

# 압착에 따른 원환체 형상의 두꺼운 직물 복합재 내부의 잔류응력

김종운\*·김형근\*\*·이대길\*\*\*

## Residual Stresses in Thick Fabric Composite Rings with Respect to Compaction

Jong Woon Kim, Hyoung Geun Kim and Dai Gil Lee

### Abstract

The fabric composite rings for nozzle parts of solid rocket motors should be thick to endure high temperature and pressure of combustion gas. Since the thermal residual stresses developed during manufacturing of the axi-symmetric composite structures increase as the thickness increases and eventually induce failures during storage and operation, the estimation of the residual stresses is indispensable for design and manufacture of the thick composite nozzle parts. In this paper, thick fabric rings made of carbon fabric phenolic composites were fabricated in a hydroclave and in an autoclave using a multi-step pre-compaction process to minimize draping. The residual stresses distributed in the rings were measured by the radial-cut method and it was found that the compaction reduces the residual stresses in the composite ring.

**Key Words:** Fabric composite (직물 복합재), Thick composite ring (두꺼운 복합재 고리), Thermal residual stress (열잔류응력), Compaction (압착), Draping (드레이핑).

### 1. 서 론

유도무기용 추진기관의 노즐 (nozzle)의 기능적 요구조건 (functional requirement)은 연소가스가 설계한 대로 흘러갈 수 있도록 공력형상을 유지하는 라이너 (liner)로서의 역할과, 연소가스로부터 전달되는 열을 차단하는 단열재 (insulator)로서의 역할, 그리고 연소가스의 압력을 견디는 구조물 (structure)로서의 역할이다. 이와 같은 기능들을 만족시키기 위한 노즐 재료는 노즐의 공력형상을 유지하기 위한 내삭마성 (ablation resistance), 외부 구조물의 온도 상승을 제한하기 위한 낮은 열전도율, 그리고 기계적 강도를 동시에 만족시켜야 하기 때문에, 탄소직물/페놀 복합재료 (carbon fabric phenolic composite)가 적용되고 있으며, 두꺼운 축대칭 형상의 구조물로 제작된다.

그런데, 탄소섬유와 페놀수지의 열팽창계수 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE)의 큰 차이로 인한 탄소직물/페놀 복합재의 열팽창계수의 이방성 (anisotropy)은 제작 공정 중에 온도강하를 겪는 축대칭 형상의 구조물에 열잔류응력 (thermal residual stress)을 형성시키고, 구조물의 반경방향 두께가 커질수록 잔류응력도 증가하여 층간 박리 (delamination)와 같은 치명적인 결함을 야기하기 때문에, 노즐 구조물의 두께의 증가가 제한되고 있다. 또한, 두꺼운 축대칭 형상으로 적층된 직물 복합재의 압밀 (consolidation)이 진행될 때 반경방향 두께의 압착 (compaction)과 드레이핑 (draping) 변형에 따라 직물 복합재의 강성과 열팽창계수 등이 달라지기 때문에 제작 공정에 따라 잔류응력이 변화한다. 따라서 잔류응력을 저감시켜 노즐 부품의 신뢰성을 향상시키기 위한 설계의 지표 및 공정 개발의 평가 잣대로서 구조물 내부에 분포하는 잔류응력에 대한 정량적인 측정이 필요하다.

본 연구에서는 드레이핑의 발생을 최소화하는 다단 예압착 공정 (multi-step pre-compaction

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 국방과학연구소

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과

process)을 사용하여 두꺼운 탄소직물/페놀 복합재 원환체 시편을 제작하였으며, 복합재 원환체 구조물 내부의 잔류응력을 측정하는 대표적인 실험 방법인 반경절단법 [1] (radial-cut method)을 적용하였다. 압착 공정에 의한 두께방향 열팽창계수의 변화 [2]를 고려한 열잔류응력의 해석과 잔류응력의 실험적 측정 결과를 비교하여 압착이 잔류응력의 형성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 두꺼운 복합재 원환체의 제조

노즐 부품은 내삭마성과 단열성을 만족시키고자 페놀수지에 PAN계 (polyacrylonitrile-based) 또는 레이온계 (rayon-based) 탄소직물이 보강된 복합재료 프리프레그 (prepreg)를 축대칭 형상으로 두껍게 적층하여 성형하는데, 직물의 드레이핑 변형에 의해 압밀을 용이하게 하고 열잔류응력을 감소시키기 위해 축방향에 대한 방사 (yarn) 방향이  $\pm 45^\circ$ 가 되도록 Fig. 1과 같은 형상으로 적층한다.

직물 복합재를 적층할 때 두께방향의 압착이 불충분하면, 직물의 면내 (in-plane) 방향으로 주름 (wrinkle)이 발생하거나 방사 형상의 사이에 갇힌 공기 (entrapped air)가 성형 후 기공 (void)으로 남게 되어 층간강도 (interlaminar strength)를 저하시키고, 직물 층 사이의 수지과다영역 (resin-rich area)으로 인한 큰 두께방향 열팽창계수는 열잔류응력을 증가시킨다. 따라서 두꺼운 직물층의 충분한 압밀을 위해서 하이드로클레이브 (hydroclave)를 사용하여 7.0 MPa의 압력을 가하여 성형하게 되는데, 본 연구에서는 비용 절감을 위해서 오토클레이브 (autoclave)의 0.7 MPa의 성형 압력과 함께 Fig. 2(a)와 같은 기계적인 반경 확장 치구 (radial expansion jig)를 사용하여 두께방향의 압착을 위한 하중을 가하는 공정을 다음과 같이 적용하였다. Fig. 2(b)와 같이 적층된 프리프레그의 내경에 반경 확장 치구를 삽입하고 프리프레그 변형을 원활하게 하고자 80°C로 온도를 높인다. 반경방향으로 치구를 확장시키면 적층된 직물은 두께방향으로는 압착되고 드레이핑 변형에 의해 원주방향으로 신장이 일어난다. 상온으로 냉각시킨 후 치구를 분리하면 원주방향 드레이핑 변형의 안정화로 인해 두께방향의 압착 상태가 유지되며, 진공백 (vacuum bag)을 적용하여 오토클레이브 내에서 경화시킨다. Fig. 3(a)는 예압착 공정을 적용하지 않고 제작한 시편에 발생한 주름을 보이며, 예압착을 적용하여 Fig. 3(b)와 같이 주름을 제거한 시편이 제작되었다.

축대칭 형상으로 적층된 두꺼운 직물 복합재는 경화 공정 동안 압밀이 진행될 때, 직물의 성긴 구조로 인해 두께방향 또는 반경방향으로 압착이 일어나고 두께가 감소한다. 이로 인한 각 직물층 (fabric layer)의 반경의 증가는 원주방향의 신장 (extension)을 필요로 하여 직물층의 드레이핑 변

형을 수반하게 된다. 구조물의 두께가 매우 두꺼울 경우에, Fig. 4(a)와 같이 드레이핑 변형이 로킹 (locking)에 의해 제한되어 결국 충분한 압밀이 얻어지지 못하고 주름과 편심 (eccentricity) 등이 발생한다. 또한 드레이핑이 커지면 원주방향의 강성 증가가 잔류응력을 증가시키며 직물층 사이의 네스팅 (nesting) 효과의 감소에 의한 층간강도의 저하가 발생할 수 있다. 따라서 두꺼운 축대칭 구조물을 제조할 때 드레이핑 발생을 최소화하기 위해서 적층과 반경확장을 여러 단계로 나누어 진행하는 다단 예압착 공정을 적용하여 시편을 제조한 결과, Fig. 4(b)와 같이 충분한 압착을 얻을 수 있었다. 직물 띠의 그물 모델 (net model)을 적용하여 드레이핑 변형량을 계산한 결과, 여섯 단계의 다단 예압착 공정을 적용할 경우 Fig. 5와 같이 방사각 각도 (inter-yam angle)가  $80^\circ$  이상이 되어 드레이핑의 발생이 적었다.

## 3. 잔류응력의 해석

두꺼운 원환체 형상의 탄소직물/페놀 복합재의 잔류응력의 해석에서 다음과 같은 가정을 사용하였다. 탄소 직물의 높은 열전도도에 근거하여 균

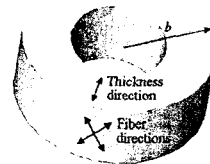


Fig. 1. Nozzle specimen

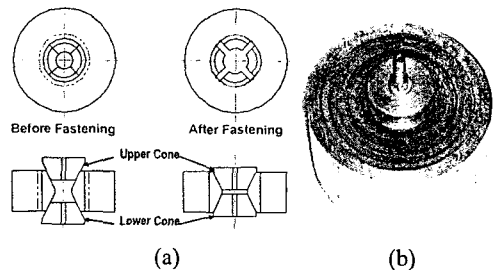


Fig. 2. Radial expansion jig

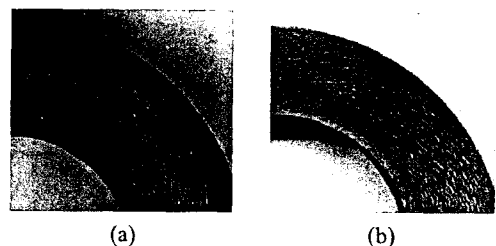


Fig. 3. Elimination of the wrinkle

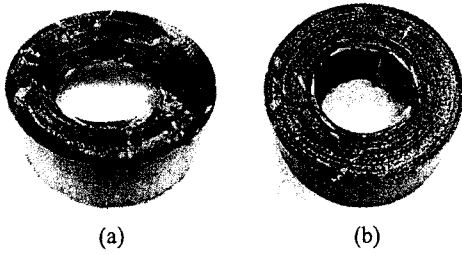


Fig. 4. Elimination of the fabric locking

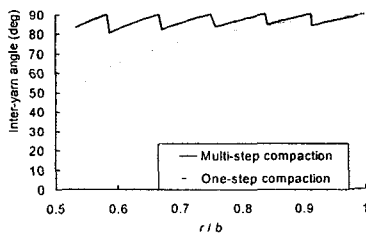


Fig. 5. Distribution of inter-yarn angle

일한 온도변화에 의해 발생하는 열잔류응력만 고려한다. 드레이핑 변형의 최소화로부터 균일한 선형 탄성 물성을 가지는 원통 직교이방성 (cylindrically orthotropic) 재료라고 가정한다. 짧은 축방향 길이 (axial length)를 갖는 형상이므로 평면응력 (plane stress) 상태이다. 이와 같은 가정을 사용하면 탄성이론 (elasticity theory)으로부터 원환체 내부에 분포하는 원주방향 및 반경방향 잔류응력의 해석해 (analytic solution)을 얻을 수 있고, 이를 실험적으로 측정된 잔류응력의 분포와의 비교에 사용하였다.

잔류응력의 해석에 사용된 탄소직물/페놀 복합재  $[\pm 45]_n$  적층판의 기계적 물성을 Table 1에 나타내었다. 직물 복합재의 물성 중에서 잔류응력 형성의 주원인인 두께방향 열팽창계수 (through-thickness CTE)가 Fig. 6과 같이 압착 정도에 따라 크게 변화하므로 [2], 제작된 복합재 시편의 플라이 두께 (ply thickness)를 측정하여 그에 해당하는 두께방향 열팽창계수를 잔류응력의 해석에 사용하였다.

#### 4. 잔류응력의 측정

복합재 원환체 내부의 잔류응력을 측정하기 위해서 Fig. 7과 같이 반경방향으로 원환체를 절단하여 원환체 외경면에서의 원주방향 변형을 변화를 측정하는 반경절단법 [1]이 사용되었다. 절단면에서 제거되는 원주방향 잔류응력을 순수 모멘트 (pure moment)로 가정하여 곡선 보 이론 (curved beam theory)을 사용하여 변형을 계측치를

Table 1.  $[\pm 45]_n$  Laminate properties

	8-harness satin weave PAN-based carbon fabric phenolic resin composite	Twill weave rayon-based carbon fabric phenolic resin composite
$E_x = E_y$ (GPa)	18.8	10.8
$E_z$ (GPa)	6.21	8.45
$\nu_{xy} = \nu_{yx}$	0.715	0.345
$\nu_{yz} = \nu_{zy}$	0.0466	0.264
$\nu_{xz} = \nu_{zx}$	0.141	0.351
$G_{xy}$ (GPa)	28.6	5.85
$G_{yz} = G_{zy}$ (GPa)	2.75	1.94
$\alpha_x = \alpha_y$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ )	0.8	7.4
$\alpha_z$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ )	33.5	25

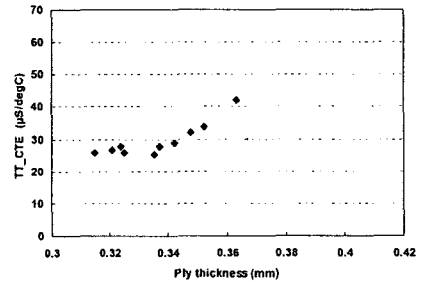


Fig. 6. Through-thickness CTE

잔류응력 분포로 환산하였다.

복합재 원환체를 이루는 재료가 잔류응력에 미치는 영향을 알아보려고 PAN계 및 레이온계 탄소직물/페놀 복합재로 시편을 제작하였으며, 또한 성형 공정의 영향을 알아보기 위하여 각 재료에 대해 하이드로클레이브에서 성형한 시편과 다단 압착 공정을 사용하여 오토클레이브에서 성형한 시편을 잔류응력 측정 실험에 사용하였다. 모든 복합재 원환체 시편의 형상은 내경과 외경의 비가 0.75이었으며 방사각 각도는  $80^\circ$  이상으로서 드레이핑 변형이 적었다.

반경절단 시험으로부터 얻어진 반경방향과 원주방향의 잔류응력을 Fig. 8에 나타내었으며, PAN계 원환체 시편의 잔류응력이 레이온계 원환체 시편에 비해 큰 것을 알 수 있으며, 이는 PAN계 재료에서 원주방향과 반경방향의 열팽창계수의 이방성이 크기 때문이다. 그런데 레이온계 원환체의 잔류응력은 성형 공정에 따른 차이가 거의 없는 반면, PAN계 원환체는 오토클레이브로 성형된 시편에서 하이드로클레이브로 성형된 시편보다 훨씬 큰 잔류응력이 측정되었다. 이것은 오토클레이브와 하이드로클레이브로 성형된 PAN계 시편의 플라이 두께를 관찰한 결과 각각 0.41 mm와 0.35 mm로 압착 정도의 큰 차이가 있었던 반면, 레이온계 시편은 각각 0.48 mm와 0.47 mm로서 압착 정도의 차이가 거의 없었기 때문이다. Fig. 6과 같은 압착 정도에 따른 두께방향 열팽창계수를 이용하여 잔류응력을 해석한 결과를 측정 결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었

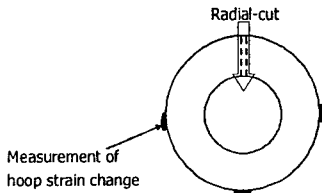


Fig. 7. Radial-cut method

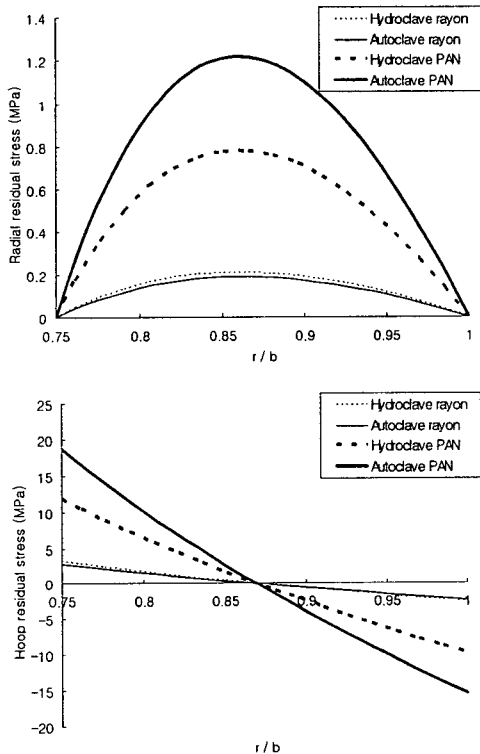
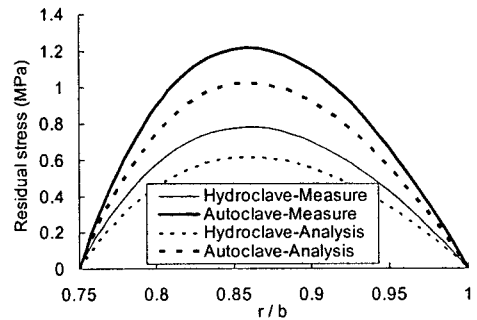


Fig. 8. Measured residual stresses

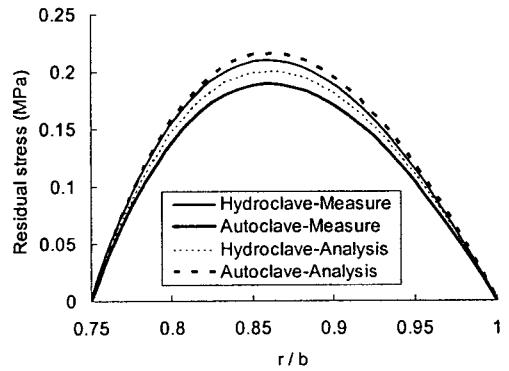
다. PAN계 시편의 두께방향 열팽창계수는 오토클레이브와 하이드로클레이브로 성형된 시편에서 각각  $51 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 와  $33.5 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 로서 크게 다르기 때문에 PAN계 시편의 공정에 따른 압착 정도의 차이가 잔류응력 크기의 차이의 원인임을 알 수 있었다. 한편 측정과 해석으로부터 반경방향 잔류응력이 최대가 되는 위치는 실제 노즐 부품에서 박리 파손이 발생하는 위치와 같았고 이 위치에서 원주방향 잔류응력은 작은 수준이므로 반경방향의 인장 잔류응력이 파손 원인임을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 드레이핑 변형을 감소시켜 충분한 압밀을 얻기 위한 다단 압착 공정을 적용하여 두꺼운 탄소직물/페놀 직물복합재 원환체를 제작



(a) PAN-based specimen



(b) Rayon-based specimen

Fig. 9. Radial residual stresses from measurement and analysis

하였으며 반경절단법으로 잔류응력을 측정하고 해석과 비교한 결과, 잔류응력을 줄이기 위해서는 직물의 충분한 압착으로써 두께방향의 열팽창 계수를 낮추는 것이 필요함을 알 수 있었다.

### 후 기

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

### 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) J. W. Kim, H. G. Kim and D. G. Lee, "Compaction of Thick Carbon/phenolic Fabric Composites with Autoclave Method," *Composite Structures*, Vol. 66, 2004, pp. 467-477.