

論文

복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더의 구조적 거동 및 최적화

이경규*, 김위대**

Behavior and Optimization of Cylinder Applied by Composite Tape Wrapping Method

Lee, Kyeong-Kyoo*, Kim, Wie-Dae**

ABSTRACT

To increase the performance of thick-walled cylinders recently their length is continually enlarged. For that reason it is important to reduce weight of the thick-walled cylinders. In this paper the FE models to predict and estimate effects on the composite tapes were created with MSC.Nastran/Patran v.2005. First of all a autofrettage method was applied to the 2D model of the AISI4340 cylinder reduced the thick. And then the comparison of the numerical results with analysis results showed and verified by using T300/5208, IM7/PET15, IM7/8552 tapes. Those are predicted to the effects of the angle of the composite tapes and elastic modulus according to the composite properties.

초 록

높은 내압을 받는 장축후육실린더의 성능향상을 위해 최근 그 길이가 길어짐에 따라 무게 또한 무시할 수 없는 변수로 떠오르게 되었다. 따라서 본 논문은 이러한 현상에 대처하기 위한 대안으로 장축후육실린더의 무게를 줄이고 대신 복합재 테이프를 감아 무게감소와 더불어 벤딩(bending)현상을 줄이기 위한 목적으로 복합재가 AISI4340 후육실린더에 미치는 영향을 살펴보았다. 우선 크기가 감소된 AISI4340 후육실린더에 높은 내압을 받는 압력용기 등에 주로 사용되는 자긴가공 autofrettage 공법을 모사한 후 T300/5208, IM7/PET15, IM7/8552 테이프를 적용하여 각각의 복합재가 AISI4340 후육실린더에 감을 때 발생하는 응력분포를 살펴봄으로써 탄성계수 및 적층각에 따른 영향을 고찰하였다. 또한 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더의 적층각 도출을 위한 다양한 적층각 조합을 통해 적층각 도출을 위한 전초를 마련하였다. 본 논문을 위한 해석에는 MSC.Nastran/Patran v.2005가 사용되었다.

Key Words : 테이프(tape), 감기(wrapping), 복합재료(composite materials), 복합재 실린더(composite cylinder), 인장(tension), 자긴가공 autofrettage)

1. 서론

최근 장축후육실린더의 무게감소를 위하여 실린더의 일부분을 복합재로 대체하여 설계, 제작한 제품이 그 우수성을 입증 받고 있다. 하지만 복합재 선정 및 공법 그리고 검증 방법 등의 어려움으로 인해 국내에서는 한 번도 시도된 적이

없었다. 일반적으로 장축후육실린더는 주로 높은 내압을 받는 압력용기 및 관의 설계에 사용되어지는 자긴가공 autofrettage 공법을 사용하여 내압을 견디게 설계하여 왔다. 복합재가 감겨진 장축후육실린더의 경우 고 비용의 실험 비용이 발생되기 때문에 사전에 많은 문헌 조사 및 이론적 검증을 통해 그 타당성을 검증한 후에 실험이 이루어진다면 많은 비용을

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 부산대학교 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:wdkim@pusan.ac.kr)

절감할 수 있을 것이다. 따라서 해석적 기법의 접근은 이러한 어려움을 극복하기 위해 반드시 필요한 과정이다. 하지만 현장에서 발생되어지는 많은 환경적 변수들과 가공 및 제작 공법을 무시할 수 없기 때문에 이러한 조건들을 모사하여 해석을 실시하여야 하며 이러한 조건들은 선행 연구되어진 각각의 이론과 실험결과를 바탕으로 AISI4340 후육실린더와 복합재에 대한 공법 및 이론 등의 조합을 통하여 새로운 기법을 개발하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 새로운 모델링 방법에 대한 검증과 복합재에 따라 달라지는 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더의 거동에 관해 고찰하여 향후 이중구조 후육실린더의 최적 적층각 및 안정성을 확보하기 위한 전초를 마련하였다. 본 연구를 위해서 상용프로그램인 MSC.Nastran v.2005가 사용되었으며 자간가공 후의 두께방향 응력 분포 검증을 위하여 선행 연구된 이론식을 사용하여 Nastran 결과 값과 상호 비교하였으며[1-6] 복합재의 각도에 따라 달라지는 강성을 입력 값으로 얻기 위해 복합재 강성 및 적층 계산법 등을 선행연구결과로 하여 그 값을 도출 하였다[7-14]. 또한 각 공정을 거쳐 완성된 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더에 포의 발사를 모사한 내압을 가하여 AISI4340 실린더와 복합재 사이의 응력분포 및 거동을 살펴보았다. 이를 바탕으로 복합재 길이방향 탄성계수값의 변화를 주면서 AISI4340 후육실린더에 복합재의 탄성계수가 미치는 영향을 살펴보았으며 다양한 해석결과를 바탕으로 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더의 최적 적층각 도출을 위한 계기를 마련하였다.

2. AISI4340 후육실린더의 수치 해석

2.1 탄성영역

장축후육실린더와 같은 두꺼운 실린더구조에는 두께방향으로 응력이 다양하게 분포하게 된다. 따라서 후육실린더 두께의 결정은 매우 중요하다. 이러한 문제점은 z-axis에 대한 축대칭을 고려함과 동시에 극 좌표계 내에서의 응력평형 미분방정식을 풀이함으로써 해결 할 수 있다. 일반적으로 구조의 힘이 작용하지 않는 응력평형 방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1-a)$$

$$\frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{\theta r}}{r} = 0 \quad (1-b)$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} = 0 \quad (1-c)$$

실린더 좌표계에서 미소 요소에 작용하는 반경 방향 응력, 원주 방향 응력과 축 방향 응력을 각각 σ_r , σ_θ 그리고 σ_z 로 표기한다. 원주방향 응력 σ_θ 가 양의 부호를 나타내는지

음의 부호를 나타내는지는 인장응력이 발생하는지 압축응력이 발생하는지를 말해주며, 반경방향 응력 σ_r 은 부호와 상관없이 항상 압축응력이 발생한다. 여기서 $P_0=0$ 과 같이 외부압력은 발생하지 않는다고 가정하면, 반경방향과 원주방향 응력은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (2-a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (2-b)$$

Fig. 1은 내압 P_i 를 받는 실린더의 두께방향에 따른 응력 분포를 보여준다.

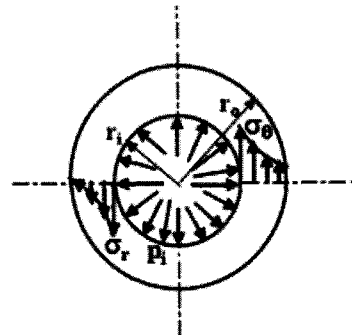


Fig. 1 Radial and circumferential stress distribution within the cylinder wall when only internal pressure acts.

2.2 탄-소성영역

자간가공(autofrettage)이란 직접적 또는 간접적으로 유압이나 기계적인 힘을 두꺼운 실린더의 내경에 일시적으로 작용한 후 제거하여 벽 두께에 따른 불균일한 탄성회복에 의하여 내경 측에 압축 잔류응력을 유도하는 방법이다. 주로 유압식이나 멘드렐을 이용한 스웨징 방식이 이용된다.

내압 P_i 를 받는 두꺼운 실린더가 Fig. 2와 같을 때, 실린더 내에서의 응력은 Lamé'식으로 표현되며 식 (2-a), (2-b)와 같다.

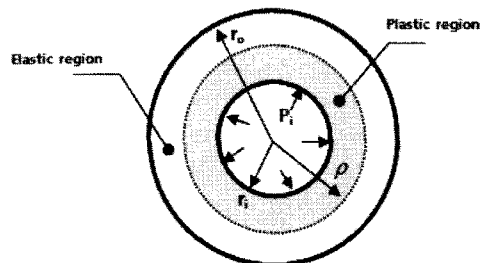


Fig. 2 Autofrettaged thick-walled cylinder.

재료의 완전 탄-소성거동(elastic-perfectly plastic behavior) 및 트레스카(tresca) 항복 조건을 가정하면,

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{2r_o^2}{r^2} \Big|_{r=r_i} = \frac{2p_i r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} = \sigma_Y \quad (3)$$

따라서 실린더의 내경에서 항복이 발생하기 시작하는 압력, P_y 는 다음과 같다.

$$P_y = \sigma_Y \frac{r_o^2 - r_i^2}{2r_o^2} \quad (4)$$

내압이 증가함에 따라 소성변형은 원통구조의 벽을 따라 외경 쪽으로 진행된다. 변형이 발생할 때의 압력, 즉 완전 자기압력 P_u 와 그 경우의 응력분포를 구하기 위하여 재료가 탄성-완전소성 거동을 하며 트레스카(tresca) 항복조건식을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{2} = \frac{\sigma_Y}{2} \quad (5)$$

미분평형방정식으로부터

$$\frac{d\sigma_r}{dr} \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0 \quad (6)$$

내압을 받는 두꺼운 실린더에서의 탄소성 응력성분이므로 전체 두께에 걸쳐 소성변형이 발생할 경우의 압력, 즉 자기압력 P_u 는 $r = r$ 에서의 반경방향응력성분과 크기가 같고 방향은 반대이다. 즉,

$$P_u = -(\sigma_r)_{r=r_i} = \sigma_Y \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (7)$$

자기압력이 제거된 후 잔류응력을 구하면 다음과 같다. 자기압력의 제거에 의한 응력, 즉 탄성회복응력(elastic recovery stress)은 내경에서 $-P_u$ 의 내압을 작용했을 때 발생하는 응력분포와 같으므로 Lamé' 식으로부터 얻을 수 있다. 따라서 자기압력, P_u 를 이용하여 얻어진 원주 및 반경방향 잔류응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta} = \sigma_Y \left[1 - \ln \frac{r_o}{r} - \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_o^2}{r_i^2} \right] \quad (8-a)$$

$$\sigma_r = \sigma_Y \left[\ln \frac{r_o^2}{r} - \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_o^2}{r_i^2} \right] \quad (8-b)$$

Fig. 2와 같이 내경으로부터 $r = \rho$ 까지 항복이 진행되는

경우에도 식 (6)과 같은 미분평형 방정식을 만족해야한다. 또한 탄성영역 $\rho \leq r \leq r_o$ 에서는 $r = \rho$ 를 제외하고는 탄성거동을 하며 부분 자기가공 압력 P_i 는 다음과 같다.

$$P_i = \sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{r_o} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{r_o^2} \right) \right] \quad (9)$$

따라서 소성영역에서의 σ_r 과 Lamé' 식을 이용한 탄성영역에서의 σ_r 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r^p = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{r_o^2} \right) \right] \text{ for } r_i \leq r \leq \rho \quad (10-a)$$

$$\sigma_r^e = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2r_o^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \text{ for } \rho \leq r \leq r_o \quad (10-b)$$

내압을 받는 두꺼운 실린더에서의 원주방향응력은 트레스카(tresca) 항복조건을 이용하여 소성영역구간에 대한 응력과 Lamé' 식을 이용하여 탄성영역에서의 원주방향응력을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta}^p = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho^2}{r_o^2} \right) \right] \text{ for } r_i \leq r \leq \rho \quad (11-a)$$

$$\sigma_{\theta}^e = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2r_o^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \text{ for } \rho \leq r \leq r_o \quad (11-b)$$

그러므로 자기가공에 의하여 발생하는 실린더에서의 잔류응력은 자기압력에 의하여 발생하는 응력을 나타내는 식 (10), (11)로부터 Fig. 3과 같이 자기압력을 제거할 때에 발생하는 탄성회복응력을 제거하여 구할 수 있다. 식 (10)의 자기압력을 제거할 때에 발생하는 반경방향 및 원주방향 탄성회복응력은 Lamé'식으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\sigma_r^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{r_i} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{r_o^2} \right) \right] \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (12-a)$$

$$\sigma_{\theta}^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{r_i} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{r_o^2} \right) \right] \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (12-b)$$

따라서 잔류응력은 식 (10), (11)과 식 (12)를 각각 중첩하여 다음과 같이 유도된다.

$$\sigma_r = \sigma_Y \left\{ \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \left[\frac{\rho^2 - r_o^2}{2r_o^2} - \ln \frac{\rho}{r_i} \right] + \left[\frac{\rho^2 - r_o^2}{2r_o^2} - \ln \frac{\rho}{r} \right] \right\} \quad (13-a)$$

For $r_i \leq r \leq \rho$

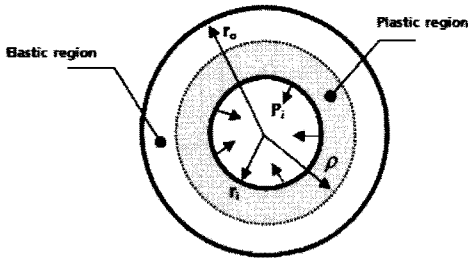


Fig. 3 Unloading of autofrettage pressure.

$$\sigma_r = \sigma_Y \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \left[\frac{\rho^2}{2r_o^2} + \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(\frac{\rho^2 - r_o^2}{2r_o^2} - \ln \frac{\rho}{r_i} \right) \right] \quad (13-b)$$

For $\rho \leq r \leq r_o$

$$\sigma_\theta = \sigma_Y \left\{ \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \left[\frac{\rho^2 - r_o^2}{2r_o^2} - \ln \frac{\rho}{r_i} \right] + \frac{\rho^2 + r_o^2}{2r_o^2} - \ln \frac{\rho}{r} \right\} \quad (13-c)$$

For $r_i \leq r \leq \rho$

$$\sigma_\theta = \sigma_Y \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \left[\frac{\rho^2}{2r_o^2} + \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(\frac{\rho^2 - r_o^2}{2r_o^2} - \ln \frac{\rho}{r_i} \right) \right] \quad (13-d)$$

For $\rho \leq r \leq r_o$

3. 복합재 실린더의 수치 해석

3.1 복합재로 구성된 3D 실린더 지배방정식

Fig. 4는 해석에 사용된 원통형 좌표계 z - θ - r 과 라미나 (lamina) 좌표계 1-2-3를 나타낸다. 여기서 z , θ , r 은 각각 축 방향, 원주방향, 그리고 반지름 방향 좌표를 나타내며, 반지름 변위는 z 축 변위와 관계하지 않는다. 또한 이러한 좌표의 변위는 다음과 같다.

$$u(z, \theta, r) = u(z, r) \quad (14-a)$$

$$v(z, \theta, r) = v(z, r) \quad (14-b)$$

$$w(z, \theta, r) = w(r) \quad (14-c)$$

z - θ - r 좌표계에서 응력-변형률 거동에 관한 각각의 복합재 층에 관하여 다음과 같이 쓰여진다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \sigma_r \\ \tau_{\theta r} \\ \tau_{zr} \\ \tau_{z\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_z - \alpha_z \Delta T \\ \epsilon_\theta - \alpha_\theta \Delta T \\ \epsilon_r - \alpha_r \Delta T \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{zr} \\ \gamma_{z\theta} - \alpha_{z\theta} \Delta T \end{Bmatrix} \quad (15)$$

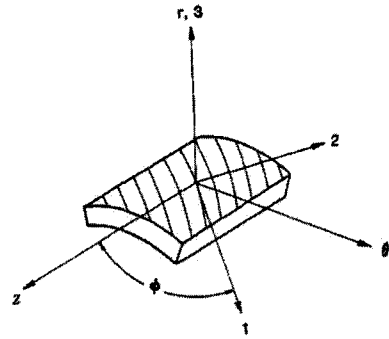


Fig. 4 Cylindrical coordinate system used and defined off-axis angle ϕ .

$[C_{ij}]$ 는 복합재 각 층 재료의 탄성에 관한 물성으로 정의되는데, 탄성계수(young's moduli), 프아송비(poisson's ratios), 그리고 전단계수(shear moduli)와 관계가 되며, 복합재의 각도의 함수로도 존재하게 된다. 또한 α 는 복합재의 열팽창 계수로 나타낸다. 따라서 6개의 양립하는 방정식들의 3개는 자동적으로 만족하게 된다. 나머지 3개의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2 \epsilon_z}{dr^2} = 0; \quad \frac{1}{r} \frac{d\epsilon_z}{dr} = 0; \quad \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \gamma_{z\theta}) \right] = 0 \quad (16)$$

3.2 복합재의 적층각에 따른 물성변화

Fig. 4의 실린더 좌표계에서 축방향에서 $\pm\phi$ 방향의 축으로 강성행렬이 변환할 때 강성변환행렬을 사용하여 복합재의 변환된 물성을 얻을 수 있으며 Fig. 5는 복합재 실린더 적층에 따른 layer 및 각 층의 반지름을 나타낸다.

앞에서 언급한 복합재 물성 행렬의 좌표변환을 위하여 식 (17)의 $[C_{ij}]$ 행렬을 다음 식에 대입하면 복합재의 방향(ϕ)에 따른 강성행렬 $[Q_{ij}]$ 를 얻을 수 있다.

$$[Q_{ij}] = [T_\sigma]^{-1} [C_{ij}] [T_\epsilon] \quad (17)$$

좌표변환 행렬인 $[T_\sigma]$ 와 $[T_\epsilon]$ 은 응력과 변형률의 변화에 근거한 행렬이며 다음과 같이 표현된다.

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m-n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[T_\epsilon] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m-n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -2mn & 2mn & 0 & 0 & 0 & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

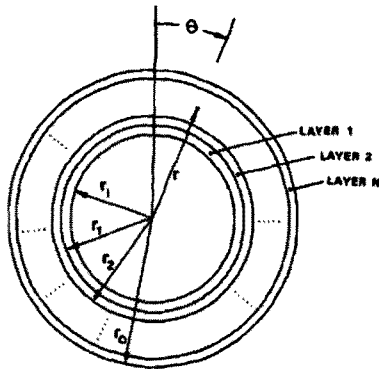


Fig. 5 Geometry and nomenclature of the cylinder cross section.

m 은 $\cos\phi$ 를 나타내며 n 은 $\sin\phi$ 를 나타낸다. 그리고 ϕ 는 원통의 축 방향으로 0° 로 한 실린더 좌표계에서의 변환된 복합재 섬유 각을 나타낸다.

4. 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더

4.1 AISI4340 후육실린더의 자인가공 (autofrettage)

Fig. 6(a)와 같이 강 의 두께방향으로 내압을 가하여 소성 변형 시킨 후 Fig. 6(b)와 같이 압력을 제거하게 되면 압축 잔류응력이 발생하게 된다. Fig. 7은 AISI4340 후육실린더 내에 발생하는 잔류응력을 이론식과 유한요소 해석 결과를 통해 상호 비교한 그래프이며 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 해석을 위해 사용한 모델은 내반경이 50mm이며 외반경이 80mm 이다. 또한 재료 물성치는 Table 1에 나타낸 값을 사용하였다.

Table 1 Properties of AISI4340 steel

	AISI4340		AISI4340
E (GPa)	205	σ_u (Mpa)	1272
ν	0.29	σ_y (Mpa)	1180
G (GPa)	79.46	HRB	109.6

Fig. 8은 자인가공을 실시하기 전과 자인가공을 실시한 후에 500MPa의 내압을 받은 실린더의 잔류응력 분포를 비교 하였으며 자인가공을 실시한 후의 응력이 상대적으로 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이를 통해 자인가공 후 더 큰 내압에도 견딜 수 있게 설계할 수 있다. Fig. 8은 기존의 AISI4340강에 두께 5mm를 제거한 후 T300/5208 테이프를 40층 감은 후의 원주방향 응력을 나타내며 본 해석에 사용한 T300/5208 tape의 두께는 0.125mm 이다. 자인가공을 실시하지 않고 감은 경우에는 자인가공을 실시하고 테이프를 감은 경우보다 AISI4340강의 원주방향 응력이 다소 높은 것을 확인할 수 있으나 자인가공을

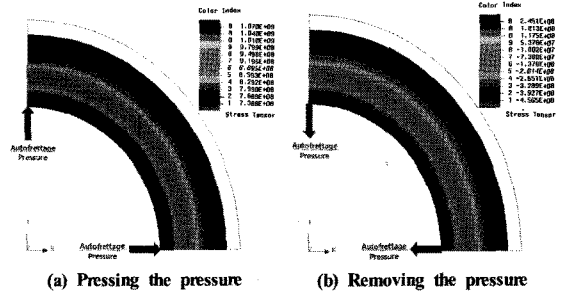


Fig. 6 Distributed stresses in the AISI4340 (autofrettage).

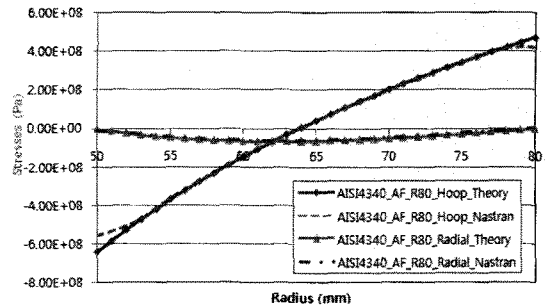


Fig. 7 Hoop stress curves of autofretted cylinder comparing between theory and nastran (100%).

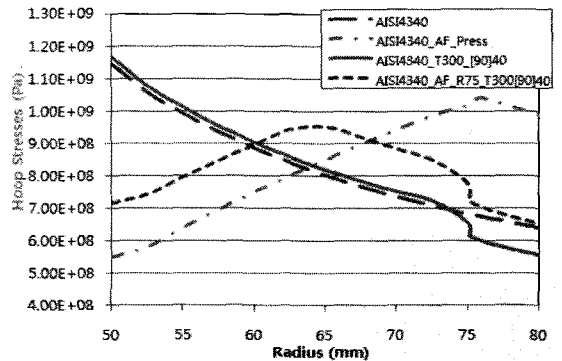


Fig. 8 Radius of hoop stresses comparing between before autofrettage and after autofrettage (inner pressure : 500MPa).

실시한 후에 T300/5208 테이프를 감은 경우에는 AISI4340강으로만 구성된 값보다 약 150MPa 이상 그 값이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 그 만큼 AISI4340강에서 받는 응력이 복합재에 전달이 되어 상대적으로 복합재 응력은 약 150MPa 정도 높아졌다. 따라서 복합재/AISI4340 이중후육 실린더에 미치는 자인가공법의 영향은 동일한 재료로 안전율을 높이기 위해서는 고려하는 것이 더 좋은 결과를 얻는 방법을 알 수 있다. 본 해석을 위해 사용한 요소는 MSC.NASTRAN의 CQUAD4를 사용하였으며, 노드(node) 개수 및 요소(element) 수는 각각 1,456 EA, 750EA 이다.

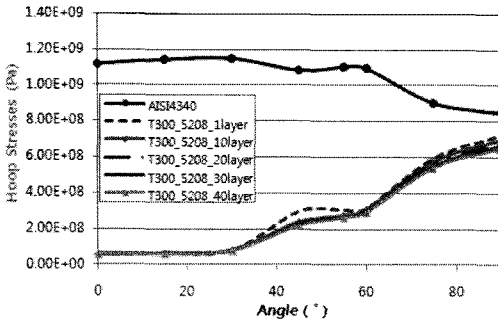


Fig. 9 Hoop stresses of angle at each layer (inner pressure : 500MPa).

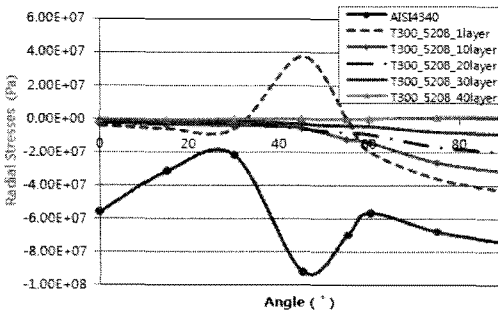


Fig. 10 Radial stresses of angle at each layer (inner pressure : 500MPa).

Table 2 Properties of composite tapes

	T300/5208	IM7/8552	IM7/PET15
E_{11} (GPa)	181	139.6	151
E_{22} (GPa)	10.3	11.39	9.65
E_{33} (GPa)	10.3	11.39	9.65
ν_{12}	0.28	0.324	0.34
ν_{13}	0.28	0.324	0.34
ν_{23}	0.43	0.46	0.64
G_{12} (GPa)	7.17	4.75	6.34
G_{13} (GPa)	7.17	4.75	6.34
G_{23} (GPa)	5.03	3.9	2.94

4.2 복합재/AISI4340 이중구조 후육 실린더의 자기 가공에 따른 복합재의 영향

AISI4340강에 T300/5208, IM7/8552, IM7/PET15 복합재와 같이 탄성계수가 다른 복합재 테이프가 자기가공 전과 후에 감겨질 때 각각의 복합재 테이프가 AISI4340 후육실린더에 미치는 영향을 살펴보았다. 각각의 물성치는 Table 2와 같다. Fig. 9는 자기가공된 AISI4340에 복합재테이프가 감겨져 발생하는 원주 방향의 응력 분포를 0 ~ 90°로 적층각을 바꾸어 가며 각층에서 나타나는 경향성을 살펴보았다. 90°로 적층이 된 경우에 AISI4340 후육실린더의 응력이 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 복합재의 탄성계수가 가장 높은 값을 가지는 90°적층각일 때 AISI4340 후육실린더에서 발생하는 원주방향 내부압력을 가장 많이 감소시켜 주었으며 각 층(layer) 위치

에 따른 분포는 일정한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 약 40 ~ 55°사이에서 AISI4340 후육실린더에 발생하는 응력이 감소하는 것을 알 수 있는데 Fig. 10에서처럼 반지름 방향 응력의 경우는 1번 층(layer)에서 인장응력이 발생하였지만 10번 층 이후 층에서는 압축응력이 발생하였으며 AISI4340 후육실린더에서는 T300/5208 테이프 1번 층에서 인장응력이 발생한 각도인 약 40 ~ 55° 사이에서 가장 많은 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11, 12는 T300/5208 테이프의 섬유방향 탄성계수값에 변화를 주어 AISI4340 후육실린더 및 T300/5208 테이프에 분포되어 있는 응력을 관찰하였다. 탄성계수가 제일 큰 100%이상 더해진 값을 가질 때 AISI4340 후육실린더에서는 실린더에서 받는 압력을 많이 상쇄시켰지만 복합재 부분에서는 상대적으로 제일 높은 응력값을 가지게 되며 반지름 방향응력에서는 가장 큰 압축응력이 발생된다. 또한 복합재 종류에 따른 AISI4340 후육실린더에 미치는 영향을 살펴보았는데 탄성계수 값이 가장 큰 T300/5208이 가장 좋은 결과 값을 가졌으며 Fig. 13, 14에서 확인할 수 있듯이 IM7/PET15, IM7/8552 순으로 AISI4340 후육실린더에서 받는 응력을 완화시켜 주었다. 각각의 물성치는 Table 2에 나타나 있으며, 복합재의 탄성계수 값이 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 본 해석에 사용된 복합재 테이프의 적층 방향은 시계방향으로 감겨지면서 적층이 실시되었다.

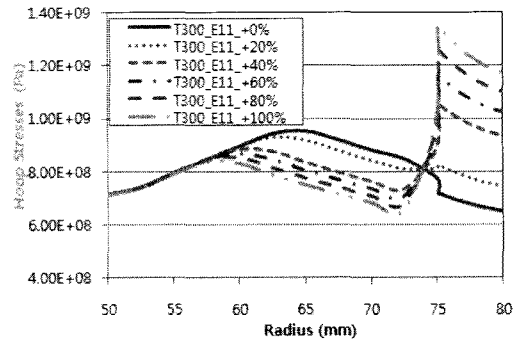


Fig. 11 Hoop stresses of changed elastic modulus to fiber direction (angle : 90°, inner pressure : 500MPa).

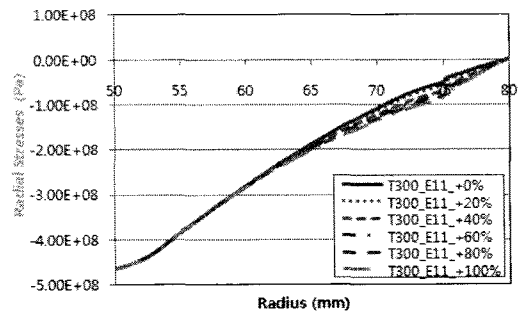


Fig. 12 Radial stresses of changed elastic modulus to fiber direction (angle : 90°, inner pressure : 500MPa).

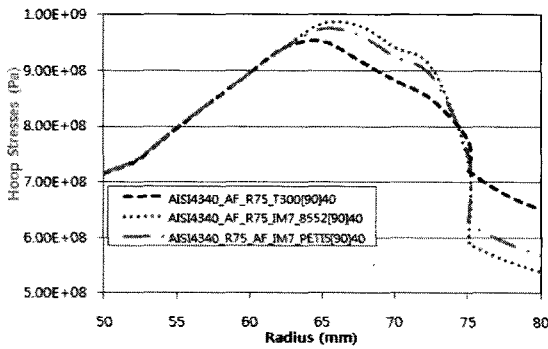


Fig. 13 Hoop stresses comparing among composite materials (angle : 90°, inner pressure : 500MPa).

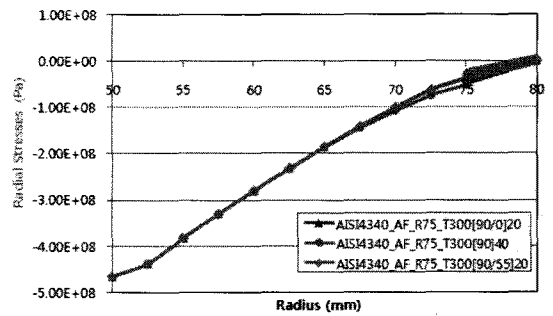


Fig. 16 Radius stresses comparing among combinations of composite angle (inner pressure : 500MPa).

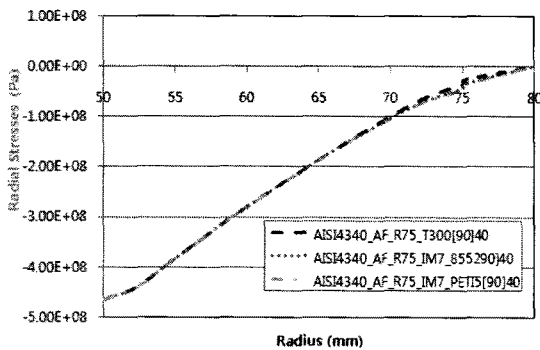


Fig. 14 Radial stresses comparing among composite materials (angle : 90°, inner pressure : 500MPa).

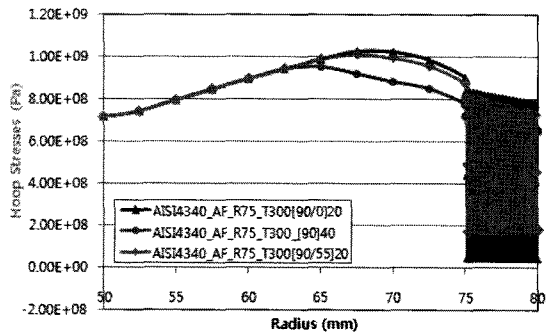


Fig. 15 Hoop stresses comparing among combinations of composite angle (inner pressure : 500MPa).

Fig. 15와 16은 T300/5208 복합재 테이프의 [90/0]₂₀, [90]₄₀, [90/55]₂₀ 적층각 조합에 따른 특성을 살펴보았다. [90]₄₀로 적층된 경우에 AISI4340 후육실린더 부분에서 가장 낮은 응력 분포값을 보였으며, [90/55]₂₀, [90/0]₂₀ 순으로 원주방향응력 분포가 큰 것을 알 수 있다. 하지만 반지름방향 응력분포의 경우 반대로 [90]₄₀ 적층이 압축응력이 가장 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더의 자진가공 공법과 복합재의 종류에 따라 달라지는 후육실린더의 두께방향 응력분포를 살펴보았다. 높은 내압을 견뎌야 하는 장축후육실린더는 주로 자진가공 공법을 사용하여 왔다. 이러한 공법은 복합재의 적층수를 줄여주는 주요한 공법이므로 본 해석에도 적용을 하였다. 우선 복합재의 적층각에 따른 응력분포를 살펴보았는데 90°적층각에서 AISI4340 후육실린더의 원주방향 응력이 가장 낮은 값을 보였지만 상대적으로 복합재 부분에서는 가장 높은 응력값을 나타내었다. 또한 탄성계수값을 달리하여 AISI4340 후육실린더에 미치는 영향을 살펴보았다. 본래의 탄성계수값 보다 약 2배 정도의 값을 부여한 해석결과에서 AISI4340 후육실린더의 원주방향 응력을 가장 많이 감소시켜 주었으나 복합재 부분에서 발생하는 원주방향응력은 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 복합재의 종류에 따른 변화를 살펴보기 위해 T300/5208, IM7/8552, IM7/PETI5를 사용하여 적층하였다. 그 중 탄성계수값이 가장 높은 T300/5208 복합재 테이프가 적층되었을 때 AISI4340 후육실린더에서 발생하는 원주방향 응력을 가장 많이 감소시켜 주었다.

다양한 적층각에 따른 영향을 살펴보기 위해 [90/0]₂₀, [90/55]₂₀, [90]₄₀로 적층각을 조합하여 해석을 실시한 결과 [90]₄₀ 적층된 경우가 AISI4340 후육실린더의 원주방향 응력을 가장 많이 감소시켜 주었지만 반면에 반지름 방향에서 발생하는 압축응력이 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 AISI4340 후육실린더에서 감소된 응력은 복합재가 그 응력을 받아 AISI4340 후육실린더의 안정성을 높여주었다. 향후 다양한 실린더 모양 및 두께 그리고 내압 등의 변수를 고려하기 위하여 본 논문의 해석 결과를 토대로 원주방향 응력이 더 고려되어야 할 경우에는 90° 적층을 반지름 방향 응력이 더 고려되어야 할 경우에는 0° 적층을 더 많이 고려하여 적층하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 따라서 복합재/AISI4340 이중구조 후육실린더의 최적화를 위해서는 요구사항

에 따라 0°, 55°, 90° 외에 다양한 적층각을 적절히 조합하여 요구사항에 맞는 최적 적층각을 도출하여야 할 것이다.

본 연구결과를 통해 향후 복합재가 감겨진 이중구조 장축 후육실린더의 최적 적층각 및 후육실린더 내에서 발생하는 응력 완화 방법을 모색할 수 있는 계기를 마련하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소/현대위아(주)가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Anthony P. Parker “A Re-Autofrettage Procedure for Mitigation of Bauschinger Effect in Thick Cylinders” *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, No. 4, Nov. 2004, pp. 451-454.
- 2) X.-L. Gao “Elasto-plastic analysis of an internally pressurized thick-walled cylinder using a strain gradient plasticity theory” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 23, Nov. 2003, pp. 6445-6455.
- 3) Ruilin Zhu, Jinlai Yang “Autofrettage of thick cylinders”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 6, May 1998, pp. 444-446.
- 4) M.H. Hojjati, A.Hassani “Theoretical and finite-element modeling of autofrettage process in strain-hardening thick-walled cylinders” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, No. 5, May 2007, pp. 310-319.
- 5) 김재훈, 심우성 외, “자간가공된 후육실린더의 잔류응력 해석에 관한 연구” 한국정밀공학회지, 제26권, 12호, 2009, pp. 110-116.
- 6) 박재현, 이영신, 김재훈, 차기엽, 홍석균 “자간가공된 복합 실린더의 기계가공해석”, 대한기계학회 논문집 A권, 제 31권 제7호, 2007, pp. 800-807.
- 7) 이경규, 김위대 “복합재를 이용한 발사체 노즐 열 구조 해석 및 설계”, 한국복합재료 춘계학술대회, 2010, pp. 147-151.
- 8) F. J, A. V, “Analytical Calculation of the Transient Thermoelastic Stresses in Thick Walled Composite Pipes”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 19, 2004, pp. 1773-1751.
- 9) 박지상, 정상수, 정재한, “금속재 라이너를 갖는 복합재 압력용기의 라이너압축잔류응력을 고려한 반복수명 예측 방법에 대한 연구”, 한국복합재료학회지, 제 19권, 1호, 2006, pp. 22-28.
- 10) Wu, R.Y. and Stachurski, 2, “Evaluation of the Normal Stress Interaction Parameter in the Tensor Polynomial Strength Theory for Anisotropic Materials”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, No .5, Sept. 1984, pp. 456-463.
- 11) P.Y. Tabakov, E.B. Summers, “Lay-up optimization of multilayered anisotropic cylinders based on a 3-D elasticity solution”, *Computers and Structures*, Vol. 84, No. 5-6, Jan. 2006, pp.
- 12) Robert M. Jones “Mechanics of Composite Materials”, McGraw-Hill Kogakusha, LTD., 1975.
- 13) James M. Whitney “Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates”, Technomic Pub. Co. 1987.
- 14) S. Koussios, O.K. Bergsma, A.Beukers, “Filament winding, Part 1: determination of the wound body related parameters”, *Composites: Part A*, Vol. 35, No. 2, Feb. 2004, pp. 181-195.