

열진공성형에서 발생하는 필름의 두께 분포와 패턴 변형에 관한 연구

성겸손¹ · 이호상[†]

한국교통대학교 항공기계설계학과^{1,†}

A study on the thickness distribution and pattern deformation of films in vacuum-assisted thermoforming

Gyeom-Son Seong¹ · Ho-Sang Lee[†]

Dep. of Aeronautical & Mechanical Design Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation^{1,†}
(Received May 18, 2018 / Revised July 24, 2018 / Accepted August 01, 2018)

Abstract: Vacuum-assisted thermoforming is one of the critical steps for successful application of film insert molding(FIM) to parts of complex shape. In this study, the simulations and experiments of thermoforming processes were performed to investigate the effects of process conditions on thickness distribution and printed pattern deformation of films in vacuum-assisted thermoforming. The film thickness uniformity increased with decreasing film heating time, whereas it increased with increasing vacuum delay time. After thermoforming of films with uniform pattern space of 5mm, the maximum space was 9.432mm. Based on the simulation, a modified pattern was calculated to obtain uniform spaces after thermoforming. In the experiments for film with the modified pattern, the maximum space appeared 5.837mm. In, addition, the predicted patterns were in good agreement with the experimental results.

Key Words: Film insert molding, Patterns, Thermoforming, Thickness distribution, Vacuum

1. 서 론

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. 필름 인서트 성형은 사전에 인쇄된 필름을 사용하기 때문에 패턴 형상 및 색상의 선택이 자유로우며, 유기화합물이 배출되지 않는 친환경 성형 공법이라는 장점을 가지고 있다.

필름 인서트 성형에서는 플라스틱 필름을 유리전이온도 이상으로 가열한 상태에서 진공 압력을 작용하여 금형 표면을 따라 성형하는 것이 일차적

인 공정이다. 그러나 성형된 필름의 두께가 얇은 부분에서는 사출성형 공정에서 수지의 높은 온도와 압력에 의해 필름이 터지거나 주름이 발생할 수 있다. 또한 필름을 3차원 곡면형상으로 열성형하는 과정에서 필름에 인쇄된 패턴이 심하게 왜곡되어 본래의 디자인 또는 기능이 손상되는 문제점을 안고 있다.

그동안 열진공성형에서 공정조건이 필름의 두께 분포, 패턴 변형 등에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다¹⁻⁹⁾. Pollar^등³⁾은 플러그 적용 열성형에서 플러그와 필름 온도가 두께 분포에 가장 큰 영향을 미치는 것을 보고하였다. Lee^등⁴⁻⁵⁾은 컵 형상의 제품에 대한 플러그 적용 열진공성형 실험을 통하여 필름 가열시간, 플러그 깊이, 플러그의 속도, 진공 지연시간 등 공정조건이 두께 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 적층필름에 대한 인장실험을 통해 응력과 변형률 관계를 도출하고 점탄성을 고려한 해석과 실험을 수행하였다. 또한

1. 한국교통대학교 항공기계설계학과
† 교신저자 : 한국교통대학교 항공기계설계학과
E-mail: lhs@ut.ac.kr

Kim⁶⁾은 열진공성형시 단축 인장 실험데이터를 사용한 해석을 수행하고, 해석과 실험의 비교와 함께 필름의 두께 및 패턴 변화를 고찰하였다. Lee⁷⁾은 필름 온도에 따른 마찰계수를 측정하였으며, 유변학적 특성 및 마찰계수가 열성형에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 발표하였다.

그동안 열진공성형에 관한 연구는 플러그 또는 양각금형의 이동에 따른 성형에 대하여 주로 이루어졌다. 그리고 필름을 3차원 곡면형상으로 열성형하는 과정에서 필름에 인쇄된 패턴이 심하게 왜곡되는 문제에 대한 해결 방안은 아직까지 미진하다. 따라서 본 논문에서는 음각 금형에 대하여 열진공성형 공정조건이 필름의 두께변화에 미치는 영향을 고찰하였으며, 열진공성형 이후 균일한 인쇄 패턴을 구현할 수 있는 방안을 모색하기 위한 해석과 실험적인 연구를 수행하였다.

2. 두께분포

2.1. 해석조건

열진공성형 해석과 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 대칭 구조이며, 깊이가 50.55 mm인 음각 금형을 적용 대상으로 하였다. 그리고 실험을 위하여 SEOJIN에서 제작한 열진공성형기를 사용하였으며, 클램핑을 위한 필름 크기는 600 x 780 mm로 고정하였다. 열진공성형 해석을 위하여 T-SIM¹⁰⁾을 사용하였으며, 필름 가열시간과 진공 지연시간을 변화시키며 해석을 수행하였다. 이때 해석에 사용된 요소수는 27,008개이며, 해석조건은 Table 1과 같다. 해석을 위한 경계조건으로 필름의 가장자리를 따라 변위를 고정하였으며, 다른 영역에는 진공압력을 설정하였다.

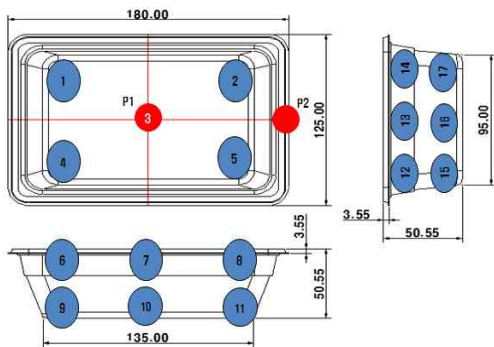


Fig. 1 Schematics of model(the numbers denote measurement positions for pattern spaces)

Table 1 Analysis conditions

Parameters		Conditions
Film	Material	PP
	Thickness	0.4 mm
	Heat transfer coefficient	238 W/m ² K
Mold	Temperature	25 °C
Ambient air	Heat transfer coefficient	0.175 W/m ² K

해석에 필요한 초기 필름온도를 파악하기 위하여 열화상카메라(E50, FLIR, Sweden)를 이용하여 필름의 온도 변화를 측정하였다. Fig. 2는 필름 가열시간 및 진공 지연시간에 따른 필름 표면 온도의 변화를 측정한 결과를 나타낸다. 필름 가열시간이 증가함에 따라 필름의 온도는 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 필름을 가열시키는 열선의 최고 온도가 150°C이기 때문에 13초 이상에서는 필름 온도가 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났다. 한편 진공 지연시간에 따른 필름의 온도 변화는 초기 필름의 온도 150°C에서부터 시간이 지남에 따라 대류 열전달에 의해 온도가 감소하고 있음을 알 수 있다.

해석에서는 미성형이 발생하지 않도록 필름의 최소 온도를 120°C이상으로 유지하는 것이 필요하였다. 따라서 필름 가열시간을 10, 11, 12, 13초로 설정하였으며, 각각에 대한 필름의 온도는 133, 138, 143, 150°C를 해석에 적용하였다. 또한 진공 지연시간은 1, 2, 3, 4초로 설정하였으며, 각각에 대한 필름 온도는 145, 137, 131, 127°C를 해석에 적용하였다.

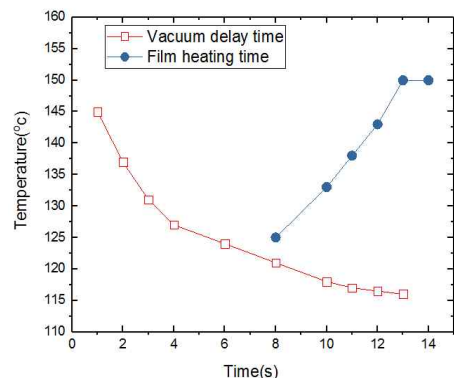


Fig. 2 Film temperature traces under various heating time and vacuum delay time

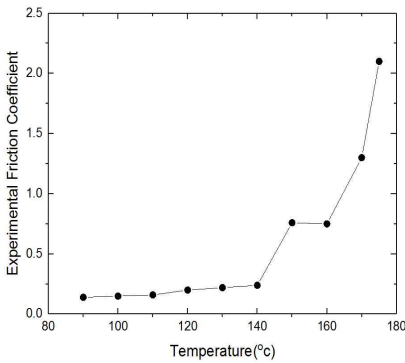


Fig. 3 Friction coefficient vs. temperature⁷⁾

필름 온도가 변함에 따라 금형과 필름사이의 마찰계수도 달라지게 된다⁷⁾. 이를 고려하기 위하여 Fig. 3에서 도시된 바와 같이 참고문헌⁷⁾의 결과를 사용하였다. 해석에 의한 두께분포와 실험 결과를 비교하기 위하여 Fig. 1에서 표시된 P1에서 P2사이를 균일한 간격으로 나눠 13개 지점에서의 두께를 측정하였다. 이를 위하여 공구현미경(STV-V-1020, SOMETECH, Korea)을 사용하였다.

2.2. 해석 및 실험 결과

2.2.1. 필름 가열시간

Fig. 4는 열진공성형 해석에 의하여 두께분포를 예측한 결과를 나타낸다. 성형 과정에서 필름과 금형이 가장 먼저 접촉하게 되는 음각금형의 바닥면과 금형 테두리 부분은 필름의 연신이 거의 발생하지 않기 때문에 두께가 가장 두꺼운 것을 볼 수 있다. 반면에 바닥과 벽면이 접하는 선을 따라 필름 두께는 0.08mm로 매우 얇아지게 됨을 볼 수 있다. 이 영역은 필름과 금형이 가장 늦게 접촉하게 되는 부분으로서 금형내 진공홀이 설치된 곳과 일치한다. 따라서 진공압력에 의해 필름의 연신이 가장 크게 발생하게 됨을 알 수 있다.

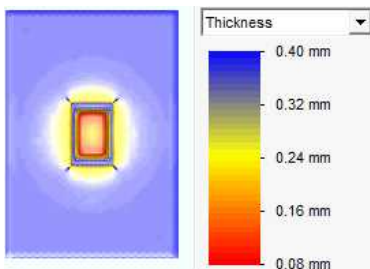


Fig. 4 Thickness distribution

Fig. 5는 필름 가열시간에 따른 열진공성형 해석과 실험에 의한 두께분포를 나타낸 것이다. 필름 가열 시간은 10, 11, 12, 13초이며 이때 필름의 온도는 133, 138, 143, 150°C이다. 앞에서 기술한 바와 같이 필름의 온도가 증가할수록 금형과 필름사이 마찰계수도 증가하게 되며, 해석에 사용된 마찰계수는 0.12~0.16이다. 필름 가열시간이 감소할수록 금형과 필름이 가장 먼저 접촉하는 성형품의 테두리 부분과 바닥면의 두께는 감소하고 필름과 금형이 가장 늦게 접촉하고 진공압이 발생하는 부분의 두께는 증가하게 되어, 결과적으로 두께 균일도가 증가하고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 유리전이온도 이상의 높은 온도에서는 필름과 금형 사이의 마찰계수는 온도가 높아짐에 따라 지수 함수로 증가하게 된다⁷⁾. 따라서 필름의 가열시간이 짧을수록 필름의 온도는 감소하며, 필름과 금형 사이의 마찰계수가 작아진다. 이로 인해 필름과 금형이 가장 먼저 만나는 바닥면의 대한 필름의 연신율이 높아지며, 바닥면과 성형품 테두리 부분의 필름이 측벽 쪽으로 유입되는 양이 증가하기 때문에 두께 균일도가 증가하게 되는 것으로 판단된다.

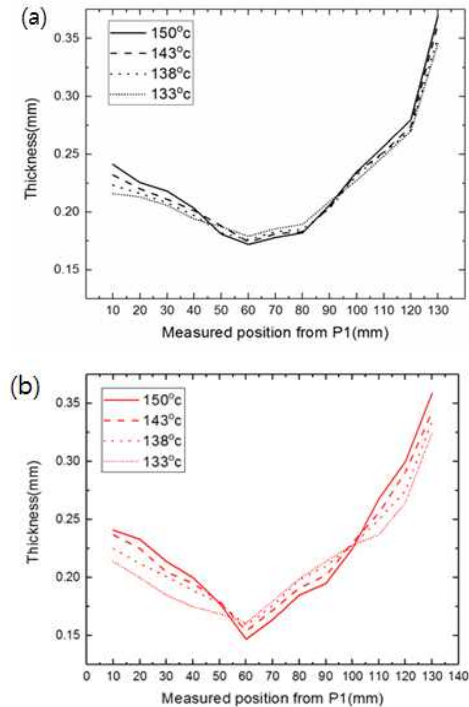


Fig. 5 Thickness distribution under various film temperatures: (a) simulation and (b) experiment

해석과 실험에 대한 최대 오차는 0.025mm으로, 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 본 모델의 경우 열진공성형시 미 성형이 발생하지 않는 범위에서 두께 균일도를 보다 높게 하기 위한 필름 가열시간은 11초, 필름온도 133℃가 바람직한 것으로 판단된다.

2.2.2. 진공 지연시간

열진공성형 공정에서 1차적으로 열선에 의해 필름을 가열한 이후 하부 금형을 상승시키고, 진공압을 작용하게 된다. 진공 지연시간은 필름이 가열되고 하부 금형이 상승하기 이전 시간으로 1, 2, 3, 4 초로 설정하였으며, 이때 필름의 온도는 145, 137, 131, 127℃, 그리고 마찰계수는 0.11~0.14를 사용하여 열진공성형 해석과 실험을 수행하였다. Fig. 6은 진공 지연시간에 따른 열진공성형 해석과 실험 결과를 나타낸다. 진공 지연시간이 증가함에 따라 바닥면의 두께는 감소하고 진공압이 발생하는 부분의

하부, 금형과 필름 사이의 마찰계수가 작아지게 되어 바닥부분에서 필름의 연신율이 높아지기 때문으로 판단된다.

해석과 실험에 대한 최대 오차는 0.026mm로 나타났다. 해석과 실험이 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 미 성형이 발생하지 않는 범위에서 보다 높은 두께 균일도를 얻기 위한 진공 지연시간은 4초이며, 필름온도는 127℃가 바람직한 것으로 판단된다.

3. 패턴변형

3.1. 균일한 패턴

깊이가 큰 금형일수록 열진공성형 이후 필름에 인쇄된 패턴 및 형상의 변형이 크게 일어난다. 열진공성형 해석을 사용하여 인쇄된 패턴의 변형을 사전에 예측하고, 또한 열진공성형 이후 균일한 패턴 간격을 얻을 수 있도록 하는 보정된 패턴 형상을 계산하였다. 먼저 투명한 PP필름위에 실크인쇄를 이용하여 5mm의 균일한 간격을 갖는 격자를 생성하였다. 이어서 열진공성형 해석과 실험을 위하여 필름온도 150도, 진공 지연시간 2초를 적용하였다. 해석과 실험 결과를 비교하기 위하여 Fig. 1에서 표시된 총 17개 지점에서의 패턴 간격을 측정하였다.

Fig. 7은 필름에 인쇄된 5mm의 균일한 간격을 가진 패턴을 나타낸다. Fig. 8은 해석과 실험에 의한 열진공성형 이후의 패턴 간격을 나타낸 결과이다. 필름의 연신에 의하여 전체적으로 패턴 간격이 증가하고 있으며, 특히 진공압이 발생하는 부분의 간격 변화가 더 크게 발생하고 있음을 볼 수 있다. 바닥면의 경우 중앙 부위(3번)의 패턴 간격은 6.414mm 이지만 진공압이 발생하는 모서리 부분(1번, 2번, 4번, 5번)의 경우 7.389mm로 약 0.975mm의 간격 차이가 발생하였다. 그 이유는 필름과 금형이 가장 먼저 만나는 바닥면 중앙 부분은 필름의 연신율이 작아지게 되며, 마찰력에 의해 측면으로의 필름 유입이 어렵기 때문으로 판단된다. 해석과 실험에서 모두 패턴 간격이 가장 많이 변화한 곳은 15, 16, 17번 위치이며, 최대 패턴 간격은 9.432mm로 나타났다. 또한 실험을 통한 측정결과가 해석에 비해 다소 크며, 최대 1.983mm의 오차가 발생하고 있음을 확인하였다. 그 이유는 실험에서는 일차적으로 필름이 가열되면서 필름의 처짐 현상이 발생하고, 필름의 가열만으로 패턴 간격의 변화가 발생하게

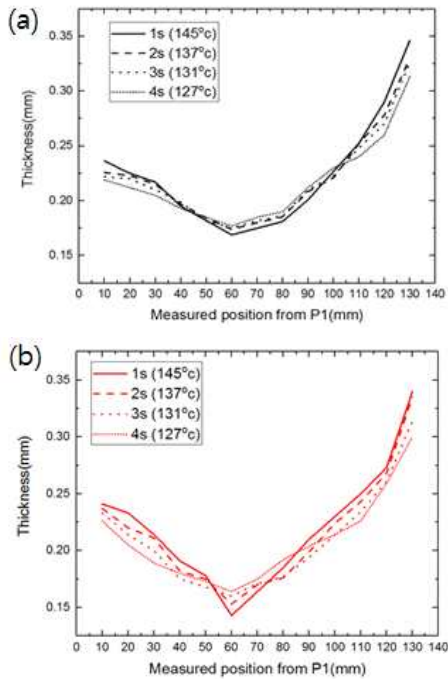


Fig. 6 Thickness distribution under various vacuum delay time: (a) simulation and (b) experiment

두께는 증가하게 되며, 두께 균일도가 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그 이유는 진공 지연시간이 증가함에 따라 대류 열전달에 의해 필름의 온도가 감소

된다. 그러나 해석에서는 실험과 달리 필름의 가열 상태에서 패턴의 변형이 고려되지 않기 때문에 결과적으로 실험에 의한 패턴 간격이 해석보다 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

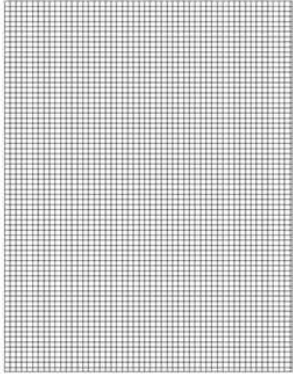


Fig. 7 Printed pattern with uniform spaces of 5mm

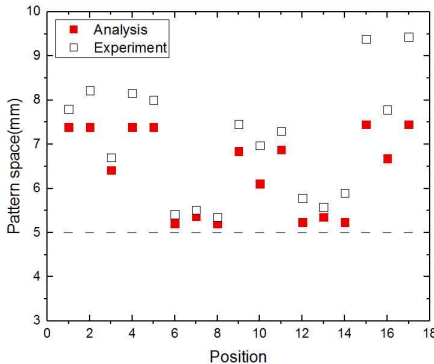


Fig. 8 Pattern spaces after thermoforming for the film with uniform pattern

3.2. 보정된 패턴

필름을 3차원 곡면형상으로 열성형한 이후에 필름에 인쇄된 패턴이 왜곡되는 문제를 해결하는 것이 필요하다. 이를 위하여 균일한 간격의 인쇄 패턴을 적용한 열진공성형 해석결과를 바탕으로 제품 바닥면, 진공압이 작용하는 모서리 부분처럼 패턴간격의 변형이 큰 곳은 패턴을 조밀하게 설정하고, 반면에 패턴간격이 조밀하게 변형된 측벽부분의 패턴 간격은 넓게 설정하였다. 구체적으로 Fig. 1에서 표시된 1번 지점의 경우 5mm의 균일한 간격을 가지는 패턴에 대한 해석을 수행한 결과 7.388mm의 간격으로 증가하는 것으로 예측되었으며, 이 결과를 기초로 패턴간격을 약 2.218mm 감소시켜 2.782mm

의 간격을 갖도록 보정하였다. 동일한 방법을 적용하여 열진공성형에 의해 균일한 패턴 간격을 얻을 수 있도록 하는 보정된 패턴을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 투명한 PP 필름 위에 실크 인쇄를 이용하여 보정된 패턴을 인쇄하고, 열진공성형 실험을 통해 패턴 간격을 확인하였다.

보정된 패턴을 적용하여 실험을 수행하고, 위치별 측정된 패턴 간격을 Fig. 10에 나타내었다. 실험을 통해 측정된 최대 패턴간격은 5.837mm로 나타났다. 이는 앞에서 확인한 바와 같이 균일한 패턴을 적용한 경우의 9.432mm에 비하여 5mm에 상당히 근접하는 결과를 보여주는 것이다. 필름의 물성치, 마찰계수 등 해석조건을 더욱 정교하게 보완한다면 해석의 정밀도를 높일 수 있으며, 결과적으로 해석을 적용한 패턴 보정방법이 열진공성형에서 발생하는 패턴의 왜곡 문제를 해결하기 위한 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

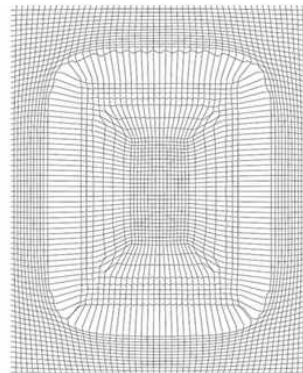


Fig. 9 Printed pattern with modified spaces

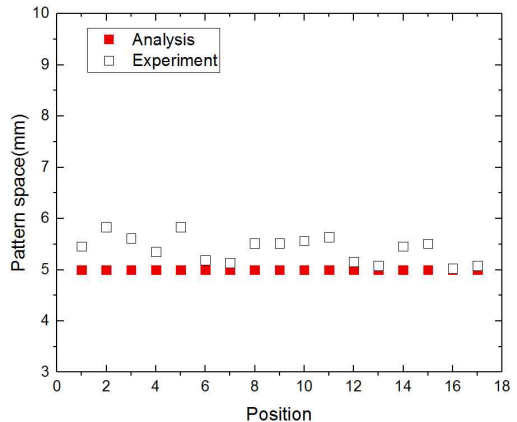


Fig. 10 Pattern spaces after thermoforming for the film with modified pattern

4. 결론

열진공성형 해석과 실험을 통하여 필름 가열시간과 진공 지연시간이 필름 두께 분포에 미치는 영향을 고찰하였으며, 균일한 패턴 및 보정된 패턴에 대하여 실험을 수행하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 필름 가열시간이 감소하고, 진공 지연시간이 증가할수록 성형후 두께 균일도가 증가하였다.
- 2) 5 mm의 균일한 패턴 간격을 적용한 경우 진공압이 발생하는 부분의 패턴 변화가 크게 발생했으며, 최대 패턴 간격은 9.432 mm로 나타났다.
- 3) 성형 이후 균일한 패턴 간격을 얻기 위하여 해석에 의해 보정된 패턴 형상을 계산하고, 이를 적용한 결과 최대 패턴 간격은 5.837 mm로 나타났다.
- 4) 해석을 적용한 패턴 보정방법이 열진공성형에서 발생하는 패턴의 왜곡 문제를 해결하기 위한 방안이 될 수 있을 것으로 판단되었다.

후기

이 성과는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2018R1D1A3B07045339)이며, 실험에 협조해 주신 (주)썬텍솔루션 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Gimenez, E., Lagaron, J.M., Cabedo, L., Gavara, R., and Saura, J.J., "Study of the Thermoformability of Ethylene-vinyl Alcohol Copolymer Based Barrier Blende of Interest in Food Packaging Applications", *J. Appl. Poly. Sci.*, Vol. 96, No. 6, pp. 3851-3855, 2004.
- 2) Gimenez, E., Lagaron, J.M., MasPOCH, M. L., Cabedo, L. and Saura, J.J., "Uniaxial Tensile Behavior and Thermoforming Characteristics of High Barrier EVOH-Based Blends of Interest in Food Packing", *Polym. Eng. Sci.*, Vo. 44, No. 3, pp. 598-680, 2004.
- 3) Poller, S. and Michaeli, W., "Film Temperatures Determine the Wall Thickness of Thermoformed Parts", *SPE ANTEC*, Vol. 38, No. 1, pp. 104-108, 1992.
- 4) Yoo, Y. G. and Lee, H. S., "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, 2011.
- 5) Yoo, Y. G. and Lee, H. S., "Numerical and Experimental Analysis of Laminated-Film Thickness Variation in Vacuum-Assisted Thermoforming", *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 3, pp. 171-177, 2013.
- 6) Kim, G., Lee, K. and Kang, S., "Prediction of the Film Thickness Distribution and Pattern Change during Film Insert Thermoforming", *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 49, No. 11, pp. 2195-2203, 2009.
- 7) Lee, J. K., Virkler, T. L. and Scott, C. E., "Effects of Rheological Properties and Processing Parameters on ABS Thermoforming", *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 41, No. 2, pp. 240-261, 2001.
- 8) Lee, J. K., Virkler, T. L. and Scott, C. E., "Influence of Initial Sheet Temperature on ABS Thermoforming", *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1830-1844, 2001.
- 9) G'Sell, C. and Jonas, J. J., "Determination of the Plastic Behaviour of Solid Polymers at Constant True Strain Rate", *J. Mater. Sci.*, Vol. 14, No. 3, pp. 583-591, 1979.
- 10) Acuiform, Computer Simulations of Transforming and Blowing Molding, <http://www.t-sim.com/index.html>, 2005.