

## 시뮬레이션을 통한 열성형에서의 필름 평균두께 계산

이순영<sup>1</sup>.김선경<sup>1,†</sup>

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과<sup>1,†</sup>

### Calculation of Average Thickness of film in Thermoforming by Simulation

Soon-Young Lee<sup>1</sup>.Sun-Kyoung Kim<sup>1,†</sup>

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology<sup>1,†</sup>  
(Received December 20, 2023 / Revised December 20, 2023 / Accepted December 31, 2023)

**Abstract:** In this study, numerical simulation of the thermoforming process of PVC film material was performed using PAM-Form. For this purpose, tensile tests were performed at various temperatures and the coefficients of the G'Sell model were obtained and used. As a result of the analysis, it was confirmed that the thickness decreased by up to 55% in the section where the film was in contact with the vertical direction and was greatly stretched. If the thickness is excessively thin, the part may become structurally weak, so in the thermoforming process, numerical simulation of the thickness in advance is expected to be helpful in successfully performing the process.

**Key Words:** thermoforming, simulation, thickness, polymer film

#### 1. 서 론

고분자 필름 열성형은 얇은 고분자 필름을 다양한 3차원 물체나 포장 용기로 성형하고 성형하는 데 사용되는 제조 공정이다. 이 공정은 식품 포장, 의료 기기 제조, 다양한 소비재 생산과 같은 산업에서 일반적으로 사용된다<sup>1)</sup>.

이 과정은 적절한 폴리머 필름을 선택하는 것부터 시작된다. 일반적으로 사용되는 재료로는 필름 형태로 널리 사용되는 폴리에틸렌 (polyethylene), 폴리프로필렌 (polypropylene), 흔히 PVC로 불리는 폴리염화비닐 (polyvinylchloride), 폴리스티렌 (polystyrene), 폴리에스테르 (PET, polyether phthalate) 등이 많이 사용되지만, 고성능 재료인 폴리카보네이트 (polycarbonate) 혹은 그 수준의 성능을 갖는

필름 재료들도 열성형에 사용된다. 재료 선택은 최종 제품의 특정 용도와 원하는 특성에 따라 달라진다. 선택한 폴리머 필름은 일반적으로 롤(roll) 형태로 공급된다. 롤이 풀리고 열성형 기계에 공급된다<sup>2)</sup>.

그런 다음 가공할 원재료(feed stock)를 오븐이나 가열 스테이션에서 가열한다. 가열하면 폴리머 필름이 부드러워져 유연해지고 성형이 쉬워진다. 온도와 가열 시간은 필름 전체에 균일한 가열이 보장되도록 세심하게 제어된다. 가열 후 필름은 금형과 성형 스테이션으로 구성된 열성형 스테이션으로 들어간다. 금형은 최종 제품의 모양을 정의하며 원하는 결과에 따라 캐비티 혹은 코어의 형태를 갖을 수 있다.

금형은 일반적으로 알루미늄이나 강철로 만들어진다. 가열된 필름을 금형 위에 놓고 진공 또는 공기압을 가하여 필름을 금형 안이나 위로 끌어당긴다. 어떤 경우에는 플러그 보조 또는 압력 상자와 같은 기계적 보조 방법을 사용하여 재료를 금형 캐비티에 정확하게 형성하는 데 도움을 줄 수 있

†교신저자: sunkkim@seoultech.ac.kr

\* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있다.

다. 성형 후 금형을 냉각하여 폴리머 필름을 원하는 모양으로 신속하게 응고시킵니다.

냉각은 공냉식이나 수냉식 등 다양한 방법을 통해 달성할 수 있다. 성형된 모양을 유지하고 뒤틀림을 방지하려면 적절한 냉각이 필수적이다. 성형된 폴리머가 냉각되고 응고되면 여분의 재료나 플래시를 다듬거나 잘라내어 공정을 마무리하게 된다. 이 단계는 수동으로 수행하거나 자동화된 기계를 사용하여 수행할 수 있다.

폴리머 필름 열성형의 주요 장점은 비용 효율성, 빠른 생산 속도, 상대적으로 낮은 금형제작 비용으로 복잡한 모양을 만들 수 있는 능력 등이다. 이는 일반적으로 식품 용기, 블리스터 포장, 일회용 트레이 및 소비자 및 산업 응용 분야의 다양한 플라스틱 구성 요소와 같은 품목의 생산에 사용된다.

보통 열성형을 통해 구멍과 같은 체결 구조를 공정 과정을 통해 생성하기는 어렵고, 보통 후가공을 수행하게 된다. 사출품과 달리 리브, 보스도 구현할 수 없어 구조적으로 취약성이 있으며 적용에 한계가 따른다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 대면적 제품에 대해서는 낮은 금형과 장비비용과 낮은 공정난이도로 인해 활용도가 높다.

열성형 시 두께 문제는 플라스틱 시트의 고르지 못한 가열, 시트에 가해지는 너무 높거나 낮은 압력, 플라스틱 시트의 특성, 금형 설계 등 여러 가지 요인으로 인해 발생한다. 두께 문제를 최소화하려면 플라스틱 시트를 고르게 가열하고, 정확한 양의 압력을 가하고, 두께 편차가 발생하지 않는 플라스틱 시트를 사용하고, 금형을 적절하게 설계하는 것이 중요하다. 열성형 시 두께 편차 생기는 이유는 플라스틱 시트가 고르게 가열되지 않아 일부 영역이 과하게 연신될 때 흔히 나타난다. 가열이 고른 경우에도 압력이 너무 높은 경우 마찰이 높아 미끄러움이 일어나지 않아 일어날 수도 있다. 또한 열성형 중에는 잔류 응력이 발생하거나 스프링 백이 일어나므로 설계와 공정에서 유의해야 한다.

열성형 시 두께 문제를 해결하려면 문제의 원인을 파악하는 것이 중요한데, 고르지 못한 가열이 문제인 경우 플라스틱 시트를 오븐에서 예열하여 문제를 완화할 수 있고, 압력이 너무 높은 것이 문제인 경우 압력을 낮춰 해결할 수 있다. 그러나 날카로운 모서리처럼 형상이 급격하게 변화하는 경

우에는 급격한 두께 변화가 나타나게 된다. 회전성형의 경우 직각으로 꺾이는 구간에서 되려 후속이 나타나는 장점이 있지만, 열성형의 경우 이 모서리에서 얇아지는 문제가 있다. 이 연구에서는 이러한 구간들에서 두께가 어떻게 변화하는 지 수치모사를 통해 알아보고자 한다. 수치모사는 유한요소 소프트웨어인 PAM-Form을 사용하였다.

## 2. 해석

### 2.1. 해석 대상 공정

이 연구에서는 Fig.1에 제시된 바와 같은 공정을 고려한다. 최초 필름이 클램프에 의해 지지된 상태에서 예열되어 있다가 클램프에 의해 필름이 하강하면서 진공펌프에 의해 필름과 금형 사이의 공간의 공기가 배출되면 성형이 완료된다. 성형은 단순하며, 예열 온도와 진공압력 외에는 크게 제어할만한 부분이 많지 않다. 다만 금형의 온도제어를 통해 일부 문제를 완화할 수 있는 여지는 있다.

이 해석에서는 PVC시트를 사용하여 여러가지 조건에서 결과를 본다. 이루고자 하는 제품의 형상은  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 이며 열성형된 성형품의 최소 두께는  $0.25\text{ mm}$ 를 목표로 했다. 먼저 목표 두께에 가장 적합한 시트의 두께를 계산해야 한다. 열성형에 사용될 시트의 크기는  $280\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ 이다. 이중 성형 공정에 필요한 영역은  $65\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 로 제품의 겉면적을 필요한 영역으로 나누면 연신율이 된다. 따라서  $6290\text{ mm}^2$ 을  $4225\text{ mm}^2$ 로 나누게 되면 연신율이 1.489라는 것을 확인할 수 있다. 최소 시트의 두께는 이 연신율과 제품의 최소 두께를 곱한 값,  $1.489 \times 0.25\text{ mm}$ 로 시트의 최소 두께는  $0.372\text{ mm}$ 를 필요로 한다.

### 2.2. 역학적 특성

열성형 공정에 사용하는 필름 재료는 고상이나 고분자 재료인 이유로 복잡한 물성이 나타난다. 공정의 특성상 사출의 경우처럼 완전한 흐름성이 나타나는 상태는 아니지만 상당한 점성이 있는 고온 상태에서 성형을 하게 된다. 따라서 점탄성고체(viscoelastic solid) 상태에서 성형을 한다고 볼 수 있으며, 시간, 속도, 온도 의존성이 크게 나타난다.

따라서 이 연구에서는 초탄성 구성방정식 (hyper-elastic constitutive equation)을 사용하여 재료를 모사해 왔다. 그 중에서도 G'Sell 모델이 열성형에 적합한 것으로 인정받고 있다. 여기서 스트레스  $\sigma$  는 아래와 같은 스트레인  $\varepsilon$  과 스트레인을  $\dot{\varepsilon}$  의 함수로 주어진다<sup>4)</sup>.

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

여기서,  $m, h, k, w$  시험 결과를 통해 결정되어야 하는 온도의 함수로 주어지는 값이다. 이 모델의 계수를 정확히 결정하기 위해서는 반복된 인장시험을 여러 온도에서 실시하여야 한다.

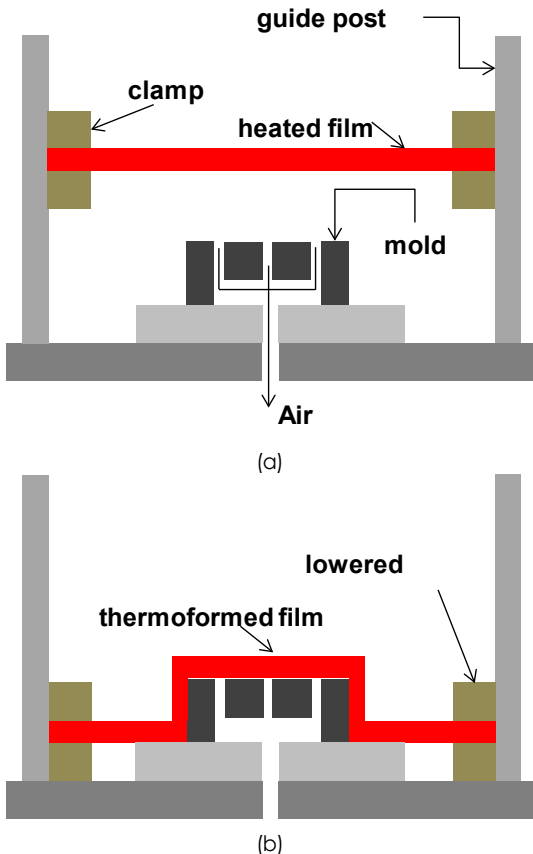


Fig. 1 Schematic of the thermoforming process: (a) before forming (b) after forming.

### 2.3. 물성계수

이론적으로는 2축 인장시험을 활용하는 것이 보다 정확한 물성을 얻는데 유리하나 이 연구에서는 여건 상 실시할 수 없었다. 여기서 중요한 점은

일반 인장시험과 달리 시험의 속도  $v$ 가 매우 중요하다. 최초 길이  $l_0$ 가 주어졌을 때 스트레인은 아래의 식으로 얻어진다.

$$\dot{\varepsilon} = (v/l_0)e^{-\varepsilon} \quad (2)$$

이 식을 활용하면 속도에 따라 스트레인과 스트레인의 관계를 구할 수 있는데, 여기서 유의할 점은 이 스트레인은 실제 스트레인 (true strain)이라는 점이다. 시험에 사용한 PVC 필름 재료의 인장 시험 결과로부터 Table. 1에 제시한 바와 같은 계수들을 얻었다.

Table 1 G'Sell model coefficients alongside temperature.

	25°C	75°C	150°C
$k$	42.2	12.4	1.35
$w$	80.3	40.3	8.5
$m$	0.033	0.052	0.332
$h$	1.42	1.02	0.63

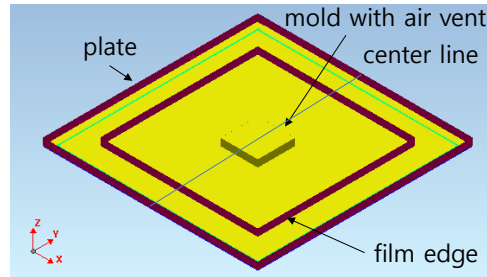


Fig. 2 Schematic of the analysis domain.

### 2.4. 해석방법

본 연구에서는 Fig. 2에 보인 것과 같은 형상의 금형에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 기준 예열 온도는 150°C로 설정하였다. 이 때영역은 1465개의 shell 요소를 사용하여 이산화 하였다. 격자계 생성과 해석은 모두 PAM-Form을 사용하였다. T-Sim<sup>5)</sup> 등 다른 소프트웨어들도 있으나 PAM-Form이 온도에 따른 초탄성 구성방정식의 적용 결과가 우수한 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>.

### 3. 결과

해석을 수행하여 Fig. 3에 보인 결과를 얻었다. 평판 구간에서의 두께 변화는 없으며 수직 구간에

서 연신에 따라 두께가 얇아지는 결과를 확인할 수가 있다. 꼭지점 근처에서는 재료가 완전하게 성형되지 않으면서 연신량이 감소하면서 모서리 사이의 구간에 비해서는 두께가 두껍게 나타난다. 평탄 구간의 두께가 0.4mm 인데 반해 연신된 수직 구간의 두께는 0.25mm 까지 감소하여 두께 변화가 매우 심한 것을 알 수 있다. 모서리 근처에서는 연신율이 매우 낮은 구간이 존재하게 되며 이 부분은 0.44mm 정도로 두께가 높은 구간이 존재함을 알 수 있다. Fig. 4에 예열 온도의 변화에 따른 두께 변화를 제시하였는데, 예열온도가 120°C인 경우인 Fig. 4(a)에서는 예열온도가 150°C인 Fig. 4(b)인 경우에 비해, 두께 변화가 일어난 구간이 길게 나타나지만 얇은 두께 변화가 완화된 것을 알 수 있다. 계산 시간은 Windows 기반의 PC(Intel i9-9900K)에서 85 s 소요되었다.

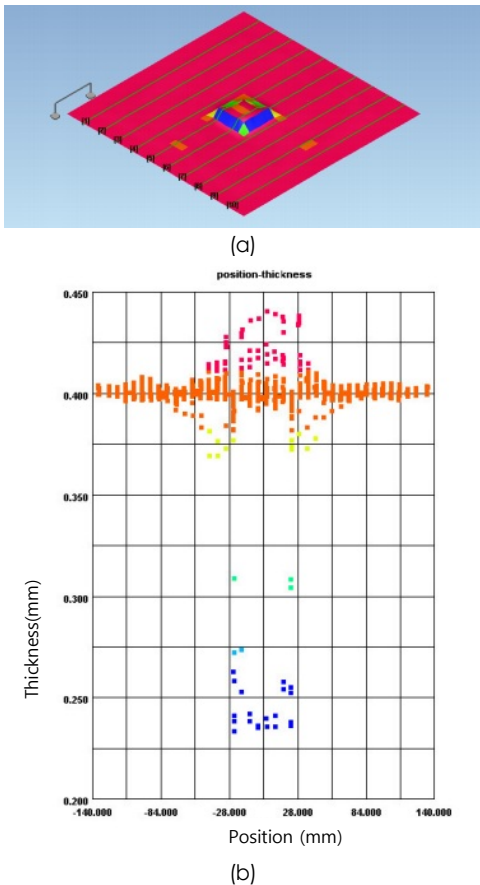


Fig. 3 Thickness variation over the domain preheating at

150°C: (a) three-dimensional view, (b) along the center line shown in Fig. 2: Red (around 0.425); Orange (around 0.4); Yellow (around 0.375); Green (around 0.3); Light blue (around 0.275); Blue (0.25).

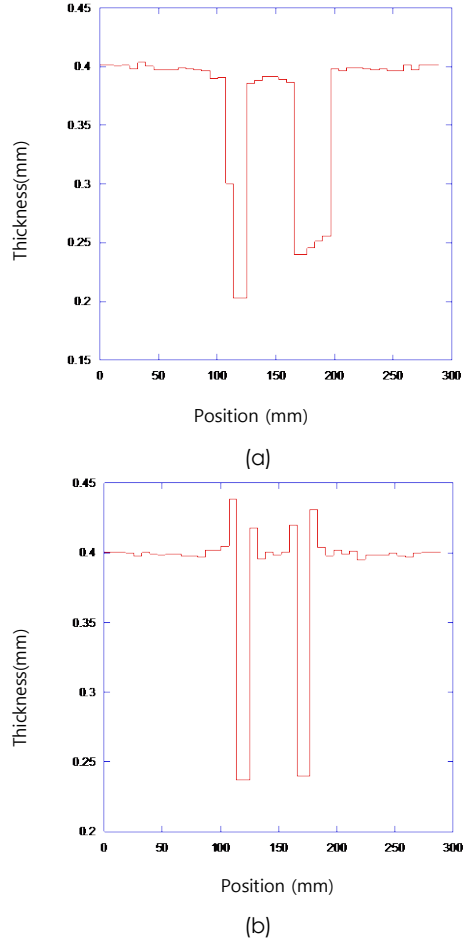


Fig. 4 Thickness variation over the domain preheating (a) at 120°C and (b) at 150°C.

본 연구에서 제시한 온도 이상의 여러 온도에서 이 해석을 수행하기 위해서는 물성데이터를 고온에서 획득해야 하나 실제로 인장시험을 높은 온도에서 실시하는 것은 여러가지 기술적인 문제를 야기하였다. 이를 해결하기 위해서는 인장시험기가 아닌 TMA와 DMA를 활용하는 모델 수립 방법이 요구될 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 PVC 필름 재료의 열성형 공정을 PAM-Form을 이용하여 수치 모사를 수행하였다. 이를 위해서 여러 온도에서 인장시험을 수행하여, G'Sell 모델의 계수를 구하여 사용하였다. 해석 결과 필름이 수직방향으로 접촉하면서 연신이 크게 일어난 구간에서 두께가 55% 수준까지 감소하는 것을 확인하였다. 두께가 과도하게 얇아진다면 부품이 구조적으로 취약해 질 수 있기 때문에 열성형 공정에서는 두께를 사전에 수치모사하는 것이 공정의 성공적 수행에 도움이 되리라 기대 된다

#### 후기

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2018R1A5A1024127, NRF-2020R111A2065650).

#### 참고문헌

- 1) Park, D.Y., Park, D.H. and Lee, H.S., "A study on the residual stress and spring back of thermoformed films", Design & Manufacturing, Vol. 16, No. 1, pp. 27-34, 2022.
- 2) Lee, C.H., Byun, Y.S. and Kim, S.K., "Thermoforming device development and process analysis", KSMTE Fall Meeting Proceedings, pp. 117-117, 2018.
- 3) Park, D.Y., Park, D.H., Lee, H.S., "A study on the residual stress and spring back of thermoformed films", Design & Manufacturing, Vol.16 No.01, pp. 27- 35, 2022.
- 4) G'Sell, C. and Jonas, J.J., "Yield and transient effects during the plastic deformation of solid polymers", J Mater Sci. Vol. 16 pp.1956 - 1974. <https://doi.org/10.1007/BF00540644>
- 5) Seong, G.S. and Lee, H.S., "A study on the thickness distribution and pattern deformation of films in vacuum-assisted thermoforming", Design and Manufacturing, Vol. 12, No.2, pp. 1151-1159, 2003.
- 6) Park, E.M., Lee, S.Y., Choi, K.H. and Kim, S.K., "Numerical Simulation of Preform Molding Using Carbon Fabric", Composites Research, vol.33 No.2 pp.61-67, 2020

#### 저자 소개

##### 이 순 영 (Soon Young Lee)



- 2019년8월 서울과학기술대학교 기계시스템 디자인공학과(공학박사)
- 2021년 12월~현재 KLA Korea Field Application Engineer

<관심분야>  
설계 성형, 가공기계

##### 김 선 경 (Sun Kyoung Kim) [정회원]



- 2000년2월 서울대학교 기계공학과(공학박사)
- 2000년11월~2003년11월 노스웨스트대학교 연구원
- 2004년 2월~현재 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 교수

<관심분야>  
성형 수치모사, 소프트웨어개발