

두꺼운 복합재 원통의 잔류응력 측정방법

김종운*·박동창*·이대길**

Measurement Method of Residual Stresses in Thick Composite Cylinders

Jong Woon Kim, Dong Chang Park, and Dai Gil Lee

Abstract

During manufacturing thick composite cylinders, large thermal residual stresses are developed and induce catastrophic interlaminar failures. Since the residual stresses are dependent on many process parameters, such as temperature distribution during cure, cure shrinkage, winding tension, and migration of fibers, calculation of the residual stresses is very difficult. Therefore a radial-cut method have been used to measure the residual stresses in the composite cylinders. But the conventional radial-cut method needs to know numerous material properties which are not only troublesome to obtain but also vary with change of fiber arrangement during consolidation. In this paper, a new radial-cut method with cut-cylinder-bending test was proposed and the measured residual stresses were compared with calculated thermal residual stresses. It was found that the new radial-cut method which does not need to know any of material properties gave better estimation of residual stresses regardless of radial variation of material properties. Additionally, interlaminar tensile strength could be obtained by the cut-cylinder-bending test.

Key Words: Thick Composite cylinder, Thermal Residual Stress, Radial-cut Method, Curved Beam Bending, Shear Deformation of Fabrics, Interlaminar Tensile Strength

1. 서 론

두꺼운 섬유강화 복합재료를 적층하여 원통 구조물을 제조할 때, 복합재료의 열팽창계수 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE)의 이방성 등에 의해 잔류응력이 발생한다. 보다 큰 내압을 지지하기 위해 원통 구조물의 두께가 커질 경우에 잔류응력 또한 증가하고, 반경방향의 인장 잔류응력이 층간 인장강도 (Interlaminar Tensile Strength, ILTS)보다 커지면 박리 등의 파손이 일어나 구조물의 신뢰성을 저하시키고 있다. 그런데 경화사이클 중의 온도분포, 경화수축, 와인딩 장력 및 압밀에 의한 섬유 적층 상태의 변화 등

의 여러 가지 공정변수가 잔류응력의 크기와 분포에 영향을 미치기 때문에, 잔류응력을 계산하기 위해서는 복잡한 해석과 방대한 물성 데이터가 요구된다. 따라서 제조된 구조물에 존재하는 잔류응력을 측정하여 구하는 방법이 적용되어 왔으며, 그 중 대표적인 실험 기법이 반경절단법 (radial-cut method)이다 [1]. 그러나 기존의 반경절단법은 복합재료의 압밀 상태에 따라 변하는 여러 가지 물성치 데이터를 필요로 하고 섬유 적층 상태의 변화를 고려하기 어려웠다.

본 연구에서는 공정에 따라 변화하는 복합재료의 물성치 데이터를 구하는 대신에, 반경절단된 원통인 굽은 보의 굽힘 시험 (cut-cylinder-bending test)을 통해 반경절단 시 측정되는 변형량을 잔류응력으로 환산하는 간단한 방법을 개발하였으며, 굽힘 시험에서 부가적으로 층간 인장강도 또한 얻을 수 있었다.

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 실험 방법

2.1 시편의 제조

탄소직물/페놀 프리프레그 (carbon fabric phenolic prepreg, CF3336, 한국화이바)를 $[\pm 45]_n$ 로 적층하고 외측 금형의 내부에 삽입하여 내경부를 기계적으로 확장하는 inside-out 방법[2]을 사용하여 일정한 정도의 두께방향 압착 (compaction)을 갖는 두꺼운 복합재 원통을 제작하였다. 모든 층을 적층한 뒤에 압착을 한번에 실시하는 일단 압착공정을 적용한 시편의 경우에, 반경방향 두께의 수축은 안쪽 층의 원주방향 신장을 수반하고, Fig. 1과 같이 반경위치에 따라 섬유적층각이 변화하게 된다. 한편 일부 층의 적층과 압착을 반복하는 다단 압착공정을 적용할 경우에는 반경위치에 따른 섬유적층각의 변화가 거의 없는 시편이 제작되었다. Table 1은 제작된 시편의 치수와 압착방법 및 적층각을 나타낸다.

2.2 기존 반경절단법

반경절단법은 원통 구조물을 반경방향으로 절단할 때 발생하는 변형을 측정하여 탄성이론 (elasticity theory)을 통해 잔류응력으로 환산하는 방법이다. 반경절단된 원통을 굽은 보 (curved beam)로 볼 때, 잔류응력 이완으로 인해 변형된 보의 양단에 모멘트만을 가함으로서 원래의 형태로 돌이킬 수 있다고 가정한다. Fig. 2와 같은 반경절단 시험 시에 발생하는 원주방향 상대 변형률 (relative hoop strain)을 원통의 내면($\Delta \varepsilon_c^a$) 또는

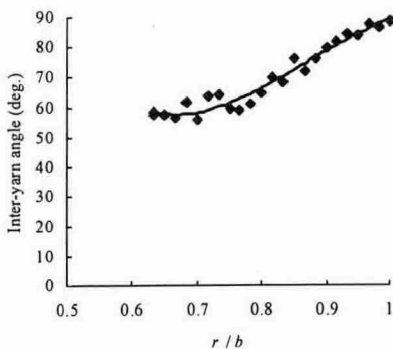


Fig. 1. Inter-yarn angle (M60).

Table 1. Specifications of cylinder specimens

	M60	M90	O75
압착방법	다단	다단	일단
내경 a (mm)	60.9	90.7	75.8
외경 b (mm)	120	120	120
길이 w (mm)	36.3	36.6	17.5
적층각 β	$\pm 38^\circ$	$\pm 38^\circ$	(Fig. 1)

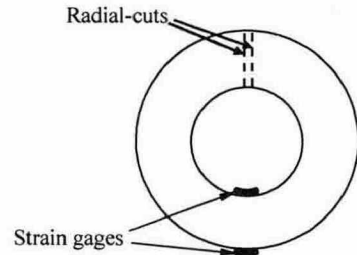


Fig. 2. Radial-cut test.

외면($\Delta \varepsilon_c^b$)에서 측정하고, 탄성 이론[3]을 통해 다음의 식으로 잔류응력의 분포가 구해진다.

$$\sigma_r(r) = \frac{4M_R / wb^2}{(1-\bar{a}^2)^2 - 4\bar{a}^2(\log \bar{a})^2} \left[\left(\frac{\bar{a}}{\bar{r}} \right)^2 \log \bar{a} + \log \bar{r} + \bar{a}^2 \log \frac{\bar{a}}{\bar{r}} + 1 - \bar{a}^2 \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{4M_R / wb^2}{(1-\bar{a}^2)^2 - 4\bar{a}^2(\log \bar{a})^2} \left[- \left(\frac{\bar{a}}{\bar{r}} \right)^2 \log \bar{a} + \log \bar{r} + \bar{a}^2 \log \frac{\bar{a}}{\bar{r}} \right] \quad (2)$$

여기서 $\bar{a} = a/b$, $\bar{r} = r/b$ 는 normalize된 치수이고, 잔류모멘트 M_R 은 축방향으로 굽은 원통일 경우 다음의 경계조건 중의 하나로부터 구해진다.

$$\sigma_\theta(a) = E_\theta \Delta \varepsilon_c^a, \quad \sigma_\theta(b) = E_\theta \Delta \varepsilon_c^b \quad (3)$$

2.3 새 반경절단법

위와 같은 기존 반경절단법은 위치에 따른 물성변화가 없으며, 그 물성치 또한 확보되었을 경우에만 적용이 가능한 방법이다. 특히 직물복합재 구조물의 경우에 직조된 성긴 구조에 의해 압밀 공정에 따른 물성치의 변화 또는 구배가 발생하기 쉽고, 이는 기존 반경절단법에 의한 잔류응력 측정의 오차를 야기한다. 따라서 물성치 확보의 복잡성을 피하고 Fig. 1과 같이 위치에 따른 물성변화가 있을 때에도 적용할 수 있는 새로운 반경절단법을 개발하였다.

반경절단 시 측정된 상대 변형률을 잔류응력으로 환산함에 있어서, 압밀 상태와 섬유적층 상태에 의해 변화하는 방대한 재료물성 데이터를 확보하는 대신에, Fig. 3과 같이 반경절단 시험

후의 원통에 대한 굽힘 시험을 수행하였다. 굽힘 시험 중에는 가해진 인장하중 P , 원통의 내면 및 외면에서의 원주방향 변형률 (ε_B^a , ε_B^b)이 측정되었다. 변형률 측정부 근방에서의 하중상태는 Fig. 4와 같이 힘 성분 P 와 모멘트 성분 M 으로 주어지며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M = \left(\frac{a+b}{2} \right) P \quad (4)$$

그러면 변형률과 모멘트의 관계는

$$\varepsilon_B^a = \phi_B^a M, \quad \varepsilon_B^b = \phi_B^b M \quad (5)$$

으로 구해지고, 비례상수는 힘 성분과 모멘트 성분의 합으로 나타내어진다.

$$\phi_B^a = \phi_F + \phi_M^a, \quad \phi_B^b = \phi_F + \phi_M^b \quad (6)$$

한편, 반경절단 시험에서 측정된 상대 변형률은 모멘트 성분에 의해 발생한 것으로 보면,

$$\Delta \varepsilon_C^a = \phi_M^a M_R, \quad \Delta \varepsilon_C^b = \phi_M^b M_R \quad (7)$$

이 성립하고, 식 (6)과 (7)로부터 ϕ_M^a , ϕ_M^b , ϕ_F 이 구해져서, 잔류모멘트 M_R 을 얻을 수 있다.

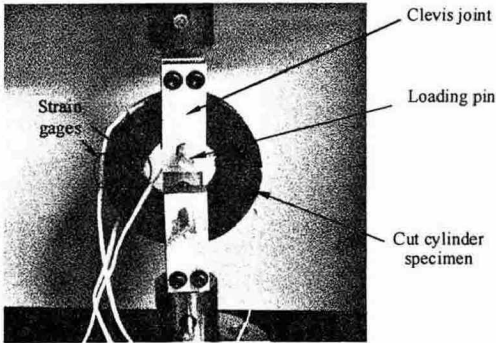


Fig. 3. Cut-cylinder-bending test.

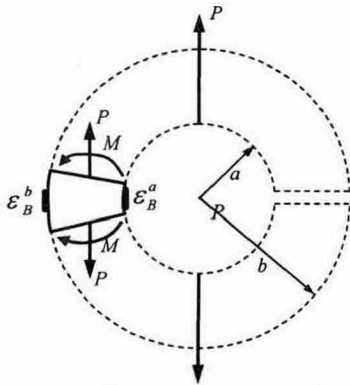


Fig. 4. Force and moment components during the cut-cylinder-bending test.

잔류응력은 반경절단된 원통에 잔류모멘트를 반대로 가했을 때 발생하는 응력으로서 구해진다. 위치에 따른 물성변화가 없는 경우에는 잔류모멘트를 식 (1)과 (2)에 대입하여 잔류응력을 바로 구할 수 있다. 위치에 따른 물성변화를 고려하는 경우는 추가적인 데이터 처리가 필요하다. 굽은 보가 모멘트 하중을 받을 때 단면이 평면으로 유지된다는 가정으로부터 원주방향 변형률 분포는 다음 형태로 표현된다[4].

$$\varepsilon_\theta(r) = K \left(1 - \frac{R}{r} \right) \quad (8)$$

위 식의 계수 K 와 R 은 반경절단 시험 결과인 $\Delta \varepsilon_C^a$ 와 $\Delta \varepsilon_C^b$ 의 경계조건으로부터 얻을 수 있다. 위치에 따른 물성 구배를 고려하기 위해 다음과 같이 강성함수 $E(r)$ 을 정의하자.

$$\sigma_\theta(r) = E(r) \varepsilon_\theta(r) \quad (9)$$

모멘트 $-M_R$ 하에서 힘과 모멘트의 평형으로

$$\int_a^b \sigma_\theta(r) dr = \int_a^b E(r) \varepsilon_\theta(r) dr = 0 \quad (10)$$

$$\int_a^b \sigma_\theta(r) r dr = \int_a^b E(r) \varepsilon_\theta(r) r dr = -\frac{M_R}{w} \quad (11)$$

이 성립해야 한다. 또한 굽힘시험 중의 힘 평형이 다음과 같이 표현된다.

$$\int_a^b E(r) \varepsilon_F dr = \int_a^b E(r) \phi_F M dr = \frac{P}{w} \quad (12)$$

식 (10)-(12)을 만족시키기 위한 강성함수 $E(r)$ 을 이차함수로 표현할 수 있다.

$$E(\bar{r}) = c_0 + c_1 \bar{r} + c_2 \bar{r}^2 \quad (13)$$

식 (13)을 식 (10)-(12)에 대입하여 얻어지는 세 개의 식으로부터 식 (13)의 계수 c_0 , c_1 , c_2 가 구해진다. 그러면 원주방향 잔류응력은 다음과 같이 주어지고,

$$\sigma_\theta(r) = (c_0 + c_1 \bar{r} + c_2 \bar{r}^2) K \left(1 - \frac{\bar{R}}{\bar{r}} \right) \quad (14)$$

여기서 $\bar{R} = R/b$ 이다. 이로부터 반경방향 잔류응력을 구하기 위해서 다음의 축대칭 평형방정식과 경계조건을 이용하여 풀면,

$$\frac{d\sigma_r(r)}{dr} + \frac{\sigma_r(r) - \sigma_\theta(r)}{r} = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_r(a) = 0, \quad \sigma_r(b) = 0 \quad (16)$$

반경방향 잔류응력은 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma_r(r) = \frac{K}{\bar{r}} \left[\left(c_0 \bar{r} + \frac{c_1}{2} \bar{r}^2 + \frac{c_2}{3} \bar{r}^3 \right) - \bar{R} \left(c_0 \log \bar{r} + c_1 \bar{r} + \frac{c_2}{2} \bar{r}^2 \right) + X \right],$$

$$X = -\left(c_0 + \frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{3}\right) + \bar{R}\left(c_1 + \frac{c_2}{2}\right) \quad (17)$$

한편, 새로운 반경절단법의 부가적인 장점은 반경절단된 원통의 굽힘 시험으로부터 반경방향 잔류응력이 최대인 위치에서의 층간 인장강도를 얻을 수 있다는 것이다. 굽힘 시험 중에 박리가 발생할 때의 모멘트 성분 M_D 의 측정치로부터 층간 인장강도는

$$ILTS = \frac{M_D}{-M_R} \cdot \max_{a < r < b} \{\sigma_r(r)\} \quad (18)$$

으로 주어지고, 측정된 반경방향 최대 잔류응력과의 비교를 통해 층간 박리에 대한 신뢰성을 평가할 수 있다.

3. 결과 및 검토

이상과 같은 잔류응력 측정방법을 검증하기 위해 적층각 분포를 고려하여 열잔류응력을 유한요소법으로 계산하였다. Fig. 5는 계산된 열잔류응력과 측정된 잔류응력을 나타내며, CAL, CON, HOM, VAR는 각각 계산, 기존 반경절단법, 위치에 따른 물성변화가 없는 경우의 새로운 반경절단법, 위치에 따른 물성변화를 고려한 새로운 반경절단법을 나타낸다. M60의 경우 잔류응력 측정시험 이전에 이미 박리가 존재하여 측정결과들이 모두 오차가 컸으나, 다른 측정방법들과 달리 VAR는 박리의 존재여부를 검출할 수 있었다. M90의 경우 CON만 오차가 컸는데, 실제 적층각인 $\pm 38^\circ$ 가 아닌 물성치 데이터가 확보된 $\pm 45^\circ$ 적층판의 물성을 잔류응력 환산에 사용했기 때문이다. O75의 경우 VAR만이 위치에 따른 물성변화에 의한 잔류응력 분포의 형태와 크기를 잘 예측할 수 있었다. M90과 O75의 층간 인장강도 측정 결과는 각각 9.23 MPa, 7.10 MPa이었다.

4. 결론

본 연구에서는 물성치 데이터가 확보되지 않았거나 위치에 따른 물성 변화가 존재할 때에도 적용이 가능한 새로운 반경절단법을 적용하여 잔류응력을 측정하였으며, 열잔류응력의 계산 결과와 잘 일치하였다. 새 방법에서는 부가적으로 층간 인장강도도 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 '내열 복합재료 원 환체 구조물의 잔류응력 평가기법' 위탁연구의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

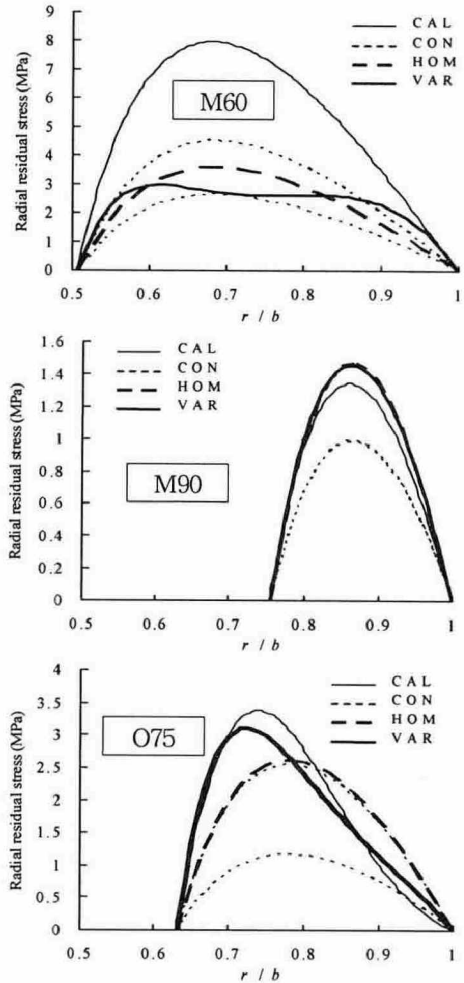


Fig. 5. Calculated and measured residual stresses.

참고문헌

- (1) Aleong, C. and Munro, M., "Evaluation of the Radial-cut Method for Determining Residual Strains in Fiber Composite Rings," *Experimental Techniques*, Vol. 15, 1991, pp. 55-58.
- (2) 김종운, 김형근, 이대길, "압착에 따른 두꺼운 직물 복합재 고리의 잔류응력", 한국복합재료학회 추계학술대회, 2004.
- (3) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 1970, pp. 71-77.
- (4) Beer, F.P. and Johnston Jr. E.R., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, 1992, pp. 257-262.