

사출성형된 단섬유 복합재료의 잔류응력 측정

이석원, 김상균*, 윤재륜
서울대학교 재료공학부
㈜ 코오롱 중앙기술원*

Measurement of Residual Stress in Injection Molded Short Fiber Composites

S. W. Lee, S. K. Kim* and J. R. Youn

Seoul National University, School of Materials Science and Engineering
KOLON Central Research Institute*

1. 서론

사출성형된 단섬유 복합재료는 뛰어난 역학적 성질과 제작의 용이성, 그리고 경제적 이점 등으로 인해서 많은 산업의 응용 분야에서 널리 이용되고 있다. 사출성형된 단섬유 복합재료는 공정 중에 발생한 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. 사출성형된 순수 고분자 제품의 잔류응력은 일반적으로 *layer-removal method*에 의해서 측정될 수 있다. 시편으로부터 일정한 두께의 얇은 층을 제거하게 되면, 시료 내의 평형상태가 깨지고 남은 시편이 다시 평형상태를 유지하기 위해 휘게 된다. 따라서 시편의 층을 두께 방향으로 제거해나가며 곡률을 측정하면 잔류응력을 결정할 수 있다[1].

비교적 두께 방향으로 일정한 탄성계수와 Poisson비를 가지는 순수 고분자 제품과는 달리 사출성형한 단섬유 복합재료의 경우에는 두께 방향으로 섬유 배열의 분포를 가지게 되고, 이에 따라 탄성계수가 변하게 된다. 따라서, Treuting과 Read[1]의 식을 그대로 사용하면 오차의 원인이 될 수 있다[2]. White[3]는 두께 방향으로의 탄성계수와 *layer-removal method*로 얻은 곡률을 이용하여 사출성형물의 이방성을 고려한 잔류응력을 결정하는 식을 제안하였다.

본 연구에서는 사출성형한 폴리스티렌/탄소섬유 복합재료 시편을 *layer-removal method*를 이용하여 두께 방향의 곡률 변화를 측정하고, 등방성을 가정한

Treuting과 Read의 식과, 이방성을 고려한 White의 식을 이용하여 잔류응력을 결정하였다.

2. 이론

2.1. Treuting과 Read 해석

등방성의 선형탄성물질을 가정하면 잔류응력은 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다[1].

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

위 식에서 E 는 탄성계수, ν 는Poisson비로 두께 방향에 상관없이 상수로 가정한다. ρ_x 와 ρ_y 는 각각 x, y 방향의 곡률, z_0 는 시편의 원래 두께의 절반, z_1 는layer-removal후 중심으로부터 표면까지의 거리이다.

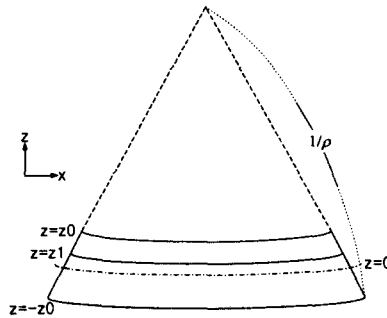


Fig. 1. Schematic diagram of coordinates and curved specimen after layer removal.

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

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

2.2. White의 해석

두께 방향으로의 탄성계수의 변화를 알고, layer-removal에 따른 곡률의 변화를 알면, 다음의 식들을 이용하여 잔류응력을 결정할 수 있다[3].

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

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

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

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

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

3. 실험

3.1. 시편제작

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 80 MPa로 하였다.

3.2. Layer-removal 실험

양면접착 테이프를 고정하고 밀링머신을 이용하여 layer-removal 하였다. 밀링머신의 날의 회전 속도는 열처리(80°C, 1hr)로 잔류응력을 제거한 폴리스티렌 시편을 여러 회전속도로 실험해 본 후, 밀링으로 인한 추가의 응력을 최소화하는 1450 rpm으로 결정하였다[4].

시편의 곡률은 스캐너로 이미지를 얻은 후, image processor로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 곡률

곡률의 부호를 아래로 볼록한 경우를 (-), 위로 볼록한 경우를 (+)라고 정의했을 때, 실험적으로 측정된 곡률을 Fig. 2에 나타내었다. 실험을 통해 얻은 값들을 natural cubic spline 함수를 이용하여 내삽하였다.

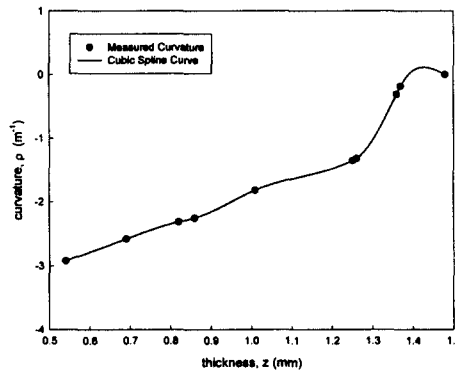


Fig. 2. Measured curvature and interpolated curvature by cubic spline function.

4.2. 잔류응력 계산 – Treuting and Read Analysis

폭 방향의 곡률 ρ_y 는 길이 방향의 곡률 ρ_x 에 비해 아주 작아 무시할 수 있기 때문에, 식 (2)를 이용하여 잔류응력을 결정하였고, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 곡률을 내삽하여 얻은 곡률함수로부터 곡률의 함수값, 미분값, 적분값을 계산하였다. 식 (2)에서 탄성계수 E 는 섬유들이 유동방향으로 모두 배열되었다고 가정하고 Halpin-Tsai식을 이용하여 평균화 하였다. Poisson비는 문헌값을 사용하였다 ($\nu=0.33$). Table 1에 사용된 재료의 물질상수를 나타내었다.

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

Table 1. Material constants used for calculation of residual stress.

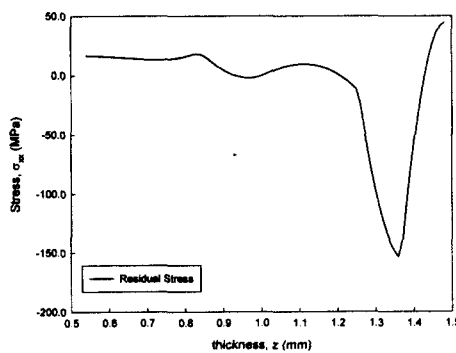


Fig. 3. Residual stress determined from measured curvature (Treuting and Read analysis).

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

White의 해석을 이용하려면, 기본적으로 두께방향으로의 탄성계수의 분포를 알아야 한다. 본 연구에서는 수치모사를 통해 금형 내의 고분자 수지의 흐름과 섬유 배열을 예측하고 이로부터 x 방향의 탄성계수를 계산하여 사용하였다[5, 6].

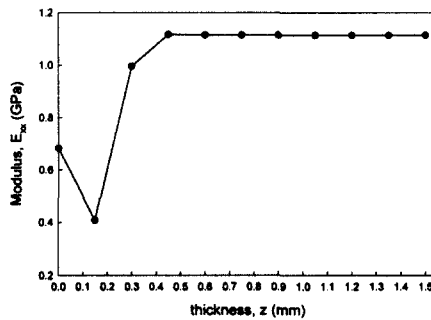


Fig. 4. Predicted Young's modulus through the thickness.

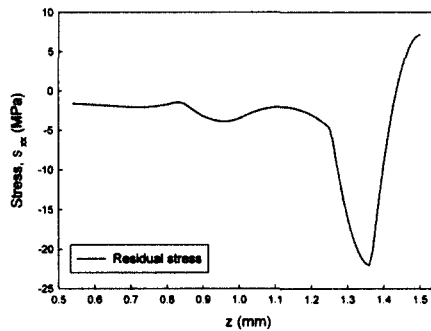


Fig. 5. Residual stress determined from measured curvature (White analysis).

Treuting 과 Read의 해석에서는 섬유가 모두 x 축 방향으로 배열되었을 경우를 가정한 탄성계수를 사용하였기 때문에 잔류응력이 크게 나왔으나, 실제로는 섬유들이 수지의 흐름에 따라 복잡하게 배열되어 있기 때문에 White의 해석에서는 잔류응력이 10배 정도 작은 값을 보였다.

5. 결론

사출성형된 단섬유 복합재료의 잔류응력을 layer-removal method를 사용하여 측정하였다. 사출성형된 단섬유 복합재료의 경우에는 두께 방향으로의 탄성계수의 분포를 가지기 때문에 이를 고려하기 위하여 수치모사를 통해서 얻어진 섬유배열을 바탕으로 계산된 탄성계수의 분포를 고려하여 잔류응력을 결정하였다. 탄성계수의 분포를 고려할때나 하지 않을때나 모두 인장응력-압축응력-인장응력의 잔류응력 분포를 나타내었지만 그 크기는 10배정도 차이가 나는 결과를 보였다.

후기

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. Treuting, R. G. and W. T. Read, Jr., 1951, "A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials," *Journal of Applied Physics*, 22, 130.
2. White, J. R., 1985, "On the layer removal analysis of residual stress – Part 1 : Polymer mouldings with depth-varying Young's modulus," *Journal of Materials Science*, 20, 2377.
3. Paterson M. W. A. and J. R. White, 1989, "Layer removal analysis of residual stress – Part 2 : A new procedure for polymer mouldings with depth-varying Young's modulus," *Journal of Materials Science*, 24, 3521.
4. Hastenberg, C. H. V., P. C. Wildervanck, and A. J. H. Leenen, 1992, "The Measurement of Thermal Stress Distributions Along the Flow Path in Injection-Molded Flat Plates," *Polymer Engineering and Science*, 32, 506.
5. Lee, K. S., 2001, "A study on fiber orientation in injection molded short fiber composites with a confocal laser scanning microscope," Ms Thesis, Seoul National University.
6. Lee, S. W., 1997, "Study on the prediction of fiber orientation, mechanical properties, and thermal expansion coefficients of injection molded short fiber composites," Ms Thesis, Seoul National University.