한국금형공학회지, 제9권 제3호, 2015
J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.9 No.3, 2015 ISSN 2092-9692

사각 프리폼 블로우 성형 특성에 관한 수치적 연구

조승현[1] · 송민재[2] · 이동원[2] · 고영배[2,†]
동양미래대학교 기계공학부[1].한국생산기술연구원[2,†]

Numerical study on the blowing deformation characteristics of a square shaped preform

Seung-Hyun Cho[1] · Min-Jae Song[2] · Dong-Won Lee[2] · Young-Bae KO[2,†]
Department of Mechanical Engineering, University of Dongyang Mirae[1]
Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)[2,†]
(Accepted November 23, 2015)

Abstract : This study presents the preform injection molding and the blow molding of the injection stretch-blow molding process for PET bottles. The numerical analysis of the injection molding and the blow molding of a preform is considered in this paper using CAE with a view to minimize the warpage and the thickness. In order to determine the design parameters and processing conditions in injection/blow molding, it is very important to establish the numerical model with physical phenomenon. In this study, we appropriately predicted the warpage, deformation and thickness distribution along the product walls.

Key Words: PET bottle, injection-stretch blowing, infrared lamp, large deformation, FEA

1. 서 론

PET 용기산업은 가격이 저렴하고 사용이 편리하여 사용량이 증가하는 분야로서 가격경쟁력을 확보하기 위한 재료절감 기술, 디자인설계 기술, 제조자동화 기술 등의 개발이 절실한 상황이다. 최근 관련업계에서는 원재료 절감, 물류에 필요한 연료 사용량 및 이산화탄소 배출량 감소를 할 수 있도록 용기의 두께를 감소시키는 연구를 수행하고 있다. PET용기를 생산하는 블로우 성형 중 사출-연신 블로우(injection-stretch blowing) 성형은 중공 제품을 성형 하는데 적용되며, 성형의 상대적인 높은 가격과 설비 때문에 탄산음료병과 같은 큰 용량의 병을 제작하는데 가장 적합하다.

1. 동양미래대학교 기계공학부
† 교신저자 : 한국생산기술연구원
E-mail: kaiser74@kitech.re.kr

PET용기의 경량화와 원가절감을 위해서는 프리폼의 두께를 균일하게 하여 블로우 성형 후 PET용기의 두께를 균일하게 유지하는 것이 가장 중요하다. 특히, 비선형거동 특성을 가진 PET는 온도에 민감하게 반응하기 때문에 균일한 두께유지를 위해서 사출-연신 공정조건인 압력, 시간, 온도 중 온도의 영향분석이 중요하다. 이것을 위해 많은 수치해석을 이용한 연구가 수행되었는데 Schmidt et al[1)]은 변형 거동을 뉴톤 유동(newtonian flow)으로 가정하였으며, 타당성 있는 두께 분포를 구하였으나 계산된 플런저 힘은 측정된 결과와 맞지 않았다. 또한, Haessly과 Ryan[2,3)]은 사출-블로우 성형과정의 자세한 실험적 연구를 진행 시켰으며, 그것을 묘사하는데 네오후크 구성 방정식을 도입하였으나 재료의 변형된 모양을 정확히 묘사하지 못했다. Hartwig[4)]은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/STANDARD를 이용하여 블로우 성형과정의 변형형태를 모사하였다. 이와 같은 연구성과들은

블로우 성형조건에 의한 형상변화를 해석하는데 집중되었다는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 균일한 용기두께를 구현하기위한 기초연구로써 상용 프로그램인 MSC/MARC 2013[5]을 사용하여 연신-블로우 성형공정의 주요 공정조건인 적외선 램프의 온도조건에 따른 프리폼 내.외부의 온도편차와 변형거동특성 및 균일한 두께의 박판용기 성형에 대한 적외선 램프 설계변수의 영향도를 파악하고자 한다.

2. 프리폼 블로우 성형 수치해석

2.1. 해석 모델 및 경계조건

본 연구는 분위기온도관찰, 연신-블로우 성형 시 균일한 두께의 박판성형을 위한 최적온도선정, 연신-블로우 성형 시 균일한 두께의 박판성형에 대한 적외선 램프 설계변수의 영향도 분석을 위하여 수치해석을 진행하였다. Fig. 1은 수치해석에 사용된 모델이며 사각프리폼을 해석모델로 선정하여 2차원 솔리드 메쉬로 모델링하였다. PET용기 형상의 금형과 스트레칭 로드는 변형이 없는 강체바디(rigid body)로 모델링하였으며, 프리폼, PET용기 형상의 금형과 스트레칭 로드는 접촉모델(contact model)로 지정하여 연신-블로우 성형을 재연하였다. 적외선 램프는 그림과 같이 등간격으로 배치하였으며, 적외선 램프의 열특성은 열전도 385 W/m·K, 비열 385 J/kg·K, 밀도 8960 kg/m^3, 방사율 0.3이다.

연구에 사용된 PET소재는 내약품성, 내유성이 우수하고 인체에 무해하며 성형성 또한 좋기 때문에 식품용 용기에 적합한 소재이다. 수치해석에 사용된 PET소재의 열특성은 열전도 0.246 W/m·K, 비열 1719.9 J/kg·K, 밀도 1074 kg/m^3, 방사율 0.9이다. Fig. 2는 PET의 인장시험에 의한 응력변형률(stress-strai) 특성을 온도에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 3은 연신-블로우 해석에 사용된 성형조건을 보여주고 있다. 스트레칭 로드가 0.05초동안 42.2 mm를 이동하여 프리폼에 축방향 연신력을 가하고 0.25초 동안 원위치로 돌아온다. 또한 스트레칭 로드에 의한 연신이 시작되고 0.19초 후 축방향과 반경방향의 변형을 위해 프리폼 내부에 0.6 N/mm^{2}의 블로우 압력이 1단계로 0.01초간 짧게 가해지고 이후 7.5 N/mm^{2}의 블로우 압력이 2단계로 0.5초 동안 가해진다. 블로우 압력이 2단계로 나뉘어 가해지는 것은 스트레칭 로드가 축 방향으로 이동시 가열된 프리폼이 연신되는 과정에서 스트레칭 로드에 점착되는 현상을 막기 위한 것이다.

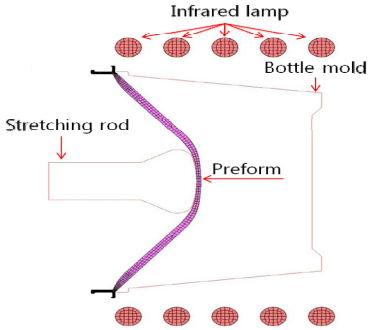
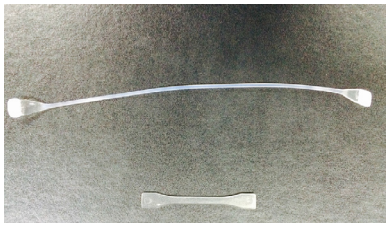
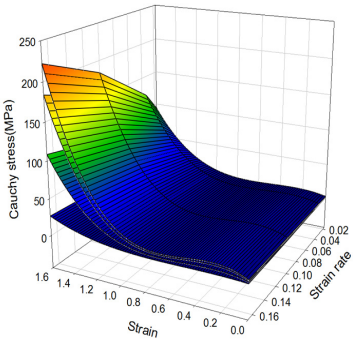


Fig. 1 Square shape preform for blow molding simulation



(a) Tensile test of PET



(b) Stress-Strain

Fig. 2 Mechanical Properties of PET

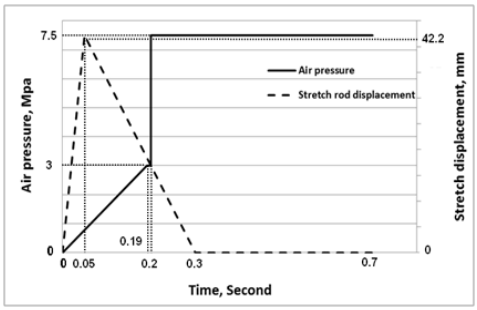


Fig. 3 Process condition of blow molding

2.2. 해석 프로세스

본 연구에 사용된 상용프로그램을 사용한 연신-블로우 성형해석 프로세스는 Fig. 4와 같다. 연신-블로우 성형은 프리폼의 분위기 온도에 영향을 크게 받는다. 분위기온도는 적외선 램프로부터 전달되는 복사열에 영향을 받고 이러한 복사열전달로부터 성형 전의 프리폼 온도가 결정되어지기 때문에 분위기 온도 파악을 위한 열적 해석이 우선적으로 수행되었다. 열적 해석은 상온상태에서 프리폼과 적외선 램프의 열적 특성(열전도율, 비열, 밀도, 방사율)이 입력되면 강제대류, 자연대류, 복사열전달 등의 열적 경계조건으로 프리폼의 온도가 계산된다.

열적해석 수행 이후 PET프리폼이 PET용기로 성형되는 연신-블로우 성형과정을 기계적해석으로 재연하였다. 기계적해석은 열적해석의 결과인 프리폼의 온도가 초기온도조건으로 입력되며 강소성 특성값인 온도에 따른 소성변형률과 스트레칭 로드의 변위량, 블로우 압력이 적용되어 계산된다. 스트레칭 로드에 의하여 프리폼이 연신될 때와 연신된 프리폼이 블로우 압력에 의하여 금형모양으로 성형될 때는 접촉모델(contac model)이 적용되었으며, 연신에 의한 성형에서 프리폼의 대변형 해석 시 수치계산의 수렴을 위하여 유한요소의 크기가 재조정되는 리메쉬(remesh)모델이 적용되었다. 이러한 열적해석과 기계적해석으로 계산된 프리폼의 대변형과 응력값은 대변형거동특성을 분석하는 특성값으로 사용되었다.

2.3. 해석 조건

연신-블로우 성형에서는 프리폼의 초기온도를 관리하는 것이 매우 중요한데, 이는 PET는 폴리머이기 때문에 온도변화에 매우 민감하게 변형하기 때문이다. 본 연구에서는 프리폼에대한 초기 온도의 영향을 분석하기 위해 복사열을 이용하여 프리폼을 가열하는 적외선 램프의 온도를 Fig. 5와같이 총 7가지의 경우로 가정하였다.

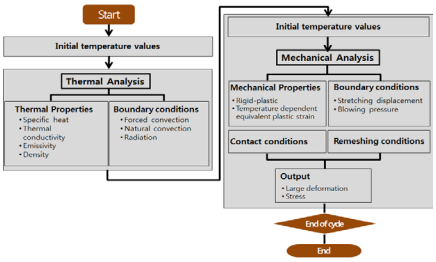


Fig. 4 Simulation process of stretch-blow mold

또한, 프리폼의 표면에서 발생하는 대류열전달을 고려하기 위해 프리폼의 외부와 내부 표면의 대류열전달계수를 분위기온도가 적외선 램프와 같을 때 각각 100 W/m²·K와 20 W/m²·K으로 가정하였다. 한편, 블로우압력은 프리폼 내부표면의 수직방향으로 Fig. 6과 같이 가해진다고 가정하였다.

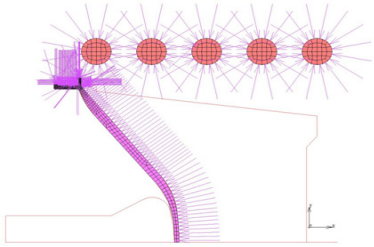
표면사이의 복사열에 의한 열전달은 프리폼의 온도를 예측하는데 매우 중요하다. 복사열을 계산하기 위해서는 적외선 램프 표면에서 프리폼 표면으로 전달되는 복사비인 뷰펙터(viewfactor)를 계산해야 한다. 적외선 램프에서 프리폼 표면의 복사열은 식(1)으로 정의되고, 식(1)에서 σ는 스테판-볼츠만상수이고, F_{12}는 뷰펙터, T_1과 T_2는 각각 두 표면의 온도이다.

$$q_{12} = \sigma F_{12}(T_1^4 - T_2^4) \tag{1}$$

뷰펙터 F_{12}는 식(2)과 같이 계산된다.

$$F_{12} = \frac{1}{A_1}\int_{A_1}\int_{A_2}\frac{\cos\theta_1\cos\theta_2}{\pi r^2}dA_2dA_1 \tag{2}$$

식(2)에서 θ_1과 θ_2는 각 표면과 법선방향의 사잇각, A_1과 A_2는 두 표면적이고 r은 두 표면사이의 거리이다.



	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Temperature of infrared lamp, ℃	80	100	120	140	160	180	200

Fig. 5 Temperature of Infrared lamp and radiation thermal transfer condition

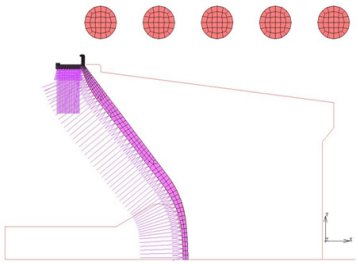


Fig. 6 Blow pressure in the preform

3. 해석 결과

3.1. 분위기 온도 해석 결과

Fig. 7은 적외선 램프의 온도가 120℃일 때 프리폼의 온도분포를 관찰한 그림이다. 적외선 램프에 의해 가열된 프리폼의 온도분포는 블로우성형에 의한 프리폼의 거동특성을 이해하는데 중요한데 특히 내부와 외부의 온도편차가 큰 영향을 미치는 것으로 알려져있다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 7과 같이 프리폼의 위치에 따른 온도분포를 내부와 외부로 나누어 그래프로 나타내고 온도차가 큰 구간과 성형 후 바닥면이 되는 곳의 내부온도와 외부온도를 비교하여 보았다.

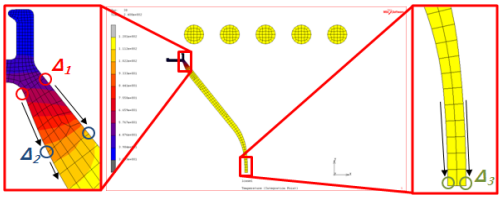
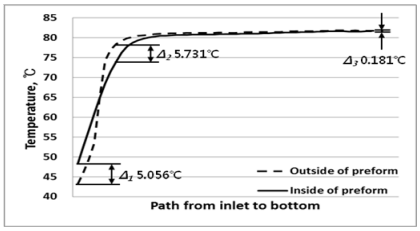
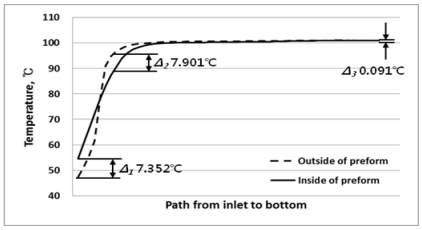


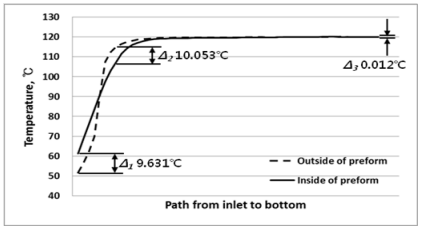
Fig. 7 Observation on temperature distribution and thickness direction of preform in accordance with infrared lamp



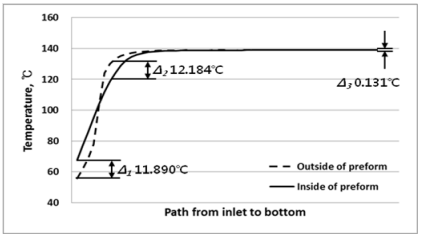
(a) 80℃



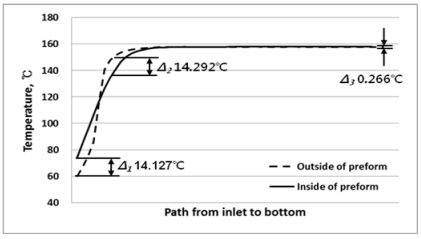
(b) 100℃



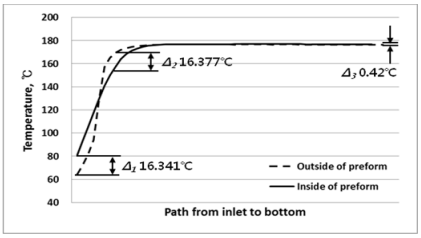
(c) 120℃



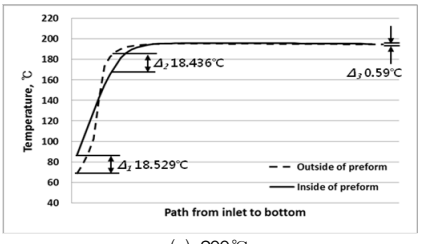
(d) 140℃



(e) 160℃



(f) 180℃

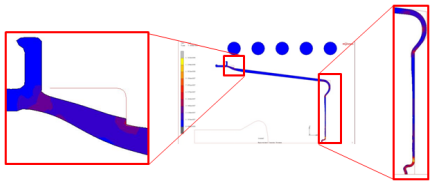


(g) 200℃

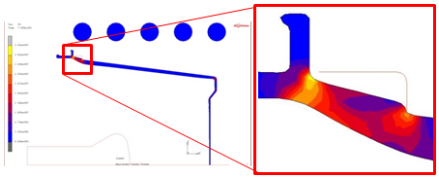
Fig. 8 Compare with internal temperature of preform and external temperature of preform

Fig. 8은 적외선 램프에 의하여 가열된 프리폼의 온도를 Fig. 7과 같이 프리폼의 입구부터 바닥면 방향으로 측정한 결과이다. 그래프에서 알 수 있는 것은 입구에서의 온도는 내부가 더 높지만 프리폼의 두께가 두꺼워질수록 외부의 온도가 급격히 높아지는 경향을 보이는데 80℃에서 $\Delta 1$=5.056℃, $\Delta 2$=5.731℃이고 온도가 점차 증가하여 200℃에서 $\Delta 1$=18.529℃, $\Delta 2$=18.436℃로 적외선 램프의 온도가 증가할수록 입구의 내.외부 온도차 및 외부표면의 온도증가량 또한 커지는 것을 알 수 있다. 또한 프리폼에 온도는 바닥면으로 갈수록 적외선 램프의 온도에 근사한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있는데,

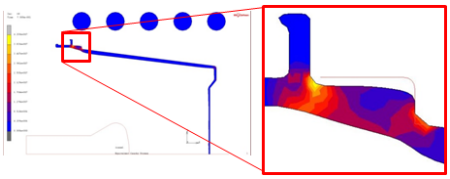
이때에도 온도차가 발생하였지만 80℃에서 ⊿3=0.181℃, 120℃에서 ⊿3=0.091℃, 200℃에서 ⊿3=0.59℃로 80℃에서 온도가 증가할수록 온도차는 작아지다 120℃에서 최솟값을 보이며 이후 적외선 램프의 온도가 증가할수록 온도차 또한 커지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로부터 적외선 램프에 의하여 가열된 프리폼 입구부분의 내.외부의 온도차는 적외선 램프의 온도가 높을수록 증가하는 것을 알 수 있고, 바닥면의 온도차는 120℃에서 가장 적은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.



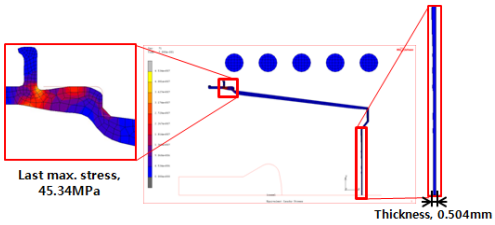
(a) 80℃



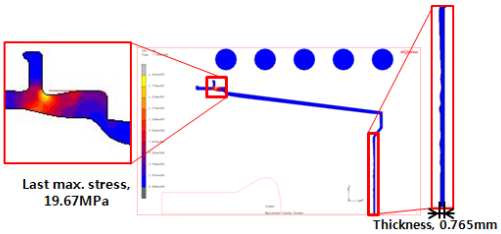
(b) 100℃



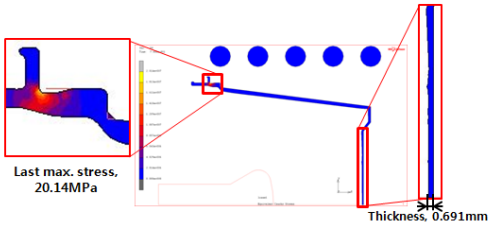
(c) 120℃



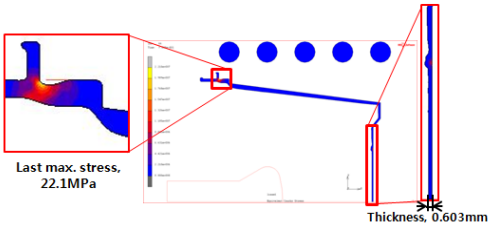
(d) 140℃



(e) 160℃



(f) 180℃



(g) 200℃

Fig. 9 Deformation of preform after blow molding due to infrared lamp temperature

3.2. 분위기 온도에 따른 연신-블로우 성형 해석 결과

Fig. 9는 적외선 램프의 온도에 따라 블로우 성형 후 프리폼 변형분포를 나타낸 결과이다. 성형 후 프리폼의 변형 결과가 각각 다른 것은 적외선 램프의 온도와 블로우 성형 전 적외선 램프에 의하여 가열된 프리폼의 온도가 비슷하기 때문에 프리폼의 초기온도의 영향으로 볼 수 있다. 해석 결과에 의하면 적외선 램프의 온도가 80℃, 100℃, 120℃인 경우에서 블로우 압력에 의해 완전히 성형되지 않았으며 국소부위에 응력이 집중되는 것을 볼 수 있다. 이것은 프리폼의 초기온도가 낮아 프리폼이 블로우 압력에 의하여 충분히 연신되지 않았다는 것을 의미한다. 적외선 램프의 온도가 140℃이상이 되었을 때 용기의 형상이 완전히 구현 되는 것을 볼 수 있는데 160℃이상에서는 바닥면의 형상이 140℃에서 성형된 프리폼에 비하여 비교적 불균일한 형태인 것을 그림 (e), (f), (g)를 통하여 관찰 할 수 있다. 온도에 따른 발생 응력과 바닥면의 두께를 정리하여보면 Table 1과 같다.

Fig. 8과 Fig. 9로 미루어보아 프리폼을 가장 얇고 균일하게 성형할 수 있는 적외선 램프의 온도는 140℃이다.

3.3. 적외선 램프 설계변수 영향도 분석

연신-블로우 성형 시 균일한 두께의 박판성형을 위한 적외선 램프의 설계 변수에 대한 영향도 분석

을 하기 위하여 망소특성에 의한 파라메타 설계를 적용하였다. 성형 후 PET용기의 두께가 얇으면 얇을수록 바람직한 설계라는 관점에서 망소특성을 적용하였고 성능특성치인 두께값에 대한 SN비(signal to noise ratio)분석을 수행하였다. 설계인자의 영향도는 SN비 분석 그래프의 기울기가 클수록 영향도 또한 크며, SN비 값이 최대가 되는 수준이 최적조건이라할 수 있다.

Table 1 Stress and floor thickness of preform after blow molding due to temperature

Temperature(℃)	Last Max. stress(N/mm²)	Last Thickness(mm)
80	131.15	0.773
100	33.62	0.563
120	42.59	0.654
140	45.34	0.504
160	19.67	0.765
180	20.14	0.691
200	22.1	0.603

Fig. 10과 Table 2는 적외선 램프의 설계변수와 다구찌 법을 통하여 만들어진 직교배열표이다. 적외선 램프의 설계변수로는 적외선 램프의 개수, 적외선 램프의 지름, 적외선 램프와 프리폼과의 거리 총 3가지로 설정하였다. 적외선 램프는 등간격으로 배치되었으며 각각의 설계인자의 수준은 적외선 램프의 개수는 2개, 3개, 5개, 적외선 램프의 지름은 현 수준을 10 mm로 가정하여 현 수준의 60%인 6 mm, 현 수준인 10 mm, 현 수준의 140%인 14 mm, 적외선 램프와 프리폼 간의 거리는 현수준을 10 mm로 정의하여 현 수준의 80%인 8 mm, 현 수준인 10 mm, 현 수준의 120%인 12 mm로 각각의 인자를 3개의 수준으로 정의하여 다구찌법을 적용시킨 결과 총 9개의 다구찌 모델로 해석을 진행하였다.

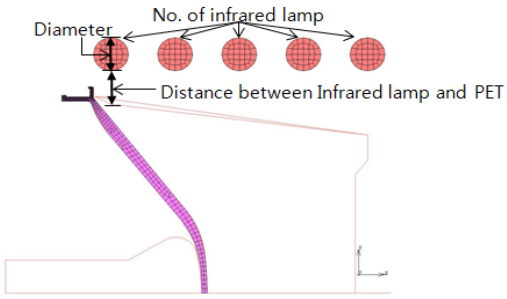


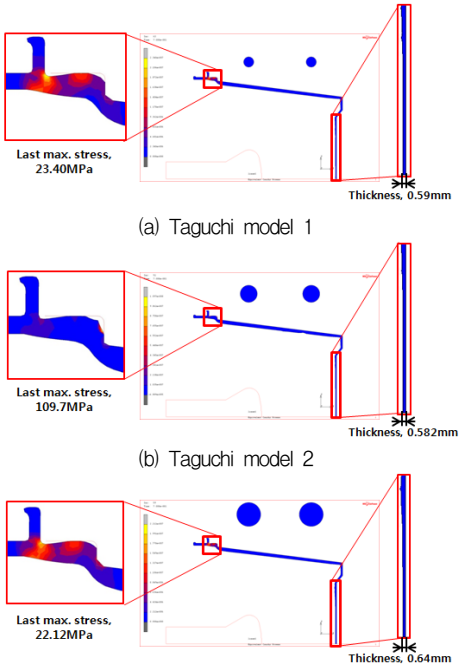
Fig. 10 Design parameter of infrared lamp

Table 2 Design parameter of infrared lamp and 3factors 3levels orthogonal array due to Taguchi method

Level	1	2	3
Number of Infrared lamp	2	3	5
Diameter of Infrared lamp, mm	6	10	14
Distance between Infrared lamp and Preform, mm	8	10	12

Model	Number of Infrared lamp	Diameter of Infrared lamp, mm	Distance between Infrared lamp and Preform, mm
1	2	6	8
2	2	10	10
3	2	14	12
4	3	6	10
5	3	10	12
6	3	14	8
7	5	6	12
8	5	10	8
9	5	14	10

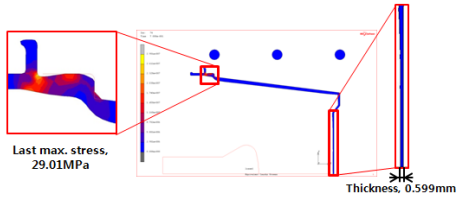
분위기 온도는 3.2 분위기 온도에 따른 연신-블로우 성형 해석에서 프리폼이 가장 얇고 균일하게 성형 되었던 140℃로 설정하였다.



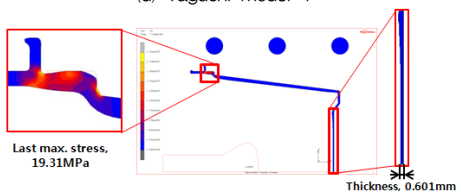
(a) Taguchi model 1

(b) Taguchi model 2

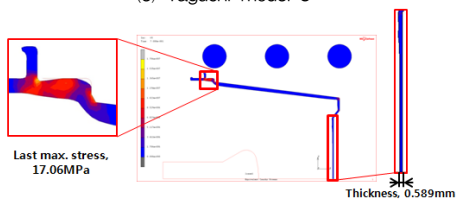
(c) Taguchi model 3



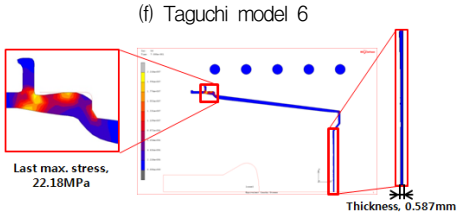
(d) Taguchi model 4



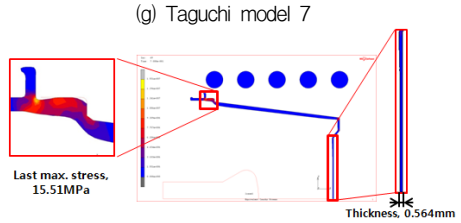
(e) Taguchi model 5



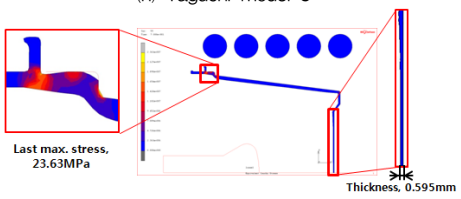
(f) Taguchi model 6



(g) Taguchi model 7



(h) Taguchi model 8



(i) Taguchi model 9

Fig. 11 Deformation of preform after blow molding due to changed design parameter of infrared lamp

Fig. 11은 각각의 다구찌 모델에 대한 연신-블로우 성형 해석결과이다. 9개 모델 모두 충분히 성형된 모습을 보여주고 있다. 3.2 분위기 온도에 따른 연신-블로우 성형 해석 결과와 같은 방법으로 바닥면의 두께를 측정하였을 때 바닥면의 두께는 0.582 ~0.64 mm 수준이며 가장 얇은 두께인 0.582 mm로 성형된 다구찌 모델 2에서 가장 높은 응력이 발생한 것을 Fig. 11의 (b)를 통하여 알 수 있다.

Fig. 12와 Table 3은 다구찌법의 망소조건을 사용하여 Fig. 9와 같은 설계인자 조건으로 성형 두께에 대한 영향도 분석을 수행한 결과이다. 해석결과에 의하면 적외선 램프의 개수는 많을수록, 적외선 램프의 지름은 10 mm에서 적외선 램프와 PET프리폼 사이의 거리는 가까울수록 얇은 두께로 성형이 되었다. 또한 그래프의 기울기가 클수록 성형 두께에 대한 영향도가 크다는 것을 의미하기 때문에 성형 두께에 대한 영향도는 적외선 램프와 PET프리폼 사이의 거리가 가장 높고 적외선 램프의 개수가 가장 낮다는 것을 알 수 있다.

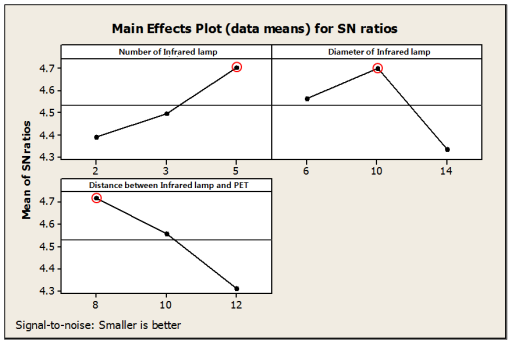


Fig. 12 Analystic graph of S/N ratio on thin molding of infrared lamp design parameter

Table 3 Impact analysis on thin molding of infrared lamp design parameter

Level	Number of Infrared lamp	Diameter of Infrared lamp, mm	Distance between Infrared lamp and Preform, mm
1	4.391	4.561	4.720
2	4.495	4.698	4.559
3	4.706	4.333	4.313
Delta	0.315	0.365	0.408
Contribution ratio	29%	34%	38
Rank	3	2	1

4. 결론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 PET용기 성형 시 적외선 램프의 온도조건에 따른 프리폼의 내·외부 온도편차와 연신-블로우 성형 시 변형거동에 대하여 해석하였고 가장 얇은 두께로 성형 된 온도조건에서 두께에 대한 적외선 램프 설계변수의 영향도를 망소특성을 적용한 다구찌법을 이용하여 분석하였다. 해석 결과에 의하면 적외선 램프에 의한 프리폼의 내·외부 온도편차는 프리폼의 입구와 입구 근처에서 크게 발생하였으며, 적외선 램프의 온도가 높아질수록 프리폼 입구와 입구 근처의 온도편차 또한 커지는 경향을 보였다. 입구에서의 온도편차는 내부의 온도가 높았으나 프리폼의 두께가 두꺼워짐에 따라 외부의 온도증가율이 내부의 온도증가율보다 커지게 되어 온도편자가 역전되었다가 적외선 램프 온도에 근사한 값으로 수렴하는 경향을 보였다.

반면에 바닥면의 온도편차는 적외선 램프의 온도가 80℃에서 0.181℃, 120℃에서 0.091℃, 200℃에서 0.59℃로 적외선 램프의 온도가 증가할수록 바닥면의 온도편차는 감소하다 적외선 램프의 온도가 120℃일 때 최소값을 가졌으며 이후 적외선 램프의 온도가 증가 할수록 바닥면의 온도편차 또한 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 연신-블로우 성형 시 용기가 완전히 성형 된 온도는 140℃이상이었으며 160℃이상의 온도에서는 140℃에서 성형 된 PET용기에 비하여 바닥면의 두께는 두껍고 형상 또한 비교적 불균일하게 성형이 되는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 연신-블로우 성형 후 용기의 정밀한 형상과 얇은 두께를 구현하기 위해서는 바닥면 두께방향의 온도편차를 줄이는 것이 중요하지만, 프리폼이 충분히 연신될 수 있도록 프리폼 전체의 온도를 적절히 가열하는 것이 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

두께에 대한 적외선 램프 설계변수의 영향도 분석 결과는 SN비 그래프에서 적외선 램프의 개수는 많을수록, 적외선 램프의 지름은 10 mm에서, 적외선 램프와 프리폼 사이의 거리는 가까울수록 얇은 두께로 성형이 된다는 결론을 얻을 수 있었으며, 두께에 대한 적외선 램프 설계변수의 영향도는 적외선 램프와 프리폼 사이의 거리가 38%, 적외선 램프의 지름이 34%, 적외선 램프의 개수가 29%로 적외선 램프와 프리폼 사이의 거리가 가장 큰 영향도를 갖는다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1) F. M. Schmidt, J. F. Agassant, and M. Bellet, Simul. Mater. Proc. Numiform 92, p. 383, 1992.
2) W. P. Haessly and M. E. Ryan, J. Polym. Eng. Sci. 33, p. 1279, 1993.
3) W. P. Haessly and M. E. Ryan, ANTEC ' 89, p. 934, 1989.
4) K. Hartwig and W. Michaeli, Simul. Mater. Proc. Numiform 95, p. 1029, 1995.
5) MSC/MARC2013 ; Theory and user information