

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.5.505>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 3차원 진공 열성형 해석<sup>§</sup>

이호진\* · 안동규\*† · 이상훈\*\* · 기준철\*\* · 고재홍\*\*

\* 조선대학교 기계공학과, \*\* (주) 삼성전자 생활가전사업부

### Three-Dimensional Thermoforming Analysis of an Inner Case with Three Cavities for Refrigerator

Ho Jin Lee<sup>\*</sup>, Dong Gyu Ahn<sup>\*†</sup>, Sang Hun Lee<sup>\*\*</sup>, Jun Chul Ki<sup>\*\*</sup> and Jae Hong Ko<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Chosun Univ.,

<sup>\*\*</sup> Digital Appliances, Samsung Electronics Ltd.

(Received January 31, 2016; Revised March 8, 2016 ; Accepted March 15, 2016)

**Key Words:** Thermoforming(진공 열성형), Inner Case of Refrigerator(냉장고 내상), Three Cavities(3개의 캐비티), Thermoforming Analysis(진공 열성형 해석), Thermoforming Mould(진공 열성형 금형)

**초록:** 이 연구에서는 3차원 진공 열성형 해석을 통하여 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 진공 열성형 특성을 분석/고찰 하고자 한다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 금형의 3차원 모델을 이용하여 냉장고 내상 제품의 기초 성형성을 분석하였다. 고온 인장시험을 수행하여 진공 열성형 재료에 대한 물성데이터 도출과 재료 특성 분석을 하였다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 열성형 공정의 세부 공정들을 설계하고 세부 공정들에 적합한 유한요소해석 모델을 개발하였다. 각 세부 공정들에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 제품의 변형 형상 및 두께 분포를 분석하였다. 최종적으로 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 성형성과 진공 열성형 특성을 고찰하였다.

**Abstract:** The aim of this study is to investigate the thermoforming characteristics of an inner case with three refrigerator cavities using three-dimensional(3D) thermoforming analyses. We perform fundamental formability analyses using a 3D model of the mould for the inner case. We carry out tensile tests at the elevated temperature to examine the properties and characteristics of the thermoformed material. Then, we design sub-processes of the thermoforming process for the inner case. In addition, we develop suitable finite-element models for different sub-processes. We investigate the deformed shapes and thickness distributions of the inner case for different sub-processes using the results of the thermoforming analysis. Finally, we discuss the formability and thermoforming characteristics of the inner case with three cavities.

- 기호설명 -

$\alpha$  : 면적 드로잉률  
 $\beta$  : 최대 선형 드로잉률  
 $\lambda$  : 평균 두께 감소율  
 $\eta_f$  : 성형된 제품의 표면적  
 $\eta_s$  : 성형에 사용된 판재의 표면적

$\phi_f$  : 성형된 제품의 최대 선형길이  
 $\phi_i$  : 성형부의 선형길이  
 $T_f$  : 성형된 제품의 평균두께  
 $T_i$  : 성형에 사용된 판재의 평균두께

## 1. 서론

진공 열성형(Thermoforming), 블로우 몰딩(Blow molding), 사출성형(Injection molding) 및 회전성형(Rotational molding) 등은 현대산업에 널리 사용되는 대표적인 플라스틱 성형 공정이다.<sup>(1-4)</sup> 이 플라

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, smart@chosun.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

스틱 성형 공정들 중 진공 열성형 공정은 다른 성형 공정에 비하여 성형 온도와 성형 압력이 작으며, 하나의 금형면을 사용하여 제품을 성형할 수 있다.<sup>(2-3)</sup> 진공 열성형 공정에서는 다른 플라스틱 성형공정에서는 사용하기 어려운 기계적 및 열적 특성이 좋지 않은 저가의 재료들을 이용하여 금형을 비교적 쉽고 빠르게 제작할 수 있다.<sup>(2,3)</sup> 이와 같은 이유로 진공 열성형 공정은 제품 생산 단가와 생산 설비 구축 비용이 다른 플라스틱 성형 공정보다 매우 저렴하다.<sup>(1-4)</sup> 그럼에도 불구하고 성형 공정의 특성상 얇은 두께를 가지는 대형 제품을 효율적으로 생산할 수 있는 장점을 가지고 있다.<sup>(2,3)</sup> 또한 밀폐형 금형으로 제작하기 어려운 크기가 큰 중대형 플라스틱 제품성형이 가능하다.<sup>(1-4)</sup>

일반적인 진공 열성형 공정은 세가지의 세부 성형 단계(Sub-processes)로 구성된다.<sup>(3-6)</sup> 첫번째 세부 공정은 진공 열성형에 사용되는 플라스틱 판재(Plastic sheet)를 재료의 유리전이온도(Glass transition temperature) 이상으로 가열하여 연화시키는 가열(Heating) 공정이다.<sup>(7)</sup> 두번째 세부 공정은 연화된 플라스틱 판재를 금형 형상으로 성형하는 진공(Vacuum) 성형 공정이다. 세번째 세부 공정은 성형된 제품이 충분한 강성을 가질 수 있도록 냉각한 후 취출(Ejection) 하는 공정이다. 그러나 제품의 형상이 복잡하거나 크기가 큰 경우에는 스트레칭(Stretching) 공정이 종종 추가되어 네가지 세부 공정으로 구성된다.<sup>(3)</sup>

진공 열성형 공정은 압출(Extrusion) 된 플라스틱 판재를 사용한다.<sup>(3,4)</sup> 성형공정 중 플라스틱 판재는 빠르게 가열된 후 성형 및 냉각 된다.<sup>(5)</sup> 이 과정에서 제품 코너부의 찢김이나 주름, 제품 벽면의 국부적인 두께감소 및 성형 후 제품의 뒤틀림 등 다양한 문제들이 발생하게 된다.<sup>(3,6)</sup> 제품 및 설비의 크기가 작아 소규모 실험이 가능한 경우에는 실험적 접근을 통하여 적합 성형 공정 및 금형 형상 도출이 가능 하지만, 제품 및 설비의 크기가 큰 경우에는 시간 및 비용 손실을 고려하여 해석적 접근을 통하여 적합한 성형 공정과 금형 형상을 도출하는 것이 바람직하다.<sup>(5,6)</sup>

최근 3차원 진공 열성형 해석을 통한 진공 열성형 제품의 성형성 분석에 대한 연구가 폭넓게 수행되고 있다.<sup>(8-11)</sup> Warby 등은 진공 열성형 공정에서 성형압력에 따른 성형 후 제품 형상 및 두께 분포 변화에 관한 연구를 수행하였다.<sup>(8)</sup> 이 연구에서는 고온 인장 시험을 수행하여 온도에 따른 재료 물성데이터를 분석하고, 이 물성데이터를 적용

한 유한요소해석 모델을 개발하여 성형 공정에 따른 제품 특성 변화를 분석하였다.<sup>(8)</sup> Wiesche 등은 진공 열성형 해석을 이용하여 진공 성형 공정 조건에 따른 자동차 연료 탱크 제품의 두께 분포 변화 분석에 관한 연구를 수행하였다.<sup>(9)</sup> Ahn 등은 3차원 진공 열성형 해석을 이용하여 얇은 평판형 광생물 반응기 케이스 개발에 관한 연구를 수행하였다.<sup>(10)</sup> 이 연구에서는 진공 열성형 공정조건에 따른 제품 성형 특성을 분석하여 적합한 진공 열성형공정 조건을 도출하였다.<sup>(10)</sup> Wang 등은 유한요소해석을 이용하여 성형재료의 초기 온도분포 조건에 따른 제품의 두께분포 변화 분석을 수행하였다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서는 3차원 진공 열성형 해석을 통하여 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 진공 열성형 특성을 분석/고찰 하고자 한다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 금형의 3차원 모델을 이용하여 냉장고 내상 제품의 기초 성형성을 분석하였다. 고온 인장시험을 수행하여 진공 열성형 재료에 대한 물성데이터 도출과 재료 특성 분석을 하였다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 열성형 공정의 세부 공정들을 설계하였다. 각 세부 공정들에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 제품의 변형 형상 및 두께 분포를 분석하였다. 최종적으로 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 성형성과 진공 열성형 특성을 고찰하였다.

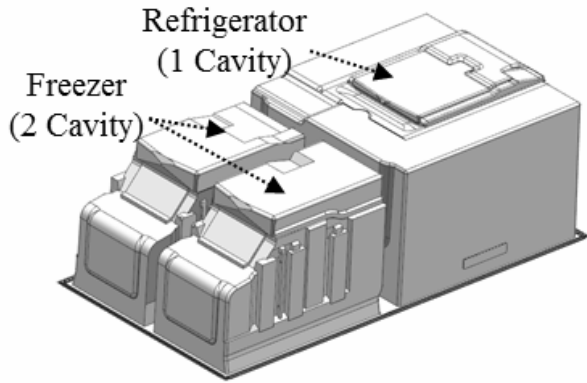
## 2. 설계 및 기초 성형성 분석

### 2.1 금형 설계

Fig. 1은 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상용 진공 열성형 금형의 3차원 형상이다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 금형은 냉동실에 2개의 캐비티를 가지고 냉장실에 1개의 캐비티를 가지도록 설계되었다. 냉동실과 냉장실은 Fig. 1과 같이 가로 폭 방향의 수직 분할 형상에 의하여 분리되어 성형될 수 있도록 분할 금형으로 설계하였다. 냉장실은 Fig. 1과 같이 길이 방향의 수직형 분할 형상에 의하여 분리되어 성형될 수 있도록 금형을 설계하였으며, 좌/우 냉장실 금형은 대칭 형상을 가진다.

### 2.2 기초 성형성 분석

기초 성형성 분석에서는 제안된 금형과 제품 설계에 대하여 진공 열성형 가능성 및 기초 진공 열성형 특성을 검토한다.<sup>(6)</sup> 진공 열성형 금형/제품의



**Fig. 1** Design of an inner case with three cavities for refrigerator

기초 성형성 분석을 위해 면적 드로잉률(Aerial draw ratio), 최대 선형 드로잉률(Maximum linear draw ratio), 평균 두께 감소율(Average reduction rate of thickness) 및 성형 후 제품 평균 두께(Average thickness of thermoformed parts)를 산출하였다.<sup>(6)</sup> 면적 드로잉률, 최대 선형 드로잉률, 평균 두께 감소율 및 성형 후 제품 평균 두께는 각각 식 (1), (2), (3) 및 (4)을 이용하여 예측할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\alpha = \frac{\eta_f}{\eta_s} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\phi_f}{\phi_i} \quad (2)$$

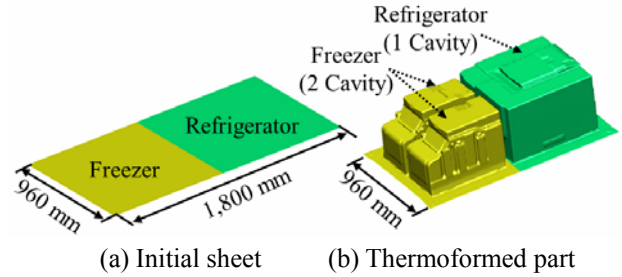
$$\lambda = \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

$$T_f = \lambda \times T_i \quad (4)$$

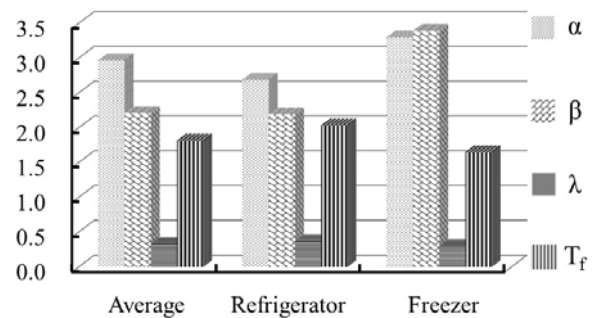
본 연구에서는 성형량이 다른 냉장실과 냉동실에 대하여 각각의 면적 드로잉률, 최대 선형 드로잉률, 평균 두께 감소율 및 성형 후 제품 평균 두께를 산출하여, 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 금형과 제품의 기초 성형성을 고찰하였다. 성형 재료는 Fig. 2(a)와 같은 직사각형 평판 플라스틱 판재로 가정하였다. 진공 열성형 후 최종 제품 형상은 Fig. 2(b)와 같다.

### 2.3 기초 성형성 분석 결과 및 고찰

Fig. 3은 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 금형 및 초기 성형 판재 설계에 대한 기초 성형성 분석 결과이다. 냉장실과 냉동실 각각에 대한 기초 성형성 분석 특성 데이터를 도출한 후, 냉장실과 냉동실에 대한 기초 성형성 분석 특성 데이터 평균값을 산출하여 Fig. 3과 같은 전체 제품에 대한 평균(Average) 기초 성형성 분석 특성 데이터로 나



**Fig. 2** Designed shapes of initial sheet and thermoformed part for an inner case with three cavities



**Fig. 3** Results of fundamental formability analyses

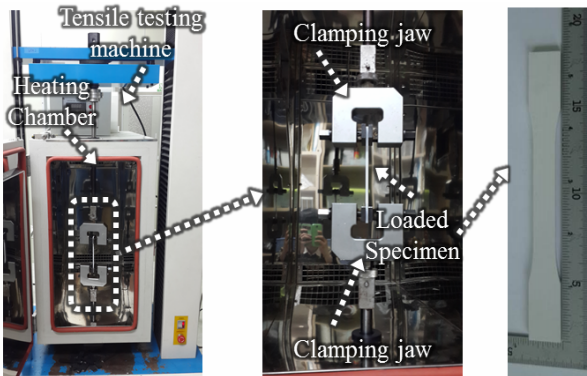
타내었다.

냉장실과 냉동실의 면적 드로잉률 및 전체 제품의 평균 면적 드로잉률은 각각 3.30, 2.97 및 2.69 정도이며, 냉동실의 면적 드로잉률이 냉장실의 면적 드로잉률 보다 123% 정도 크게 나타남을 알 수 있었다. 냉장실과 냉동실의 최대 선형 드로잉률 및 전체 제품의 최대 선형 드로잉률은 각각 2.21, 2.19 및 3.39로서 냉동실의 최대선형 드로잉률이 냉장실의 최대 선형 드로잉률 보다 155% 크게 나타남을 알 수 있었다.

냉장실과 냉동실 및 전체 제품 평균 면적 드로잉률로부터 각각에 대한 평균 두께 감소율을 Fig. 3과 같이 산출하였다. 산출된 평균 두께 감소율로부터 식 (4)를 이용하여 냉장실과 냉동실 및 전체 제품 평균 두께를 예측하였다. 그 결과 Fig. 3과 같이 성형 후 제품 전체 평균 두께는 1.39 mm 수준일 것으로 예측되었다. 냉장실과 냉동실의 성형 후 평균 두께는 각각 2.04 mm 및 1.65 mm로 예측되었다. 이 결과로부터 진공 열성형 후 냉동실에서 현저한 두께 감소가 발생할 것으로 사료되었다. 진공 열성형의 특성상 성형 공정 중 재료의 두께 변화율이 크거나 성형 후 두께가 얇은 곳에서 제품의 뒤틀림, 주름 및 찢어짐 등의 결함이 발생하게 된다. 그러므로 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 진공 열성형 공정 설계 시 냉동실의

**Table 1** Experimental conditions of tensile test at the elevated temperature

Parameter	Experimental range
Ambient temperature (°C)	100 - 160
Tensile speed (mm/min)	50 - 500



**Fig. 4** Experimental set-up of tensile tests at the elevated temperature

성형성에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료되었다.

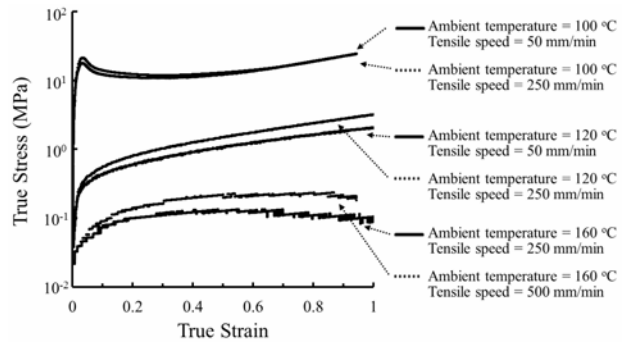
### 3. 성형 재료 고온 물성 및 특성

#### 3.1 고온 인장 시험 방법

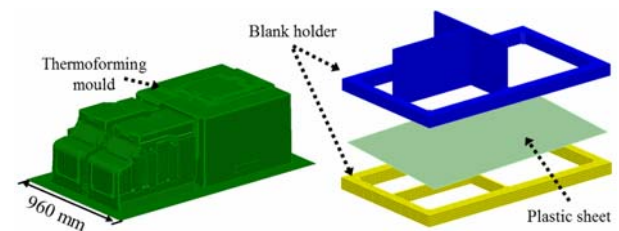
진공 열성형 공정은 플라스틱 판재를 유리 천이 온도 이상으로 가열한 후 성형하는 공정이다.<sup>(3-6,9,11)</sup> 플라스틱 재료가 유리 천이 온도 이상으로 가열될 경우, 재료의 변형 거동은 가열 온도와 인장 속도에 매우 의존적이다.<sup>(1-3)</sup> 그러므로 진공 열성형 공정을 정확하게 모사하기 위해서는 성형 재료의 온도 및 인장속도에 따른 거동을 분석하고, 이 결과를 진공 열성형 해석 모델에 적용하여야 한다.<sup>(6,9,11-14)</sup> 이 연구에서는 성형재료의 온도/인장속도 의존 특성이 고려된 물성데이터를 도출하고 고온 변형 특성을 고찰하기 위하여, 고온 인장 시험을 수행하였다. 진공 열성형 재료는 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)이며, ABS의 유리 천이 온도는 약 100°C이다. 고온 인장 시험은 ASTM D 638의 규격에 따라 수행되었으며, 시험 시편은 ASTM D 638의 Type 1의 규격에 따라 제작되었다. 고온 인장 시험 조건은 Table 1과 같다. Fig. 4는 고온 인장 시험 셋업(Set-up)이다. 고온 인장 시험을 통하여 성형재료의 온도 및 인장속도에 따른 진응력-진변형률 선도를 도출하였다.

#### 3.2 고온 인장 시험 결과 및 고찰

Fig. 5는 고온 인장 시험 결과 도출된 분위기 온



**Fig. 5** True stress-true strain curves for different ambient temperatures and tensile speeds



**Fig. 6** Model of thermoforming analysis

도와 인장 속도별 성형 재료의 진응력-진변형률 선도이다.

Fig. 5에서 분위기 온도가 100 °C 이하인 경우 항복 응력 발생 변형률이 분명하게 나타나며 항복 응력 발생 변형률 보다 크게 변형 시킬 경우 이후 응력 감소 후 다시 응력 증가하는 고체 ABS 특성이 나타남을 알 수 있었다. 그러나 분위기 온도가 ABS 재료의 유리 천이 온도인 100°C를 초과할 경우 항복 응력 발생 변형률이 명확하지 않으며, 대변형 시 지속적으로 응력이 증가하는 현상이 발생하였다. 또한 ABS 재료의 유리 천이 온도인 100°C를 초과할 경우 온도 증가에 따른 응력 감소율이 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. ABS의 유리 천이 온도 이상에서는 분위기 온도가 상승할수록 인장속도에 증가에 따른 응력 증가량이 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. 분위기 온도가 160°C인 경우 인장속도 50 mm/min에서는 응력이 매우 미미하여 시험 장치로 측정이 불가능하였다. 또한 시험을 수행한 변형률 범위에서 분위기 온도가 160°C인 경우 최대 응력이 100 °C일때의 최대 응력에 0.5% 수준으로 크게 감소하는 것을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 성형 높이가 높으며 기하학적 형상이 복잡한 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 성형 하중 감소와 재료 유동성 향상을 위해서는 성형 판재의 초기 온도가 160°C 이상 되도록 가열하여야 함을 알 수 있었다. 또한 제품의

성형성을 향상 시키기 위해서는 제품내 변형률 속도를 가능한 감소 시켜야 함을 알 수 있었다.

고온 인장 시험 결과 도출된 분위기 온도 및 인장속도에 따른 진응력-진변형률 선도를 이용하여 3차원 진공 열성형 해석에 소요되는 G'sell-Jonas 모델의 계수들을 도출하였다.

#### 4. 진공 열성형 해석 및 성형성 분석

##### 4.1 진공 열성형 해석 방법 및 성형 공정 설계

3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 3 차원 진공 열성형 해석을 수행하기 위하여 Fig. 6 과 같은 3 차원 유한요소해석 모델을 도출하였다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 3차원 유한요소해석 모델은 진공 열성형 금형, 성형 판재 상측/하측 홀더(Blank holder) 및 성형 판재로 구성하였다. 진공 열성형 금형면은 삼각형과 사각형 쉘 요소(Shell element)로 격자를 생성하고, 강제 면으로 정의하였다. 진공 열성형 금형의 격자 및 절점 수는 각각 133,736개 및 124,672개이다. 성형 판재 상측/하측 홀더는 사각형 쉘 요소로 격자를 생성하고, 강제 면으로 정의하였다. 성형 판재 상측 홀더의 격자 및 절점 수는 각각 5,412개 및 4,957개이다. 성형 판재 하측 홀더의 격자 및 절점 수는 각각 2,636개 및 2,330개이다. 성형 판재는 사각형 쉘 요소로 표현하였다. 성형 판재의 초기 격자 및 절점 수는 각각 48,183개 및 47,326개이며 H형 격자세분화 기법을 적용하였다.<sup>(15)</sup> 성형 판재의 각 온도 및 변형률 속도별 응력-변형률 선도는 3.1절에서 도출된 계수들이 적용된 G'sell-Jonas 모델로부터 산출 되었다. 외연적 유한요소해석(Explicit finite element analysis) 기법 기반의 상용 해석 소프트웨어인 PAMFORM-2G를 이용하여 3차원 진공 열성형 해석을 수행하였다.

기초 성형성 분석 결과 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상은 전체 평균 면적 드로잉률이 2.69 정도로 성형량이 매우 많을 것으로 예측되었다. 이 결과를 고려하여 해석에 적용된 진공 열성형 공정을 네가지 세부 공정으로 설계하였다. 첫번째 세부공정은 판재를 성형가능 온도까지 가열하는 가열(Heating) 공정으로 설정 하였다. 가열 공정 해석에서는 판재의 성형성을 고려하여 판재의 초기온도를 위치에 따라 160°C~180°C로 설정하였다. 가열 공정 해석에서는 판재에 중력을 적용하여 자중에 의한 판재의 연신이 발생하도록 모델링 하였다. 두번째 세부공정은 판재를 가압하여 판재의 면적을 증가시키는 스트레칭(Stretching) 공정으로

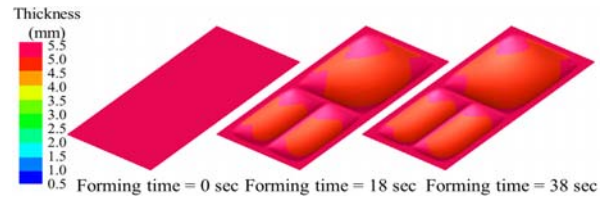


Fig. 7 Thickness distributions for different forming times (Heating process)

설정하였다. 스트레칭 공정에서는 제품 성형중 스탬핑(Stamping) 량을 최소화하기 위하여 가열 후 변형된 판재에 중력 방향에 수직인 방향으로 역 압력을 적용하여 판재를 스트레칭 시킨다. 스트레칭 공정에서는 스트레칭된 판재의 높이가 제품 높이의 60% 이상 성형 되도록 하였다. 이 연구에서는 냉장실과 냉동실별 요구되는 스트레칭 높이를 얻기 위하여 사전 연구에서 도출된 차등 압력을 부가하였다. 세번째 세부공정은 금형을 이송시켜 제품의 전체적인 외관 형상을 생성하는 스탬핑 공정으로 설정하였다. 마지막 세부공정은 진공압력을 판재 표면에 부가하여 최종 제품 형상을 성형하는 진공 성형 공정으로 설정하였다.

##### 4.2 진공 열성형 해석 결과 및 고찰

반복적인 진공 열성형 해석을 통하여 진공 열성형 해석 결과 제품의 두께 감소율을 최소화하기 위해서는 금형과 성형 판재의 접촉이 발생하지 않는 가열 공정과 스트레칭 공정에서 성형 높이가 충분히 확보되어야 함을 알 수 있었다. 또한, 금형과 성형 판재가 접촉이 시작되면 성형 판재에서 금형으로 열전달이 발생하여 성형 판재의 온도가 급속히 감소함을 알 수 있었다.

가열 공정 해석 결과 Fig. 7과 같이 성형 판재의 가열 시간이 증가할수록 제품의 성형 깊이가 증가하는 것을 알 수 있었다. 냉동실의 성형 깊이보다 냉장실의 성형 깊이가 크게 예측되었다. 가열 시간이 38초일 때 자중에 의해 냉장실 및 냉동실의 최대 성형 깊이가 각각 184 mm 및 103 mm로 예측되었다. 그러나 가열 시간이 38초를 초과할 경우 최대 성형 깊이는 거의 증가하지 않으며, 하측 홀더의 모서리 부와 접촉하는 성형 판재의 영역에서 두께가 국부적으로 얇아지는 현상이 발생하였다.

이 결과로부터 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 최대 가열 시간이 38초임을 알 수 있었다. 최대 가열 시간인 38초에서의 성형 판재의 최소 두께는 약 4.8 mm이며, 최소 두께 발생 위치는 각 캐비티 중앙으로 예측되었다.

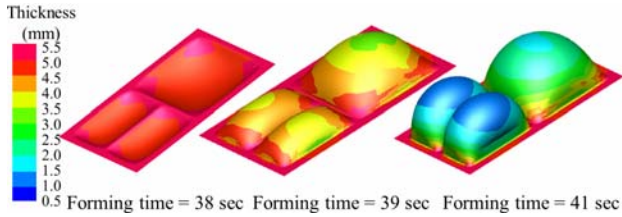


Fig. 8 Thickness distributions for different forming times (Stretching process)

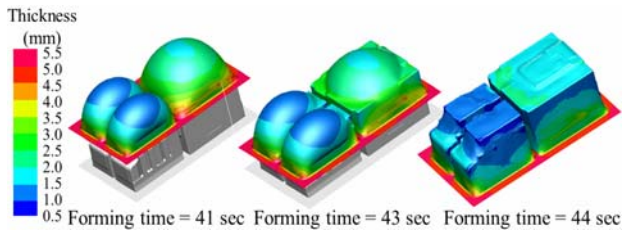


Fig. 9 Thickness distributions for different forming times (Stamping process)

Fig. 8은 스트레칭 공정에 대한 유한요소해석 결과이다. 스트레칭 공정 해석 결과 스트레칭 시간 3초까지는 스트레칭 시간이 증가할수록 스트레칭 높이가 증가하였다. 그러나 스트레칭 시간이 3초를 초과한 경우에는 스트레칭 시간을 증가하여도 성형 판재의 성형 판재의 스트레칭 높이는 거의 증가하지 않았다. 이 결과로부터 적정 스트레칭 시간이 3초임을 알 수 있었다. 이 시간을 가열 시간이 포함된 성형 시간으로 환산할 경우 Fig. 8과 같이 41초로 예측되었다. 스트레칭 시간 3초일 때 냉장실과 냉동실의 스트레칭 높이는 각각 451 mm과 508 mm이었다. 스트레칭 시간 3초인 경우 냉장실과 냉동실의 스트레칭 높이는 각각 제품 최대 높이의 77.3 %와 제품 최대 높이의 87.1 %로 공정 설계에 적용된 요구 최소 스트레칭 높이 기준을 만족하는 것을 알 수 있었다. 또한 적층 스트레칭 시간에서의 냉장실과 냉동실의 최소 두께는 각각 약 1.4 mm와 약 2.5 mm이며, 최소 두께의 발생 위치는 각 캐비티의 중앙부임을 알 수 있었다.

Fig. 9는 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 스탬핑 공정 해석 결과이다. 스탬핑 공정 해석 결과 3초 동안 스탬핑을 수행한 결과 Fig. 9와 같이 제품의 외관 형상이 거의 성형됨을 알 수 있었다. 이 결과로부터 적정 스탬핑 시간을 3초로 선정하였다. 적정 스탬핑 시간을 가열 시간과 스트레칭 시간이 포함된 성형 시간으로 환산할 경우 Fig. 9와 같이 44초로 예측되었다. 적정 스탬핑 시간에서의 냉장실 및 냉동실 영역 최소 판재 두께는 각각 약 1.0 mm 및 약 2.5 mm임을 알 수 있었

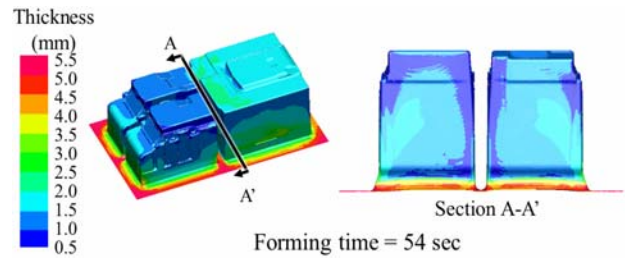


Fig. 10 Thickness distributions for different forming times (Vacuum process)

다. 스탬핑 공정에서는 성형 판재 두께가 가장 얇게 예측되는 영역은 Fig. 9와 같이 스탬핑 공정중 냉장실 및 냉동실 금형과 스트레칭된 판재가 최초로 접촉하는 영역임을 알 수 있었다.

Fig. 10은 네번째 세부 공정인 진공 성형 공정 해석 결과이다. 진공 성형 공정 해석결과 10초 동안 진공 압력이 성형 판재에 부가되었을 때, Fig. 10과 같이 제품의 특징 형상을 포함하는 세부 형상들이 구현됨을 알 수 있었다. 이 결과로부터 적정 진공 성형 시간을 10초로 결정하였다. 적정 진공 성형 시간을 가열 시간, 스트레칭 시간 및 스탬핑 시간이 포함된 성형 시간으로 환산할 경우 Fig. 10과 같이 54초로 예측되었다. 최소 두께는 Fig. 10의 Section A-A'와 같이 냉동실 바닥면 하단부의 언더컷(Undercut) 영역에서 발생함을 알 수 있었다. 냉장실과 냉동실의 최소 제품 두께는 각각 0.9 mm와 1.2 mm로 예측되었다.

일반적인 진공 열성형 제품의 허용 가능 최소 두께가 0.5 mm 내외임을 고려하면, 설계된 진공 열성형 공정을 적용할 경우 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 성형이 가능함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

이 연구에서는 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 진공 열성형 특성 분석/고찰을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 금형의 3차원 모델과 성형 판재 초기 형상 설계 및 최종 제품 형상 설계를 이용하여 냉장고 내상 제품의 기초 성형성을 분석하였다. 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 면적 드로잉률, 최대 선형 드로잉률, 평균 두께 감소율 및 성형 후 제품 평균 두께를 산출하였다. 그 결과 설계된 금형/초기판재/제품형상으로 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 진공 열성형이 가능하며, 진공 열성형

후 냉동실에서 두께 감소가 크게 발생할 것으로 사료되었다.

둘째, 성형 재료에 대한 고온 인장시험을 수행하여 진공 열성형 재료에 대한 분위기 온도와 인장 속도가 고려된 진응력-진변형률 선도 도출하였다. 이 선도를 이용하여 또한 성형 재료의 변형 거동 분석을 통하여 진공 열성형을 위한 성형 관재 초기 온도 범위를 예측할 수 있었으며, 성형 압력 감소를 위해서는 성형중 제품내부의 변형률 속도를 가능한 감소 시켜야 함을 알 수 있었다.

셋째, 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상의 진공 열성형 공정의 세부 공정들을 설계하고 세부 공정들에 적합한 유한요소해석 모델을 개발하였다. 각 세부 공정들에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 제품의 변형 형상 및 두께 분포를 분석하였다. 그 결과 각 세부 공정별 적합 성형 시간을 예측할 수 있었다. 또한 각 세부 공정별 주요 제품 성형 메커니즘과 성형성 향상 방안에 대한 고찰을 할 수 있었다. 최종적으로 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 성형성과 진공 열성형 특성을 고찰할 수 있었다.

실제 대량 생산 공정에 적합한 3개의 캐비티를 가지는 냉장고 내상 제품의 진공 열성형 공정 개발에 대한 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

## 후 기

이 연구는 2015 년도 (주)삼성전자 생활가전사업부의 지원으로 수행된 산학기술개발과제의 결과 중 일부이며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Mark, J. E., 1999, "Polymer Data Handbook," *Oxford University Press, Inc.*
- (2) Throne, J. L., 1996, "Technology of Thermoforming," *Hanser Publisher.*
- (3) Throne, J. L., 2008, "Understanding Thermoforming," *Hanser Publisher.*
- (4) Yoon, S. T. and Park, K., 2015, "Design and Analysis of Shell Runners to Improve Cooling Efficiency in Injection Molding of Subminiature Lens," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 10, pp. 1021~1028.
- (5) Cha, S. W. and Yoon, J. D., 2000, "Change of Glass Transition Temperature of PETG Containing Gas," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 24, No. 4, pp. 824~829.
- (6) Lee, H. J. and Ahn, D. G., 2015, "Manufacturing of a Large-Sized Flat Panel Airlift Photobioreactor (FPA PBR) Case with Characteristic Shapes using a Thermoforming Process," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 12, pp. 5099~5105.
- (7) Warby, M., Whiteman, J., Jiang, W. G., Warwick, P. and Wright, T., 2003, "Finite Element Simulation of Thermoforming Processes for Polymer Sheets," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 61, No. 3, pp. 209~218.
- (8) Wiesche, S., 2004, "Industrial Thermoforming Simulation of Automotive Fuel Tanks," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 16, pp. 2391~2409.
- (9) Ahn, D. G., Ahn, Y. S. and Jung, S. H., 2012, "A Study on the Development of a Thin Flat Panel Photobioreactor Case," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 9, pp. 946~957.
- (10) Wang, C. H. and Nied, H. F., 1999, "Temperature Optimization for Improved Thickness Control in Thermoforming," *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, Vol. 8, No. 2, pp. 113~126.
- (11) Lee, H. J. and Ahn, D. G., 2015, "Methodology of Three-Dimensional Thermoforming Analysis to Simulate Forming Process of Medium and Large-Sized Plastic Parts," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, No. 11, pp. 953~960.
- (12) G'sell, C. and Jonas, J. J., 1979, "Determination of the Plastic Behavior of Solid Polymers at Constant True Strain Rate," *Journal of Material Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 583~591.
- (13) G'sell, C., Aly-Helal, N. A. and Jonas, J. J., 1983, "Effect of Stress Triaxiality on Neck Propagation During the Tensile Stretching of Solid Polymers," *Journal of Material Science*, Vol. 18, No. 6, pp. 1731~1742.
- (14) Kim, G., Lee, K. and Kang, S., 2009, "Prediction of the Film Thickness Distribution and Pattern Change During Film Insert Thermoforming," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 49, No. 11, pp. 2195~2203.
- (15) Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. and Witt, R. J., 2002, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis-4<sup>th</sup> Edition," *Wiley*, pp. 318~319.