Young's modulus | MPa | 2900 (4275)* |
| Poisson's ratio | - | 0.389 |
| Tensile yield strength | MPa | 52.4 (88.1)* |
| Tensile ultimate strength | MPa | 57.4 (156)* |

(* : Experimental data)

2.2. 선형 좌굴해석

선형 좌굴해석을 통한 경량 용기의 형상 최적화를 수행하기 위하여 용기의 형상 변수(parameter)를 Fig. 1(a)와 같이 선정하였으며, 형상 변수는 용기의 폭(L1), 어깨부 높이(H2), 바디부 높이(H3), 바텀부 높이(H4), 용기의 모서리 곡률(R5, R6, R7)로 경량

용기의 전체적인 형상과 좌굴임계하중에 영향을 줄 수 있는 7개의 변수로 선정하였다. 7개의 형상 변수 변화에 따라 약 100가지의 서로 다른 형상의 경량 용기를 모델링하였으며, Fig. 1(b)와 같이 선형 좌굴 해석을 통해 각각의 형상에 대한 용기의 부피, 질량 좌굴임계하중을 도출하였다. 형상 파라미터 변화에 따른 경량 용기의 부피 및 좌굴임계하중 변화를 확인할 수 있다. 약 100가지의 다양한 경량 용기 형상의 선형 좌굴해석 결과로부터 형상변수, 좌굴임계하중, 용기의 부피에 대한 상관관계 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 형상 변수 상관관계 분석 결과, 경량 용기의 폭(L1)은 용기의 부피와 좌굴임계하중에 대하여 높은 상관관계를 보였으며, 경량 용기의 바디부 높이(H3)는 용기 부피에는 높은 상관관계를 보이지만 좌굴임계하중에는 크게 영향을 미치지 않고, 바디부 모서리 곡률(R6)은 용기 부피에는 크게 영향을 미치지 않지만 좌굴임계하중에는 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.

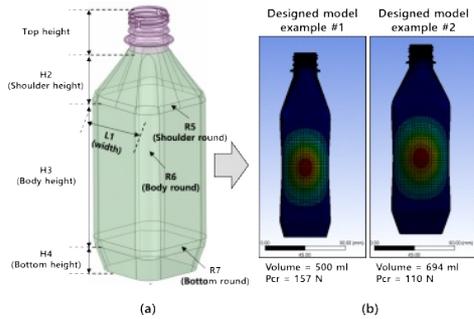


Fig. 1 The modeling of 500 ml square lightweight PET bottles; (a) geometric parameters, (b) example of generated models

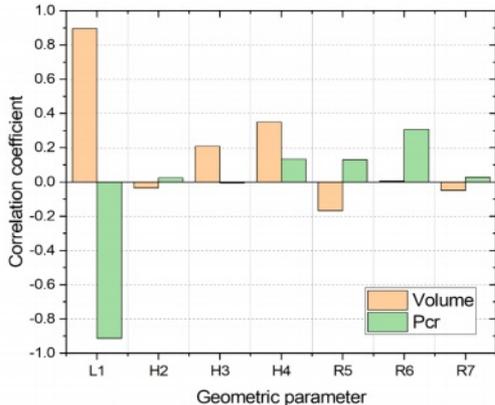


Fig. 2 The result of correlation (geometric parameters -

volume, Pcr) analysis of 500 ml square lightweight PET bottles

형상 변수 상관관계 분석 결과로부터 목적함수를 경량 용기의 부피가 500 ml, 좌굴임계하중은 최대값을 갖도록 설정하여 반응표면분석법(response surface design)을 통한 형상 최적화를 수행하였다. 형상 최적화를 통해 도출된 경량 용기의 형상 변수는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 The geometric optimization results for lightweight PET bottle

| Geometric parameter | Unit | Value |
|-------------------------|------|-------|
| L1 | mm | 58.9 |
| H2 ratio, (H2/H2+H3+H4) | - | 0.279 |
| H4 ratio, (H2/H2+H3+H4) | - | 0.174 |
| R5 | mm | 10.7 |
| R6 | mm | 10.3 |
| R7 | mm | 10.2 |

최적화된 경량 용기 형상에 대하여 경량 용기의 서로 다른 네 곳(상단부, 어깨부, 바디부, 바닥부)의 두께 변화에 대한 추가적인 선형 좌굴해석을 수행하고 용기의 두께 분포, 용기의 질량, 좌굴임계하중에 대한 상관관계 분석을 수행하였다. 두께 분포에 따른 상관관계 분석 결과를 Fig. 3에 나타냈으며, 경량 용기의 바디부 두께가 용기의 질량과 좌굴임계하중에 높은 상관관계가 있음을 확인하였다. 이는 경량 사각 용기 설계에 있어 용기의 폭과 바디부의 두께 설정이 매우 중요함을 의미한다.

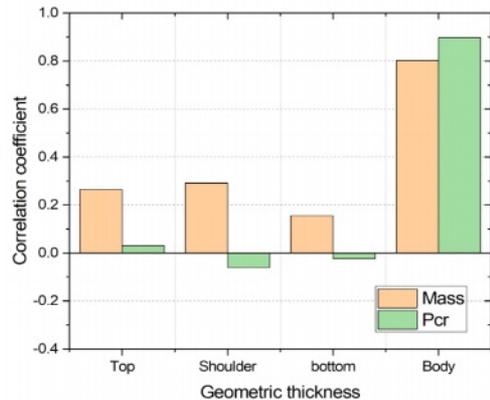


Fig. 3 The results of correlation (thickness distribution - mass, Pcr) analysis 500 ml square lightweight PET bottles

2.3. 비선형 좌굴해석

선형 좌굴해석으로부터 도출된 최적 형상 경량 용기에 대하여 Fig. 4와 같이 탑로드에 대한 좌굴 시뮬레이션을 수행하였으며, 좌굴 시뮬레이션은 LS-Dyna의 비선형 CAE 구조해석을 활용하였다. 탑로드 시험과 동일한 일정 변형률 속도 조건(25 mm/min)에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 변형속도에 대한 용기의 반발력(force reaction)과 버터워스 필터(butterworth filter)를 사용하여 경량 용기의 최대 좌굴 하중을 예측하였다.

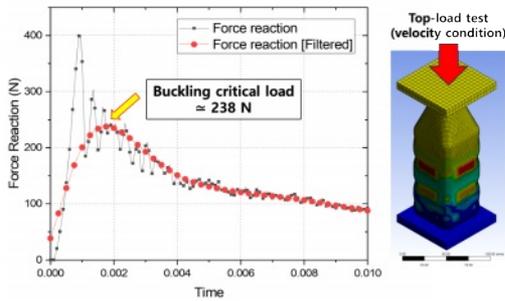


Fig. 4 The result of non-linear buckling simulation

최적화된 경량 용기 형상에 대한 프리폼(preform) 설계 후 블로우 성형을 통해 실제 500 ml 사각 PET 병을 성형하였으며, Fig. 5와 같이 탑로드 시험을 수행하였다. 탑로드 시험은 ASTM D2659 표준 시험 규격에 맞추어 25 mm/min의 압축 변형률 속도 조건에서 수행하였으며, 5개의 PET병에 대하여 반복 수행 후 탑로드 시험에서의 좌굴 하중값을 도출하였다. 시험 결과 탑로드에 대한 최대 좌굴 하중은 약 236 N으로 좌굴 시뮬레이션으로 예측된 좌굴임계하중 238 N과 매우 유사함을 확인할 수 있다.

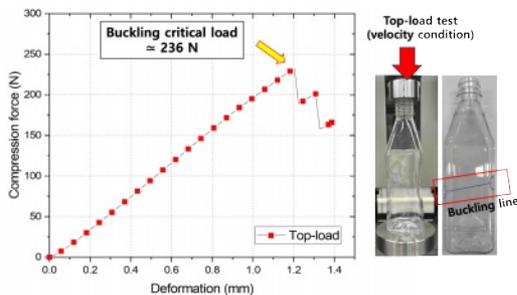


Fig. 5 The result of top-load testing

3. 결론 및 토의

본 연구에서는 CAE 해석을 활용하여 500 ml 경량 사각 PET병의 형상 최적화를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 재료의 물성을 보다 정확하게 반영하기 위해 블로우 성형 과정에서 발생하는 재료의 물성변화를 고려하였다. 동일 소재 PET병으로부터 절취한 인장 시편을 활용하여 소재의 인장 특성 변화를 확인하였으며, 인장 시험 결과 소재의 탄성계수는 2,900 MPa에서 4,275 MPa로 약 1.47배 증가하였으며, 항복응력은 52.4 MPa에서 88.1 MPa로 약 1.68 배 증가하는 것을 확인하였다.

2) 선형 좌굴해석과 반응표면분석법을 통해 최적화된 경량 용기 형상을 도출하였으며, 사각 PET병의 폭(L1)과 바디부 높이(H3)가 용기의 부피와 좌굴 임계하중에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 특히, 용기의 폭(L1)은 부피와 좌굴임계하중 모두에 높은 상관관계를 보였으며, 바디부 모서리 곡률(R6)은 좌굴임계하중에 주로 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.

3) 최적화된 경량 용기 형상에 대하여 좌굴 시뮬레이션을 수행하여 좌굴 하중을 예측하였으며, 성형된 경량 용기의 탑로드 시험값과 비교를 통해 CAE를 활용한 좌굴 하중 예측 결과의 신뢰성을 검증하였다. 이를 통해 본 연구에서 수행한 공학적 분석 및 CAE 해석 기반 최적화 설계 접근법의 타당성을 확인하였다.

본 연구의 결과는 재료 물성 변화를 고려한 CAE 해석기반 경량 용기 최적 설계의 유효성을 보여준다. 이를 바탕으로 향후 리브 구조를 포함한 병의 형상 최적화를 수행하여 다양한 PET 용기들의 경량화를 달성할 예정이다.

후기

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 우수기업연구소육성사업(ATC+) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(20018030).

참고문헌

- 1) D. Clare, T. Mehdi, L. Peter, P. Roman “Green products and corporate strategy: an empirical investigation”, J. Society and Business Review, Vol. 1, No. 2, pp.144-157, 2006.
- 2) M. Stephen, “Rib-less, panel-less PET bottle quenches beverage industry thirst for new design”, Technolw. ogy Trend. Canadian Plastic.
- 3) Q. Du, W. Cui, B. Zhang, “Buckling characteristics of a circular toroidal shell with stiffened ribs”, Ocean Eng, Vol. 108, pp.325-335, 2015.
- 4) Z. Lin, S. Du, Y. Liang, “Significant improvement in mechanical performance for grid-stiffened polmer composites”, J. Poylmer Composites, Vol. 4, No. 1, pp.1-12, 2011.
- 5) D. Rosato, “Blow molding Handbook.” Hanser/Gardner Publication Inc., Cinicinnati, 1988.
- 6) D. Van, “Finite element optimisation of plastic bottles.” Faculty of Industrial Design Engineering, Tu-Delft, 1983.
- 7) D. Tsiourvas, J. Pagidas, A. Stassinopoulos, “Development of plastic bottles resistant to lateral deformation.” J. Packaging Technology, Vol. 6, pp.23-29, 1993.
- 8) Y. Lee, B. Park, E. Jung, G. Oh, S. Hong, “A study of improvement of stiffness for plastic PET bottle with different geometries and number of rib”. J. Design & Manufacturing, Vol. 17, No. 4, pp.33-41, 2023.
- 9) S. Hong, M. Song, Y. Ko, B. Cha, “Finite element analysis of a injection blow molding process for the thick-walled PET bottle”. J. Design & Manufacturing, Vol. 12, No. 3, pp.5-12, 2018.

저자 소개

정의철 (Eui-Chul Jeong)

[정회원]



- 2014년 : 단국대학교 기계공학 학사
- 2016년 : 단국대학교 대학원 기계공학 열유체 석사
- 2022년 : 단국대학교 대학원 기계공학 열유체 박사
- 2022년 8월~현재 : 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 포스트닥터

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 탄소복합소재

이성희 (Sung-Hee Lee)

[정회원]



- 1998년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 7월~2006년 12월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2010년 12월~2014년 1월 : 한국생산기술연구원 부천금형센터 센터장
- 2014년 1월~2015년 3월 : 한국생산기술연구원 한국금형센터 그룹장
- 2007년 1월~현재 : 한국생산기술연구원 금형성형연구부, 수석연구원

< 관심분야 >
고분자성형 및 금형, 금속가열, 복합재료, 전산모사/최적화

이현승 (Hyunn-Seung Lee)



- 2021년~현재 : 연세대학교 기계공학과 박사과정
- 2021년~현재 : 한국생산기술연구원, 디지털생산부문, 학연협동과정생

< 관심분야 >
3차원 모델링, 복합소재, 블로우 성형

오 정 길 (Jung-Gil Oh)



- 2009년: 단국대학교 기계공학 석사
- 2021년 6월~현재: 동아정밀공업(주),
부설연구소, 책임연구원

< 관심분야 >

사출연신블로우, 금형 및 성형, CAE

홍 석 관 (Seok-Kwan Hong)

[정회원]



- 2015년 8월: 단국대학교 기계공학과
(공학박사)
- 2004년 3월~현재: 한국생산기술연구
원, 디지털생산부문, 선임연구원

< 관심분야 >

프레스 공정 해석, 사출 공정 해석, 최적화, 인공지능
