

# 횡리브로 보강된 복합적층 원통형 쉘의 좌굴거동에 관한 연구

## Study on Buckling of Composite Laminated Cylindrical Shells with Transverse Rib

장 석 윤<sup>1)</sup>

Chang, Suk Yoon

요약 : 본 논문에서는 복합재료로 이루어진 원통형 쉘 구조물을 해석모델로 설정하였으며, 좌굴의 링 보강재 보강효과에 대해서 연구하였다. 유한요소법으로 해석을 수행하였으며, 보강재의 요소는 3차원 보요소를 사용하였고, 쉘 요소는 적용성이 뛰어난 평면셸요소를 사용하였으며, 대체 전단 변형률장을 도입하여 잠김현상을 극복하였다. 본 연구에서 링 보강재는 횡리브(Rib)의 형태이다. 이러한 보강재가 원통형 쉘의 좌굴에 미치는 영향을 고찰하였다. 즉, 보강재의 위치 변화, 보강재의 크기 변화, 쉘의 변장비 변화, 쉘의 지점조건의 변화, 복합재료의 화이버 보강각도 변화 등 다양한 파라미터 연구를 통해서 쉘의 좌굴거동을 분석하였다. 여러가지 설계변수에 대한 보강된 쉘의 거동에 대한 정확한 이해로부터 효율적인 보강설계를 제시하고자 하였으며, 원통형 쉘의 좌굴해석시 좋은 참고자료로 활용할 수 있으리라 기대된다.

ABSTRACT : In this study, the effects of ring stiffeners for buckling of cylindrical shells with composite materials were analyzed. The finite element method was used: 3-D beam elements were used for stiffeners and flat shell elements were used for cylindrical shells and were improved by introducing a substitute shear strain. The ring stiffeners were of the transverse rib type. The buckling behaviors of the cylindrical shells were analyzed based on various parameters, such as locations and sizes of stiffeners, diameter/length ratios and boundary conditions of shells, and fiber-reinforced angles. Effective reinforcement was examined by understanding the exact behaviors for buckling. The results of the analysis may serve as references for designs and future investigations.

핵심용어 : 원통형 쉘, 좌굴, 링 보강재, 횡리브, 복합재료

KEYWORDS : Cylindrical shell, Buckling, Ring stiffener, Transverse rib, Composite material, Anisotropic

### 1. 서론

복합재료를 적용한 쉘 구조는 최근 건설기술의 향상과 경량화로 인하여 그 사용이 증대되고 있다. 서로 다른 재료를 적층시켜 구조계의 전체적인 강성을 효과적으로 발휘하도록 제작할 수 있는 복합구조형식은 토목 구조물에 적용하기 위한 많은 연구와 실험이 지속되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 복합적층 원통형 쉘의 좌굴해석을 수행하고, 보강효과에 대해서 고찰하였다. 복합적층 쉘 구조의 보강방안은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 즉, 쉘의 단면을 크게 하는 방법, 복합재료를 사용하는 방법 그리고 보강재로 보강하는 방법이다. 복합재료를 사용하는 방법은 복합재료가 강성에 대한 방향성을 갖기 때문에 화이버 보강각도에 따라서 쉘의 거동이

달라지게 된다. 본 연구에서는 위의 세가지 방법 중 화이버 보강각도를 개선하는 방법과 보강재로 보강하는 방법을 이용하였다.

등방성 원통형 쉘의 좌굴에 대한 해석과 보강효과에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으며(Tian 1999, Zhong 2002), 또한 복합재료로 구성된 원통형 쉘의 좌굴에 대한 해석도 어느 정도 이루어져 있다(Navin, 1999). 그러나, 본 연구에서 다루는 복합재료로 구성된 원통형 쉘의 좌굴의 보강효과에 대한 연구는 미비한 실정이며, 있어도(Rikards, 2001) 다양한 파라미터 연구가 되어 있지 않아, 설계시 참조하기에 부적절한 면이 있다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 파라미터 연구를 통해서 복합재료로 이루어진 원통형 쉘의 좌굴에 대한 정확한 거동을 이해하며, 횡리브에 의한 보강효과를 분석함으로써 경제적인 설계방안을 제시하고자 한다. 즉, 보강재의 위치 변화, 보강재의 크기 변화,

1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수  
(Tel. 02-2210-2273, Fax. 02-2217-6800, E-mail : changsy@uos.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

셸의 변장비 변화, 셸의 지점조건의 변화, 복합재료의 화이버 보강각도 변화 등 다양한 파라미터 연구를 통해서 효율적인 보강설계를 제시하고자 하였다.

## 2. 기본이론

본 연구에서는 복합적층 원통형 셸의 좌굴에 대한 링 보강 효과에 대해서 연구하였다. 그림 1은 축방향(길이방향)으로 하중을 받는 링보강된 원통형 셸을 나타낸 것이다. 링의 위치가 변할 수 있으며, 링의 개수도 한개 또는 여러개 일수가 있다.

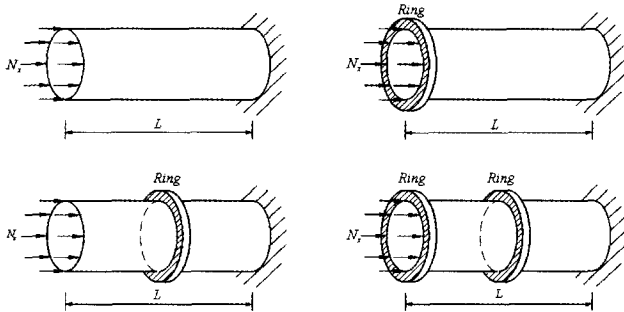


그림 1. 축방향 하중을 받는 링으로 보강된 원통형 셸

그림 2는 해석모델의 미소요소에 대한 좌표계 및 변위장을 나타내며, 그림 3은 화이버 보강각도와 적층셸의 단면을 나타낸다. 화이버 보강각도는 길이방향이  $0^\circ$ , 원주방향이  $90^\circ$ 이며, 반시계 방향을 (+)로 설정하였다. 복합적층 원통형 셸의 합응력과 변형률 관계는 식(1), (2), (3)과 같다(Vinson, 1975).

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

(2)

$$\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{-L/2}^{L/2} \bar{Q}_{ij}(1, z, z^2) dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}_{ij}]_k(1, z, z^2) dz \quad (4)$$

여기서,  $A_{ij}$ 는 면내력 강성,  $B_{ij}$ 는 휨과 면내력 연계강성,  $D_{ij}$ 는 휨강성 그리고  $K_i$ 는 전단보정계수를 의미한다. 또한  $\bar{Q}_{ij}$ 는 재료축에서의 재료강성을 구조축으로 좌표변환하여 구한 재료강성을 나타낸다.

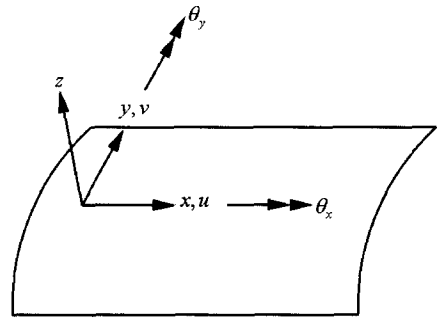


그림 2. 원통형 셸의 좌표계 및 변위장

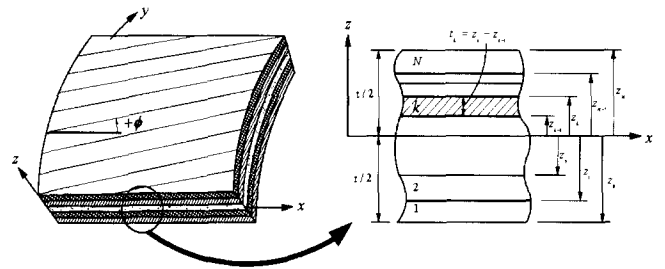


그림 3. 적층 셸의 화이버 보강각도 및 적층형상

## 3 유한요소법

### 3.1 개요

본 논문에서는 여러 가지 수치해석 기법 중 구조해석시 적용성이 뛰어난 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법에서 셸요소에 대한 연구는 70년대 이래로 계속해서 발전되어오고 있으며, 현재에도 개발이 진행중에 있다. 셸요소는 크게 세 가지에 토대를 두고 있다. 즉, 평면셸요소(flat shell element), 쉘 이론을 토대로 한 곡선요소(curved element), 3차원 요소로 유도된 감절점셸요소(degenerated shell element)이다.

위의 세 가지 요소는 각각 장단점을 가지고 있다. 평면셸요소는 적용성은 우수한 반면 요소수를 많이 세분화해야 하는 단점이 있으며, 곡선요소는 높은 정확성을 갖는 반면 많은 부가적인 단점을 가지고 있으며, 감절점셸요소는 정확성은 높으나 절점당 6개의 자유도를 가지는 다른 요소(예 : 보요소 등)와의 결합에서 다소 어려운 단점을 지니고 있다(Hinton &

Owen, 1984).

본 연구에서 사용한 쉘요소는 4절점 평면쉘요소를 선택하여 해석을 수행하였다. 평면쉘요소는 본 논문에서 고려한 링 보강재가 고려될 경우 적용성을 높이며, 요소를 적당히 세분화하면 좋은 정도를 얻을 수 있게 된다. 또한, 링 보강재의 요소는 3차원 보요소(Logan, 2002)를 사용하여 해당위치의 쉘 요소의 강성에 중첩시키는 방법으로 보강재의 효과를 고려하였다.

### 3.2 평면쉘요소

그림 4는 평면쉘요소의 자유도를 나타낸 것이며, 면내 회전 자유도( $\theta_z$ )가 추가되어 쉘구조의 해석이나 보요소와의 결합에 유용하게 사용할 수 있다. 기존의 쉘요소들은 잠김(locking) 현상과 같은 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 대체전단 변형률장(식(5)의  $MX_i, MY_i, LX_i, LY_i$ )을 도입하였다(Choi & Lee, 1999). 대체전단 변형률장을 도입한 B 매트릭스는 식(5)와 같으며, 강성매트릭스는 식(6)과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,y} & 0 & 0 & 0 \\ N_{i,y} & N_{i,x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_{i,x} \\ 0 & 0 & 0 & -N_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -N_{i,x} & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,x} & MX_i & MY_i \\ 0 & 0 & N_{i,y} & LX_i & LY_i \end{bmatrix}_{8 \times 20} \quad (5)$$

$$[K]_{20 \times 20} = \int_V [B]^T [E] [B] dV \quad (6)$$

여기에, 면내 회전자유도( $\theta_z$ )에 관한 강성 매트릭스(식(7)의  $k_{\theta z}$ )를 해당 자유도 위치에 추가하면, 최종 요소 강성 매트릭스( $[K_s]_{24 \times 24}$ )를 얻을 수 있다(LUSAS Theory Manual, 2001).

$$k_{\theta z} = k_{ip} (E_x + E_y) t A \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $E_x, E_y$ 는 탄성계수를,  $t$ 는 쉘의 두께를,  $A$ 는 요소의 면적을 의미하며,  $k_{ip}$ 는  $0.02E-5$ 로 설정하여 해석을 수행하였다(LUSAS Theory Manual, 2001). 또한, 기하적인 매트릭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Cook, 1989).

$$[K_\sigma]_{24 \times 24} = \int_V [G]^T_{24 \times 2} \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{xy} & N_y \end{bmatrix} [G]_{2 \times 24} dV \quad (8)$$

여기서,  $[G] = [J]^{-1} [G_7]$ 를 나타내며,  $[J]$ 는 Jacobian 매트릭스를,  $[G_7]$ 는 형상함수의  $\xi, \eta$ 에 관한 미분항을 나타낸다.

따라서, 좌굴해석은 다음과 같은 고유치 문제로 표현할 수 있다.

$$[K_s][X] = \bar{\lambda}[K_\sigma][X] \rightarrow |[K_s] - \bar{\lambda}[K_\sigma]| = 0 \quad (9)$$

여기서,  $\bar{\lambda}$ 는 좌굴하중  $N_{cr}$ 을 의미하며, 고유치 문제는 매트랩의 sparse eigenvalue solver를 사용하여 해석하였다.

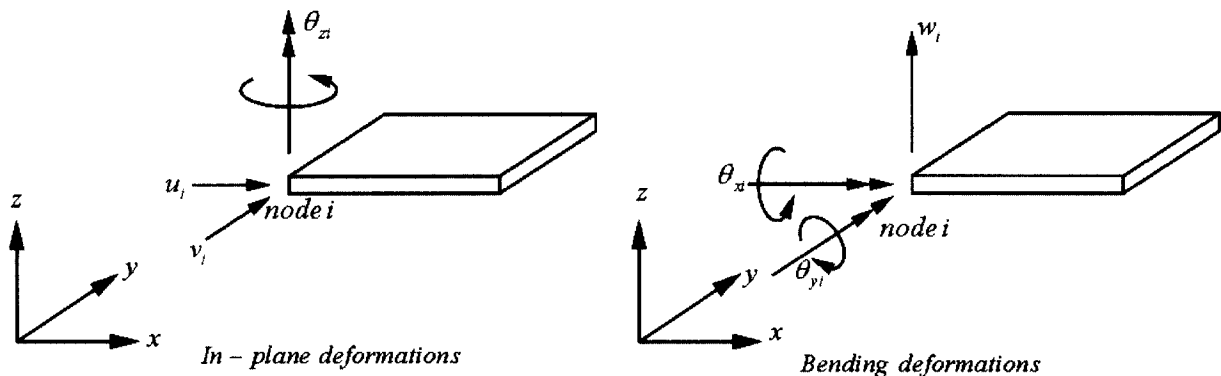
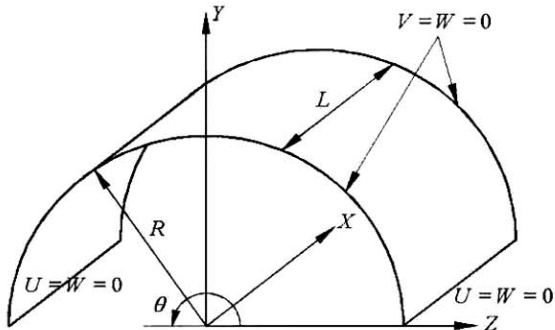


그림 4. 평면쉘 요소의 자유도

### 4 해석 예 및 고찰

#### 4.1 프로그램의 타당성 검증

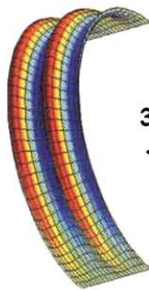


- Curved edges :  $V = W = 0$  ( $x = 0, L$ )
- Straight edges :  $U = W = 0$  ( $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ )
- $R = 40in, L = 22in, \theta = 180^\circ$
- Ply thickness :  $0.018 \times 12plies = 0.216in$
- Ply stacking sequence :  $[\pm 45/90/0/\mp 45]_s$
- Composite material properties  
 $E_1 = 13.75 Msi, E_2 = 1.03 Msi$   
 $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.42 Msi, \nu_{12} = 0.25$

그림 5. 축방향 하중을 받는 적층 원통형 셸

표 1. 적층 원통형 셸의 좌굴하중 (lbs/in) (20x40 elements)

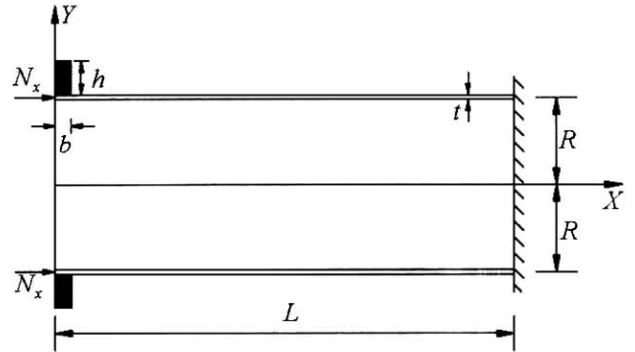
Januky(1999)		Rikards(2001)		Present
STAGS	Segmet approach	ANSYS	SH36 element	Flat shell element
3328	3278	3285	3313	3318



3318.2043  
← EigenValue

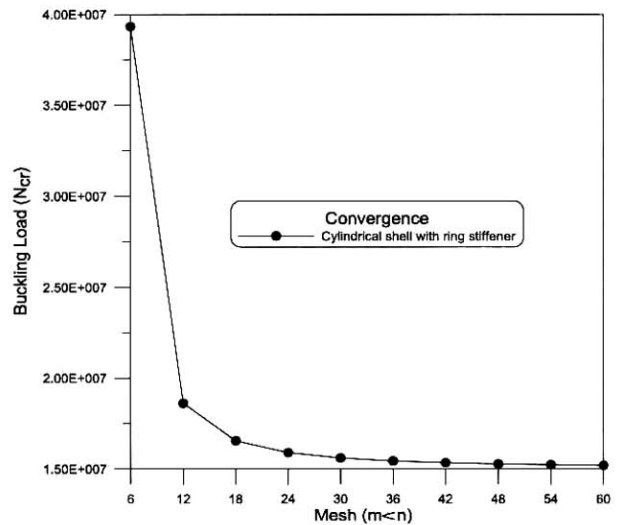
2, 3장의 이론으로부터 작성된 본 해석 프로그램의 타당성을 증하고자 관련논문과 비교를 하였고(Januky 1999, Rikards 2001), 링 보강재가 보강되었을 경우의 수렴성을 분석하였다. 그림 5는 관련논문과 비교하기 위한 모델을 나타내며, 비교 결과는 표 1에 나타나 있다. 그림 6은 링으로 보

강된 원통형 셸의 좌굴에 대한 수렴도를 나타낸 것이다. 해석 결과 관련논문과 잘 일치하며, 수렴성도 양호함을 알 수 있다 (24x24 에서 97%이상의 수렴성을 보인다). 이후의 요소 분할수는 20x20 으로 해석을 수행하였다.



[ $L = 3m, R = 0.5m, t = 0.01m, b = 0.01m, h = 5b$ ]

(a) 모델의 치수



(b) 수렴도

그림 6. 끝단 링으로 보강된 원통형 셸 (Material A [표 2])

### 4.2 해석모델

기본적인 해석모델은 그림 7, 8과 같이 폐합된 원통형 셸이다. 그림 7은 캔틸레버 형태의 원통형 셸(Model I)을, 그림 8은 단순지지인 원통형 셸(Model II)을 나타낸 것이다. 보강재는 편심효과를 고려하여( $I_y = bh^3/12 + A(h/2)^2$ ), 셸의 강성에 중점을 시켜서 해석을 수행하였다. 보강재의 위치 변화, 보강재의 크기 변화, 셸의 변장비 변화, 셸의 지점조건의 변화, 화이버 보강각도 변화 등 다양한 파라미터 연구를 통해서 셸의 좌굴거동을 분석하였다. 해석모델의 물성치는 표 2와 같으며, 셸 요소는 Material B인 직교이방성인 재료를, 보강재

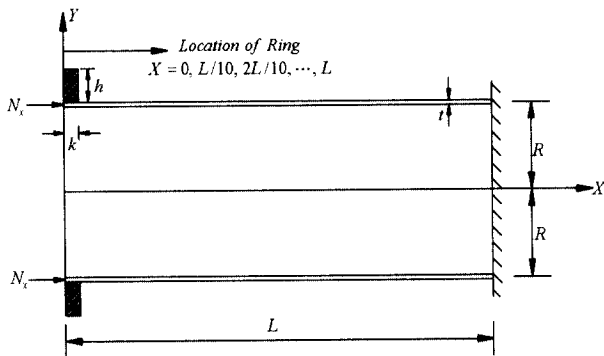
표 2. 셸과 링의 물성치 (단위 : GPa)

Material Type	$E_1$	$E_2$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12}$
Material A (Steel) - 보강재	200	200	76.9231	76.9231	76.9231	0.3
Material B (Boron/Epoxy) - 셸	200	20	6.67	6.67	4	0.3

의 요소는 강재인 Material A를  $L^2$ 사용하였다.

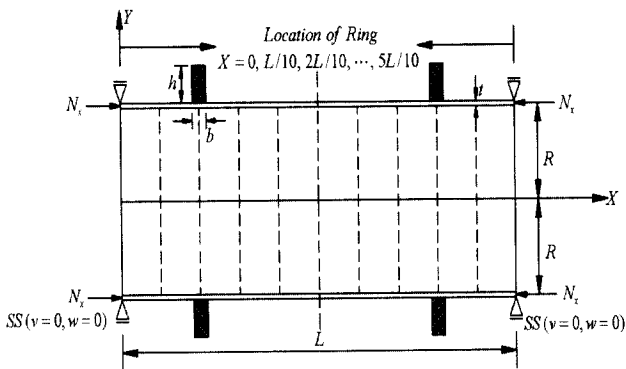
식(10)은 좌굴하중  $N_{cr}$ 을 무차원화 시킨 것이다. 식(10)과 같이 무차원화 하면 이 분자에 있기 때문에 같은 조건에서 길이가 길어지면  $\lambda$ 도 커지므로, 길이가 길어지면 좌굴하중도 커지는 오해의 소지가 있다. 따라서, 그림 9와 표 3과 같이 링으로 보강되지 않은 경우는 좌굴하중  $N_{cr}$ 을 사용하여 결과를 비교, 분석하였으며, 나머지는 좌굴 파라미터  $\lambda$ 를 사용하여 결과를 비교, 분석하였다.

$$\lambda = N_{cr} (L^2 / E_2 t^3) \quad (10)$$



( $R=0.5m, t=0.01m, L/D=3\sim7, b=0.01m, h=b\sim5b$ )

그림 7. 캔틸레버 형태의 원통형 셸 (Model I)



( $R=0.5m, t=0.01m, L/D=3\sim9, b=0.01m, h=b\sim5b$ )

그림 8. 양단 단순지지된 원통형 셸 (Model II)

### 4.3 Model I 에 대한 결과분석

본 절은 캔틸레버 형태 원통형 셸의 링 보강 효과에 관하여 결과를 분석하였다(그림 7). 그림 9는 보강되지 않은 원통형 셸의 화이버 보강각도 변화에 따른 결과를 나타낸 것이다. 가로축의 100은  $100^\circ$ 가 아니라,  $[0/90/90/0]$ 로 적층된 경우를 나타내며, 나머지 가로축은 그 각도 값을 나타낸다. 축방향 좌굴하중이기 때문에  $0^\circ$  또는  $[0/90/90/0]$ 보강이 유리함을 알 수 있으며, 변장비가 커질수록  $90^\circ$ 보강이 불리함을 알 수 있다.

그림 10(a)는 보강재의 위치 변화에 따른 결과이다. 가로축의 0은 자유단 보강을 나타내며, 1로 커질수록 고정단쪽으로 위치가 변화한다. 따라서, 가로축의 1은 보강되지 않은 경우 (Unstiffened)를 나타낸다. 해석결과 자유단 보강효과가 가장 크다. 그림10(b)는 자유단에 보강했을 경우 보강재의 높이/폭 ( $h/b$ )의 변화에 따른 결과이다. 고정단 효과와 비교하기 위해서 가로축의 5를 고정단으로 설정하였다. 변장비가 작을 때  $h/b=3$ 에서 거의 고정단 효과를 나타내며, 변장비가 7이상일 때도  $h/b=3$ 에서 효과가 크게 나타났다.

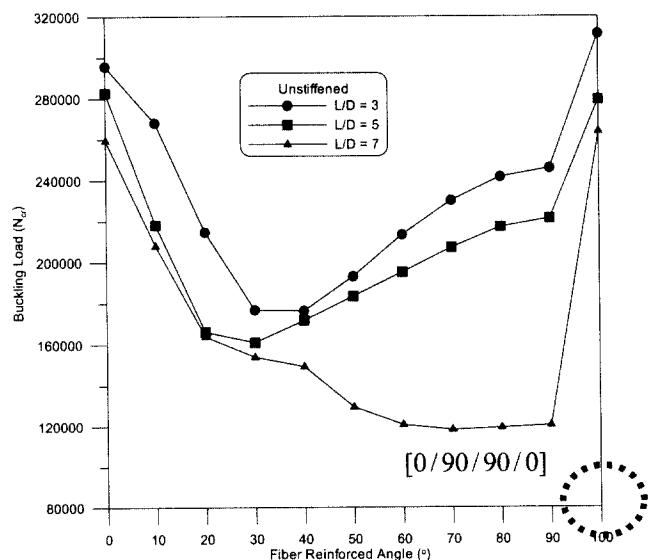
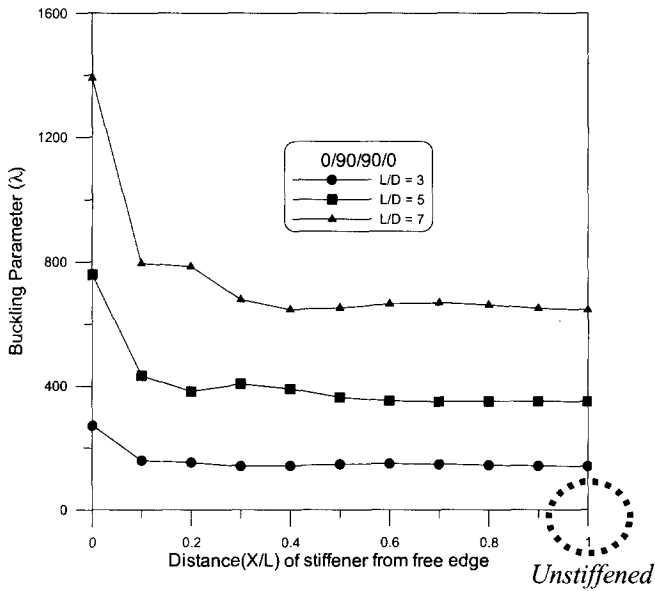
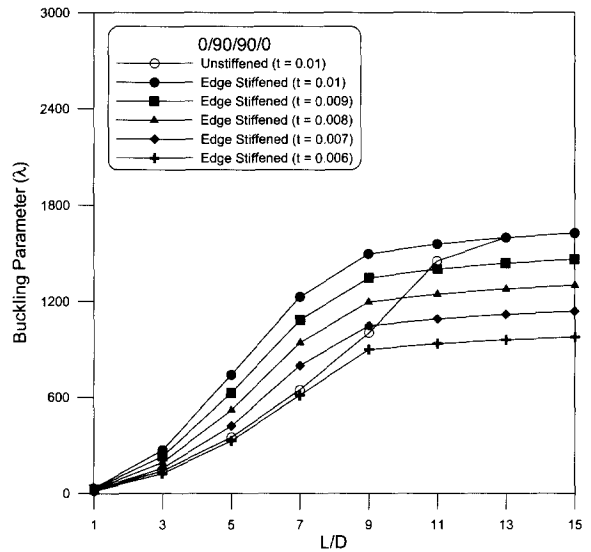


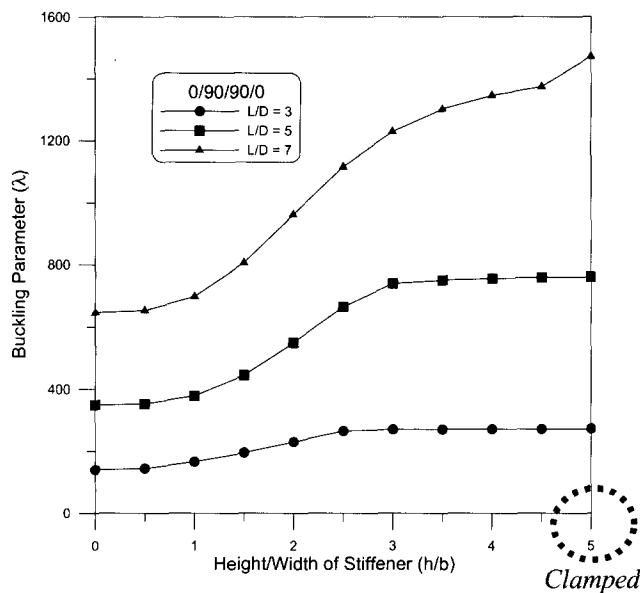
그림 9. 링으로 보강되지 않은 원통형 셸의 화이버 보강효과



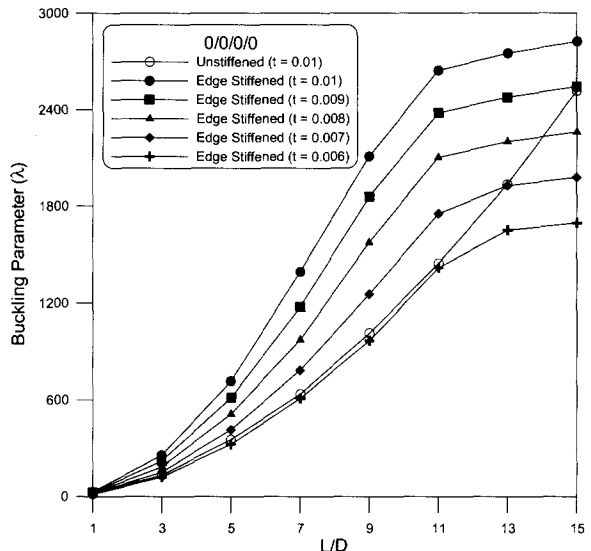
(a) 보강재의 위치 변화 ( $h = 5b$ )



(a) [0/90/90/0]



(b) 보강재의 높이/폭비 변화 ( $h/b$ )



(b) [0/0/0/0]

그림 11. 끝단 링으로 보강된 원통형 셸의 두께 감소 효과 ( $h = 3b$ )

그림 10. 링 보강재 효과

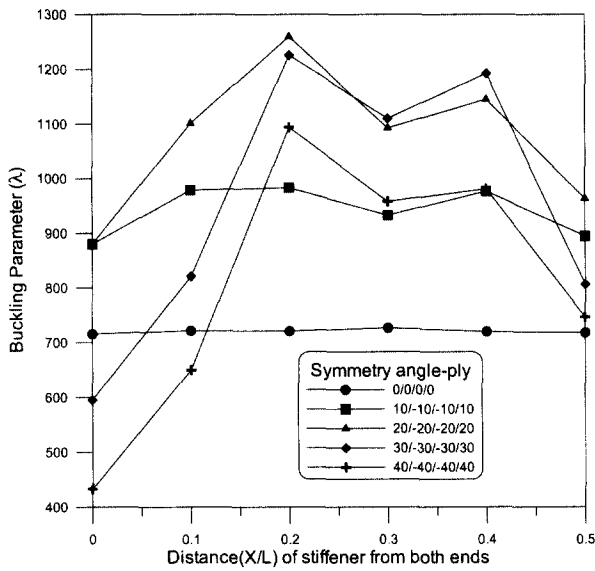
#### 4.4 Model II에 대한 결과분석

그림 11은 일정한 단면을 가진 보강재로 보강 했을 때, 셸의 두께를 얼마나 감소시킬 수 있는지를 알고자 해석을 수행하였다. 비교를 하기 위해서 무차원 파라미터( $\lambda$ )를 구할 때  $t$ 는 0.01로 통일시켰다(식(10)). 변장비가 9이하에서는 셸의 두께를 30%이상 감소시킬 수 있다. 변장비 9이상일 경우는 [0/90/90/0]로 보강하기 보다는 [0/0/0/0]이 보다 유리하며, [0/0/0/0] 보강과 링 보강재를 사용하면 효과를 높일 수 있다.

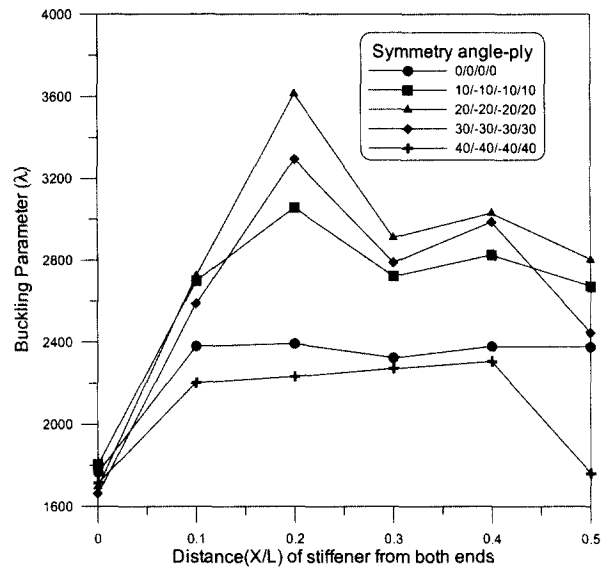
본 절은 양단 단순지지 원통형 셸의 링 보강 효과에 관하여 결과를 분석하였다(그림 8). 표 3은 보강되지 않은 원통형 셸의 화이버 보강각도 변화에 따른 결과를 나타낸 것이다. 단층 보강일 때는  $0^\circ$ 가 가장 유리하며, 단층 보다는 앵글 플라이로 적층한 것이 유리하다. 또한, 참고문헌(박근우 등, 2000)과 같이 역대칭 보다는 대칭 앵글 플라이로 적층한 것이 유리하다. 또한 변장비에 따라서 다소 차이가 있지만, 대칭 앵글 플라이  $10 \sim 20^\circ$ 보강이 가장 유리함을 알 수 있다.

표 3. 보강되지 않은 원통형 쉘의 확이버 보강각도 변화에 따른 좌굴 하중( $N_{cr}$ )

Fiber Angle	$L/D=3$			$L/D=7$		
	$[\phi/\phi/\phi/\phi]$	$[\phi/-\phi/-\phi/\phi]$	$[\phi/-\phi/\phi/-\phi]$	$[\phi/\phi/\phi/\phi]$	$[\phi/-\phi/-\phi/\phi]$	$[\phi/-\phi/\phi/-\phi]$
0°	5.56E5	5.56E5	5.56 E5	4.90E5	4.90E5	4.90E5
10°	4.33E5	6.39E5	6.37E5	3.44E5	<b>5.20E5</b>	5.19E5
20°	3.99E5	<b>6.51E5</b>	6.44E5	2.64E5	4.70E5	4.66E5
30°	4.47E5	5.80E5	5.62E5	2.79E5	3.79E5	3.68E5
40°	4.00E5	5.84E5	5.77E5	3.59E5	3.85E5	3.65E5
50°	3.83E5	4.16E5	4.06E5	3.99E5	4.20E5	4.22E5
60°	3.86E5	4.00E5	3.85E5	4.11E5	4.21E5	4.09E5
70°	4.02E5	4.23E5	4.04E5	4.22E5	4.41E5	4.21E5
80°	4.21E5	4.37E5	4.22E5	4.32E5	4.54E5	4.33E5
90°	4.30E5	4.30E5	4.30E5	4.31E5	4.31E5	4.31E5



(a)  $L/D=5$



(b)  $L/D=9$

그림 12. 링의 위치 변화에 따른 좌굴 파라미터  $\lambda$  ( $h=5b$ )

그림 12는 보강재의 위치 변화에 대한 결과이다. 보강된 쉘의 경우는 대칭 앵글 플라이 20~30°보강이 유리하며, 보강되지 않은 경우와 다소 차이를 나타내고 있다. 이처럼 적층된 쉘의 거동은 예측하기 난해하기 때문에, 적층 효과와 링 보강효과를 최대한 살리기 위해서는 면밀한 검토가 요구된다. 링 보강재의 위치는 2L/10, 4L/10지점에 양쪽으로 보강하는 것이 유리하며, 중앙(5L/10)에 중첩보강은 불리함을 알 수 있다.

표 4는 2L/10, 4L/10의 양쪽으로 4개의 링으로 보강했을 경우 보강재의 높이/폭비에 따른 결과를 나타낸 것이다. 0°로 보강했을 경우는 보강재의 높이가 커질수록 계속해서 좌굴하중도 커지지만, 앵글 플라이로 보강했을 경우는 2~3에서 보강효과가 뛰어나며, 그 이상에서는 별 영향이 없는 것으로 나타났다. 앵글 플라이로 보강했을 경우 보강재의 높이/폭비를 2정도로 하면 큰 효과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

표 4. 보강재의 높이/폭( $h/b$ )비에 따른 좌굴 파라미터( $\lambda$ )

$L/D$	$h/b$	[0/0/0/0]	[30/-30] <sub>s</sub>	$L/D$	$h/b$	[0/0/0/0]	[20/-20] <sub>s</sub>
3	0†	250.19	261.06	7	0†	1201.1	1151.2
	1	260.92 (4.29%)‡	317.27 (21.53%)		1	1274.7 (6.12%)	1230.7 (6.91%)
	2	264.12 (5.57%)	519.78 (99.10%)		2	1434.3 (19.41%)	1740.6 (51.2%)
	3	266.69 (6.60%)	519.96 (99.17%)		3	1437.7 (19.70%)	2443.2 (112.2%)
	4	268.61 (7.36%)	520.12 (99.23%)		4	1440.4 (19.92%)	2448.3 (112.7%)
	5	270.05 (7.94%)	520.27 (99.29%)		5	1442.5 (20.10%)	2452.6 (113.0%)

† 보강되지 않은 원통형 셸을 의미한다.

‡ 괄호안의 %는  $(\lambda_s - \lambda_u)/\lambda_u \times 100$  (%) 를 의미한다.  $\lambda_s$ 는 보강된 좌굴 파라미터를,  $\lambda_u$ 는 보강되지 않은 좌굴 파라미터를 나타낸다.

#### 4.5 복합적층 원통형 셸의 좌굴 형상

복합재료의 방향성 때문에 복합 적층된 원통형 셸의 좌굴 거동을 예측하기가 매우 난해하며, 여기에 링으로 보강했을 경우는 더욱 어렵게 된다. 복합적층 원통형 셸의 첫번째 좌굴 형상을 표 5, 6, 7에 나타내었다. 화이버 보강방향에 따라서 좌굴 거동이 판이하게 달라지며, 또한 보강되었을 경우와 보강되지 않았을 경우에도 좌굴 거동이 상당히 달라짐을 알 수가 있다.

이처럼, 복합적층 원통형 셸의 좌굴해석시 좌굴거동을 면밀히 고찰하여야 하며, 좌굴 거동을 면밀히 살펴보면, 화이버 보강방향을 설정하면 효율적인 설계를 할 수 있으리라 기대된다.

#### 5 결론

본 연구에서는 복합적층 원통형 셸을 해석 모델로 설정하여, 좌굴에 대한 링 보강효과에 대하여 연구를 수행하였다. 캔틸레버 형태의 원통형 셸과 단순지지인 원통형 셸의 2가지 형태에 대한 다양한 파라미터 연구를 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 캔틸레버 형태에서 화이버 보강각도는 0 또는 [0/90/90/0] 보강이 유리하고, 보강재는 자유단에 보강했을 경우가 가장 효율적이며, 보강재의 높이/폭비는 3정도에서 큰 효과를 나타내었다. 위와 같이 보강했을 경우 셸의 두께를 30%정도 감소시킬 수 있다.
- (2) 양단 단순지지 형태에서는 단층 보다는 앵글 플라이로

적층한 것이, 역대칭 보다는 대칭 앵글플라이로 적층한 것이 유리하다. 또한 변장비에 따라서 다소 차이가 있으나, 대칭 앵글 플라이 10~20°보강이 가장 유리하게 나타났다.

- (3) 복합재료의 방향성 때문에 복합 적층된 원통형 셸의 좌굴 거동을 예측하기가 매우 난해하며, 여기에 링으로 보강했을 경우는 더욱 어렵게 된다. 따라서, 복합적층 원통형 셸의 좌굴해석시 좌굴거동을 면밀히 고찰하여야 하며, 좌굴 거동을 면밀히 살펴보면, 화이버 보강방향을 설정하면 효율적인 설계를 할 수 있으리라 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2003년도 서울시립대학교 연구교수 학술연구비에 의하여 연구되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고 문헌

- 박근우, 임성순, 장석윤 (2000) 비등방성 원통형 셸의 안정성에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제12권 2호, pp.187~196
- Assan A.E. (1999) Analysis of multiple stiffened barrel shell structures by strain based finite elements, *Thin Walled Structures*, Vol.35, pp.233~253
- Choi C.K. and Lee P.S. (1999), Defect free 4 node flat shell element:NMS 4F element, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.8, pp.207~231.



표 5.  $L/D=3$ 에 대한 좌굴 모드형상 (Model I)

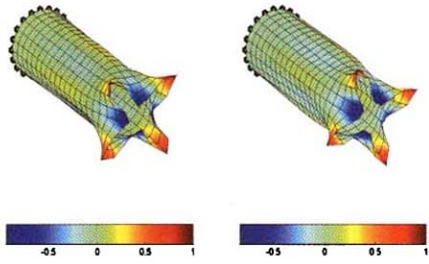
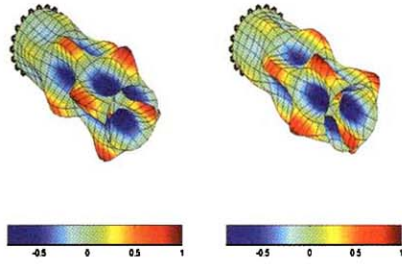
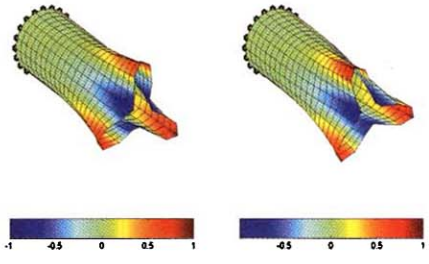
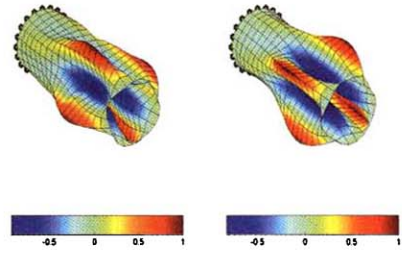
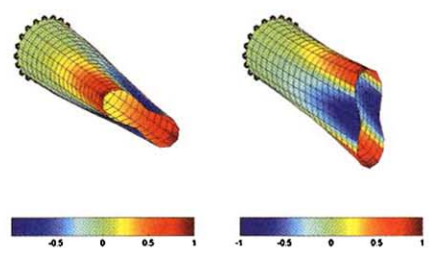
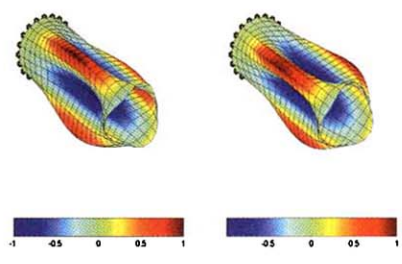
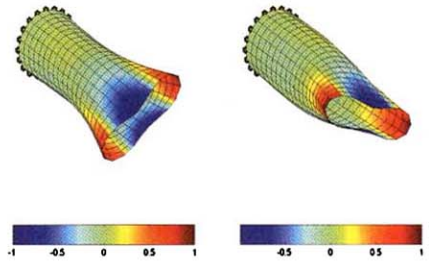
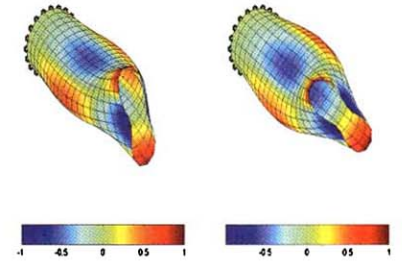
Fiber angle	Unstiffened	Edge stiffened
[0/0/0/0]		
[20/-20/-20/20]		
[30/-30/-30/30]		
[90/90/90/90]		

표 6. L/D=5에 대한 좌굴 모드형상 (Model I)

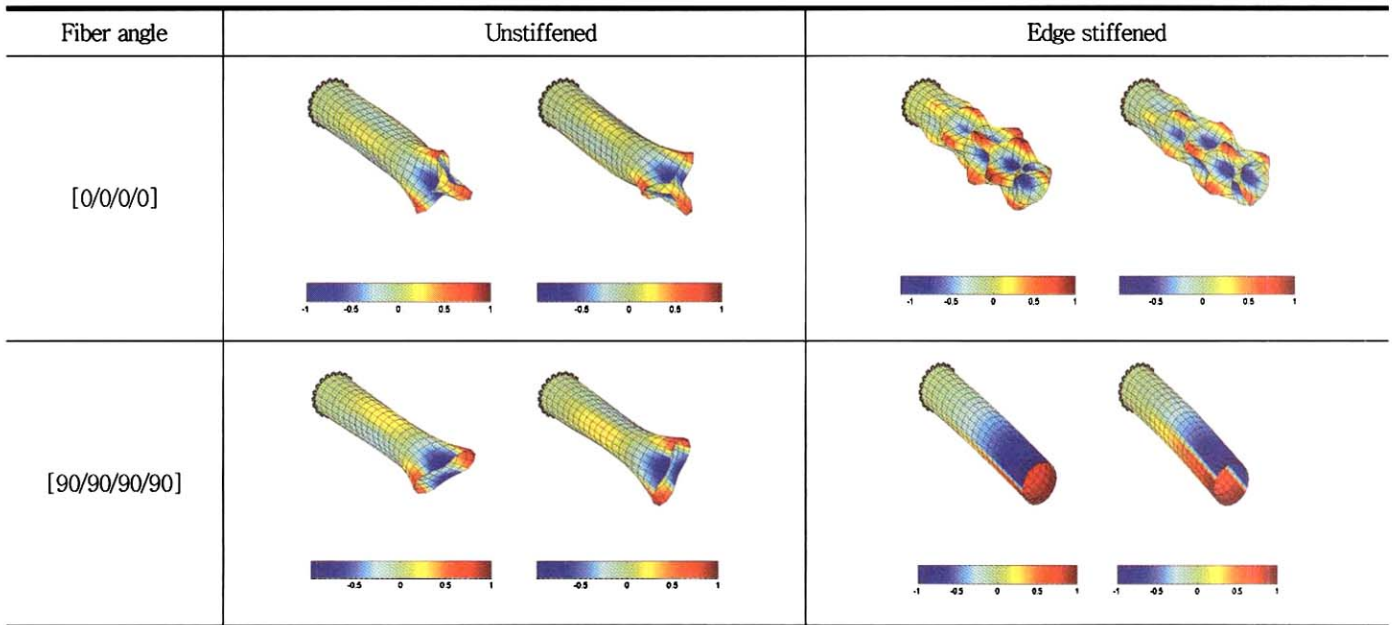
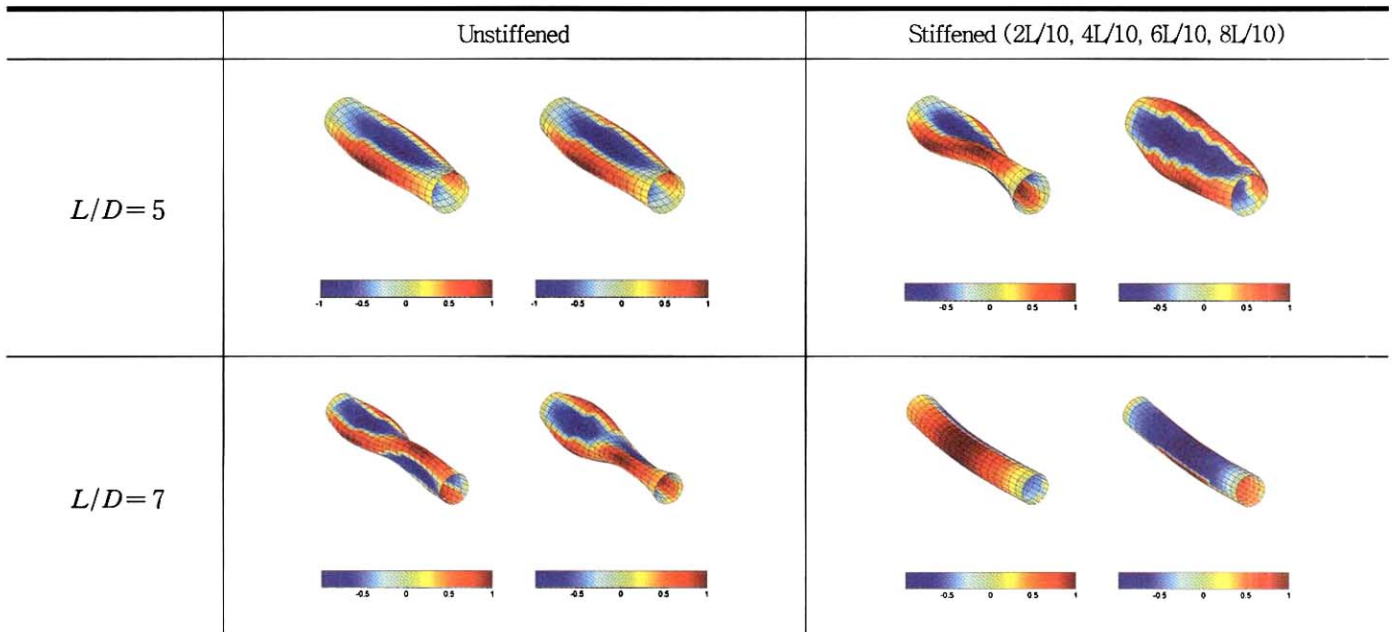


표 7. 화이버 보강각도 [60/-60/-60/60]에 대한 좌굴 모드형상 (Model II)



Cook R. D., Malkus D.S. and Plesha, M.E. (1989) *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> Ed.  
 Flugge Wilhelm (1973), *Stresses in Shells*, Springer Verlag Berlin, 2<sup>nd</sup> Ed.  
 Hass D.J. and Lee S.W. (1987), A nine node Assumed strain Finite Element for Composite Plates and Shells,

*Computers & Structures*, Vol.26, No.3, pp.445~452.  
 Hinton E. and Owen D.R.J. (1984), *Finite Element Software for Plates and Shells*, Pineridge Press Limited.  
 Logan D. L. (2002) *A First Course in the Finite Element Method*, 3<sup>rd</sup>.  
 LUSAS Theory Manuel (Ver 13.4, 2001), FEA Ltd.  
 Jones R. M. (1975) *Mechanics of Composite Materials*,

McGraw Hill.

Navin Jaunky, Norman F. Knight Jr., Damodar R. Ambur (1999) Buckling analysis of anisotropic variable curvature panels and shells, *Composite & Structures*, Vol.43, pp.321~329.

Omurtag M.H. and Akoz A.Y. (1995) Isoparametric mixed finite element formulation of orthotropic cylindrical shells, *Computers & Structures*, Vol.55, No. 5, pp.915~924.

Reddy J. N. (1997) *Mechanics of Laminated Composite Plates*, CRC press.

Rikards R., Chate A. and Ozolinsh O. (2001) Analysis for buckling and vibrations of composite stiffened shells and plates, *Composite & Structures*, Vol.51, pp.361~370.

Soedel Werner (1981) *Vibrations of Shells and Plates*,

Marcel Dekker, Inc..

Tian J., Wang C.M. and Swaddiwudhipong (1999) Elastic buckling analysis of ring stiffened cylindrical shells under general pressure loading via the Ritz method, *Thin Walled Structures*, Vol.35, pp.1~24.

Vinson J.R. and Tsu wei Chou (1975) *Composite Materials and Their Use in Structures*, Applied Science Publishers LTD.

Zhong L.J., Chew H.K., Zhangzhi C. (2002) Shell element of relative degree of freedom and its application on buckling analysis of thin walled structures, *Thin Walled Structures*, pp.1~12.

(접수일자 : 2004. 3. 15 / 심사일 2004. 3. 22 /  
심사완료일 2004. 7. 19)