

# 단섬유 복합재료 사출성형물의 잔류응력 측정

김상균\* · 이석원\* · 윤재륜\*

## Measurement of Residual Stress Distribution in Injection-Molded Short Fiber Composites

Sang Kyun Kim, Seok Won Lee and Jae Ryoung Youn

**Key Words** : residual stress, injection molding, short fiber composites, layer-removal method, curvature.

### ABSTRACT

Residual stress distribution in injection-molded short fiber composites was determined using layer-removal method. Polystyrene with 3 vol% carbon fibers was injection-molded into the tensile specimen. With milling machine layer-removal process was conducted and the curvature data were acquired. Treuting and Read analysis which is assuming isotropic material, and White analysis considering anisotropy due to the fiber orientation were used to calculate residual stress of the flow direction through the thickness direction and compared with each other.

### 1. 서 론

단섬유 복합재료는 뛰어난 역학적 성질과 제작의 용이성, 그리고 경제적 이점 등으로 인해서 많은 산업의 응용 분야에서 널리 이용되고 있다. 단섬유 복합재료는 일반적으로 사출성형을 이용하여 만들어지는데, 사출성형 과정 중의 높은 압력과 온도 변화, 고분자 사슬의 완화작용, 그리고 고분자 수지와 섬유 간의 열팽창계수의 차이 등으로 인해서 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 최종 제품의 수축 및 휨 현상을 유발시킨다. 따라서 원하는 역학적 성질을 가지는 사출성형물을 만들기 위해서는 잔류응력의 측정과 예측이 매우 중요하다고 할 수 있다.

잔류응력을 측정하는 방법으로는 일반적으로 layer-removal method 가 사용된다. 이 방법은 시편으로부터 일정한 두께의 얇은 층을 제거하게 되면, 시료 내의 평형상태가 깨지고, 시편은 평형상태를 유지하기 위해 휘게 된다. 따라서 두께 방향으로 제거하는 시편의 두께를 달리하면서 곡률을 측정

하면 이로부터 Treuting 과 Read 가 유도한 식을 이용하여 잔류응력을 계산할 수 있다 [1].

그러나 Treuting 과 Read 는 시편의 두께 방향으로 탄성계수와 Poisson 비를 일정하다고 가정하고 식을 유도하였으나, 사출성형한 단섬유 복합재료의 경우에는 두께 방향으로 탄성계수가 변하게 된다. 따라서 Treuting 과 Read 의 식을 그대로 사용하면 오차의 원인이 될 수 있다 [2].

White 는 두께 방향으로의 탄성계수와 layer-removal method 로 얻은 곡률을 이용하여 사출성형물의 이방성을 고려한 잔류응력 계산식을 제안하였다 [3].

본 연구에서는 사출성형한 폴리스티렌/탄소섬유 복합재료 시편을 layer-removal method 를 이용하여 두께 방향의 곡률 변화를 측정하고, 등방성을 가정한 Treuting 과 Read 의 식과, 이방성을 고려한 White 의 식을 이용하여 잔류응력을 계산하였다.

### 2. 이 론

#### 2.1. Treuting 과 Read 의 해석

등방성의 선형탄성물질을 가정하면 잔류응력은

\* 서울대학교 재료공학부

다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_x(z_1) = \frac{-E}{6(1-\nu^2)} \left\{ (z_0 + z_1)^2 \left\{ \frac{d\rho_x(z_1)}{dz_1} + \frac{w d\rho_x(z_1)}{dz_1} \right\} + 4(z_0 + z_1) \times \left[ \rho_x(z_1) + \nu \rho_y(z_1) \right] - 2 \int_{z_0}^{z_1} [\rho_x(z_1) + \nu \rho_y(z_1)] dz_1 \right\} \quad (1)$$

위 식에서  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 Poisson 비로 두께 방향에 상관없이 상수로 가정한다.  $\rho_x$ 와  $\rho_y$ 는 각각  $x, y$  방향의 곡률,  $z_0$ 는 시편의 원래 두께의 절반,  $z_1$ 는 layer-removal 후 중심으로부터 표면까지의 거리이다.

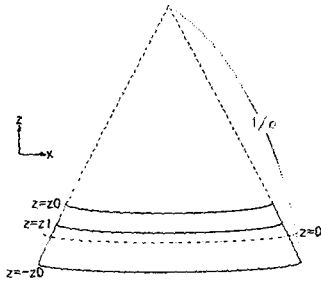


Fig. 1 Schematic diagram of determination of curvature and coordinates.

만일 한쪽 방향( $y$ )의 곡률이 아주 작아 무시할 수 있으면( $\rho_y = 0$ ), 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_x(z_1) = \frac{-E}{6(1-\nu^2)} \left\{ \begin{array}{l} (z_0 + z_1)^2 \frac{d\rho_x(z_1)}{dz_1} + 4(z_0 + z_1) \rho_x(z_1) \\ - 2 \int_{z_0}^{z_1} \rho_x(z_1) dz_1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

## 2.2. White 의 해석

두께 방향으로의 탄성계수의 변화를 알고, layer-removal 에 따른 곡률의 변화를 알면, 다음의 식들을 이용하여 잔류응력을 결정할 수 있다.

$$w(z_1) = - \frac{\int_{z_0}^{z_1} z E_x dz}{\int_{z_0}^{z_1} E_x dz} \quad (3)$$

$$M_x(z_1) = \int_{z_0}^{z_1} (z+w) \sigma_x dz \quad (4)$$

$$\frac{dM_x}{dz_1} = \frac{1}{1-\nu^2} \left\{ \begin{array}{l} \rho_x E_x (z_1 + w)^2 + \frac{d\rho_x}{dz_1} \times \\ \left( \int_{z_0}^{z_1} z^2 E_x dz + 2w \int_{z_0}^{z_1} z E_x dz + w^2 \int_{z_0}^{z_1} E_x dz \right) \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_x(z_1) = \frac{-1}{(z_1 + w)} \frac{dM_x}{dz_1} + E_x \int_{z_0}^{z_1} \frac{dM_x}{dz_1} \frac{dz}{(z_1 + w) \int_{z_0}^{z_1} E_x dz} \quad (6)$$

위 식에서  $w$ 는 layer-removal 하기 전 시편의 중립면으로부터 layer-removal 후의 중립면까지의 거리,  $M_x$ 는 중립면에 대한 단위 길이당 굽힘 모멘트이다.

## 3. 실험

### 3.1. 시편 제작

압출기(PRISM)에 폴리스티렌(GPPS HF-2680, 제일산업)과 탄소섬유(태광산업)를 넣고 펠렛을 만든 후, 사출기(Battenfeld)로 인장시편을 만들었다. 이때, 섬유의 부피비는 3%, 사출 압력은 8 MPa로 하였다.

### 3.2. layer-removal 실험

양면접착 테이프로 시편을 고정하고 밀링머신을 이용하여 layer-removal 하였고, 날의 속도는 열처리(80°C, 1h)로 잔류응력을 제거한 폴리스티렌 시편을 여러 회전속도로 실험해 본 후 밀링으로 인한 추가의 응력을 최소화하는 1450 rpm 으로 결정하였다 [4].

시편의 곡률은 스캐너로 이미지를 얻은 후, image processor 로 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 곡률

곡률의 부호를 아래로 볼록한 경우를 (-), 위로 볼록한 경우를 (+)라고 정의했을 때, 곡률은 다음 그래프와 같다.

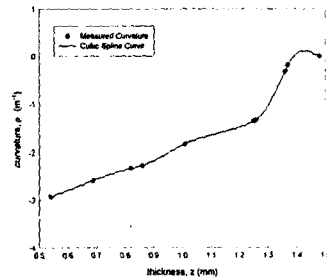


Fig. 2 Measured curvature and interpolated curvature by cubic spline function.

실험을 통해 얻은 값들은 cubic spline 함수를 이용하여 내삽하였다.

### 4.2. 잔류응력 계산 - Treuting and Read analysis

폭 방향의 곡률  $\rho_y$ 는 길이 방향의 곡률  $\rho_x$ 에 비해 아주 작아 무시할 수 있기 때문에, 식 (2)를

이용하여 잔류응력을 결정하였다.

곡률을 내삽하여 얻은 곡률함수로부터 곡률의 함수값, 미분값, 적분값을 계산하였다. 식 (2)에서 탄성계수  $E$  는 Halpin-Tsai 식을 이용하여 평균화하였고, Poisson 비는 문헌값을 사용하였다 ( $\nu=0.33$ ).

표 1.에 사용된 재료의 물질상수를 나타내었다.

	PS	탄소섬유	PS/carbon
탄성계수 ( $E_x$ )	41 MPa	264 Gpa	8 Gpa
부피비 (%)	97	3	-

표 1. Material constants used for calculation of residual stress

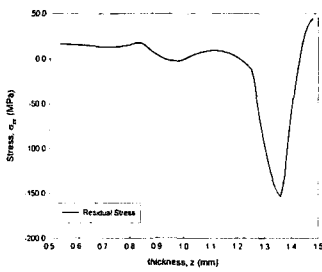


Fig. 3 Residual stress calculated from measured curvature (Treuting and Read analysis).

결과를 보면, 사출성형물이 일반적으로 보이는 것으로 알려져 있듯이 표면과 중심부에서는 인장응력, 그 사이 부분에서는 압축응력을 나타냈다. 최대 인장응력은 표면에서 약 50 MPa, 최대 압축응력은 150 MPa 정도를 보였다.

#### 4.3. 잔류응력 계산 - White analysis

White 의 해석을 이용하려면, 기본적으로 두께방향으로의 탄성계수를 알아야 한다.

본 연구에서는 수치모사를 통해 금형 내의 고분자 수지의 흐름과 섬유 배향을 예측하고 이로부터  $x$  방향의 탄성계수를 계산하여 사용하였다[5, 6].

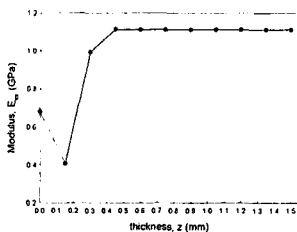


Fig. 4 Calculated Young's modulus through the thickness.

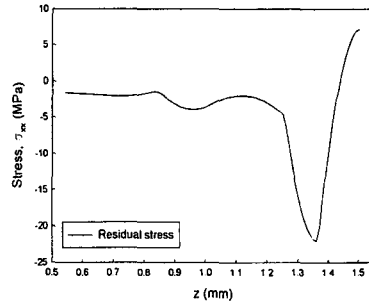


Fig. 5 Residual stress calculated from measured curvature (White analysis).

Treuting 과 Read 의 해석에서는 섬유가 모두  $x$  축 방향으로 배향되었을 경우를 가정한 탄성계수를 사용하였기 때문에 잔류응력이 크게 나왔으나, 실제로는 섬유들이 수지의 흐름에 따라 복잡하게 배향되어 있기 때문에 White 의 해석에서는 잔류응력이 10 배 정도 작은 값을 보였다.

#### 후 기

This study was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) through the Applied Rheology Center (ARC) at Korea University. The authors are grateful for the support.

#### 참고문헌

- (1) R. G. Treuting and W. T. Read, Jr., "A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials," *Journal of Applied Physics*. Vol. 22, No. 2, 1951, pp. 130-134.
- (2) J. R. White, "On the layer removal analysis of residual stress - Part 1 Polymer mouldings with depth-varying Young's modulus," *Journal of Materials Science*. Vol. 20, 1985, pp. 2377-2387.
- (3) M. W. A. Paterson and J. R. White, "Layer removal analysis of residual stress - Part 2 A new procedure for polymer mouldings with depth-varying Young's modulus," *Journal of Materials Science*. Vol 24, 1989, pp. 3521-3528.
- (4) C. H. V. Hastenberg, P. C. Wildervanck, and A. J. H. Leenen, "The Measurement of Thermal Stress Distributions Along the Flow Path in Injection-Molded Flat Plates," *Polymer Engineering and Science*. Vol. 32, No. 7, 1992, pp. 506-515.
- (5) 이광석, "공초점 레이저 주사 현미경을 이용한 단섬유 복합재료 사출성형물 내의 섬유배열 측정 및 수치모사," 석사학위논문, 서울대학교.
- (6) 이석원, "사출성형된 단섬유 복합재료의 섬유 배열과 역학적 성질 및 열팽창 계수 예측에 대한 연구," 석사학위논문, 서울대학교.