열처리된 얇은 판유리의 뒤틀림

이성근, 정관수*, 강태진*, 윤재륜*
LG화학 기술연구원, *서울대학교 재료공학부

Distortion of Tempered Thin Plate Glasses

Seong Keun Lee, Kwansoo Chung*, Tae Jin Kang* and Jae Ryoun Yun*
LG Chem Research Park, 104-1 Moonji-dong, Yuseong-gu, Daejeon, South Korea
**School of Materials Science and Engineering, College of Engineering, Seoul National University, 56-1, Shinlim-dong, Kwanak-ku, Seoul 151-742, South Korea*

1. 요약

폭과 길이에 비해 상대적으로 두께가 아주 얇은 판유리 생산에 있어서 여러 가지 형태 불안정성이 문제가 되는데, 본 논문에서는 이러한 형태 불안정성 중 완성된 판유리를 용도에 따라 절단했을 때 판유리가 뒤틀리는 현상을 다루었다. 이러한 뒤틀림 현상을 해결하기 위한 노력의 일환으로 뒤틀림의 원인이 냉각 후 판유리에 남아있는 잔류 응력이라 생각하고, 판유리 제조 공정 중 여러 가지 온도 분포와 다양한 경계 조건을 사용했을 때 잔류응력 분포 변화를 해석하고 그에 따른 뒤틀림 거동을 해석하였다. 해석 과정은 판유리 냉각 과정에서의 온도분포 변화 해석, 냉각 후 변형과 잔류응력 분포 해석, 절단했을 때 뒤틀림 형상 해석의 세 단계로 수행하였다.

판유리의 냉각과정은 표면에서의 열전달 계수가 상수로 고정된 강제 대류 조건을 사용하였으며, 구성방정식으로 열적 성질과 역학적 성질 모두가 탄성적 거동을 한다고 가정하는 열탄성 모델과, 열적 성질에서는 탄성적 거동, 역학적 성질에서 점탄성적 거동을 가정하는 점탄성 모델, 이 두 가지를 사용하였다. 해석에는 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

해석 결과, 해석에 사용한 온도 분포와 경계 조건에 따라 다양한 잔류 응력 분포와 뒤틀림 양상이 얻어 졌으며, 판유리를 절단했을 때 뒤틀림 형상은 절단면의 응력 분포와 밀접한 관련이 있음이 밝혀 졌다.

2. 서론

얇은 판유리 생산은 온도 1300K 정도의 용융 상태의 유리로부터 시작된다. 완성된 판유리를 얻기 위해 용융상태의 유리는 상온까지 냉각되게 되고, 유리는 그 동안 큰 온도 변화를 겪게 된다. 그 과정에서 완성된 판유리 내부에 잔류응력 남게 되고, 이 잔류응력은 판유리의 강도를 증가시키는 역할을 하기도 한다. 또는, 원하는 강도의 판유리를 얻기 위해, 냉각 후에 의도적으로 열처리를 하는 경우도 있다[1][2]. 실제로, 현재까지의 판유리의 잔류응력에 관한 연구의 대부분은 두께 방향으로 응력 분포와 그 크기 즉, 잔류응력이 완성된 판유리의 강도 향상에 얼마나 기여하는지에 대한 것이 대부분 이었다[3][4]. 그러나, 최근 두께가 매우 얇고(1mm이하), 강도 보다는 정학한 치수의 판유리 생산이 요구되어 지면서 판유리의 잔류 응력과 변형에 관한 연구의 필요성이 대두 되었다.

본 논문에서는 완성된 판유리를 용도에 따라 사용하기 위해 다양한 크기로 또, 여러 방향으로 절단할 때 생기는 뒤틀림 현상을 내부 응력 분포의 관점에서 이해해 보고자 한다. 해석 과정은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard를 사용하여 다음의 세단계로 수행하였다.

① 판유리의 열전달 문제를 풀어 냉각과정에서의 위치와 시간에 따른 온도 분포를 구한다.

② 위에서 구한 온도 분포를 적용하여 판유리 내부의 잔류응력 분포를 구한다.

③ 판유리를 절단했을 때의 뒤틀림 거동을 해석한다.

열수축과 이에 의한 잔류응력을 해석하기 위한 유리의 물성에 대한 모델로 현재까지 Instant Freezing 모델, 점탄성 모델, 구조이완 모델 등이 제안 되었고[5][6], 그 중 점탄성 모델과 구조이완 모

델이 유리의 거동을 가장 유사하게 설명한다고 알려져 있다. 본 논문에서는 뒤틀림 거동을 정성적으로 이해하기 위하여 선형 열탄성 모델과 점탄성 모델을 사용하여 그 결과를 서로 비교해 보았다.

3. 본론

고온의 용융상태의 유리가 상온의 공기중으로 흘러 내릴때, 판유리의 표면에서 공기중으로 열이 빠져 나가고, 판유리 내부에서 바깥쪽으로 열이 이동한다. 이를 모사하기 위하여 식(1)과 같은 3차원 열전달 방정식을 사용하였다[7].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \hat{k}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{1}$$

$$\hat{k} = \frac{K}{c\rho} \quad \text{(K : thermal conductivity, c : sepcific heat, } \rho \text{ : density)} \tag{2}$$

냉각과정에서 판유리의 수축변형이 일어나는데, 열에의한 변형율을 다음과 같이 가정하였다.

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \alpha \, \boldsymbol{I} \, \Delta T \tag{3}$$

여기서, α는 온도에 대하여 상수인 열팽창계수, ΔT는 온도변화, $\boldsymbol{I}$는 단위 텐서이다.

판유리 내부에 생기는 잔류응력은 기계적 변형율에 의해 생기고, 기계적 변형율은 전체 변형율에서 열변형율을 뺀 값이 된다. 따라서, 선형 열탄성 모델의 구성방정식은 식(4)와 같이 표현 된다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\varepsilon}^{total} - \boldsymbol{\varepsilon}^{th}) \tag{4}$$

점탄성 모델의 경우 잔류응력을 식(5)과 같이 두가지 성분으로 나누어 표시할 수 있다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{v} + \boldsymbol{s} \tag{5}$$

여기서 $\boldsymbol{S}$는 deviatoric 응력텐서이다.

점탄성 모델의 구성 방정식은 Boltzmann의 중첩 원리를 도입한 Hereditary 식으로 주어진다. 여기서 일반적인 Hereditary 식의 경우 온도 변화에 따른 물성 변화를 표현하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 열-유변학적 단순화 원리를 이용하여, 온도 차이를 시간의 개념으로 환산해 주는 환산시간이라는 개념을 Hereditary 식에 도입한 식(6)을 점탄성 모델의 구성방정식으로 사용하였다.

$$S_{ij} = \int_0^{\xi} 2G(\xi - \xi')\frac{de_{ij}}{d\xi'}d\xi' \tag{6}$$

그리고 환산 시간은 실험적으로 다음과 같이 Arrhenius 식의 형태를 따른다고 가정하였다.

$$\xi = \int_0^{t} exp\left(\frac{H}{R}\left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T(x,t')}\right)\right)dt' \tag{7}$$

여기서 $T(x,t)$는 현재 시간과 위치에서의 온도, T_R는 기준 온도, H는 엔탈피이며, R은 이상기체 상수이다.

4. 수치해석

수치해석의 첫 단계로 판유리의 열전달 문제를 풀어 시간과 위치에 따른 온도분포를 얻었다. 이때

사용되어진 경계조건을 Fig.1에 표시하였다. 실제로는 연속공정이지만, 해석을 용이하게 하기 위해 batch process로 가정 하였다. 화살표는 heat flux를 나타내는데 판유리의 왼쪽과 오른쪽에 표시한 heat flux는 판유리를 냉각하는 공정중 판유리가 안으로 말리는 것을 막기 위해 양쪽 끝부분을 초기에 빠르게 냉각시킨 것을 모사한 것이다. Fig.2는 냉각 공정이 끝난 후 판유리의 변형을 과장해서 표현한 것이다. Fig.3은 냉각후 판유리의 수직 중앙 단면에 작용하고 있는 잔류응력의 모양을 보여준다. 이상태에서 판유리를 절단하면 작용하고 있는 잔류응력이 풀리면서 변형이 일어나는데, 그것을 Fig.4에서 확인할 수 있다.

다음 과정으로 heat flux 경계조건에 변화를 주었다. Fig.1과 온도분포의 모양에 큰 변화 없이 판유리의 위쪽과 아래쪽의 온도구배를 점점 크게 했을 때, 응력분포와 뒤틀림 형상을 해석하였다. 실제 생산 공정에서는 판유리가 내려오는 속도를 조절함으로써 이것을 조절할 수 있다.

Fig.5를 보면, 잔류응력의 형태가 위로 볼록한 모양에서 아래로 볼록한 모양으로 바뀌는 것을 알 수 있고, 실제로 판유리를 잘랐을 때도 뒤틀림의 방향이 역전되는 현상을 수치해석을 통하여 확인할 수 있었다. Fig.6은 상하 온도구배가 커질때 뒤틀림의 방향이 역전되는 현상을 보여준다.

위에서 적용한 같은 온도이력과 기계적 경계조건을 사용하고, 점탄성 모델의 구성방정식을 사용하여 수치해석 했을 때, 전체적으로 잔류응력 분포의 모양, 뒤틀림 형태등은 선형열탄성 모델의 경우와 큰 차이를 보이지는 않았고, 다른점은 열탄성 모델의 경우 냉각공정시 계속적인 수축으로 잔류응력 분포가 계속 커지는 방향으로 가지만, 점탄성 모델의 경우는 초기에는 같은 경향을 보이다가, 마지막 단계에서 응력이 이완되면서 전체적으로 선형열탄성에 비해 잔류응력의 크기가 조금 작아지고, 그에 따라 뒤틀림의 크기도, 약간 작게 나오는 결과를 얻었다.

5. 결론

판유리의 냉각과정에서 생기는 잔류응력을 해석하고, 잔류응력이 판유리를 절단했을 때 어떤 식으로 뒤틀림에 영향을 주는지를 해석해 보았다. 얻은 결론을 다음 몇가지로 정리하여 보았다.

(1) 판유리 냉각시에 생기는 변형의 대부분은 열에 의한 변형이다. 반면, 기계적 변형은 전체 변형중 극히 작은 부분을 차지하지만, 이 값이 실제로 판유리 내부에 잔류응력이 생기는 원인이 된다.

(2) 판유리는 온도 분포와 경계 조건에 따라 다양한 형태의 뒤틀림 거동을 보이는데, 뒤틀림 형태는 절단하기 전 절단면에 수직으로 작용하는 법선응력의 분포와 밀접한 관계가 있다.

(3) 경계조건으로 판유리의 양 옆으로 급속한 냉각 조건을 주었을 때 선형 열탄성 모델, 점탄성 모델 둘 다 유리판 상부와 하부의 온도구배가 커질 때 잔류응력 분포가 역전되는 모습을 보여주었다.

(4) 점탄성모델의 경우 응력 이완 효과에 의하여 잔류응력의 크기가 열탄성모델의 경우에 비하여 작고, 뒤틀림 정도도 작다.

감사의 글

본 연구는 삼성코닝정밀유리와 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업을 통하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1) G. M. Bartenev, *Zh. Tekh. Fiz.*, **19**, 1423(1949)

2) V. L. Indembom, *Zh. Tekh. Fiz.*, **24**, 925(1954)

3) E. H. Lee, T. G. Rogers and T. C. Woo, *J. Am. Ceram. Soc.*, **48**, 480(1965)

4) 공진학, *서울대학교 공과대학원 석사학위논문*, 2002

5) O. S. Narayanaswamy, *Ceramic Trans.*, **29**, 315(1993)

6) O. S. Narayanaswamy, *J. Am. Ceram. Soc.*, **61**, 146(1978)

7) H. S. Carslaw, and J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, 1947

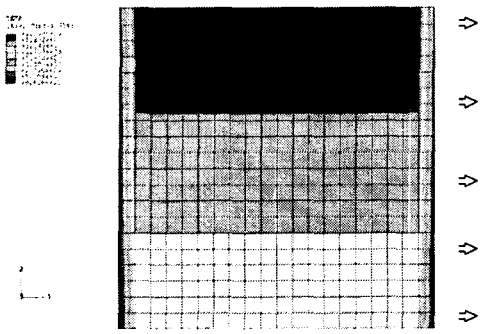

Fig.1 Initial temperature distribution & heat flux through cooling process

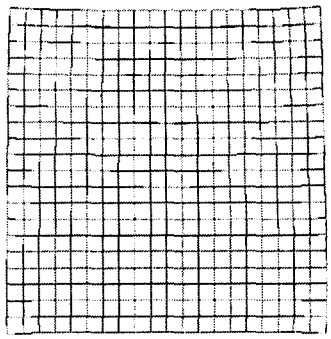

Fig.2 Deformed shape (real deformation x 40)

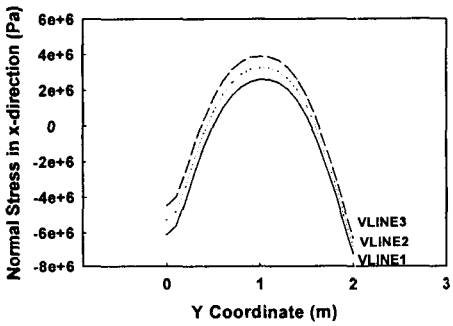

Fig.3 Stresses(σ_{xx}) along vertical line

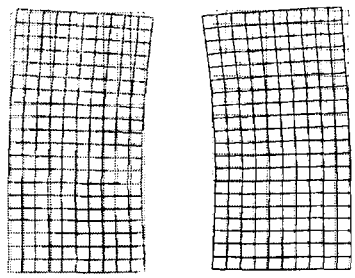

Fig.4 Distorted shape when cut along vertical line (Real deformation x 400)

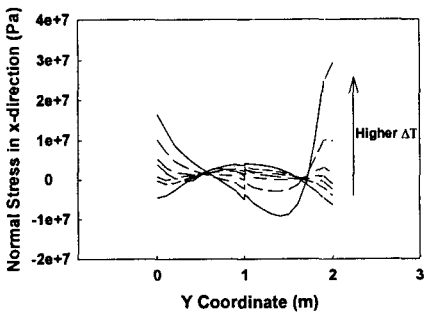

Fig.5 Stresses(σ_{xx}) variation along VLINE3 as ΔT changes

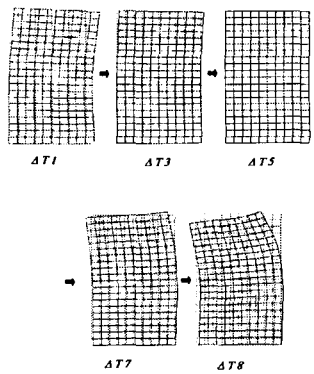

Fig.6 Distorted shape of the left part with respect to ΔT (Real deformation x 400)