

직교이방성 복합재료로 만든 두께가 얇은 압력용기의 변형에 관한 연구

김형원*, 최용규**

The Study on Axisymmetric Deformation of Thin Orthotropic Composite Pressure Vessel

Hyung-Won Kim* and Yong-Kyu Choi**

ABSTRACT

The analytic solution of radial displacements of thin cylindrical pressure vessel with carbon fiber T700/Epoxy orthotropic composites was obtained using equilibrium equations of the orthogonal curvilinear coordinate system. The governing equations with the simplified strain versus displacement relation of 3-dimensional curvilinear coordinate system were derived from the variational principle and the virtual work principle. Some theoretical analyses were presented and compared with the results of hydraulic tests for the pressure vessels with some various thicknesses. The results of the theoretical analysis and the hydraulic test were reasonably matched.

초 록

탄소섬유 T700/Epoxy로 만든 직교이방성 구조로 된 두께가 얇은 압력용기의 반경방향의 변위에 관한 해를 곡선좌표계의 평형방정식을 사용하여 구하였다. 3차원 곡선좌표계의 변형율과 변위의 관계를 간단히 하면서 지배방정식을 유도하기 위해 변분이론과 가상일의 원리를 사용하였다. 다른 여러 종류의 직교이방성 압력용기에 대한 계산 결과를 제시했으며 수압시험을 한 결과와 비교 검토하였다. 계산결과와 시험결과는 비교적 잘 일치하였다.

Keywords : pressure vessel(압력용기), orthotropic composites(직교이방성 복합재료), variational principle(변분이론), virtual work principle(가상일원리), hydraulic test(수압시험)

1. 서 론

유도탄과 항공기 등 경량화를 요구하는 구조물의 구조재료로서 복합재료가 주목을 모으고 있는데, 형상은 판 모양에 제한된 것이 아니고 대부분 셸 모양이어서 이론적으로 분석하는데 복잡한 형상을 띄고 있다. 적층된 구조물의 셸에 관한

†2003년 1월 10일 접수 ~ 2003년 2월 16일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소, 기술연구본부 4부 1팀

** 종신회원, 국방과학연구소, 기술연구본부 4부 1팀

연락처, E-mail : yongkyu1104@hanmail.net

대전광역시 유성우체국 사서함 35-4

논문은 많이 나와 있는데, 이것은 Kirchhoff-Love의 가정에서 출발한다. 이 가정은 변형 전 중립면에 수직한 선은 변형 후에도 수직을 유지하며 또한 수직인 방향으로의 변형은 없다는 것이다. 셸은 판과 같이 두께가 얇은 몸체로 되어 있지만 최소한 한 방향으로 굽어져 있다. 예를 들어, 원통형이나 콘 형태의 셸은 한 방향으로 굽어져 있다. 반면, 구 형태의 셸은 두 방향으로 굽어져 있다. 이러한 곡면 때문에 셸이론은 판이론에 비하여 상당히 복잡하다. 평형방정식이나 변형율과 변위와의 관계를 적층구조물에 적용하고, 이에 대한 해를 구하는 것은 또한 상당한 작업이 요구되므로 용도에 맞게 타당한 가정을 세워서 해를 구하는 것이 필요하다.

셸이론과 전단 변형을 포함해서 복합재료에 대한 해를 구한 것은 Vinson과 Chou가 처음이다 [3]. 1975년에, Winkins와 Love는 복합재료로 된 원통형 셸의 압축과 전단 좌굴 거동을 분석했다 [4]. 1976년에, Waltz와 Vinson은 복합재료 원통형 셸의 interlaminar 응력을 해석했으며 El Naschie는 복합재료 셸의 큰 변형에 대한 거동을 조사했다 [5]. 1977년에, Ecord는 왕복우주선의 압력용기에 관한 연구를 했는데, 티타늄과 인코넬로 만들어진 구형 셸 위에 Kevlar49를 감아서 400파운드를 줄였다 [6]. 1982년에, Bert는 2중 적층 cross-ply의 얇은 두께의 셸에 관한 굽힘과 진동에 관한 완전한 해를 구하였다 [7]. 1988년에, Chaudhuri는 3차원 곡선좌표계의 변형율과 변위의 관계를 타당하게 가정하여 셸에 관한 위치에너지와 변위를 구하고, FEM을 사용하여 여러 경우의 경계조건에서 변위를 구하였다 [8].

본 논문에서는, 3차원 곡선좌표계의 변형율과 변위의 관계를 간단히 하면서, 축대칭 하중이 작용하고 두께가 얇은 직교이방성 적층 복합재료로 만들어진 원통형 연소관에 관한 지배방정식을 유도하기 위해, 변분이론과 가상일의 원리를 사용하였다. 끝단의 영향이 없는 중앙 부분에서의 반경 방향의 처짐값을 구하고, 수압시험을 한 결과치와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 곡선좌표계에 대한 3차원 탄성방정식

Fig.1에서와 같이 ξ_i , $i=1, 2, 3$, 를 직교곡선좌표계라 하자. 한점에서의 변형율은 변형이 작은 경우 선형탄성론에서 다음과 같이 표현된다 [9].

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (v_j / i + v_i / j) \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, 3,$

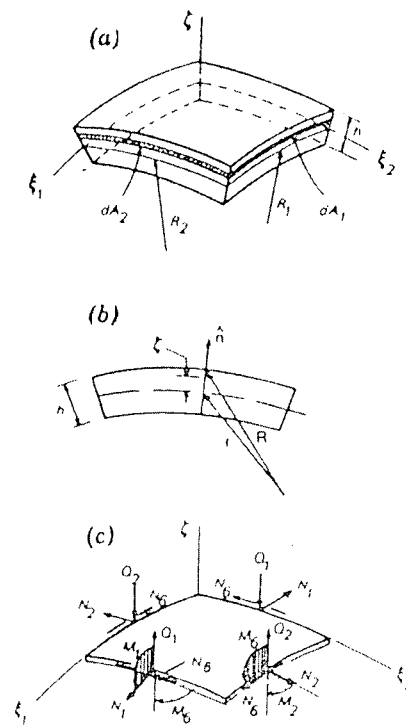


Fig. 1 Geometry and stress resultants of doubly curved shell

여기에서 '/'는 covariant differentiation이며, v_i 는 변위벡터로써 물리적성분 (u_i)는 다음과 같다.

$$u_i = \sqrt{g^{ii}} v_i, \quad (2)$$

여기에서 g^{ii} 는 Euclidean metric tensor라 칭하며 다음과 같이 정의된다.

$$g^{ii} = \sum_{m=1}^3 \frac{\partial \theta^i}{\partial x^m} \frac{\partial \theta^i}{\partial x^m} \quad (3)$$

식 (1)에서 주어진 변형율의 물리적성분은 다음과 같다.

$$\epsilon_{ij} = \sqrt{g^{ii}} \sqrt{g^{jj}} e_{ij} \quad (4)$$

Covariant derivative v_j / i 는 다음과 같이 정의된다.

$$v_j / i = v_{j,i} - \Gamma_{ji}^r v_r, \quad (5)$$

여기에서 2번째 종류의 Christoffel symbol은 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma_{ij}^r = \frac{1}{2} g^{rs} (g_{is,j} + g_{js,i} - g_{ij,s}) \quad (6)$$

직교좌표계에서 Fig.1과 같이 ξ_1 과 ξ_2 를 셸의 중립면에 위치시키고 ξ_3 를 표면에 수직인 방향에 위치시키자.

중립면에서의 위치벡터를 \underline{r} 이라 하고 중립면에서 수직방향으로 ξ 만큼 떨어진 곳에서의 위치벡터를 \underline{R} 이라 하자. 중립면에서의 두점 $(\xi_1, \xi_2, 0)$ 와 $(\xi_1+d\xi_1, \xi_2+d\xi_2, 0)$ 의 거리 ds 는 다음과 같이 나타내진다.

$$(ds)^2 = dr \cdot dr = g_1^2 (d\xi_1)^2 + g_2^2 (d\xi_2)^2, \quad (7)$$

여기에서 g_1 과 g_2 는 surface matrices이며 다음과 같다.

$$g_1^2 = \frac{\partial r}{\partial \xi_1} \cdot \frac{\partial r}{\partial \xi_1}, \quad (8)$$

$$g_2^2 = \frac{\partial r}{\partial \xi_2} \cdot \frac{\partial r}{\partial \xi_2} \quad (9)$$

중립면에서 수직방향으로 ξ 만큼 떨어진 곳에서의 두점 (ξ_1, ξ_2, ξ) 와 $(\xi_1+d\xi_1, \xi_2+d\xi_2, \xi+d\xi)$ 의 거리 dR 는 다음과 같이 나타내진다.

$$(dS)^2 = dR \cdot dR = L_1^2 (d\xi_1)^2 + L_2^2 (d\xi_2)^2 + L_3^2 (d\xi)^2, \quad (10)$$

여기에서 L_1, L_2, L_3 는 Lamb' coefficients로써 다음과 같다.

$$L_1 = g_1 \left(1 + \frac{\xi}{R_1}\right);$$

$$L_2 = g_2 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right); L_3 = 1 \quad (11)$$

Fig.1에서 검게 해칭된 단면적의 일부분의 면적 dA_1, dA_2 는 다음과 같다.

$$dA_1 = L_1 d\xi_1 d\xi$$

$$= g_1 \left(1 + \frac{\xi}{R_1}\right) d\xi_1 d\xi;$$

$$dA_2 = L_2 d\xi_2 d\xi$$

$$= g_2 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right) d\xi_2 d\xi \quad (12)$$

ξ_1 의 좌표축에 수직인 방향의 단면적에 ξ_2 의

좌표축의 단위길이에 작용하는 인장력을 N_i 이라 할 때 총 인장력은 $N_i g_2 d\xi_2$ 이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_1 g_2 d\xi_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_1 dA_2 \quad (13)$$

식(12)를 사용하여 식(13)를 정리하면 다음과 같다.

$$N_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_1 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right) d\xi \quad (14)$$

단위길이 마다의 다른 인장력에 대한 표현은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_{12} \\ N_{21} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_{12} \\ M_{21} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_1 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right) \\ \sigma_2 \left(1 + \frac{\xi}{R_1}\right) \\ \sigma_6 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right) \\ \sigma_6 \left(1 + \frac{\xi}{R_1}\right) \\ \sigma_5 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right) \\ \sigma_4 \left(1 + \frac{\xi}{R_1}\right) \\ \xi \sigma_1 \left(1 + \frac{\xi}{R_2}\right) \\ \xi \sigma_2 \left(1 + \frac{\xi}{R_1}\right) \end{pmatrix} d\xi \quad (15)$$

이러한 탄성셀에 대한 평형방정식을 구하기 위해 식(15)에 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

1. 셀의 두께는 반경에 비하여 대단히 작다 ($h/R_1, h/R_2 \ll 1$)
2. 중립면에 수직인 방향의 전단력은 무시한다.
3. 중립면에 수직인 선은 변형 전처럼 수직할 필요는 없지만 직선을 유지한다.

위의 가정으로 식(15)는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$\begin{aligned} (N_i, M_i) &= \sum_{k=1}^N \int_{\xi_{k-1}}^{\xi_k} \sigma_i(1, \xi) d\xi \\ & \quad i = 1, 2, 3 \\ (Q_i) &= \sum_{k=1}^N K_i^2 \int_{\xi_{k-1}}^{\xi_k} \sigma_i d\xi \quad i=1, 2 \end{aligned} \quad (16)$$

변형율과 변위와의 관계를 구하기 위해 변위에 대해 다음과 같이 가정을 한다.

$$\begin{aligned} u'_1 &= \frac{1}{g_1} (L_1 u_1) + \xi \phi_1; \\ u'_2 &= \frac{1}{g_2} (L_2 u_2) + \xi \phi_2; \\ u'_3 &= u_3 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 (u'_1, u'_2, u'_3)는 점 (ξ_1, ξ_2, ξ) 의 변위이고 (u_1, u_2, u_3)는 점 $(\xi_1, \xi_2, 0)$ 의 변위이다.

식(17)에서 가정한 변위를 식 (1)에 적용하면 다음과 같은 변형율과 변위의 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_1^0 + \xi x_1; \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_2^0 + \xi x_2; \\ \varepsilon_4 &= \varepsilon_4^0; \\ \varepsilon_5 &= \varepsilon_5^0; \\ \varepsilon_6 &= \varepsilon_6^0 + \xi x_6, \end{aligned} \quad (18)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^0 &= \frac{1}{g_1} \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{u_3}{R_1}; \\ \varepsilon_2^0 &= \frac{1}{g_2} \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} + \frac{u_3}{R_2}; \\ \varepsilon_4^0 &= \frac{1}{g_2} \frac{\partial u_3}{\partial \xi_2} + \phi_2 - \frac{u_2}{R_2}; \\ \varepsilon_5^0 &= \frac{1}{g_1} \frac{\partial u_3}{\partial \xi_1} + \phi_1 - \frac{u_1}{R_1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_6^0 &= \frac{1}{g_1} \frac{\partial u_2}{\partial \xi_1} + \frac{1}{g_2} \frac{\partial u_1}{\partial \xi_2}; \\
x_1 &= \frac{1}{g_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial \xi_1}; \quad x_2 = \frac{1}{g_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial \xi_2}; \\
x_6 &= \frac{1}{g_1} \frac{\partial \phi_2}{\partial \xi_1} + \frac{1}{g_2} \frac{\partial \phi_1}{\partial \xi_2} \\
&\quad + \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \\
&\quad \left(-\frac{1}{g_1} \frac{\partial u_2}{\partial \xi_1} - \frac{1}{g_2} \frac{\partial u_1}{\partial \xi_2} \right) \quad (19)
\end{aligned}$$

평형방정식을 얻기 위해 가상일의 원리와 변분원리를 적용하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (N_6 + c_0 M_6) + \frac{Q_1}{R_1} &= 0; \\
\frac{\partial}{\partial \xi_1} (N_6 - c_0 M_6) + \frac{\partial N_2}{\partial \xi_2} + \frac{Q_2}{R_2} &= 0; \\
\frac{\partial Q_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial Q_2}{\partial \xi_2} - \left(\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} - q \right) &= 0; \\
\frac{\partial M_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial M_6}{\partial \xi_2} - Q_1 &= 0; \\
\frac{\partial M_6}{\partial \xi_1} + \frac{\partial M_2}{\partial \xi_2} - Q_2 &= 0 \quad (20)
\end{aligned}$$

2.2 두께가 얇은 연소관에 적용되는 방정식

축대칭으로 변형하고 두께가 얇은 실린더 연소관은 다음과 같은 변형율의 성질을 갖고 있다.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_6^0 &= \gamma_{\xi_1 \xi_2} = 0; \\
x_6 &= 0; \\
\varepsilon_4^0 &= \gamma_{\xi_1 \xi} = 0; \\
\varepsilon_5^0 &= \gamma_{\xi_2 \xi} = 0; \\
u_{\xi_2} &= \phi_{\xi_2} = 0 \quad (21)
\end{aligned}$$

식(21)의 조건을 식(20)에 적용하고 좌표기호를 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 에서 (x, θ, ξ) 로 변환하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다. x 는 실린

더 축방향이고 θ 는 원주방향이고 ξ 는 두께방향이다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_x}{\partial x} &= 0; \\
\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{N_\theta}{R} + p &= 0; \\
\frac{\partial M_x}{\partial x} - Q_x &= 0 \quad (22)
\end{aligned}$$

다음 식(18)의 식은 식(21)과 축대칭 변형이라는 성질을 이용하면 다음과 같은 변형율과 변위의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} (\sigma_x - \nu_{x\theta} \sigma_\theta) \\
&= \frac{\partial u_0}{\partial x} + \xi \frac{\partial \phi_x}{\partial x}; \\
\varepsilon_\theta &= \frac{1}{E_\theta} (\sigma_\theta - \nu_{\theta x} \sigma_x) = \frac{w}{R}; \\
\varepsilon_{x\theta} &= \frac{1}{2G_{x\theta}} \sigma_{x\theta} \quad (23)
\end{aligned}$$

식(23)을 쉘의 두께에 따라 적분을 하고 단위 길이 당 합력의 정의를 이용하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned}
N_x &= \frac{hE_x}{1 - \nu_{x\theta} \nu_{\theta x}} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \nu_{x\theta} \frac{w}{R} \right); \\
N_\theta &= \frac{hE_\theta}{1 - \nu_{x\theta} \nu_{\theta x}} \left(\frac{w}{R} + \nu_{x\theta} \frac{\partial u_0}{\partial x} \right); \\
M_x &= \frac{E_x h^3}{12(1 - \nu_{x\theta} \nu_{\theta x})} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \quad (24)
\end{aligned}$$

식 (21)에서 중립면에 수직인 방향으로의 전단변형은 없다는 가정으로부터 다음의 조건을 얻을 수 있다.

$$\gamma_{x\xi} = \frac{1}{g_x} \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi_x} + \phi_x - \frac{u_x}{R_x} = 0$$

위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\phi_x = - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (25)$$

식(24)와 식(25)를 평형방정식 식(22)에 넣고 정리하면 다음과 같은 변위미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 u_0}{dx^2} + \frac{\nu_{\theta x}}{R} \frac{dw}{dx} = 0;$$

$$- \frac{d^4 w}{dx^4} + 4 \epsilon^4 w = \frac{1}{D_x} \left(p - \frac{\nu_{\theta x}}{R} N_x \right), \quad (26)$$

여기에서 $\epsilon^4 = \frac{3 D_\theta (1 - \nu_{x\theta} \nu_{\theta x})}{R^2 h^2 D_x}$

2.3 미분방정식의 해

반경방향의 변위 미분방정식 (26)의 일반해와 특수해를 구하면 다음과 같다.

$$w(x) = \frac{M_0}{2 \epsilon^2 D_x} e^{-\epsilon x} (\sin \epsilon x - \cos \epsilon x)$$

$$- \frac{Q_0}{2 \epsilon^3 D_x} e^{-\epsilon x} \cos \epsilon x$$

$$+ \frac{M_L}{2 \epsilon^2 D_x} e^{-\epsilon(L-x)} (\sin \epsilon(L-x) - \cos \epsilon(L-x))$$

$$+ \frac{Q_L}{2 \epsilon^3 D_x} e^{-\epsilon(L-x)} \cos \epsilon(L-x)$$

$$+ \frac{1}{4 \epsilon^4 D_x} \left(p(x) - \frac{\nu_{\theta x}}{R} N_x \right) \quad (27)$$

위의 해를 고찰하면 일반해는 진폭이 1인 삼각 함수를 포함하고 있으며 이것에 음의 지수를 갖는 e를 곱하였다. ϵx 나 $\epsilon(L-x)$ 의 값이 5.12보다 클 때 $e^{-\epsilon x}$ 과 $e^{-\epsilon(L-x)}$ 값은 지수적으로 격감하여 0.006

보다 작아지므로 이 항은 다른 항에 비해 무시해도 된다. 본 논문에서 시험한 연소관은 필라멘트 와인딩 공법을 사용하여 여러 적층각도로 적층된 것으로 적층각도는 회사 고유의 비밀이며 여기서는 표 1과 같이 연소관의 직교이방성 물성을 소개한다.

Table 1 Effective orthotropic mechanical properties of T700/Epoxy pressure vessel

E_x	E_θ	E_z	$G_{x\theta}$	$G_{\theta z}$	G_{xz}	$\nu_{x\theta}$	ν_{xz}	$\nu_{\theta z}$
0.74 $\times 10^4$ kg/mm ²	0.55 $\times 10^4$	0.99 $\times 10^4$	0.18 $\times 10^4$	0.46 $\times 10^4$	0.49 $\times 10^4$	0.26	0.31	0.34

위의 물성 값으로부터 다음과 같은 x의 영역에서 일반해의 관련된 항목은 0에 접근한다.

$$x > 3.94 \sqrt{Rh \left(-\frac{D_x}{D_\theta} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$L-x > 3.94 \sqrt{Rh \left(-\frac{D_x}{D_\theta} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (28)$$

실린더의 길이가 식(27)을 만족하도록 충분히 큰 경우에 다음의 조건에서는 일반해의 적분상수 모두가 0이 된다.

$$3.94 \sqrt{Rh \left(-\frac{D_x}{D_\theta} \right)^{\frac{1}{2}}} < x$$

$$< L - 3.94 \sqrt{Rh \left(-\frac{D_x}{D_\theta} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (29)$$

표 1로부터 $D_x = 6.48 \times 10^5$, $D_\theta = 4.82 \times 10^5$ 값을 알 수 있고 $Rh = 4500(\text{mm}^2)$ 인 경우 식 (28)을 만족하는 x의 값은 285mm이며 x의 값이 285mm보다 큰 경우는 끝단의 영향을 받지 않는다. 연소관의 최대 처짐은 연소관 중앙 부근에

서 일어나며 연소관의 길이가 1m인 경우 중앙은 끝단의 영향을 받지 않으므로 일반해가 0에 접근하며 반경방향의 변위를 식(26)을 이용하여 구할 수 있다. 연소관의 압력이 1450psi인 경우 실린더의 최대 반경방향 처짐은 표 2에 있다.

이상의 분석은 연소관의 두께가 10mm인 경우에 대한 것이며 두께가 8mm와 6mm에 대한 반경방향의 처짐은 표 2에 나타나 있다.

Table 2. The deflection of pressure vessel at 1450psi pressure

h(두께)	D_x	D_θ	$w(x)$ 처짐
6mm	1.4E5	1.04E5	6.3mm
8mm	3.32E5	2.47E5	4.7mm
10mm	6.48E5	4.82E5	3.75mm

3. 수압시험 및 결과 검토

이론으로부터 구한 결과치를 검증하기 위하여 연소관 수압시험을 실시하였다.

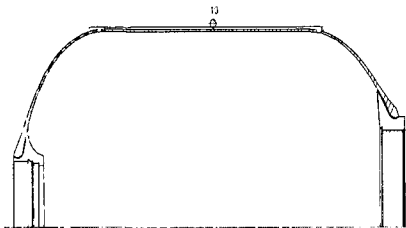


Fig. 2 Hydraulic test of the thin orthotropic composite pressure vessel

이 연소관의 두께는 10mm이며 그림 2에서와 같이 직교이방성 복합재료로 만든 압력용기를 전방과 후방에 알루미늄 마개로 막고 용기가 파열

이 될 경우 안전장치가 되 있는 시험장치에 용기를 후방이 위로 향하게 장착했다. 연소관이 동적하중을 받지 않게 하기위해 물을 분당 21.1kgf/cm²(300psi) 내로 서서히 넣어 압력을 가한다. 각 중요한 부분에 스트레인 게이지를 장착했으며 Fig. 2에서 19번이 연소관 실린더 부위의 중앙에 해당한다. 압력별 변형도를 측정하기 위해 M/M사의 System4000으로 데이터를 분석했다.

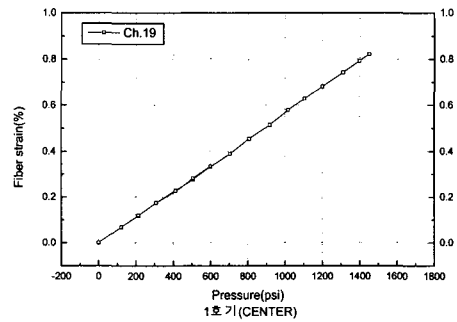


Fig. 3 The hydraulic test result of hoop directional strain at the cylinder center

수압시험을 한 결과 실린더 부위 중앙에서의 Hoop 방향의 strain에 대한 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. 변형율은 압력에 거의 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있으며 압력이 102kgf/cm²(1450psi)에서 0.83%의 strain 값이 측정됐으며 이것을 반경방향의 변위로 환산하면 표 3에서 나타난 것과 같다. 표 3에서는 3차례의 수압시험을 실시한 결과를 나타낸 것으로 시험 결과치가 이론 결과치에 근접하는 것을 나타냈으며 약간의 편차가 있으나 이것은 시험 시 연소관 두께 내부의 층간 분리나 그 밖의 결함이 내재해서 변형이 더 발생한 것으로 추정된다.

Table 3. The hydraulic test result of radial directional displacement at the cylinder center of pressure vessel of 10mm thickness

수압시험	1차	2차	3차	평균
w(x); mm	3.74	4.0	3.5	3.7

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유 T700/Epoxy로 만든 직교이방성 구조로 된 두께가 얇은 압력용기가 내압을 받을 때의 실린더 부위의 반경방향의 변위에 관한 해를 구한 결과 다음과 같이 요약된다.

1. 압력용기가 내압을 받을 때, 압력용기 실린더 부위 중앙의 반경방향의 변위는 끝단으로부터 285mm 이상에서는 끝단의 경계조건에 영향을 받지 않는다.
2. 본 압력용기가 1450psi로 내압을 받을 때, 반경방향의 이론치 변위는 두께가 10mm 인 경우 3.8mm이고, 8mm인 경우 4.7mm이며, 6mm인 경우 6.3mm이다.
3. 두께가 10mm인 본 압력용기가 1450psi로 3차례에 걸쳐 수압시험을 한 결과, 반경방향의 변위는 3.7mm이며, 압력에 따라 변위는 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다.
4. 압력용기 시편이 제한되어 있어서 두께가 10mm인 것에 국한하여 수압시험을 했지만 이론치와 시험치의 차이가 5%이내에 들어가 잘 예측되는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. J. L. Sanders, Jr, "An improved first approximation theory for thin shells", NASA Tech. Rept. R-24 (1959).
2. G. Dupuis, "Application of Ritz's method to thin elastic shell analysis", Trans. ASME, J. applied Mechanics. 38, 987-996.
3. Vinson, J. R. and T. W. Chou. "Composite materials and their use in structures", Applied Science Publishers, London (1975).
4. Wilkins, D. J. and T. S. Love. "Combined Compression-Torsional Bucking Tests of Laminated Composite Cylindrical Shells", AIAA Journal of Aircraft, v. 12. No. 11 1975.
5. Waltz, T. and J.R. Vinson, "Interlaminar Stresses in Laminated Cylindrical Shells of Composite Materials", AIAA Journal v. 14, No 9 (September 1976) : 1213-1218.
6. Ecord, G.M. "Composite Pressure Vessels for the Space Shuttle Orbiter", Composites in Pressure Vessels and Pipings, ASME-PVP-BB-021 (1977): 129-140.
7. C. W. Bert, M. Kumar, "Vibration of Cylindrical Shells of Bimodulus Composite Materials", Journal of Sound and Vibration, vol. 81, No. 1, 1982, pp. 107-121
8. Reaz A. Chaudhuri "A degenerate triangular shell element with constant cross-sectional warping", Computers of Structures Vol 28. No 3 pp 315-325 1988.
9. Y. C. Fung, "Foundations of Solid Mechanics", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1965).