

열진공성형에서 적층필름 두께변화에 대한 수치 및 실험적 해석

이호상[#] · 유영길¹

Numerical and Experimental Analysis of Laminated-Film Thickness Variation in Vacuum-Assisted Thermoforming

H. S. Lee, Y. G. Yoo

(Received April 8, 2013 / Revised May 21, 2013 / Accepted May 23, 2013)

Abstract

Vacuum-assisted thermoforming is one of the critical steps for successful application of film insert molding (FIM) to make parts of complex shape. If the thickness distribution of the formed film is non-uniform, then cracking, deformation, warpage, and wrinkling can easily occur at the injection molding stage. In this study, the simulation of thermoforming was performed to predict the film thickness distribution, and the results were compared with experiments. Uniaxial tensile tests with a constant crosshead speed for various high temperatures were conducted to investigate the stress-strain behavior. An instance of yielding occurred at the film temperature of 90°C, and the film stiffness increased with increasing crosshead speed. Two types of viscoelastic models, G'Sell model, K-BKZ model, were used to describe the measured stress-strain relationship. The predicted film thickness distributions were in good agreement with the experimental results.

Key Words : Laminated Film, Vacuum, Thermoforming, Thickness, G'Sell Model, K-BKZ Model

1. 서론

최근 종래의 IMD(In-Mold Decoration) 방법을 더욱 발전시켜 인쇄된 필름을 미리 원하는 형상으로 성형하고 금형에 삽입한 후 사출성형 공정을 적용하여, 플라스틱 제품과 필름을 일체화하는 필름인서트성형(Film Insert Molding) 공법이 새로운 플라스틱 장식기술로 각광을 받고 있다. 특히, 필름인서트성형은 사전에 인쇄된 인서트 필름을 사용하기 때문에 패턴 형상 및 색상의 유지가 용이하고 유기화합물이 배출되지 않는 친환경 성형 공법이라는 장점을 갖고 있다.

필름인서트성형에서는 인쇄된 필름을 진공성형기에 투입하고, 필름을 유리전이온도 이상으로

가열한 상태에서 진공을 작용시켜 제품형상으로 열성형하는 것이 일차적인 공정이다. 열진공성형 공정에서 플라스틱 필름은 연화온도 이상으로 가열되고, 직하중 또는 압력차이에 의하여 금형 표면을 따라 늘어나게 되며, 이때 국부적으로 필름의 터짐, 주름 등의 다양한 불량 발생하게 된다. 뿐만 아니라 열진공성형 과정에서 연신된 필름의 두께가 불균일하여 얇아진 부위에서는 사출성형 공정에서 수지의 높은 압력 및 유동속도에 의한 전단력으로 인하여 필름이 찢어지거나 주름이 발생하는 문제가 나타날 수 있다. 특히, 사용하는 수지의 점도가 높고 유동성이 나빠거나, 성형품의 두께가 얇고 대형 제품인 경우 사출성형 공정에서 발생하는 압력이 더욱 커지게

1. 한국교통대학교 대학원 항공기계설계학과
Corresponding author : Dept. Aeronautical & Mechanical Design Eng.,
Korea Nat'l Univ. Transportation, E-mail: lhs@ut.ac.kr

되어 필름의 두께 불균일은 심각한 불량률의 원인이 된다.

필름인서트 성형에 사용되는 필름은 표면에 패턴이 인쇄되고, 보호/접합 등에 필요한 화학층으로 코팅 처리되기 때문에 필름의 패턴 재현성, 두께 균일도 등은 열진공성형 공정조건에 더욱 민감하다.

열진공성형에서 발생하는 필름의 두께 및 치수변화에 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다 [1~9]. Poller 등[3]은 플러그 적용 열성형에서 플러그와 필름온도가 두께분포에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다. Aroujalian 등[4]은 필름온도, 플러그속도, 플러그온도 등 공정조건이 플러그 적용 열성형 용기에서의 두께분포에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, 플러그 속도와 플러그 온도가 필름두께 분포에 미치는 영향이 크고 필름 온도는 별 영향이 없음을 보고하였다. Chen 등[5]은 컵 형상의 제품에 대한 플러그 적용 열성형 실험을 통하여 금형온도, 필름가열온도, 플러그 깊이, 플러그 속도, 다단 성형 등의 공정조건이 패턴변화와 두께분포에 미치는 영향을 연구하였다.

한편 단층필름을 사용한 기존 대부분의 연구와는 달리 Kim[6]은 적층필름을 사용하였다. 여기서 단축인장실험을 통해 응력-변형을 관계를 도출하고, PAM-FORM 을 사용하여 두께 및 패턴변화를 예측하였으며, 실험결과와 비교하였다. Lee 등[7, 8]은 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 시트에 대하여 유변학적인 물성 및 마찰계수를 측정하고, K-BKZ 점탄성 모델을 사용하여 열성형 공정을 해석하였다. 특히, 물성 및 공정조건이 시트의 거품형상 및 두께변화에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 본 연구진[9]에서는 열진공성형 공정에서 필름가열시간, 플러그 깊이 및 속도, 진공지연시간 등이 적층필름의 두께분포에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

본 논문에서는 필름인서트 성형을 위하여 제조된 ABS 적층필름을 대상으로 단축인장실험을 통해 온도와 연신속도에 따른 응력 및 변형율을 측정하고, G'Sell[10~12] 및 K-BKZ[13] 점탄성 모델 각각에 대한 물성 파라미터를 계산하였다. 자동차용 도어 그립 커버에 대한 열진공성형 해석을 통하여 필름의 두께변화를 예측하였으며, 또한 진공금형 개발 및 열진공성형 실험을 수행하고, 해석결과와 비교하였다.

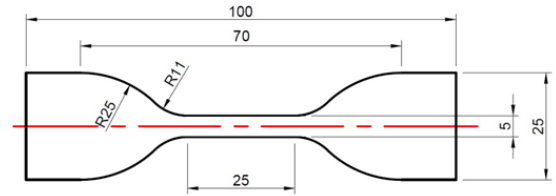


Fig. 1 Specimen for uniaxial tensile tests

2. 필름 물성 측정

독일의 Kurz에서 제조한 두께 0.5mm의 적층필름(ALUFIN®)을 사용하였으며, 필름은 ABS를 베이스로 하고 그 위에 장식층과 PUR(Polyurethane) 코팅층으로 구성되어 있다. 적층필름에 대하여 온도와 연신속도의 변화에 따른 응력과 변형 거동을 각각 측정하였다. 이때 필름의 신장률이 매우 크고, 실험용 가열챔버의 크기가 제한되어 있기 때문에, 단축인장시험을 위하여 표점거리 및 시험편 전체길이가 축소된 Fig. 1과 같이 KS M 6518모델을 축소한 시험편을 사용하였다.

시험편을 가열챔버 내부의 고정척에 장착한 이후 20분 동안 목표 온도로 가열/유지 시킨 후에 단축 인장시험을 수행하였다. 실험에 사용된 장비는 Korea-Tech사에서 제작한 인장시험기(K&T-50TC)로서 가열챔버를 구비하고 있으며, AC 서보 모터를 사용하여 1~600mm/min 범위에서 크로스헤드(Crosshead)의 속도를 가변시킬 수 있도록 하였다.

가열챔버 안에서 필름의 온도를 각각 90, 110, 130, 150℃로 유지하였으며, 크로스헤드의 속도가 50, 250, 500mm/min인 경우에 대하여 각각 하중(P)과 변위(δ)관계를 측정하였다.

하중과 변위 곡선으로부터 식(1)과 식(2)를 사용하여 진응력(σ_t , true stress)과 진변형율(ϵ_t , true strain)관계로 변환하였다.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \epsilon_e) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

여기서 $\sigma_e = P/A_0$, $\epsilon_e = \delta/L_0$ 이며, A_0 와 L_0 는 연신이 발생하기 전 필름의 단면적과 길이를 각각 나타낸다.

Fig. 2는 하중과 변위 측정결과로부터 변환된 진응력과 진변형율을 나타낸다. 필름온도 90℃에서는 뚜렷한 항복응력이 나타나고 있으며, ABS의 유리전이온도인 110℃ 이상에서는 항복 거동이 발

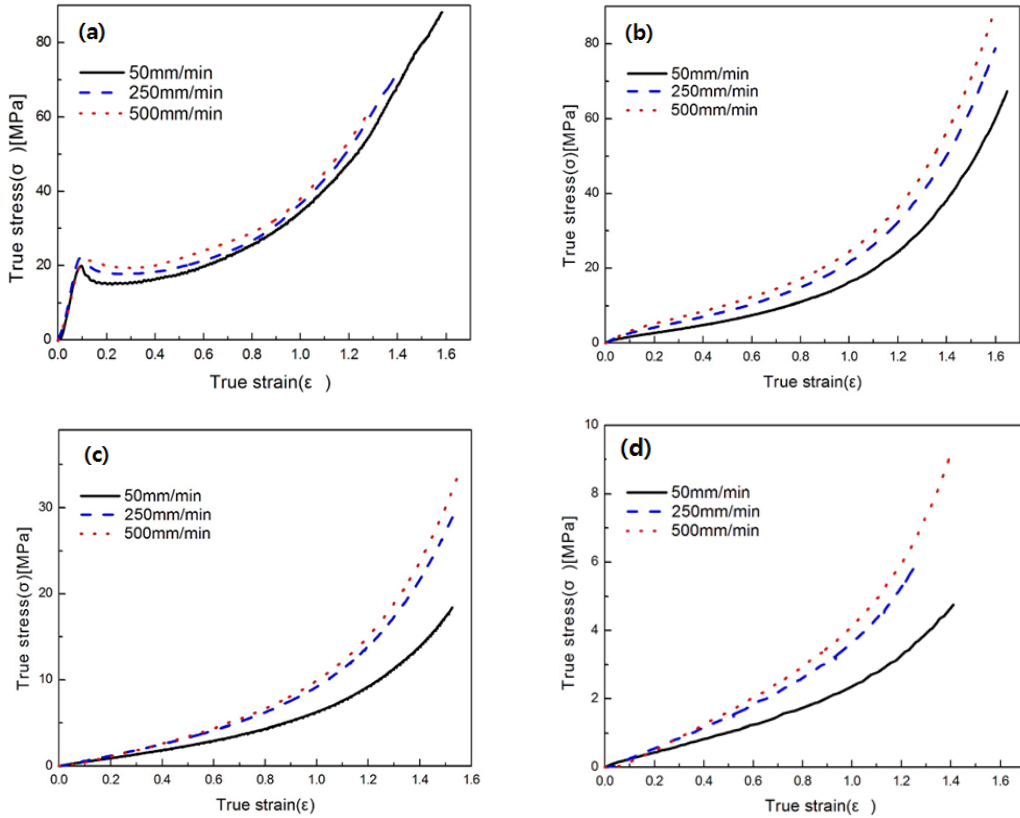


Fig. 2 The results of tensile tests with various crosshead velocities at the film temperature of (a) 90°C, (b) 110°C, (c) 130°C, (d) 150°C

생하지 않고 있음을 볼 수 있다. 또한 온도가 증가함에 따라 낮은 응력에서 변형율이 크게 발생하고 있으며, 필름온도가 낮은 90°C에서는 연신속도에 따라 응력-변형율 곡선의 변화가 작지만, 온도가 증가할수록 연신속도의 영향이 크게 나타남을 볼 수 있다. 특히 연신속도가 빠를수록 응력곡선이 높게 나타나고 있으며, 결과적으로 연신속도에 따라서 필름의 강성이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 거동은 필름의 점탄성 특성에서 기인한 것으로 판단된다.

3. 점탄성 모델

본 논문에서는 열진공성형 공정에서 적층필름의 변형거동을 해석하기 위하여 열성형 해석 전용으로 개발되어 있는 T-SIM[14]을 사용하였다. T-SIM은 K-BKZ 비선형 점탄성 모델을 사용하고 있으며, 이는 변형율 속도를 일정하게 제어하는 조

건에서 만들어진 구성방정식이다. 그러나 두께가 얇고 가열 시에 뒤틀림이 발생하는 필름의 경우에는 단축 인장시험에서 단면 변화량을 정확하게 측정하기 어렵기 때문에 변형율 속도를 일정하게 제어한 상태에서 인장시험을 수행하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 참고문헌[6]에서 제안한 변형된 G'Sell 모델식을 사용하여 일정한 크로스헤드 속도조건에서 측정한 인장시험 결과를 기반으로 물성 파라미터를 구하고, 이를 다시 일정한 변형율 속도로 표현된 원래의 G'Sell 모델에 대입하였다. 그리고 G'Sell 모델로부터 변형율 속도가 각각 0.1, 0.5, 1.0 s⁻¹인 경우에 대하여 응력-변형율 곡선을 계산하고, 이를 적용하여 K-BKZ 점탄성모델에 대한 물성 파라미터를 도출하였다.

3.1 G'Sell 모델

G'Sell 모델은 Maxwell 모델 형태에 등방성 비선형 점탄성 특성으로 정의되며, 식 (3)과 같이 표현

Table 1 G'Sell parameters of ABS film

Parameter	90°C	110°C	130°C	150°C
k	20.1091	16.1540	22.7974	6.9275
w	14.5950	2.2636	0.4313	0.6986
m	0.0626	0.1908	0.2031	0.2137
h	0.7660	0.9147	0.6578	0.5741

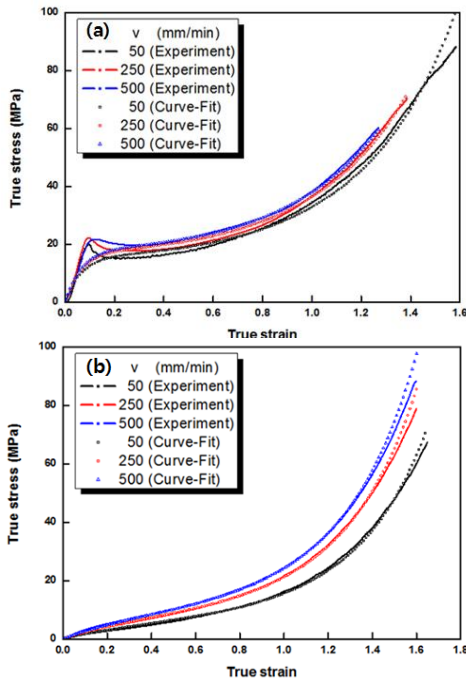


Fig. 3 Comparison of theoretical and experimental curves at film temperatures of (a) 90°C, (b) 110°C

된다[10~12].

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = k[1 - \exp(-w\varepsilon)] \exp(h\varepsilon^2) (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)^m \quad (3)$$

여기서 k 는 비례상수이고, $[1 - \exp(-w\varepsilon)]$ 는 $\sigma - \varepsilon$ 선도의 초기영역인 점탄성 구간을 나타낸 것이며, $\exp(h\varepsilon^2)$ 은 가공경화 효과를 고려한 것이다. 그리고 $(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)^m$ 은 변형률 속도 민감도를 나타내며, $\dot{\varepsilon}_0$ 는 초기 변형률 속도이며 일반적으로 $1 s^{-1}$ 로 둔다[6].

식(3)은 일정한 변형률 속도($\dot{\varepsilon}$)를 제어하는 조건에서 만들어진 구성방정식이다. 한편 변형률 속

도 대신 크로스헤드 속도를 적용한 변형된 G'Sell 모델은 식(4)와 같다[6].

$$\sigma = k[1 - \exp(-w\varepsilon)] \exp(h\varepsilon^2) \left(\frac{v}{l_0 \cdot \exp(\varepsilon)} \right)^m \quad (4)$$

변형된 G'Sell 모델은 일정한 크로스헤드 속도 (v)를 적용하여 측정된 응력-변형률 데이터를 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이 모델에서 파라미터 k, w, h 는 기존의 G'Sell 모델과 유사한 거동을 나타내고, 파라미터 m 은 크로스헤드 속도와 변형률 민감도를 나타낸다. 온도 및 속도별 단축 인장실험 결과를 기초로 Simplex 알고리즘을 사용하여 G'Sell 파라미터인 k, w, m, h 를 계산하였으며, 결과는 Table 1과 같다.

Fig. 3은 계산된 파라미터들로부터 얻어진 응력과 실제 측정 데이터를 비교한 그래프이다. 필름 온도가 90°C 일 때 나타나는 항복현상을 G'Sell 모델로 표현하기에는 한계가 있으나, 열성형이 이루어지는 필름 온도 110°C 이상에서는 G'Sell 모델이 ABS 필름의 응력과 변형거동을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 인장실험에서 변형률 속도를 일정하게 유지하기 어렵지만, 변형된 G'Sell 모델을 적용할 경우 일정한 크로스헤드 속도에 의한 실험으로 점탄성 특성을 적절하게 표현할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 K-BKZ 모델

K-BKZ 적분형 점탄성모델은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다[13].

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{I}} + \int_{-\infty}^t \mu(t-t') h(I_1, I_2) \underline{\underline{B}}(t-t') dt' \quad (5)$$

여기서 $\underline{\underline{\sigma}}$ 는 시간 t 에서의 응력텐서, p 는 압력, $\underline{\underline{I}}$ 는 unit 텐서, $\mu(t-t')$ 는 시간 메모리함수, $h(I_1, I_2)$ 는 감쇄함수, $\underline{\underline{B}}(t-t')$ 는 Finger 변형률 텐서, 그리고 I_1, I_2 는 각각 Finger 변형률 텐서의 1차 및 2차 invariant이다.

시간 메모리함수 $\mu(t-t')$ 는 Lodge 네트워크 모델을 사용하여 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\mu(t-t') = \sum_{i=1}^N \frac{G_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_i}\right) \quad (6)$$

여기서 G_i 는 응력이완계수, τ_i 는 이완시간을 나

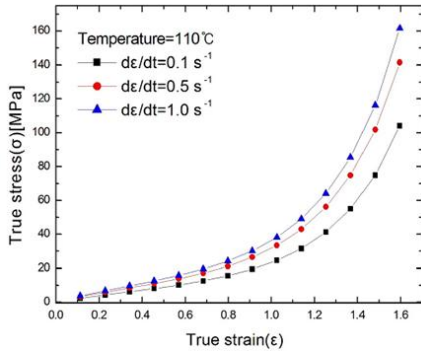


Fig. 4 True stress vs. true strain under various strain rates

Table 2 Relaxation spectrum

Parameters	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
τ_i (s)	100	10	1	0.1	0.01	0.001
G_i (MPa)	0.163	0.503	0.746	0.662	0.269	0.186

타낸다.

또한 감쇄함수 $h(I_1, I_2)$ 는 Wagner 모델[15]을 사용하여 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{\exp(\beta \sqrt{\alpha I_1 + (1-\alpha)I_2 - 3})} \quad (7)$$

여기서 α 와 β 는 조절인자이다.

열성형공정에서 온도에 따른 유변학적인 거동을 표현하기 위하여 WLF 표현식을 사용하였다. K-BKZ 비선형 점탄성 모델에 대한 물성 파라미터를 구하기 위하여, G'Sell의 변형 모델에서 얻은 Table 1의 파라미터 k, w, m, h 를 일정한 변형률 속도를 제어하는 조건으로 표현된 식(3)에 대입하였다. 그리고 필름온도 110, 130, 150°C인 각각의 경우에 대하여 변형률 속도가 0.1, 0.5, 1.0 s⁻¹일 때 응력 및 변형률을 계산하였다.

Fig. 4는 대표적으로 필름온도 110°C인 경우에 대한 응력-변형률 관계를 나타낸다. 3가지 조건의 변형률 속도에 대하여 계산된 응력-변형률 데이터를 적용하고, T-SIM과 연계된 프로그램인 T-SIMFIT[14]를 사용하여 K-BKZ 점탄성 모델에 대한 물성 파라미터를 계산하였다. Table 2는 K-BKZ 적분형 점탄성모델에서 정의된 이완시간과 응력 이완계수를 도출한 결과를 나타낸다.

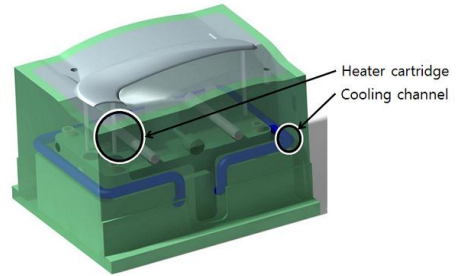


Fig. 5 3D shape of a vacuum mold

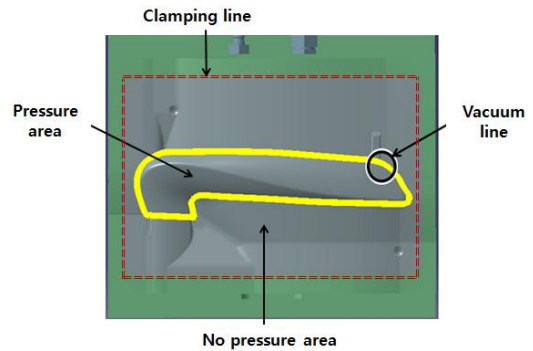


Fig. 6 Schematic of geometry and boundary conditions

4. 해석 및 실험

4.1 해석조건

자동차 내장 도어용 그림 커버에 대하여 T-SIM을 사용한 열진공성형 해석을 수행하였다. 진공금형은 Fig. 5와 같이 히터카트리지와 냉각채널을 갖는 양각 금형으로 설계하였으며, 28,514개의 삼각형 요소를 갖는 메쉬를 생성하였다. Fig. 6은 해석에 적용된 모델과 경계조건을 나타낸다. 필름의 가장자리에 고정 경계조건을 적용하였고, 진공채널이 설치된 라인 밖의 영역에서는 압력이 발생하지 않도록 경계조건을 설정하였다.

해석을 위하여 초기 필름온도 188°C, 금형온도 50°C, 진공압력 10KPa, 필름과 금형사이의 스트로크 360mm, 금형 이동속도 300mm/sec을 적용하였으며, 마찰계수는 0.6으로 가정하였다. 또한 필름의 점탄성을 고려하기 위하여 Table 2의 물성 값을 사용하였다.

4.2 해석결과

Fig. 7은 열진공성형 해석에 의한 성형 후의 필름 두께 분포를 나타낸다. 필름이 가장 두꺼운 부분은 양각금형의 가장 높게 돌출된 부분이며, 금

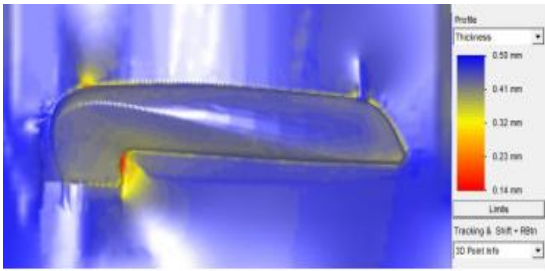


Fig. 7 Film thickness distribution



Fig. 8 Actual vacuum mold

형과 필름이 가장 먼저 접촉하여 상대적으로 저온인 금형에 의하여 급속냉각이 발생하는 부위와 일치한다. 한편 두께가 가장 얇은 부분은 코너부위로서 필름의 연신이 가장 많이 일어나는 부위이다. 결국 열진공성형 공정에서 필름이 금형과 늦게 접촉할수록 두께가 얇아짐을 알 수 있다. 그 이유는 필름이 금형과 늦게 접촉할수록 상대적으로 높은 온도를 유지하기 때문에 유동저항이 작으며, 진공에 의한 연신량이 증가하기 때문으로 판단된다.

4.3 실험 및 해석결과 비교

해석 모델과 동일한 자동차 도어 그림 커버에 대하여 열진공성형 실험을 수행하였다. 이를 위하여 2개의 가로형 히터와 성형품의 끝단 및 연신이 깊은 부분에 3개의 세로형 히터가 설치된 진공공형을 제작하였으며, Fig. 8과 같다.

신호산업(주)에서 제작하고 150mm깊이까지 성형 가능한 진공성형기(400mm×400mm)를 사용하였으며, 필름을 베이스 플레이트 위에 위치시키고 스파이크(spike)를 사용하여 필름을 고정할 수 있도록 클램핑 지그를 제작하였다. 그리고 앞에서 언급된 해석과 동일한 조건을 유지한 상태에서 성형실험을 수행하였다.

실험과 해석을 비교하기 위하여 Fig. 9와 같이 11개 지점을 두께 측정 위치로 선정하였다. 각각의 지점에 대해 해석에 의한 필름두께와 마이크로미터를 사용하여 측정한 실험값은 Table 3과 같다. 해석과 실험의 최대 차이는 0.038mm이며, 실험결과 대비 해석의 오차는 약8%로 나타났다. 해석과 실제 성형품의 측정값 모두 동일한 위치인 1번 지점에서 최소값을 갖고 있음을 볼 수 있으며, 전체적으로 해석결과는 실험과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

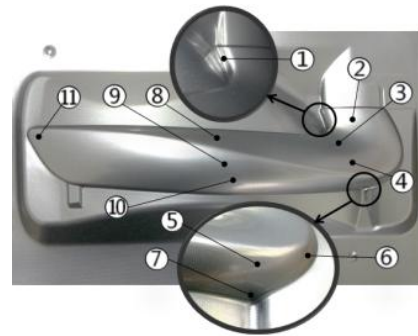


Fig. 9 Locations of film thickness measurement

Table 3 Comparison of experiment and simulation

No.	Experiment (mm)	Simulation (mm)	Difference (mm)	Error (%)
1	0.21	0.215	-0.005	2.38
2	0.39	0.416	-0.026	6.67
3	0.42	0.415	0.005	-1.19
4	0.42	0.440	-0.020	4.76
5	0.42	0.434	-0.014	3.33
6	0.49	0.465	0.025	-5.10
7	0.34	0.365	-0.025	7.35
8	0.42	0.430	-0.010	2.38
9	0.48	0.476	0.004	-0.83
10	0.48	0.460	0.020	-4.17
11	0.47	0.432	0.038	-8.09

5. 결론

ABS 적층필름에 대하여 온도와 연신속도의 변화에 따른 단축인장실험을 수행하고, G'Sell 및 K-BKZ 점탄성 모델을 적용한 응력-변형을 관계를 도출하였다. 자동차용 도어 그림커버에 대한 열진공성형 해석을 수행하고 실험과 비교하였으며, 이

를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 필름온도 90℃에서는 뚜렷한 항복응력이 나타났으며, 필름온도가 증가할수록 연신속도의 영향이 크게 나타났다. 특히, 연신속도가 빠를수록 응력곡선이 높게 나타났으며, 필름 강성이 증가하는 점탄성 거동을 관찰할 수 있었다.

(2) G'Sell 모델은 필름의 항복거동을 표현하기에는 한계가 있었으나, 열성형이 이루어지는 필름온도 110℃이상에서는 측정결과를 정확하게 표현하고 있음을 알 수 있었다.

(3) K-BKZ 점탄성 모델에 따른 응력-변형율을 도출하고, 열성형해석을 수행하였으며, 열진공성형 실험을 통해 해석결과와 비교하였다. 실험 대비 해석의 오차는 약 8%로 나타났으며, 해석에 의한 필름 두께분포는 실험에 의한 측정결과와 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(한국연구재단-2012-0004698)과, 중소기업청 기술혁신개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] E. Gimenez, J. M. Lagaron, L. Cabedo, R. Gavara, J. J. Saura, 2004, Study of the Thermoformability of Ethylene-vinyl Alcohol Copolymer Based Barrier Blends of Interest in Food Packaging Applications, *J. Appl. Poly. Sci.*, Vol. 96, No. 6, pp. 3851~3855.
- [2] E. Gimenez, J. M. Lagaron, M. L. Maspocho, L. Cabedo, J. J. Saura, 2004, Uniaxial Tensile Behavior and Thermoforming Characteristics of High Barrier EVOH-Based Blends of Interest in Food Packaging, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 44, No. 3, pp. 598~608.
- [3] S. Poller, W. Michaeli, 1992, Film Temperatures Determine the Wall Thickness of Thermoformed Parts, *SPE ANTEC*, Vol. 38, No. 1, pp. 104~108.
- [4] A. Aroujallan, M. O. Ngadi, J. P. Emond, 1997, Wall Thickness Distribution in Plug-assist Vacuum Formed Strawberry Containers, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 37, No. 1, pp. 178~182.
- [5] S. C. Chen, S. T. Huang, M. C. Lin, R. D. Chien, 2008, Study on the Thermoforming of PC Films Used for In-Mold Decoration, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 8, pp. 967~973.
- [6] G. Kim, K. Lee, S. Kang, 2009, Prediction of the Film Thickness Distribution and Pattern Change during Film Insert Thermoforming, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 49, No. 11, pp. 2195~2203.
- [7] J. K. Lee, T. L. Virkler, C. E. Scott, 2001, Effects of Rheological Properties and Processing Parameters on ABS Thermoforming, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 41, No. 2, pp. 240~261.
- [8] J. K. Lee, T. L. Virkler, C. E. Scott, 2001, Influence of Initial Sheet Temperature on ABS Thermoforming, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1830~1844.
- [9] Y. G. Yoo, H. S. Lee, 2011, Effects of Processing Conditions on Thickness Distribution for a Laminated Film during Vacuum-Assisted Thermoforming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 3, pp. 250~256.
- [10] C. G'Sell, J. J. Jonas, 1979, Determination of the Plastic Behaviour of Solid Polymers at Constant True Strain Rate, *J. Mater. Sci.*, Vol. 14, No. 3, pp. 583~591.
- [11] C. G'Sell, N. A. Aly-Helal, J. J. Jonas, 1983, Effect of Stress Triaxiality on Neck Propagation during the Tensile Stretching of Solid Polymers, *J. Mater. Sci.*, Vol. 18, No. 6, pp. 1731~1742.
- [12] C. G'Sell, N. A. Aly-Helal, S. L. Semiatin, J. J. Jonas, 1992, Influence of Deformation Defects on the Development of Strain Gradients during the Tensile Deformation of Polyethylene, *Polym.*, Vol. 33, No. 6, pp. 1244~1254.
- [13] B. Bernstein, E. A. Kearsley, L. J. Zapas, 1965, A Study of Stress Relaxation with Finite Strain, *Rubber Chem. Technol.*, Vol. 38, No. 1, pp. 76~89.
- [14] Acuuform, 2005, Computer Simulations of Transforming and Blowing Molding, <http://www.t-sim.com/index.html>.
- [15] M. H. Wagner, 1976, Analysis of Time-Dependent Non-Linear Stress-Growth Data for Shear and Elongational Flow of a Low-Density Branched Polyethylene Melt, *Rheol. Acta.*, Vol. 15, No. 2, pp. 136~142.