



Comparison of Petaloid Bottom Design for Carbonated Soft Drink PET Bottle through Computer Simulation

Dong-Hae Choi, Kyeong Hoon Cho, Kyoung Woo Nam*, Woo Min Kim*, Baek Rim Yeon*, and Min-Young Lyu†

*Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea*

**Samyang Packaing Co., 31 Jongro 33-gil, Jongro-gu, Seoul, Republic of Korea*

(Received December 11, 2022, Revised December 20, 2022, Accepted December 22, 2022)

Abstract: Research on reducing the thickness of polyethylene terephthalate (PET) bottles is necessary to reduce the amount of plastic used. However, as decreasing a PET bottle's thickness weakens it, a robust bottle design is required. Therefore, in this study, we numerically analyzed various bottom designs of a carbonated soft drink PET bottle with 245 and 500 ml capacities and complicated petaloid shapes. Deformation, equivalent stress, maximum principal stress, and its direction according to each design were analyzed to study the strength of the bottle. The results serve as a reference to design robust petaloid PET bottle bottoms with a reduced thickness for carbonated soft drinks.

Keywords: PET bottle, petaloid bottom, maximum principal stress, carbonated soft drink, robust design

Introduction

PET (Polyethylene terephthalate)병은 내용물의 특성에 따라 상압병, 내열병, 내압병, 내열압병으로 나뉜다. 이 중 탄산음료를 담은 내압병은 탄산압을 버티기 위해 원기둥 형태의 몸체와 페탈로이드(petaloid) 모양의 바닥면으로 구성된다. 초기에는 탄산압을 잘 버티기 위해 PET병의 바닥면을 반구 형태로 제작하였고 추가적으로 캡을 바닥부에 조립하여 사용하였다.^{1,2} 공정의 단순화와 플라스틱 사용량을 줄이기 위해 캡을 없애고 PET병 자체 구조만으로 병을 세우기 위해 바닥부에 페탈로이드 구조가 고안되었고 현재까지 보편적으로 사용되고 있다.^{1,2} 그러나 복잡한 페탈로이드 바닥면은 성형 중 연신이 일어나지 않아 연신에 의한 기계적 물성의 향상이 없어 바닥면이 내압에 취약하다. 이렇게 취약한 페탈로이드 형상의 바닥면은 큰 내압에 의해 크랙이 발생하기도 한다.³⁻⁷ 최근에는 환경적인 문제로 병의 중량을 줄이고 있어 병의 두께가 얇아지며 바닥면의 크랙(crack) 저항에 대한 연구가 더욱 요구되고 있다.

PET병은 프리폼(preform)을 사출성형한 후 이를 다시 가열하여 블로우 성형기에서 블로잉하여 성형된다. 이러한 사출연신 블로우 성형(ISBM, Injection Stretch Blow Molding)공정은 사출성형과 블로우 성형에서 다양한 공정 조건이 존재한다.⁸⁻¹⁰ 탄산음료용 PET병의 바닥면 페탈로이드 구조의 크

랙 저항에 대한 연구는 공정 연구, PET 소재의 연신 특성 연구 그리고 바닥면 디자인 연구가 있다.^{3-6,10-14} Lyu et al.은 바닥면 페탈로이드 설계의 파라미터를 clearance, foot length, valley width로 분류하고 바닥면의 디자인에 대한 연구를 진행하였다.³ 그리고 바닥면의 크랙 저항성을 높이기 위해서는 최대 주응력의 크기와 방향이 중요함을 검증하였다. 그러나 바닥면의 두께 변화에 따른 강성연구는 미진하다. PET병의 무게 감소를 위해 초기 프리폼의 두께를 얇게 성형하고 이를 이용하여 PET병을 성형한다. 따라서 얇아진 프리폼 두께 때문에 성형 후 얇아지는 PET병의 바닥면 강성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 PET 소재의 연신 후 물성을 파악하기 위해 블로우 성형된 PET병에서 시편을 채취하여 이방성 물성을 측정하였다. 그리고 PET병의 두께를 측정하였다. 측정한 PET병의 물성과 두께를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석에서는 탄산음료용 PET병의 페탈로이드 바닥면 강성디자이너를 연구하기 위해 245 ml와 500 ml 용량의 병에서 각각 3가지, 4가지 디자인에 대해서 해석을 수행하였다. PET병의 구조해석에서 바닥면의 강성 및 크랙 저항성을 판단하기 위해 디자인 별로 변형량, 등가 응력의 분포, 최대 주응력의 분포와 방향을 비교하며 분석하였다. 본 연구의 결과는 크랙 저항성을 높이는 PET병의 페탈로이드 바닥면 디자인에 활용될 수 있다고 판단된다.

†Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

Experimental

1. PET 수지 및 PET의 물성측정

본 연구에서 사용한 PET 수지는 Lotte Chemical(S. Korea)의 PET COOL이다. PET COOL의 밀도는 1.4 g/cm^3 이다. 이 수지를 이용하여 프리폼을 사출 성형한 후 연신 블로우 성형으로 제작한 PET병을 이용하여 PET병의 물성을 측정하였다.

PET병은 연신 블로우 성형공정으로 2축 연신 즉, 길이방향과 원주방향 두 방향으로 연신이 이루어지면서 성형된다.¹⁵ 원주방향을 연신은 길이방향 연신보다 크다. 그러므로 방향에 따른 연신비 차이로 인해 길이방향과 원주방향을 기계적 물성이 다르다.^{16,17} PET병의 구조해석에서 실제 병으로 성형된 PET 소재의 물성을 적용하기 위해 PET병 몸통부에서 길이방향과 원주방향으로 시편을 채취하여 물성을 측정하였다. Figure 1에 PET병에서 길이방향과 원주방향을의 시편을 채취한 위치가 나타나 있다. 채취한 시편의 크기는 두 방향에서 모두 폭 20 mm 길이 70 mm이다. 인장 시험에서 그립부분인 양쪽 10 mm씩 제외하여 게이지 길이(gauge length)는 50 mm로 하였다. 방향 별로 각각 9개의 시편을 채취하여 물성을 측정하였다. 인장 시험기(MINOS-020, MTDI, S. Korea)를 사용하여 인장 속도 50 mm/min으로 인장 시험을 수행하였다. 푸아송 비를 측정하기 위해 채취한 PET시편에 PET와 반응하지 않는 잉크로 5 mm 크기의 격자를 그려 시편을 제작한 후 인장 시험 시 DIC(Digital Image Correlation)장비(ATOS Core 200, Gom, U.S.A)를 사용하여 초고속으로 시편을 촬영하였다. 촬

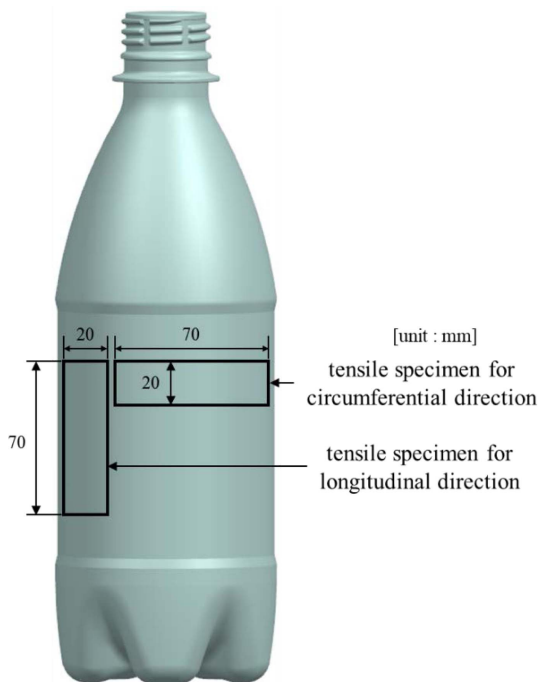


Figure 1. Tensile test specimen from blown PET bottle.

Table 1. Mechanical Property of Blown PET Bottle.

Property	Longitudinal direction	Circumferential direction
Young's modulus [MPa]	2687.83	3341.03
Yield strength [MPa]	78.54	99.55
Fracture strength [MPa]	106.65	117.88
Poisson's ratio	0.3863	0.3715

영한 사진으로 변형 계측 프로그램(Correlate 2019, Gom, U.S.A)을 사용하여 격자의 인장 방향과 인장 수직 방향의 변형량을 측정하였다.¹⁸ 측정된 변형량으로 길이방향과 원주방향의 푸아송 비를 계산하였다. 인장 시험으로 측정된 탄성계수, 항복강도, 파단강도, 푸아송 비를 Table 1에 나타내었다.

2. PET병의 모델링 및 두께측정

연구 모델은 245 ml와 500 ml 용량의 PET병으로 Figure 2(a)와 (c)에 나타나 있다. 그리고 각 용량의 PET병에 사용된 바닥면 디자인이 Figure 2(b)와 (d)에 나타나 있다. 245 ml와 500 ml PET병에서 어깨부(shoulder)와 몸통부(body)는 각 모델에서 동일하게 하고 바닥부만 각각 3가지와 4가지 디자인을 사용하였다. Figure 2(b)에 병 바닥면의 명칭을 나타내었다. 병의 골(valley)과 발(foot)이 바닥면 중앙(center) 근처에서 시작하여 바닥부의 가장 바깥쪽에서 끝나며 각각 5개의 골과 발로 구성되어 있다. 접지(heel) 부분은 병을 바닥에 세울 때 바닥과 접하는 영역이다. Figure 3(a)에서는 245 ml 병 바닥면의 자세한 치수를 볼 수 있다. 디자인 245-I은 골을 이루는 라운드가 33.13 mm이고 라운드의 중심이 병의 중심축에서 7 mm 편심되어 있다. 디자인 245-II는 골을 이루는 라운드가 38.47 mm이고 라운드의 중심이 병의 중심축에서 3.5mm 편심되어 있다. 디자인 245-III은 편심되지 않고 2개의 라운드 50.21 mm와 20 mm로 골을 이루고 있다. 바닥면 중앙에서 골과 발이 시작되는 부분의 직경이 디자인 245-I과 245-III은 14 mm이며, 디자인 245-II는 7 mm이다. 병의 발에서 바닥에 접하게 되는 면들의 위치는 직경으로 표현하며 디자인 245-I과 245-III은 45 mm이고 245-II는 46.2 mm이다. 병의 바닥면 중앙과 발이 바닥과 접하는 면 사이의 높이는 디자인 245-I과 245-II는 4.5 mm이고 245-III은 4 mm이다. Figure 3(b)에 500 ml 병 바닥면의 자세한 치수가 나타나 있다. 디자인 500-I과 500-II는 골을 만드는 라운드가 1개가 아닌 3개의 라운드로 이루어져 있다. 즉 큰 라운드 36 mm 1개와 골의 끝부분에 타원으로 표기한 작은 라운드 15 mm와 6.5 mm 2개로 이루어져 있다. 그러나 디자인 500-III과 500-IV는 골을 이루는 라운드가 하나로 각각 36.95 mm와 38 mm로 설계된 것을 볼 수 있다. 골과 발이 시작되는 병의 바닥면 중앙의 직경이 디자인 500-I은 13.72 mm이고 500-II, 500-III과 500-IV

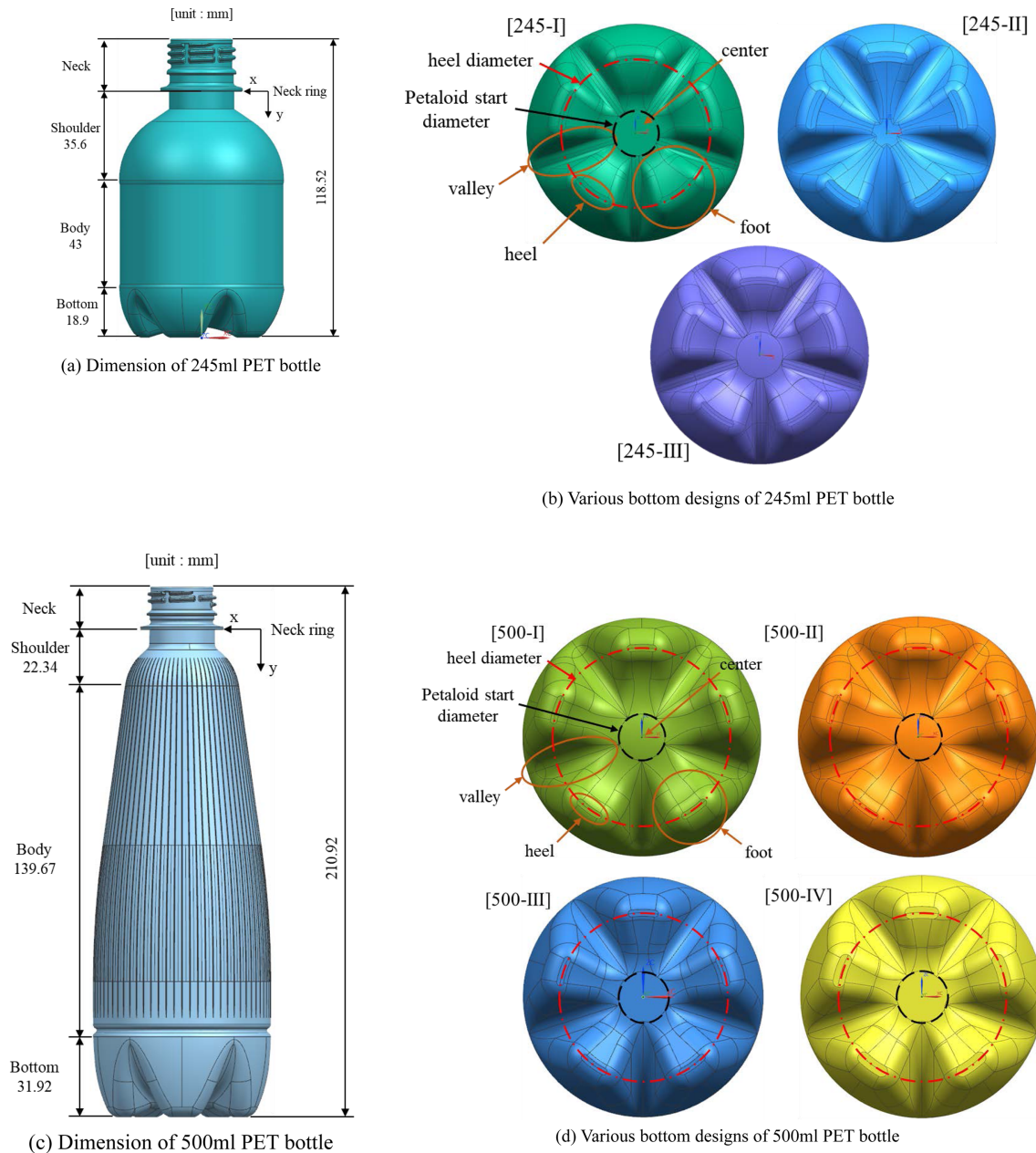


Figure 2. Studied various bottom designs of PET bottle.

는 15 mm이다. 병의 발에서 바닥에 접하게 되는 면들의 위치가 디자인 500-I와 500-II는 53 mm이고 500-III와 500-IV는 49.5 mm이다. 병의 바닥면 중앙과 발이 바닥과 접하는 면 사이의 높이는 5 mm로 4가지 디자인 모두 동일하다.

Table 2는 프리폼을 연신 블로우 기계(PB01S, Pisko, South Korea)로 성형한 병의 두께를 자석 두께 측정기(Magna-Mike 8500, Panametric, U.S.A)로 측정한 결과이다. 두께는 병의 목부분 바로 아래부터 10mm 간격으로 병의 발과 바닥이 닿는 위치 직전까지 측정하였다. Figure 2의 (a)와 (c)에 표시된 좌표의 y방향으로 두께를 측정하였다.

3. PET병의 구조해석

PET병의 구조해석은 PET병에서 직접 채취한 시편으로 측정한 이방성 물성을 이용하여 수행하였다. 해석을 위해 병에서 변형이 일어나지 않는 목부분을 제외하고 모델링하였다. 해석모델은 shell model로 만들어 격자(Mesh)를 구성한 결과가 Figure 4에 나타나 있다. 격자는 병의 몸통부는 2 mm, 바닥부는 1 mm 크기로 구성하였다. 병의 shell model에 Table 2에 나타나 있는 측정 두께를 각 높이와 바닥면의 위치마다 입력하여 해석하였다.

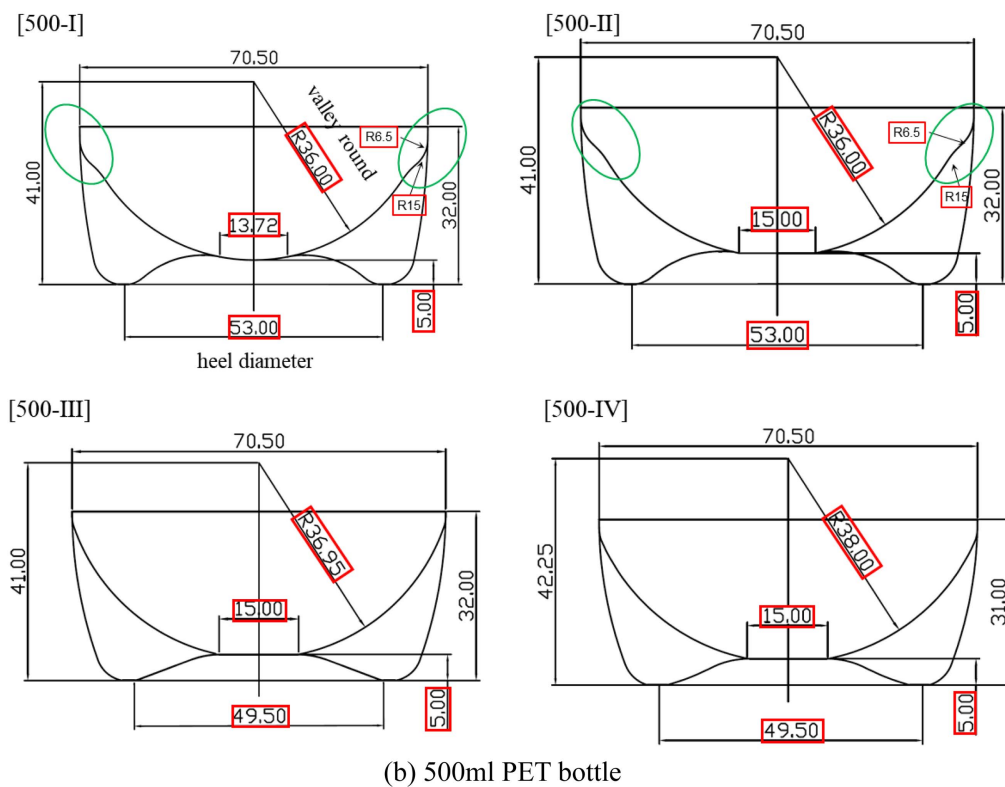
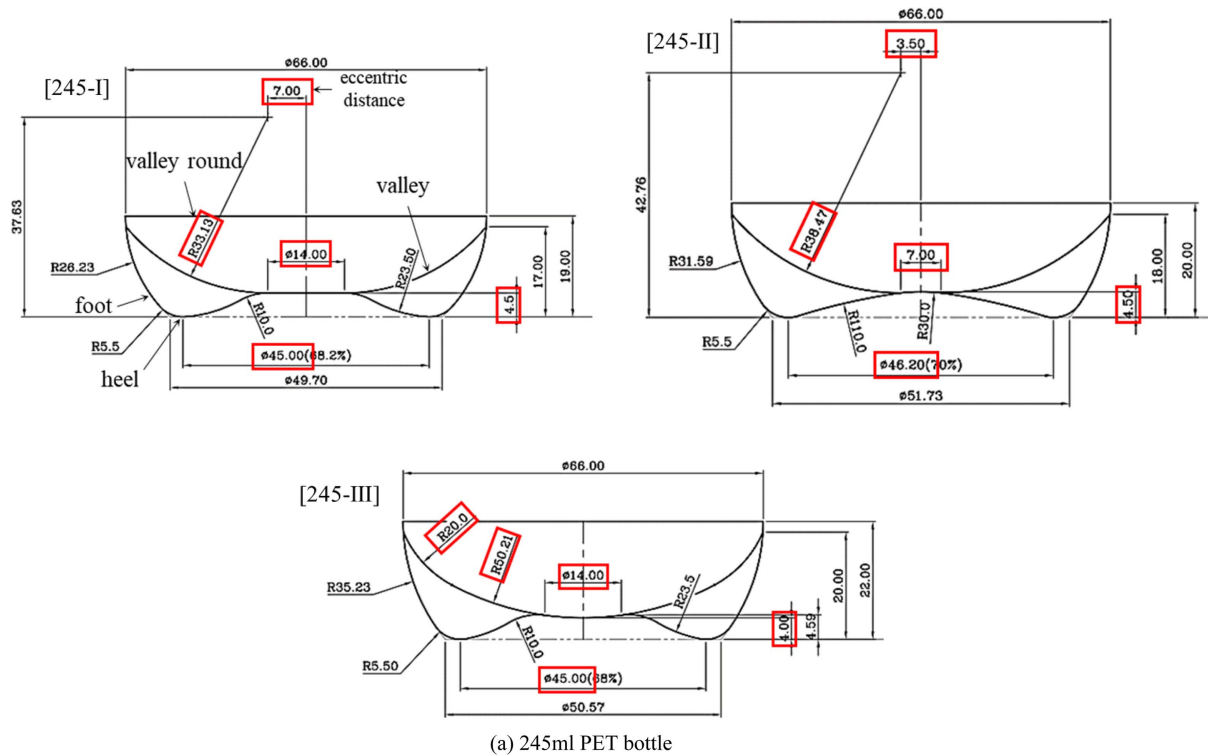


Figure 3. Details of petaloid bottom design.

해석의 경계조건으로 변형이 없는 병의 맨 윗부분에 고정 조건($v_n = v_s = 0$)을 적용하였다. 또한 병의 전체면에 내압을 적

용하기 위해 병의 안쪽 면에 바깥쪽 방향으로 수직하게 압력을 부과하였다. 245 ml병에는 탄산압이 높은 음료를 담는데

Table 2. Measured thickness of blown bottle.

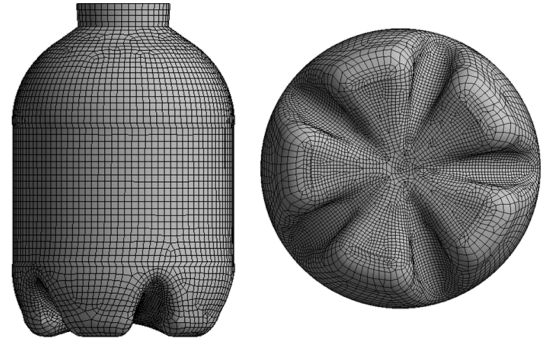
(a) 245 ml PET bottle

[unit : mm]	
Location of y-direction from neck ring	Thickness
at neck ring	1.67
10	0.356
20	0.290
30	0.228
40	0.246
50	0.284
60	0.282
70	0.293
80	0.343
90	0.507
at bottom center	1.356

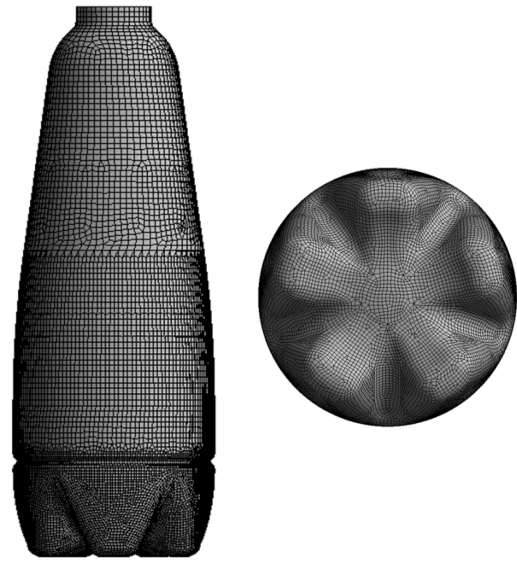
(b) 500ml PET bottle

[unit : mm]	
Location of y-direction from neck ring	Thickness
at neck ring	1.67
10	0.475
20	0.321
30	0.354
40	0.292
50	0.263
60	0.257
70	0.238
80	0.244
90	0.219
100	0.220
110	0.209
120	0.218
130	0.220
140	0.221
150	0.248
160	0.224
170	0.249
180	0.251
190	0.233
at heel	0.271
at valley	1.795
at bottom center	1.628

현장에서 병의 안전을 고려하는 압력인 0.1 MPa 크기의 압력을 부과하여 해석하였다. 500 ml 병에는 탄산압이 비교적 낮은 음료를 담기 때문에 현장에서 고려하는 0.05 MPa 크기의 압력을 부과하여 해석하였다.



(a) 245ml PET bottle



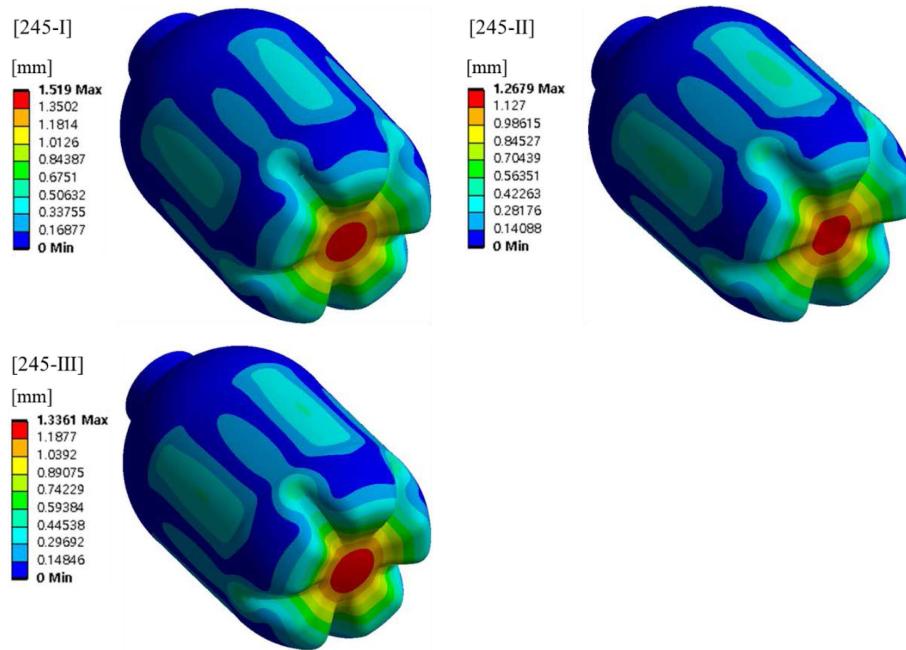
(b) 500ml PET bottle

Figure 4. Mesh for computer simulation.

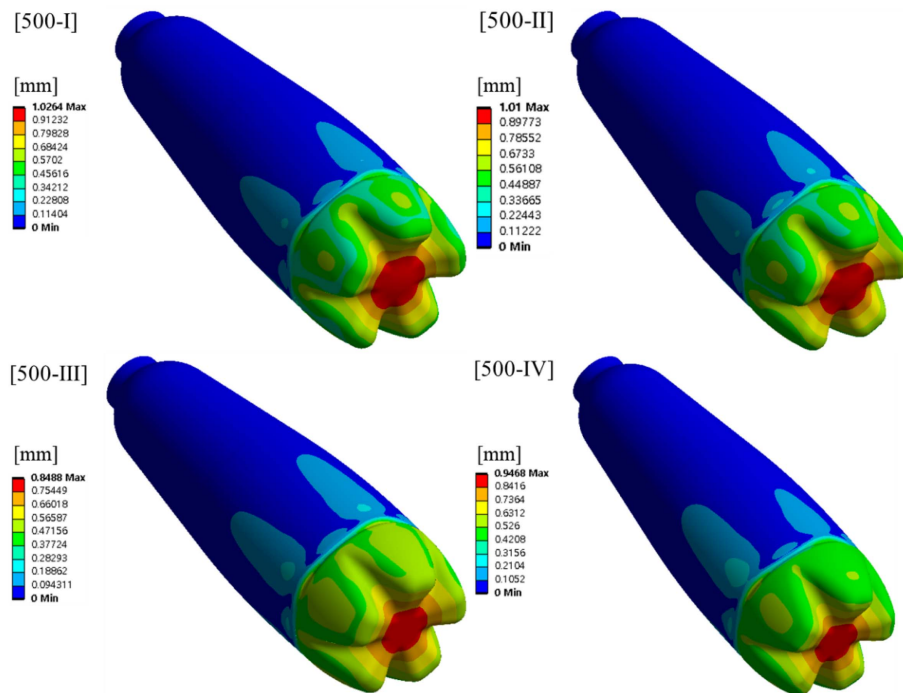
Results and Discussion

1. 바닥면 디자인에 따른 PET병의 변형

Figure 5는 압력에 의한 바닥면 디자인에 따른 병의 변형량을 나타내고 있다. Figure 5(a)에서 245 ml 병의 3가지 모델 중 디자인 245-Ⅰ 이 병의 바닥 중앙에서 1.519 mm로 가장 큰 변형량이 발생하는 것을 볼 수 있다. Figure 3(a)에서 병의 바닥면 중앙과 발이 바닥과 접하는 면 사이의 높이가 4.5 mm로 설계되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 압력에 의해 바닥면의 변형이 발생하여도 병이 바닥에 세워지는 데 문제가 없는 것으로 판단된다. 245 ml 병의 바닥면 디자인 중에서 변형량이 가장 작은 모델은 디자인 245-Ⅱ에서 병의 바닥면 중앙에서 1.2679 mm만큼 변형하였다. 이 디자인은 Figure 3(a)에 나타나 있듯이 바닥면 중앙의 평평한 부분 즉 골과 발이 형성되기 시작하는 부분의 직경이 7 mm로 245 ml 디자인 중에서 가



(a) 245ml PET bottle



(b) 500ml PET bottle

Figure 5. Deformation distributions according to bottom design.

장 작은 디자인이다. 디자인 245- I 과 245-Ⅲ을 비교했을 때 최대 변형량이 바다면 중앙에서 각각 1.519 mm, 1.3361 mm로 나타나 245-Ⅲ이 더 강성있는 디자인이라고 판단된다. Figure 3(a)에서 바다면 디자인 형상을 보면 디자인 245-Ⅲ에서 골을 형성하는 라운드가 50.21 mm로 디자인 중 가장 큰 것을 볼 수 있다. 이는 골을 형성하는 라운드가 클수록 바다면

중앙부에서 변형량이 작다고 판단된다.

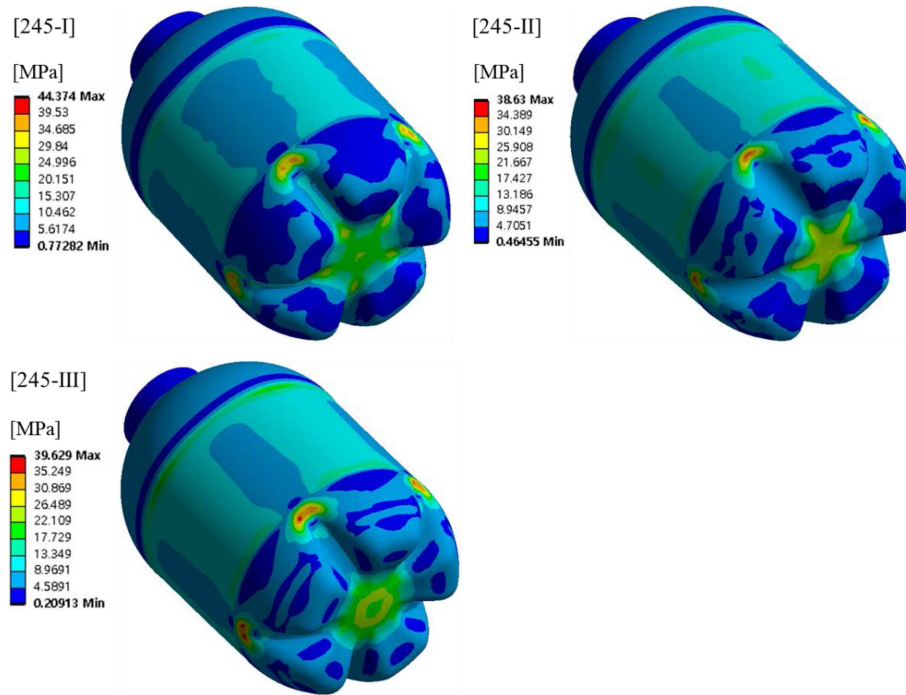
Figure 5 (b)는 500 ml 병의 변형량을 나타내고 있다. Figure 3(d)에서 디자인 500- I 과 500-Ⅱ는 골을 이루는 라운드가 3개로 이루어져 있고, 디자인 500-Ⅲ과 500-Ⅳ는 굴곡이 없이 하나의 라운드로 이루어진 디자인인 것을 볼 수 있다. 바다면 중앙에서 디자인 500-Ⅲ과 500-Ⅳ의 변형량이 각각 0.8488

mm, 0.9468 mm이고 디자인 500-I와 500-II의 변형량은 각각 1.0264 mm, 1.01 mm로 나타나 디자인 500-III과 500-IV가 변형량이 더 작은 것을 볼 수 있다. 디자인 500-III과 500-IV를 비교해보면 디자인 500-III이 골의 바닥부 높이가 32 mm로 500-IV보다 1 mm 높은데 바닥면 중앙부에서 변형량은 디자인 500-III에서 0.8488 mm로 가장 작게 나타났다. 이는 바

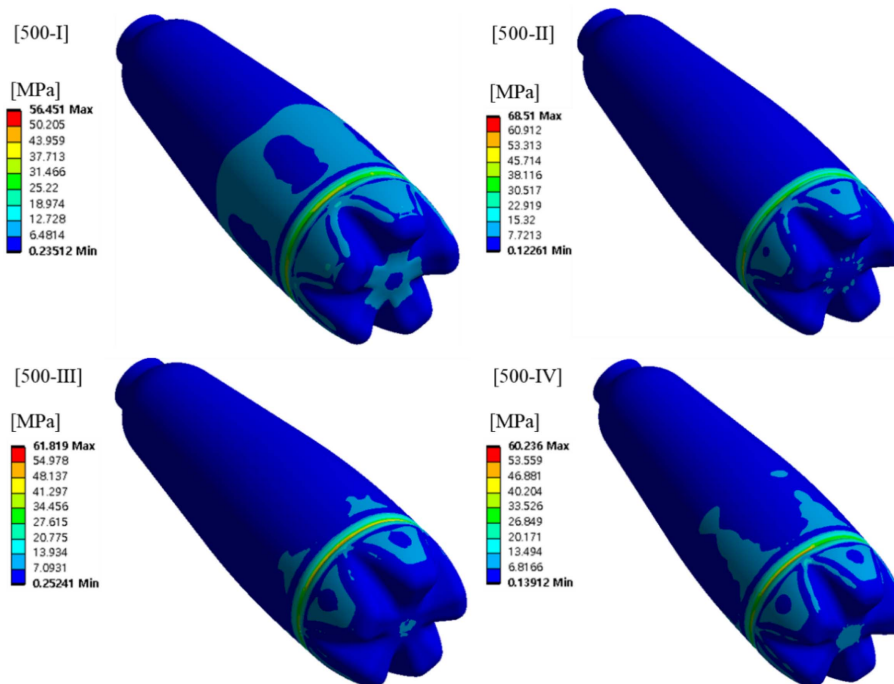
닥부 높이가 높아 변형량이 작아졌다고 판단된다.

2. 바닥면 디자인에 따른 등가 응력

Figure 6은 병에 압력으로 인한 등가 응력(equivalent stress) 분포를 나타내고 있다. Figure 6(a)는 245 ml병의 등가 응력 분



(a) 245ml PET bottle

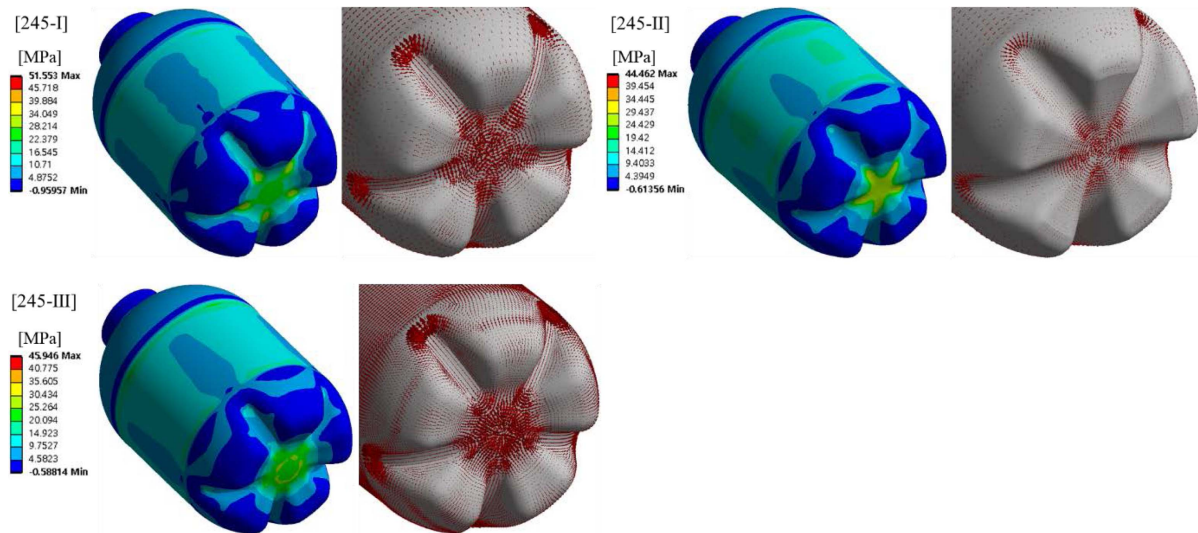


(b) 500ml PET bottle

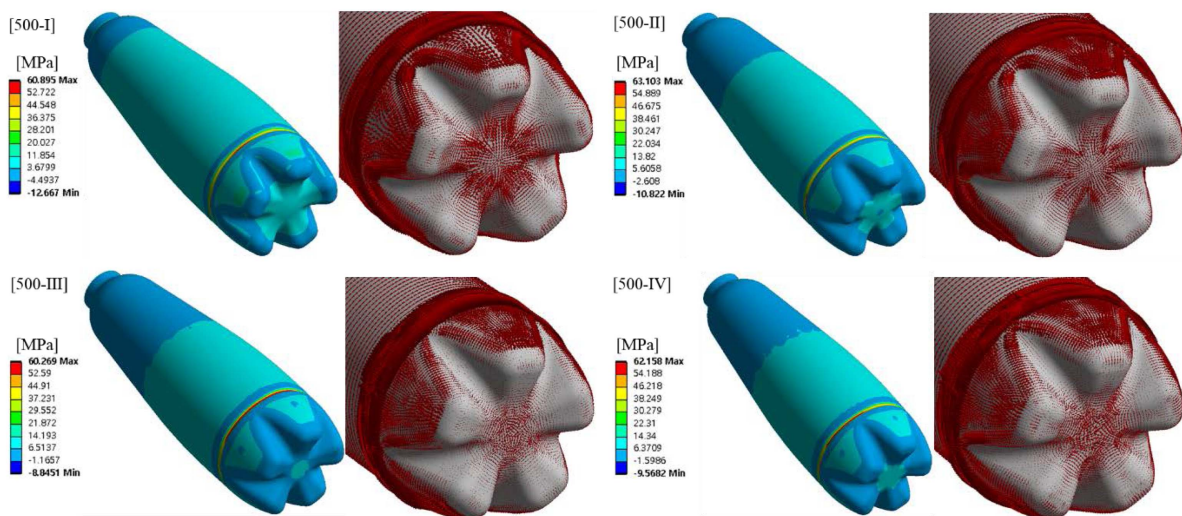
Figure 6. Equivalent stress distributions according to bottom design.

포이다. 응력이 가장 큰 부분은 3가지 디자인 모두 동일하게 몸통부가 끝나고 바닥부 가장 윗부분 골의 끝부분에서 발생하였다. 그러나 바닥면 중앙에서의 등가 응력 분포는 디자인마다 다르게 나타난다. 디자인 245-I은 바닥 중앙부의 평평한 부분의 끝인 골의 시작부분과 골의 벽면에서 응력이 크게 발생하였다. 245-II는 바닥면 중앙 부분에 넓게 방사형으로 응력이 분포되어 있다. 디자인 245-III은 바닥면 중앙 부분에서 링형태로 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 디자인 245-II는 최대 응력이 38.63 MPa로 3가지 모델 중 가장 낮은 값이다. 바닥면 중앙에서의 응력 분포 또한 30.149~25.908 MPa로 가장 낮은 범위이므로 3가지 디자인 중 가장 강성있는 디자인이라고 판단된다.

Figure 6(b)는 500 ml 병의 등가 응력 분포를 나타내고 있다. 응력의 최대값은 4가지 디자인 모두 몸통부와 바닥면 경계의 오목한 부분에서 나타났다. 디자인 500-I과 500-II 그리고 500-III과 500-IV가 각각 바닥부에서 유사한 응력분포를 보이고 있다. 디자인 500-I에서 최대응력은 56.451 MPa이며, 바닥면의 응력분포 값 또한 12.728~18.974 MPa로 4가지 디자인 중 가장 낮은 것을 볼 수 있다. Figure 3(b)에서 디자인 500-I은 바닥 중앙부가 볼록하고 500-II는 평평한 것을 볼 수 있다. 따라서 500-I의 바닥 중앙부가 볼록한 디자인이 응력이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 병의 발이 바닥에 닿는 면들의 거리가 디자인 500-I이 500-III보다 더 크다. 등가 응력 크기가 디자인 500-I이 더 작으므로 지면에 닿은 발 사



(a) 245ml PET bottle



(b) 500ml PET bottle

Figure 7. Maximum principal stress distributions and directions according to bottom design.

이의 거리가 클수록 강성이 좋은 디자인이라고 판단된다. 디자인 500-Ⅲ과 500-Ⅳ는 바닥면의 골을 만드는 라운드의 크기가 각각 36.95 mm와 38 mm이다. Figure 6(b)에서 디자인 500-Ⅲ은 바닥 중앙에 응력이 집중되어 있고 응력 크기가 20.775~13.934 MPa로 분포된 것을 볼 수 있다. 디자인 500-Ⅳ는 바닥면에서 응력이 넓게 분포하고 응력 크기는 20.171~13.494 MPa로 500-Ⅲ보다 작다. 이를 통해 바닥면 골을 이루는 라운드 크기가 큰 디자인일수록 강성에 유리하다고 판단된다.

3. 바닥면 디자인에 따른 최대 주응력 크기와 방향

Figure 7은 최대 주응력(maximum principal stress) 분포와 방향을 나타내고 있다. 병의 바닥면에서 최대 주응력이 가장 크게 분포하고 방향은 다양하게 나타났다. Figure 7에서 최대 주응력의 방향을 나타내는 화살표의 크기는 응력의 크기에 비례한다. 245 ml와 500 ml 병의 모든 디자인에서 등가 응력 해석 결과로 항복이나 파괴가 발생하지 않는다고 판단된다. 그러나 성형으로 발생하는 잔류응력, 높아진 탄산압에 의한 병의 변형, PET가 취약한 알칼리성 환경 등으로 표면에 크레이징(crazing)이 발생하여 취성 파괴가 일어날 수 있다.¹⁹ 이를 확인하는 방법으로 현장에서는 PET용기를 수산화나트륨(NaOH)수용액에 일정시간 동안 침지시켜 바닥면에 크랙이 발생하는지 검사하는 카터 테스트(Carter test)를 진행한다.³ 이러한 크랙킹을 발생시키는 카터 테스트에서는 PET병이 받고 있는 최대 주응력 크기와 방향이 중요하다.^{19,20} 각 병의 디자인에 따라 크랙킹을 야기하는 최대 주응력과 그 방향을 Figure 7에서 볼 수 있다.

Figure 7(a)는 245 ml PET병의 최대 주응력 분포와 그 방향을 보여주고 있다. 모든 디자인에서 등가 응력보다 높은 응력 값을 보여주고 있다. 최대 주응력의 방향은 3가지 디자인에서 모두 유사한 방향을 보이는데 바닥 중앙의 골이 시작되는 곳에서 골의 길이 방향에 수직인 방향으로 발생하였다. 최대 주응력 방향에 대해 수직인 방향으로 인장으로 인한 크랙이 발생될 가능성이 크므로 골의 길이방향에 수직으로 크랙에 취약하다고 판단된다. 디자인 245-Ⅱ의 최대 주응력 값은 44.462 MPa이며, 바닥 중앙부에서의 응력 분포 값 또한 34.445~24.429 MPa로 3가지 디자인 중에서 가장 작아 바닥면 크랙에 대한 저항성이 가장 크다고 판단된다.

Figure 7(b)는 500 ml 병의 최대 주응력 분포와 방향을 나타내고 있다. 최대 주응력 값은 디자인 500-Ⅲ이 최대값 60.269 MPa로 4가지 디자인 중 가장 낮은 값을 보인다. 이 두 디자인의 바닥 중앙부분의 최대 주응력 응력 분포 값은 디자인 500-Ⅰ이 11.854~3.6799 MPa이고 디자인 500-Ⅲ은 14.193~6.5137 MPa이다. 따라서 바닥면 디자인 강성을 비교

하면 500-Ⅰ이 더 우수하다고 판단된다. 디자인 500-Ⅰ이 바닥면에 최대 주응력이 넓게 분포하지만 그 값이 디자인 500-Ⅲ보다 작기 때문이다. 최대 주응력 분포와 방향이 디자인 500-Ⅰ과 500-Ⅱ 그리고 디자인 500-Ⅲ과 500-Ⅳ가 각각 서로 유사하다고 판단된다. 디자인 500-Ⅰ과 500-Ⅱ는 주응력 방향이 병 바닥면 중앙에서 반경방향으로 나타난다. 디자인 500-Ⅲ과 500-Ⅳ는 병의 바닥 중앙과 골의 시작부분에서 골과 수직방향을 향하고 있다. 이러한 결과는 디자인에 따라 크랙을 발생시킬 수 있는 주응력의 방향을 조절할 수 있다고 판단된다.

Conclusions

본 연구에서는 기존에 미흡했던 병의 두께와 PET의 이방성 물성을 적용한 연구를 해석적으로 진행하였다. 페탈로이드 바닥면의 형상 디자인과 바닥 중앙부의 골과 발이 시작되는 부분의 직경과 발이 바닥에 접지되는 부분의 직경에 따라 병의 바닥면 강도를 비교하였다. 245 ml와 500 ml 용량의 모든 디자인에서 현장에서 고려하는 압력이 가해질 때 항복이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 통해 2가지 용량의 모든 디자인의 병이 안전할 것으로 판단된다.

모든 디자인에서 최대 주응력 크기는 등가 응력보다 큰 값을 보였다. 따라서 크레이징에 의한 크랙의 가능성은 있다고 판단된다. 245 ml 용량의 탄산음료용 병의 바닥 디자인 중에서는 바닥면 중앙의 골과 발이 시작되는 부분의 직경이 작고, 골을 이루는 라운드가 가장 큰 디자인인 245-Ⅱ가 가장 강성이 우수했다. 500 ml 용량의 경우 병의 중앙부가 볼록하게 튀어나와 있고, 골이 하나의 라운드와 아닌 3개의 라운드로 이루어진 디자인 500-Ⅰ이 가장 강성이 우수했다.

결과를 종합하면 병 바닥면 중앙이 볼록하게 튀어나오고, 중앙부 골과 발이 중앙과 가까운 곳에서 시작하는 디자인의 강성이 더 우수했다. 또한 골을 이루는 라운드의 크기는 크며, 병의 발에서 바닥과 접하는 부분의 거리가 서로 멀리 떨어져 있을수록 응력 집중이 나타나지 않았다. 본 해석을 통해 탄산음료용 PET 병의 바닥면을 디자인할 때 중요 요소의 형상을 결정하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 재활용 저해제품 순환이용성 개선 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(202003080006).

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

References

1. D. P. Steen and P. R. Ashurst, "Carbonated Soft Drinks: Formulation and Manufacture", John Wiley & Sons (2008).
2. N. C. Wyeth, "Inventing the PET Bottle", *Research-Technology Management*, **31**, 53 (1988).
3. M.-Y. Lyu and Y. Pae, "Bottom design of carbonated soft drink poly(ethylene terephthalate) bottle to prevent solvent cracking", *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 1145 (2003).
4. B. Demirel and F. Daver, "The effects on the properties of PET bottles of changes to bottle-base geometry", *J. Appl. Polym. Sci.*, **114**, 3811 (2009).
5. B. Tekkanat, B. L. McKinney, and D. Behm, "Environmental stress cracking resistance of blow molded poly(ethylene terephthalate) containers", *Polym. Eng. Sci.*, **32**, 393 (1992).
6. E. D. Morrison, M. W. Malvey, R. D. Johnson, J. L. Anacker, and K. A. Brown, "Effect of chemical environments on stress cracking of poly(ethylene terephthalate) beverage bottles", *Polym. Test.*, **27**, 660 (2008).
7. S. H. Cho, J. S. Hong, and M.-Y. Lyu, "Investigation of the Molding Conditions to Minimize Residual Stress and Shrinkage in Injection Molded Preform of PET Bottle", *Polymer(Korea)*, **35**, 467 (2011).
8. N. H. Kim, I. Y. Woo, K. W. Nam, B. R. Yeon, M. R. Kim, and M.-Y. Lyu, "Comparison of Injection Molding Characteristics according to Thickness Variations of Preform for PET bottle", *Elast. Compos.*, **56**, 164 (2021).
9. B. Ottmar, "Stretch blow molding", New York, William Andrew (2016).
10. B. Demirel and F. Daver, "Optimization of poly(ethylene terephthalate) bottles via numerical modeling: A statistical design of experiment approach", *J. Appl. Polym. Sci.*, **114**, 1126 (2009).
11. W. Yuan, L. H. Xie, G. M. Zhang, D. Z. Liao, and J. D. Lu, "Research on PET Beer Bottle Structural Parameters and its Strength", *Adv. Mat. Res.*, **641**, 488 (2013).
12. S. Ge-Zhang, M. Song, Z. Huang, M. Li, and L. Mu, "Comparison and Optimization: Research on the Structure of the PET Bottle Bottom Based on the Finite Element Method", *Polymers (Basel)*, **14**, 3174 (2022).
13. Q. C. Hu, W. J. Sha, Y. H. Li, and Y. S. Wang, "Structural Optimization and Lightweight Design of PET Bottle Based on ABAQUS", *Adv. Mat. Res.*, **346**, 558 (2011).
14. T. T. Nguyen, Y. M. Luo, L. Chevalier, and F. Lesueur, "Stochastic simulation of top load test on poly(ethylene terephthalate) bottles: An experimental study on dispersion of elastic properties", *J. Appl. Polym. Sci.*, **138**, 50837 (2021).
15. M.-Y. Lyu, "Polymer Shaping Process and Applications of CAE", *Polymer Science and Technology*, **14**, 668 (2003).
16. H. Attar, Y. M. Luo, L. Chevalier, T. T. Nguyen, and F. Detrez, "Identification of anisotropic properties of polymer sheets from heterogeneous biaxial tests", *Polym. Test.*, **115**, 107721 (2022).
17. H. O. Onyishi and C. K. Oluah, "Effect of stretch ratio on the induced crystallinity and mechanical properties of biaxially stretched PET", *Phase Transitions*, **93**, 924 (2020).
18. H.-M. Son, S.-H. Yoon, K.-H. Lee, and M.-Y. Lyu, "3-Dimensional Thermoforming Computer Simulation Considering Orthotropic Property of Film", *Elast. Compos.*, **57**, (2022).
19. M.-Y. Lyu, H. C. Kim, J. S. Lee, H. C. Shin, and Y. Pae, "Causes of Cracks in Petaloid Bottom of Carbonated PET Bottle", *International Polymer Processing*, **16**, 72 (2001).
20. M.-Y. Lyu and Y. H. Kim, "Investigation of Design Parameters and Novel Design of Petaloid PET Bottles", *International Polymer Processing*, **17**, 273 (2002).

출판자 공지사항: 한국고무학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.