

블로우 몰딩 공정에서 분사 압력이 성형 두께에 미치는 영향에 관한 연구

김동환*, 설상석**,#

*한국국제대학교 항공부품공학과, **창원대학교 메카트로닉스연구원

Study on the Effect of Gas Pressure on Bottle Wall Thickness in the Blow Molding Process

Dong-Hwan Kim*, Sang-Seok Seol*#

*Dept. of Aircraft Part Engineering, IUK UNIV.,

**Mechatronics Research Center, Changwon Nat'l Univ.

(Received 10 February 2020; received in revised form 16 February 2020; accepted 21 February 2020)

ABSTRACT

This study analyzed the deformation behavior of the high density polyethylene (HDPE) bottle in the blow molding process. We carried out finite element (FE) simulations using ANSYS Polyflow. First, the axisymmetric model was executed by 2D FE-simulation to determine the change of bottle wall thickness during the molding process. Then, the square model of the bottle was executed by 3D FE-simulation to gauge the effects of gas pressure on the change of wall thickness. The experiment results showed that the FE-simulations were able to upgrade the quality of the HDPE bottle in the blow molding process. These results can be used as guidance in adjusting gas pressure, as well as be extended for further study to determine process parameters such as temperatures, forming velocity, parison shape, etc.

Key Words : Blow Molding(블로우 몰딩), Parison(예비성형체), Gas Pressure(분사압력), FE-simulation(유한 요소 해석)

1. 서 론

중공성형 또는 블로우 성형(Blow Molding)은 플라스틱 소재를 압출 즉, 사출 성형공법으로 패리슨(Parison)을 만들어 이것을 금형 안으로 이송시킨 후 공기를 주입시켜 성형하는 방법이다. 이 공법은 저렴한 비용으로 복잡하고 다양한 형상의 제

품을 신속하게 양산 할 수 있는 장점이 있다^[1-4].

블로우 성형은 일반적으로 사출 인장 블로우 성형(Injection Stretch Blow Molding), 사출 블로우 성형(Injection Blow Molding), 그리고 압출 블로우 성형(Extrusion Blow Molding, Direct Blow Molding)의 세 가지 방법이 있다.

사출 인장 블로우 성형은 Fig. 1과 같이 사출성형으로 패리슨을 성형한 후, 몸통부분을 가열하고 금형 안으로 이동한 다음 공기를 주입하여 중공품을 성형한다. 압출 블로우 성형은 Fig. 2에 나타난

Corresponding Author : gbmsss@hanmail.net

Tel: +82-55-267-1138, Fax: +82-55-263-5221

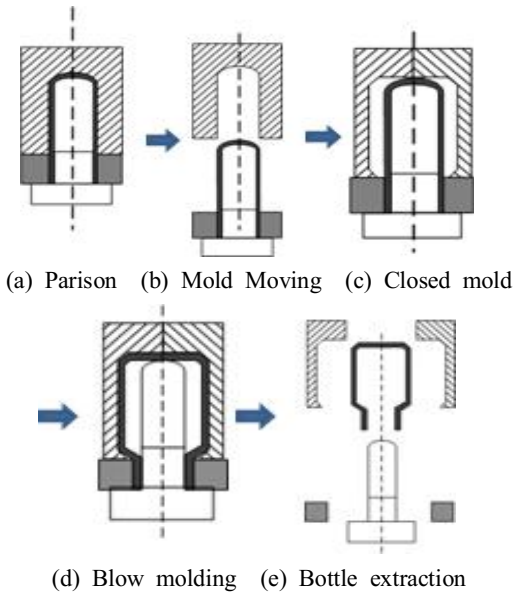


Fig. 1 The injection blow molding process

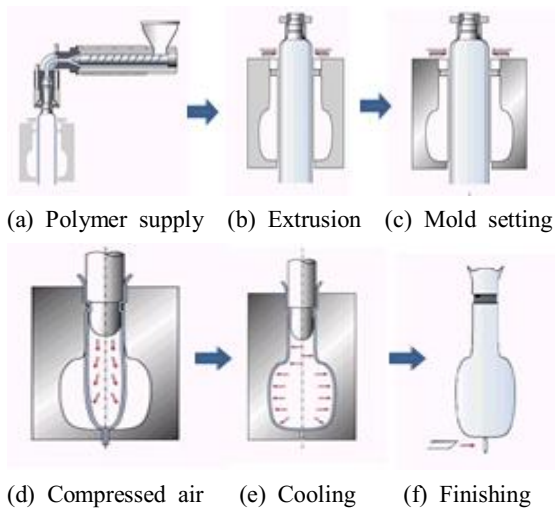


Fig. 2 The extrusion blow molding process

바와 같이 폴리머 공급, 압출, 몰드 세팅, 압축공기주입, 냉각, 최종 중공품 순으로 성형된다. 즉 압출공정으로 패리슨을 성형하고 이 패리슨을 블로우 금형에서 가압하여 최종품으로 성형하는 공법이다. 특히, 압출 블로우 성형공법에서는 예비성형체(Preform), 즉 패리슨 형상을 결정하는 것이

매우 중요하다. 만약 패리슨의 성형온도가 너무 높으면 고분자 소재의 용융강도(Melt Strength)가 낮아져 처짐(Sagging)현상이 발생하고 반대로 온도가 낮으면 패리슨의 두께 편차가 커 균일한 최종 제품으로 성형하기가 어렵다.

패리슨 형상이 결정되면 블로우 성형공법으로 최종 제품을 성형하게 된다. 이때 최종 중공품의 형상과 두께변화에 큰 영향을 미치는 공정변수가 분사압력(Gas Pressure)이다. 분사압력이 과도하게 클 경우 공정 중 블로우 성형 금형이 벌어지게 되어 완제품으로 성형하기가 어렵고, 반대로 분사압력이 낮으면 하단 곡률부에서 미 성형이 발생하게 된다. 따라서 블로우 성형으로 사용자가 원하는 최적의 중공품을 얻기 위해서는 적합한 분사압력을 결정하는 것이 매우 중요하다. 또한 분사압력에 따라 중공품의 두께가 달라지므로 두께에 대한 분사압력이 두께에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다.

처짐현상 방지와 균일한 두께의 중공 성형품을 얻기 위해서는 패리슨의 성형 온도 설정과 블로우 공정 중 분사압력의 결정이 중요하므로, 본 연구에서는 패리슨 형상은 고정하고 분사압력에 따른 블로우 성형의 두께변화에 대하여 연구를 수행하고자 한다. 지금까지 블로우 성형공법에 대한 CAE(Computer Aided Engineering)를 이용한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 축대칭 모델과 정사각형의 압출 블로우 성형공정에 대하여 분사압력에 따른 두께 변화를 예측하기 위하여 성형 해석을 수행하고자 한다.

2. 블로우 성형공법의 CAE해석

2.1 축대칭 부품의 블로우 성형 해석

본 연구에서는 블로우 성형에 대한 CAE 해석을 적용하고, 이에 대한 타당성을 검증하기 위하여 축대칭 부품에 대한 블로우 성형해석을 수행하였다. 해석 대상은 기본적인 축대칭 연료탱크 형상으로 하여 모델링을 수행하였고, 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다^[5]. 해석은 1/2 형상의 축대칭 모델로 하였고 소재는 HDPE(High Density

Polyethylene)이다. 이 소재의 점성은 100,000 poise이며, 밀도는 0.906 g/cm³이다. 해석을 위한 입력 조건은 Table 2에 나타내었다. 폴리머(Polymer) 소재의 경우 응력과 변형률은 속도와 온도에 의존적이다. 변형률 속도와 온도가 증가함에 따라 응력이 증가한다^[6].

본 연구에서의 패리손의 초기 온도는 현장 조건을 고려하여 용기 입구부는 90℃, 용기 바닥부는 80℃로 하였으며, 중간 부위는 그 사이 범위로 자동설정 되도록 하였다. 그리고 분사압력은 본 용기 크기를 고려하여 2 MPa로 하였다.

Table 1 Properties of polypropylene

Item	Value
Viscosity	100,000 poise
Density	0.96 g/cm ³

Table 2 The conditions of 2D FE-simulation

Item	Value	
Gravity	9.81 m/s ²	
Injection Pressure	2 MPa	
Boundary condition : Geometry consists of the four boundaries (Fig. 3(b))	B1	Symmetry axis
	B2	Free surface
	B3	normal velocity & surface velocity
	B4	Free surface

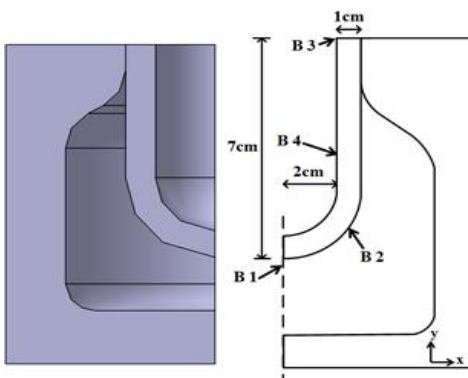
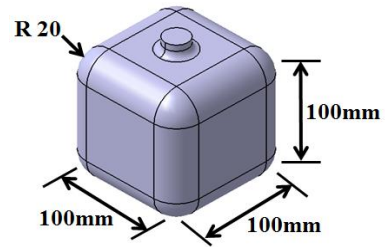
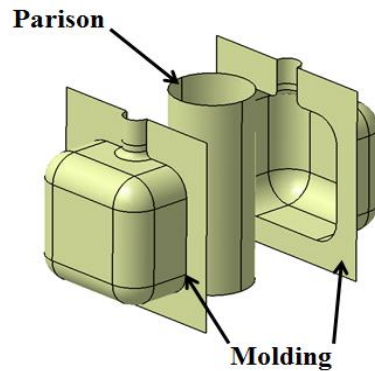


Fig. 3 The 2D axisymmetric model



(a) 3D shape



(b) Surface modeling for molding

Fig. 4 The 3D square model

2.2 정사각형 중공품의 성형해석

축 대칭 중공품의 2차원 해석결과를 바탕으로 정사각형 중공품에 대하여 3차원 해석을 수행하였다^[7]. 해석 모델은 원통형의 타입으로 초기 패리손을 설계 하였고, 그 형상을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 6(a)는 최종품의 형상이며, Fig. 4(b)는 금형과 패리손의 형상이다. 본 해석은 이전의 해석과는 달리 원통형 패리손으로 하였고, 분사압력에 따른 두께 변화를 관찰하기 위하여 정사각형 모델을 대상으로 하였다. 이전의 축 대칭 해석의 경우는 밀폐된 금형 내부 패리손에 분사압력을 주입하였으나, 본 해석의 경우에는 금형이 열린 상태로 패리손 내에 분사압력이 주입되고 성형이 시작된다. 그런 다음 금형은 점차 닫히기 시작하는데 그 때의 속도는 0.5 mm/s로 하였다. 초기의 금형과 패리손의 간격은 50 mm이다. 최종 중공품의 가로, 세로, 높이 길이는 모두 100 mm이며 입구 직경은 10 mm이다. 금형의 이송속도는 0.5 mm/s이며, 블로우 포밍 압력은 6 kPa이다. 1 step 당 금

Table 3 The conditions of 3D FE-simulation

Item	Value
Viscosity	100,000 poise
Density	1 g/cm ³
Gravity	9.81 m/s ²
Element Dilatation	0.2 mm
Number of Step(time)	200 (8 sec)

형 이송거리는 0.01 mm으로 하였으며, 총 100 step으로 설정하였다. 본 해석 수행 시간은 약 4시간이 소요되었다.

본 연구에서 사용된 폴리머 소재의 온도는 19 0°C 이며 밀도는 1 g/cm³ 이다. 해석 조건을 Table 3에 나타내었다. 실제 블로우 몰딩 공정은 자중에 의한 처짐이 발생하고, 이로 인한 초기의 두께가 균일 하지 않게 된다. 이에 현장에서는 초기 패리슨의 두께를 균일하게 하기 위하여 패리슨 컨트롤이라는 부가 장치를 이용한다. 따라서 본 연구에서는 초기 패리슨의 두께를 균일하게 하여 블로우 몰딩 성형 해석을 수행하였다. 본 해석 대상은 금형이 열린 상태로 분사압력이 주입되고, 원통형 길이방향으로 열린 패리슨의 형상 그리고 현장의 경험 등을 고려하여 초기 분사압력을 6 kPa로 설정하고 해석을 수행하였다. 해석 후 두께 분포를 Fig. 5 에 나타내었다. Fig 5의 두께 분포를 보면 Point 1의 두께는 2.7 mm, Point 2의 두께는 1.2 mm, Point 3의 두께는 1.6 mm, Point 4의 두께는 1.1 mm, Point 5의 두께는 2.5 mm로 나타났다. 두께의 변화량 분포는 이전의 축 대칭 해석 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 축 대칭 해석 결과와 달리 바닥부 코너 Point 4가 가장 얇은 두께로 나

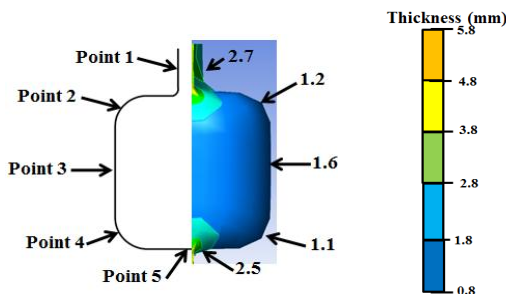


Fig. 5 The measurement points after simulation

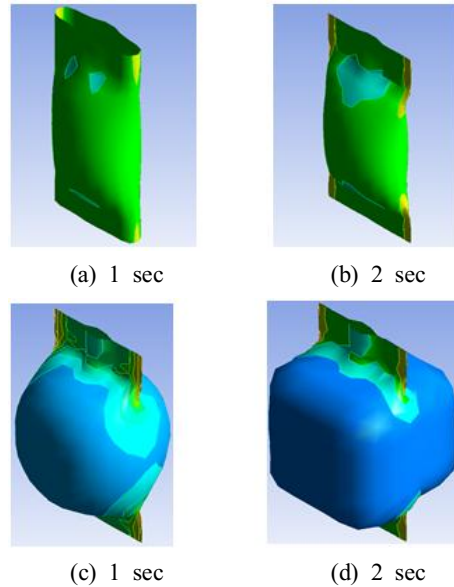


Fig. 6 The distribution of bottle wall thickness

타났고, 상단부 코너 Point 2의 두께 값이 0.1 mm 크게 예측되었다.

축 대칭 모델의 경우 밀폐 금형에 분사 압력이 분사됨으로 인하여 중심부에서 다소 거리가 먼 상단 코너에서 두께 감소가 컸으나, 본 해석 대상의 경우 금형과 패리슨이 열린 상태에서 분사압력이 주입되고 보다 균일한 압력이 용기 벽면에 걸리게 되어 코너부의 두께 편차가 적고, 또한 용기의 최종 형상이 정사각형 모양이기 때문에 각 코너부가 중심으로부터 떨어진 거리가 일정하여 코너부의 최종 두께가 거의 유사한 것으로 판단된다. 시간에 따른 성형공정의 형상변화를 Fig. 6에 나타내었다.

블로우 성형공정에서 분사압력은 두께분포에 큰 영향을 미치기 때문에 적정 분사압력의 설정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 분사압력이 두께 분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 5 kPa ~ 7 kPa 분사압력 범위에서 해석을 수행하였다. 해석은 3.1절과 동일한 사각형의 금형과 원통형의 패리슨으로 수행하였으며, 금형 속도와 격자 크기 등 동일한 입력 조건을 사용하였다. 해석 후 두께 측정 부위를 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구에서는

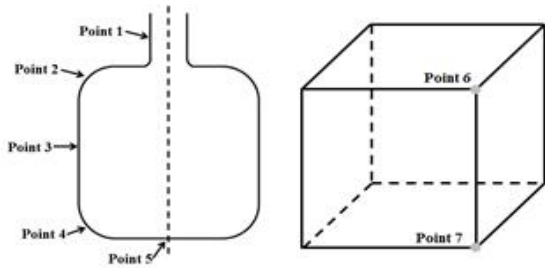


Fig. 7 The measurement point after simulation

코너부의 두께 변화를 분석하기 위하여 기존의 Point 1 ~ Point 5에 Point 6과 Point 7을 추가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축 대칭 부품 성형 특성

2차원 축 대칭으로 해석을 수행한 후 중공품의 두께를 측정하기 위하여 두께 편차가 심한 도입부, 곡률부, 직선부, 바닥부의 용기 벽 두께를 측정하였다. 측정 부위를 Fig. 8에 나타내었다.

금형의 이동속도는 0.5 mm/s이며, 블로우 포밍 압력은 2 MPa 이다. 1 step당 금형 이동거리는 0.01 mm로 하였으며 총 100 step으로 설정하였다. 본 해석 수행 시간은 약 2시간이 소요되었다. 해석 시간에 따라 용기 측면 벽 두께를 Fig. 5에 나타내었다. 1초 후에는 두께 변화가 나타나지 않았지만, 2초 후에는 Point 2, 3 부위에서 급격히 감소함을 알 수 있었다. 4초 후 최종 용기가 성형되었고, 두께는 Point 1에서 8.1 mm, 바닥부 Point

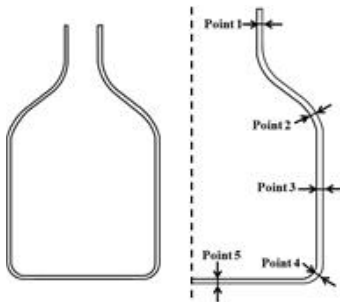


Fig. 8 The measurement points after simulation

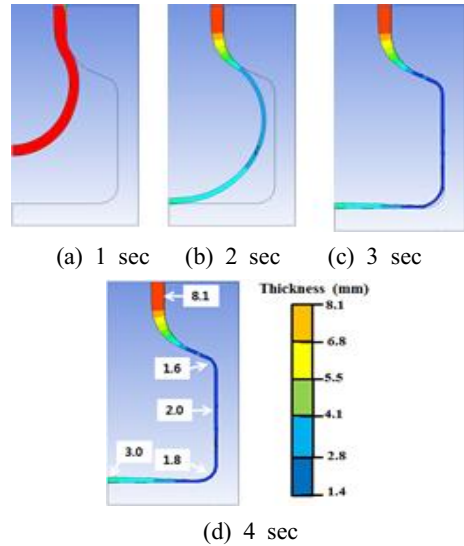


Fig. 9 The change of wall thickness for 2D model

5에서 3.0 mm 이었다. 그러나 Point 2에서는 1.6 mm, 그리고 Point 3에서는 2.0 mm, 바닥부 코너 Point 4에서는 1.8 mm로 초기 소재 두께 10 mm보다 월등히 감소된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9(b)는 변형률 속도 분포를 나타내었으며, 마찬가지로 Point 2, Point 4의 코너부에서 각각 0.7 s^{-1} 과 0.2 s^{-1} 의 상대적으로 큰 값을 나타내었다. 변형률 속도 분포에서도 Point 2의 곡률부에서 가장 높은 값을 나타내었는데 이것은 일반적으로 코너부에서 폴리머 연신이 보다 증가하고, 바닥부 코너 즉, Point 4에 비해 중심부에서 소재의 이동량이 더욱 많아 국부적 변형률이 증가했기 때문이라 판단된다. 2초 후 용기가 금형에 접촉을 시작하면서 용기 벽 부위의 두께와 변형률 속도의 편차는 다소 줄어들지만, 입구부 보다는 두께가 상당히 감소된 것을 확인할 수 있다. 용기의 측면 벽두께는 변형률 속도에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있었으며, 변형률 속도는 분사 압력에 영향을 받는다. 분사압력이 높으면 변형률 속도가 증가하게 되어 용기 측면 벽두께는 더욱 감소하게 되고, 분사압력이 낮으면 변형률 속도는 낮아지게 되어 패리손의 미성형과 결육 및 주름 등의 문제가 발생 할 수 있다. 두께와 변형률 속도 분포를 비교하면 변형률 속도가 낮은 Point 1 목부분과

Point 5 바닥부에서 두께 감소가 적은 것을 확인할 수 있다.

3.2 분사 압력에 따른 정사각형 증공품의 성형 특성

성형해석 결과를 Fig. 10(a) ~ 10(e)에 나타내었다. Fig. 10(a)의 분사압력이 5 kPa인 경우에는 패리슨의 분사압력이 낮아 폴리머 소재가 금형에 접촉하지 않았고, 최종 사각형상을 만들지 못하여 타원형 형상으로 성형이 종료되었다. 이에 미 성형이 발생되었다. 소재의 변형률 속도는 벽면에서 가장 빠르게 나타났다.

Fig. 10(b)의 분사압력이 5.5 kPa인 경우에는 폴리머 소재가 금형에 접촉하였으나, 패리슨의 분사압력이 낮아 코너부 Point 2와 Point 4는 금형에

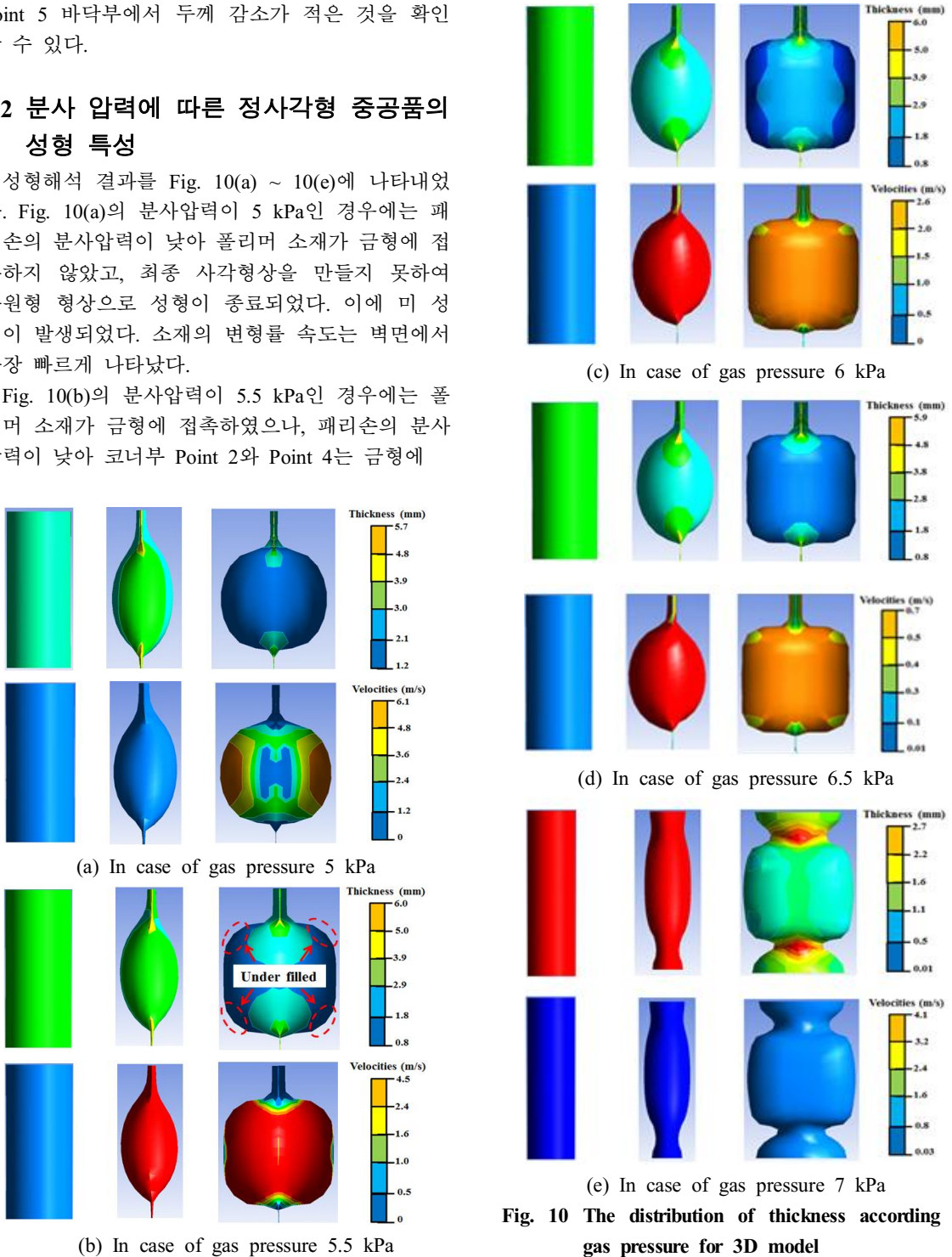


Fig. 10 The distribution of thickness according to gas pressure for 3D model

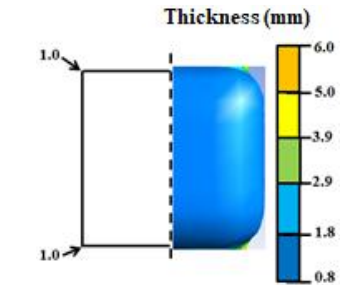
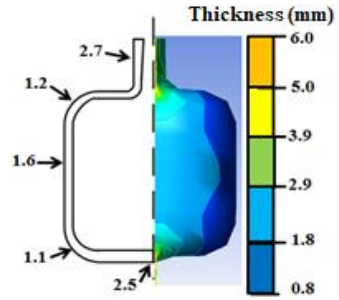
접촉하지 못하여 최종 사각형상을 만들지 못하고 성형이 종료되었다. 소재의 변형률 속도는 분사압력이 5 kPa인 경우 보다 빠르게 나타났으나 압력이 부족하여 폴리머 소재가 코너부 금형을 완전히 채우지 못하였다.

Fig. 10(c)의 분사압력이 6 kPa인 경우 폴리머 소재가 금형에 접촉하여 최종 사각형상으로 성형이 종료되었다. 그리고 Point 4와 Point 5의 두께는 점진적으로 작아지는 것을 확인하였다. 또한 6초 후에는 벽면에 접촉하는 소재의 변형률 속도가 가장 빠르게 나타났으나, 코너부 Point 2와 Point 4의 속도는 상대적으로 느린 것을 확인하였다. 이는 최종 사각형상의 중심부에서의 거리가 소재 변형률 속도에 영향 주는 것을 알 수 있다.

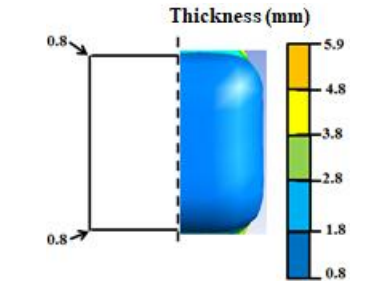
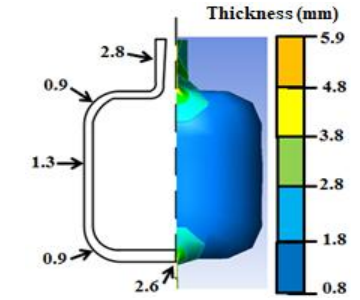
Fig. 10(d)의 분사압력이 6.5 kPa인 경우 폴리머 소재가 금형에 접촉하여 최종 사각형상으로 성형이 종료되었다. 또한 소재의 변형률 속도는 분사압력이 6 kPa인 경우와 유사하게 나타났다. 그러나 Point 4와 Point 5의 두께 편차가 비교적 큰 것을 확인하였다. Fig. 10(e)의 분사압력이 7 kPa인 경우에는 분사압력이 높아 금형이 서로 접촉하지 못하여 최종 사각형상을 만들지 못하고 성형이 종료되었다. 소재의 변형률 속도는 일정하게 나타났지만 분사압력이 높아 양쪽 금형이 서로 접촉하지 못하고 이에 완전한 성형품을 얻지 못하였다. 본 연구에서 사용된 사각형상은 최대 3 mm에서 최소 1 mm의 두께를 가져야만 연료탱크로 사용이 가능하다. 그리고 제품의 안전성을 위하여 바닥부는 두께 편차가 적은 것이 내구성에 유리하다.

최종 사각형상으로 성형이 되지 않은 5 kPa와 5.5 kPa의 해석결과는 제외하고, 분사압력 6 kPa와 6.5 kPa인 경우에 대하여 두께 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 분사압력 6 kPa의 두께 분포를 보면 Point 1의 두께는 2.7 mm, Point 2의 두께는 1.2 mm, Point 3의 두께는 1.6 mm, Point 4의 두께는 1.1 mm, Point 5의 두께는 2.5 mm, Point 6의 두께는 1.0 mm, Point 7의 두께는 1.0 mm로 나타났다. 두께를 측정한 결과 두께가 1 mm이하인 부위는 나타나지 않았다.

분사압력 6.5 kPa의 두께 분포를 보면 Point 1의 두께는 2.8 mm, Point 2의 두께는 0.9 mm, Point 3



(a) In case of gas pressure 6 kPa



(b) In case of gas pressure 6.5 kPa

Fig. 11 Thickness variation according to gas pressure

의 두께는 1.3 mm, Point 4의 두께는 0.9 mm, Point 5의 두께는 2.6 mm, Point 6의 두께는 0.8 mm, Point 7의 두께는 0.8 mm로 나타났다. 그러나

Point 2, 4, 6, 7이 최소 두께인 1 mm 이하로 측정된 것을 확인하였다. 또한 제품의 안정성을 위하여 바닥부가 균일한 것이 양호하지만 Point 4와 Point 5에서 두께 편차가 커 용기의 안정성 문제가 발생 할 수 있다. 분사압력 7 kPa인 경우에는 Point 1의 두께는 2.1 mm, Point 2의 두께는 0.8 mm, Point 3의 두께는 1 mm, Point 4의 두께는 0.8 mm, Point 5의 두께는 2.1 mm, Point 6의 두께는 0.5 mm, Point 7의 두께는 0.4 mm로 나타났다. 즉 6.5 kPa 이상에서는 Point 2, 4, 6, 7에서 두께는 더욱 얇아지게 되어 압력 용기로써 안정성이 나빠지게 된다.

Fig. 12에는 용기의 측면 벽 두께를 분사압력에 따라 정리하여 나타내었다. 분사압력이 6 kPa인 경우는 최소두께가 1 mm이상으로 연료탱크로써의 사용 안정성을 확보 할 수가 있었지만 분사압

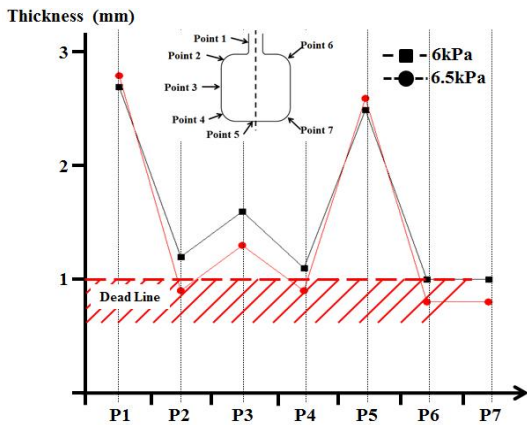
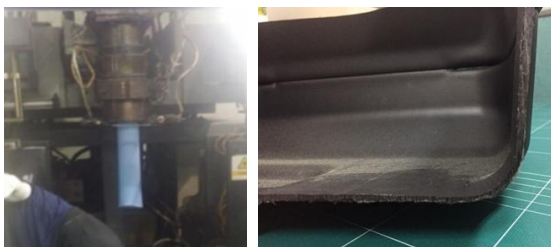


Fig. 12 Thickness variation from point 1 to point 7 according to gas pressure



(a) Parison shape (b) Thickness at corner

Fig. 13 The experiment results in blow molding test

력이 이보다 큰 경우 즉 6.5 kPa과 7 kPa인 경우에는 코너부에서 1 mm 이하로 두께가 얇아져 연료탱크로써 사용하기가 어렵다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 원통형 패리슨으로 열린 금형에서 블로우 성형을 할 경우 입구부와 가운데 바닥부가 두꺼워지고 측면 벽 부가 얇아지며 코너부에서 두께가 가장 얇아지는 경향을 알 수 있었다.

본 연구에서는 현장에서 성형 중인 유사한 크기의 모델에 대하여 6.5kPa의 분사압력으로 블로우 성형 실험을 수행하였다(Fig. 13). 실험결과 해석에서 예측한 바와 같이 각 코너부에서 두께가 가장 얇아지는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 분사압력이 블로우 성형품의 두께변화에 중요한 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었고, 해석으로부터 두께 변화를 예측한 결과가 실제 현장의 결과를 반영할 수 있다는 것을 확인 하였다. 그러나 본 연구에서 수행된 모델은 단순 모델이며, 향후 실험에서 사용된 모델에 대한 해석을 수행하고 그 결과에 대한 정량적인 두께 변화가 비교되어야 할 것이다.

실제 현장에서는 형상과 체적에 따라 최적의 분사압력을 결정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 향후에는 블로우 성형 공정에서 용기의 형상과 체적에 따라 분사압력을 어떻게 조절해야 하는 가에 대한 해석과 이에 대한 검증 실험을 수행하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 분사압력에 따른 중공품의 두께 변화를 분석하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 분사압력에 따른 중공품의 두께 변화를 해석으로 부터 예측하였고, 블로우 성형품의 중심부에서 거리가 멀수록 두께가 얇아지며 특히 코너부가 가장 얇아지는 것을 알 수 있었다.
2. 밀폐형의 축 대칭 부품 및 사각형 용기의 블로우 성형해석을 통하여 연료탱크 블로우 성형시 용기 측면과 바닥부의 두께 변화를 예측하였고 그 결과 코너부가 가장 취약하다는 것을 알 수

있었다. 이러한 경향은 현장의 실험결과와 매우 유사하였다.

3. 유한요소해석은 다양한 연료탱크 류에 대한 형상 및 두께 예측 그리고 성형가능성 평가에 유용하다는 것을 알 수 있었다. 연료탱크 양산 금형설계에 효과적으로 적용되기 위해서는 최적의 패리슨 설계와 분사압력에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.
4. 본 연구에서는 현장의 경험에 의존하여 분사압력에 대한 연구를 수행하였다. 향후, 용기의 형상과 체적에 따라 최적의 분사압력에 대한 연구를 수행하고자 한다.

REFERENCES

1. Martienssen, W., Warlimoont, H., Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data, pp 483~485, 2005.
2. Lyu, M. Y., Kim, H. C., Lee, J. S., Shin, H. C. and Pae, Y., "Causes of Cracks in Petaloid Bottom of Carbonated PET Bottle," International Polymer Processing, 16, pp. 72~78. 2001.
3. Lyu, M. Y., Kim, H. C., Shin, H. C., Lee, J. S., Joo, S. T., Kim, Y. W., "A Study on the Bottom Design of Petaloid Carbonated PET Bottle to Prebent Bottom Crack," SPE ANTEC Technical Papers, 47, pp. 2808. 2001.
4. Lyu, M. Y., Kim, Y. H., "Investigation of Design Parameters and Novel Design of Pataloid PET Bottles," International Polymer Processing, Vol. 17, No. 3, pp. 279~283, 2002.
5. Lyu, M. Y., Pae, Y. L., "Bottom Design of Carbonated Soft Drink Polyethylene Terephthalate Bottle to Prevent Solvent Cracking," Journal of Applied Polymer Science, 2003.
6. Ansys, Ansys Inc, Tutorial 2. 2D axisymmetric Blow Molding, pp. 1~27, 2012
7. Ansys, Ansys Inc, Tutorial 4. 3D Blow Molding of a Bottle, pp. 1~10, 2012.