

복합적층 원뿔형 셸의 파라미터 연구

손병직[†] · 정대석^{*}

건양대학교 건설시스템공학과 · ^{*}중부대학교 사회기반시스템공학과
(2007. 3. 13. 접수 / 2007. 9. 2. 채택)

Parametric Study of Composite Laminated Conical Shells

Son Byung Jik[†] · Jung Dae Suck^{*}

Department of Civil Engineering, Konyang University

^{*}Department of Civil Engineering, Joongbu University

(Received March 13, 2007 / Accepted September 2, 2007)

Abstract : In general, the curved structures have the engineering efficiency as well as a fine view compared with straight member. Also, composite materials are composed of two or more different materials to produce desirable properties for structural strength as compared to single ones. Shell structures with composite materials have many advantages in strength and weight reduction. Therefore, composite laminated conical shells are analyzed in this study. To solve differential equations of conical shells, this paper used finite difference method. Various parametric study according to the change of radius ratio, vertex angle and subtended angle are examined. The change of radius ratio, vertex angle and subtended angle mean the change from conical shells to cylindrical shells, conical shells to circular plates and open shells closed shells, respectively.

Key Words : composite laminated, conical shells, cylindrical shells, circular plate, radius ratio, vertex angle, subtended angle, finite difference method

1. 서 론

토목구조물에 사용하는 재료로는 대부분 콘크리트나 강재가 사용되고 있지만, 최근에는 구조물이 대형화됨에 따라 경량 재료의 사용이 요구되고 있다. 이러한 경량 재료는 중량이 가볍고 필요한 강성을 가지며 내구성이 우수한 재료를 필요로 하고 있으며 대표적인 재료로 각광을 받는 재료가 복합재료이다. 복합재료는 두 가지 이상의 재료적 특성 즉, 직교이방성 재료특성을 갖는 서로 다른 재료들을 적층시켜 전체적인 강성을 효과적으로 발휘하도록 제작된 구조재료를 말한다. 특히 방향성을 갖는 단일소재만으로 구성된 구조재보다 구조적으로 약한 방향을 보강하도록 적층시킨 복합재료는 구조적 효율성이 뛰어난 구조물로 제작할 수 있는 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라 손쉽게 제작할 수 있다는 점에서 높은 평가를 받는 구조재이다. 최근 선진국에서는 교량

재료로서 복합재료를 실제로 사용한 사례가 많이 있으며 많은 연구가 진행 중에 있다(Douglas, 1998)¹⁾. 국내에서도 소형 교량이지만 교량 바닥판을 복합재료를 사용하여 시공한 사례가 있다(지효선 등, 2004)²⁾.

이처럼 복합재료의 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있는 가운데 본 연구에서는 복합재료로 구성된 복합적층 원뿔형 셸의 파라미터 연구를 수행하였다.

셸의 연구는 Kirchhoff-Love의 가정에 근거한 고전적 이론을 시작으로 Sanders(1959)³⁾ 등에 의해 얇은 탄성 셸의 선형 이론이, Flugge(1973)⁴⁾ 등에 의해 두꺼운 셸 이론이 제안되었다. 그 후 Vinson(1975)⁵⁾ 등은 복합재료에서는 구조평면 내에서 탄성계수가 전단탄성계수보다 충분히 크므로 직교이방성 적층 원뿔형 셸의 연구에서 전단변형이 포함되어야 한다는 이론을 정립하고, 휨과 전단변형을 갖는 복합재료로 구성된 구형 셸에 관한 상세한 연구를 하였다.

원뿔형 셸의 연구는 자유진동, 강제진동, 좌굴거동, 후좌굴거동 등⁶⁻¹²⁾에 초점이 맞춰져 있고, 오히

[†] To whom correspondence should be addressed.
strustar@konyang.ac.kr

려 원뿔형 쉘의 정적해석에 대한 다양한 파라미터 연구가 미흡한 실정이다. 손병직(2000)¹³⁾ 등은 자유 경계를 갖는 비등방성 원뿔형 쉘의 해석을 통해 복합재료의 효율적인 적층각도를 제시하고, 중심각 변화에 대한 고찰을 하였으나, 이 또한 설계시 참조할만한 다양한 파라미터 연구가 미흡하다. 따라서, 본 연구에서는 복합적층 원뿔형 쉘의 정적해석에 대한 다양한 파라미터 연구를 수행하였다. 이전 연구¹³⁾에서 제시된 복합적층 원뿔형 쉘의 효율적 보강각도인 0/90/90/0으로 보강된 경우의 다양한 파라미터 연구 즉, 쉘의 반경비 변화에 따른 연구, 기울기 변화에 따른 연구, 중심각 변화에 따른 연구를 수행하여, 원뿔형 쉘의 거동특성을 분석하였다.

2. 기본이론

본 연구에서는 전단변형 효과를 고려하여 복합적층 원뿔형 쉘의 다양한 파라미터 해석을 수행하였다. Fig. 1은 해석모델의 미소요소에 대한 좌표계 및 변위장을 나타낸다. 원통형 좌표계이며, x 축은 원뿔방향, θ 축은 원주방향, 그리고 z 축은 반경방향의 의미한다.

전단변형효과를 고려한 원뿔형 쉘의 변형률-변위 관계식은 식 (1)과 같고, x 및 쉘의 기울기(α)는 Fig. 2에 나타낸 것과 같다¹⁶⁾.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_{xx}^0 + z\kappa_{xx} \\
 \varepsilon_{\theta\theta} &= \varepsilon_{\theta\theta}^0 + z\kappa_{\theta\theta} \\
 \gamma_{\theta x} &= \gamma_{\theta x}^0 + z\kappa_{\theta x} \\
 \gamma_{\theta z} &= \gamma_{\theta z}^0 \\
 \gamma_{xz} &= \gamma_{xz}^0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, 중립면의 변형률과 z 에 비례하는 곡률은 각각 식 (2), (3)과 같다.

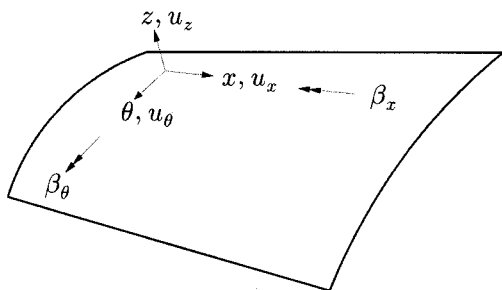


Fig. 1. Coordinate system and displacement fields of conical shells.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx}^0 &= \frac{\partial u_x^0}{\partial x} \\
 \varepsilon_{\theta\theta}^0 &= \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial u_\theta^0}{\partial \theta} + \frac{1}{x \tan \alpha} u_z^0 + \frac{1}{x} u_x^0 \\
 \gamma_{\theta x}^0 &= \frac{\partial u_\theta^0}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial u_x^0}{\partial \theta} - \frac{1}{x} u_\theta^0 \\
 \gamma_{\theta z}^0 &= \beta_\theta + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial u_z^0}{\partial \theta} - \frac{1}{x \tan \alpha} u_\theta^0 \\
 \gamma_{xz}^0 &= \beta_x + \frac{\partial u_z^0}{\partial x}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \kappa_{xx} &= \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\
 \kappa_{\theta\theta} &= \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial \beta_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{x} \beta_x \\
 \kappa_{\theta x} &= \frac{\partial \beta_\theta}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial \beta_x}{\partial \theta} - \frac{1}{x} \beta_\theta
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

본 논문에서는 직교이방성의 재료가 0/90/90/0의 4개의 층으로 적층된 쉘을 해석대상으로 선정하였다. Fig. 3은 임의의 층에서의 구조축과 재료축을 나타낸 것이며, x, θ, z 축은 구조축을, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 축은 재료축을, 그리고 ϕ 는 구조축과 재료축이 이루는 각도를 의미한다. 또한 Fig. 3은 z 축과 α_3 축이 일치하고, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 축이 직교하는 직교이방성의 쉘을 나타낸 것이다^{14,15)}.

Fig. 3으로부터 임의의 k 층에서의 구조축에 대한 응력-변형률 관계를 좌표변환을 통해서 유도할 수 있다¹⁴⁾.

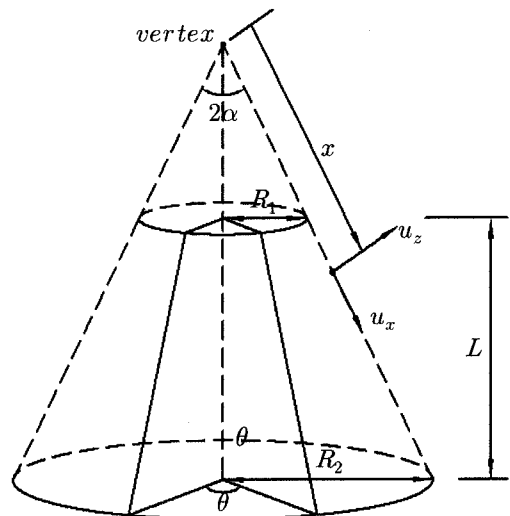


Fig. 2. Geometry of closed conical shells.

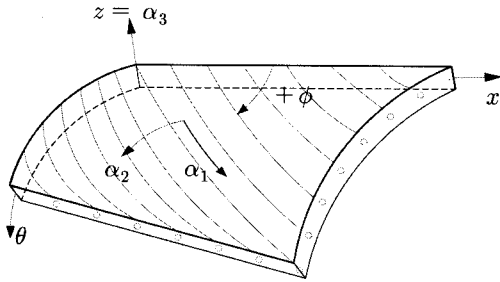


Fig. 3. Structural axis and material axis of reinforced layer.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \tau_{\theta x} \\ \tau_{\theta z} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} & 0 & 0 \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & Q_{45} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{45} & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \gamma_{\theta x} \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $[\overline{Q}]$ 는 재료축에서의 재료강도를 구조축으로 좌표변환하여 구한 재료강도를 나타낸다.

Fig. 4는 면내력을, Fig. 5는 면외력을 나타내며, 이러한 합응력과 변형률 관계는 식 (4)를 k 층으로 적분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다^{14,15}.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_\theta \\ Q_x \end{Bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\theta z}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{-z/2}^{z/2} \overline{Q}_{ij}(1, z, z^2) dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\overline{Q}_{ij}]_k(1, z, z^2) dz \quad (8)$$

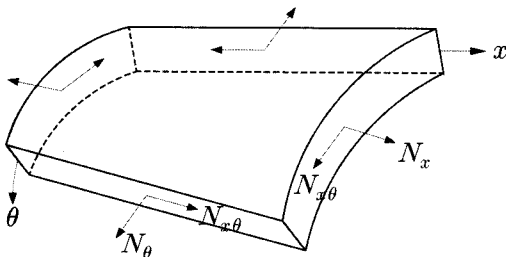


Fig. 4. In-plane forces for conical shells.

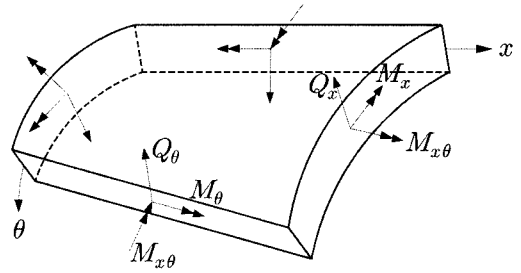


Fig. 5. Out-of-plane forces for conical shells.

이고, A_{ij} 는 면내력 강도, B_{ij} 는 휨-면내력 연계강도, D_{ij} 는 휨강도 그리고 K_i 는 전단보정계수를 의미한다^{14,15}.

복합적층 원뿔형 셸의 미소요소인 Fig. 4, 5에 정의된 합응력으로 지배방정식을 얻을 수 있다. 휨과 모멘트의 평형조건을 이용하면 원뿔형 셸의 변위에 대한 지배방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다¹⁶.

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{x} (N_x - N_\theta) &= -q_x \\ \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{x \tan \alpha} Q_\theta + \frac{2}{x} N_{x\theta} &= -q_\theta \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{x \tan \alpha} N_\theta + \frac{1}{x} Q_x &= -q_z \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial M_{x\theta}}{\partial \theta} - Q_x + \frac{M_x}{x} - \frac{M_\theta}{x} &= -m_x \\ \frac{\partial M_{x\theta}}{\partial x} + \frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - Q_\theta + \frac{2}{x} M_{x\theta} &= -m_\theta \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, x 는 셸의 침점에서부터의 거리를 나타내며, α 는 침점각의 반을 나타낸다(Fig. 2). 또한, Fig. 2의 θ 는 셸의 중심각을, L 은 셸의 길이를 나타내며, R_1, R_2 는 각각 짧은 반경, 긴 반경을 의미한다.

3. 수치해석의 적용

해석하는 모든 경계가 단순지지이거나 마주 보는 경계가 단순지지인 경계조건을 갖고, 크로스-플라이의 적층형태를 갖는 경우에 한해서 이중조화함수나 푸리에 급수를 이용하여 구할 수 있다. 그러나 경계조건이 복잡하거나 다양한 경우, 하중조건이 복잡하거나 여러 가지일 경우 및 재료의 배치가 임의의 보강방향을 가지는 비등방성일 경우 해석해를 구하기는 거의 불가능하다. 이와 같이 해석해를 구하기가 어렵거나 구할 수 없는 복잡한 구조물을 해석하기 위해서는 수치해석 기법을 적용해야 한다.

본 논문에서는 여러 가지 수치해석 기법 중 해석하고자 하는 구조물의 기본방정식에 직접 적용할 수 있는 유한차분법을 사용하였다. 유한차분법은 적층 판이나 셸의 기본방정식을 효과적으로 근사화시키는 수치해석기법으로써 수렴성과 결과치의 안정성을 제공하고 기본방정식을 수학적인 근사방법으로 간편하게 변환하여 정리할 수 있으므로 판이나 셸과 같은 연립 편미분방정식을 기본방정식으로 갖는 구조체의 해석시 편리한 수치해석 기법이다¹⁷⁾.

지배방정식 식 (9)에 합응력 식 (5)-(7)을 대입하여 정리하면 지배방정식을 변위의 미분방정식으로 표시할 수 있다. 이러한 미분방정식의 내부점은 중앙차분법 자유단의 경계선상에서는 전방, 후방차분법을 적용시키면 차분방정식을 얻을 수 있으며, 시스템 전체는 매트릭스 형태로 다음과 같이 구성된다^{12,13)}.

$$\{F\} = [K]\{X\} \quad (10)$$

여기서, $\{F\}$ 는 셸 구조물 전체에 대한 하중벡터, $\{X\}$ 는 변위벡터, 그리고 $[K]$ 는 전체 시스템 강성 매트릭스를 의미한다.

식 (10)과 같은 형태가 얻어지면, 변위벡터 $\{X\}$ 는 가우스 소거법이나, Banded solver, Skyline solver, Sparse solver 등으로 구할 수 있으며, 합응력은 구한 변위를 식 (5)-(7)에 대입함으로써 쉽게 구할 수 있다^{12,13)}.

4. 해석 예 및 결과분석

4.1. 해석모델

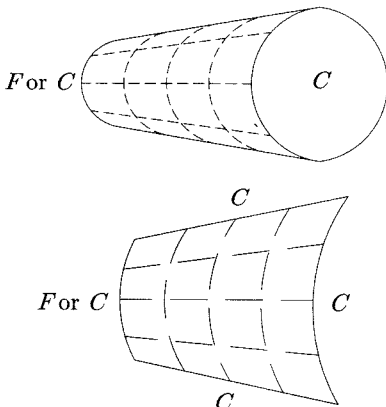


Fig. 6. Analysis model of conical shells.

Table 1. Material properties of conical shells

Boron/Epoxy	E_1/E_2 (GPa)	$G_{12}/G_{13}/G_{23}$ (GPa)	ν_{12}
	200/20	6.67/6.67/4	0.3

본 연구의 해석모델은 Fig. 6과 같이 폐합 원뿔형 셸과 중심각 120°인 부분 원뿔형 셸이며, 반경방향으로 등분포 하중 6.89MPa이 재하된 경우로 설정하였다. F 는 자유경계(Free edge)를, C 는 고정경계(Clam-ped edge)를 의미한다.

셸의 물성치는 Table 1과 같이 브론 화이버가 에폭시 모재에 묻혀있는 직교이방성인 재료를 사용하였다. 각 층의 두께가 동일한 4개의 층을 이전 연구¹³⁾에서 얻은 효율적인 적층각도인 0/90/90/0으로 적층시켜 파라미터 연구를 수행하였다.

4.2. 수치해석 타당성 분석

본 연구의 해석 프로그램은 2, 3절의 이론을 토대로 FORTRAN 95를 사용하여 직접 코딩하였다. 해석 프로그램은 이전의 연구¹³⁾에서 사용된 프로그램을 사용하였다.

4.3. 셸의 반경비 변화에 따른 분석

본 절은 원뿔형 셸의 반경비 변화에 따라서 변위 및 합응력의 변화를 분석하였다. Fig. 7은 셸의 반경비 변화에 따른 셸의 변화 형상을 나타낸 것이고, 반경비 γ 는 작은 반경과 큰 반경의 비(R_1/R_2)를 말한다. R_2 는 20, L 은 100으로 고정시켰으며, 부분 셸의 경우 중심각의 크기는 120°이다.

Fig. 8은 반경비 변화에 의한 폐합 셸의 결과 즉, (a), (b)는 변위를 (c), (d)는 합응력을 도시한 것이다. 반경비가 커질수록 즉, 원뿔형 셸에서 원통형 셸로 변할수록 u_z 는 커지는 반면 u_x 는 작아지는 경향을 보였다. 또한, 원뿔형 셸에서는 u_x 의 영향을 크

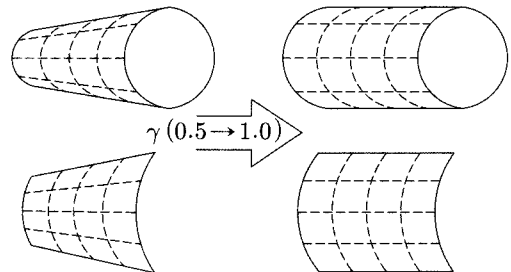


Fig. 7. Shells by change of radius ratio(γ).
(conical shells \rightarrow cylindrical shells)

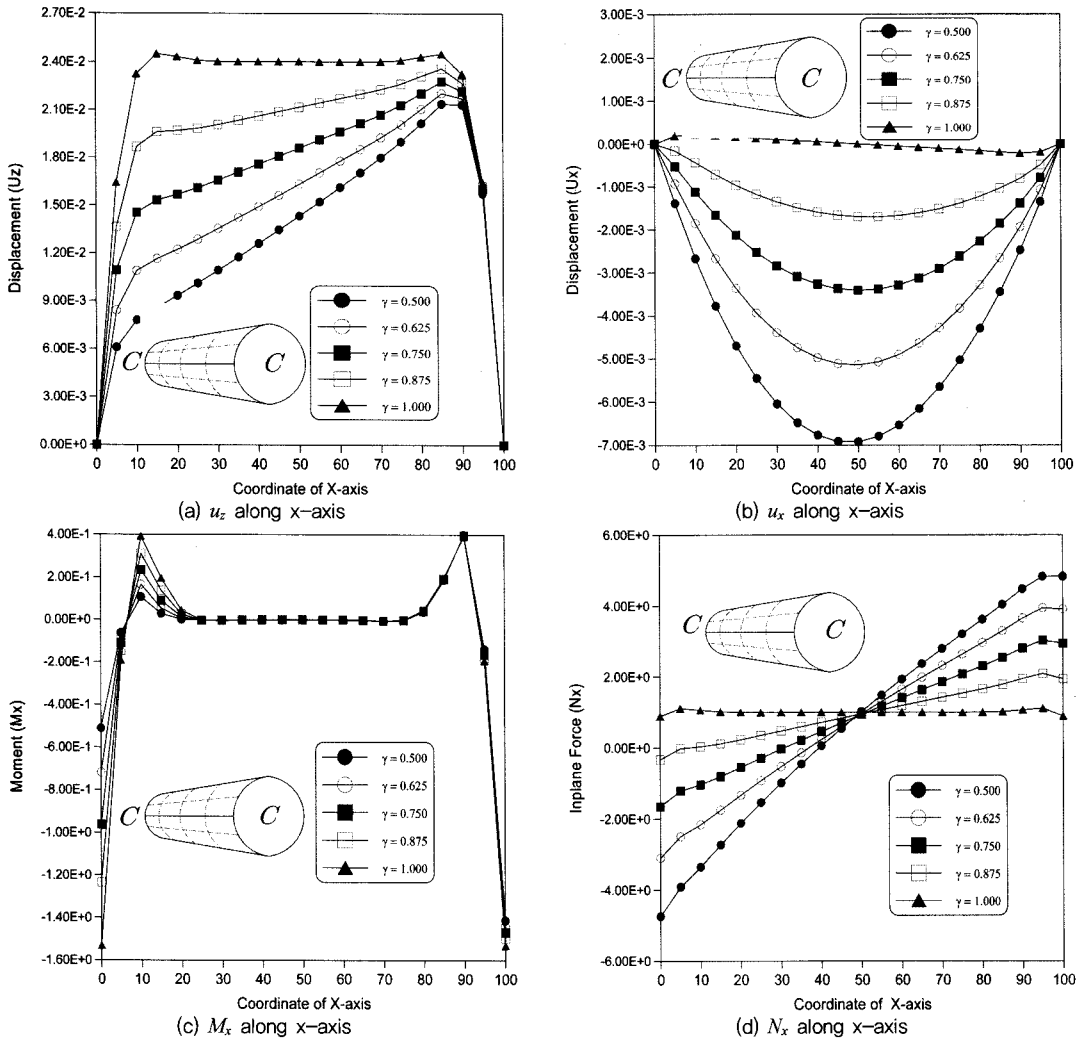


Fig. 8. Results of closed shells by γ change.

게 받는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 원뿔형 쉘의 변형률-변위 관계식 및 지배방정식에서 각각의 식들이 x (Fig. 2)에 의해서 연계되기 때문이다. 합응력을 살펴보면, 원뿔형 쉘에서 원통형 쉘로 변할수록 u_x 가 지배적인 면내력 N_x 는 작아지며, u_z 가 지배적인 면외력 M_x 는 커짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 반경비 변화에 의한 개방 쉘의 결과를 도시한 것이다. (a), (b)는 변위의 x 축상의 분포를, (c), (d)는 합응력의 θ 축상의 분포를 나타낸 것이다. 변위는 폐합된 경우와 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉, 원뿔형 쉘에서 원통형 쉘로 변할수록 u_z 는 커지는 반면 u_x 는 작아지고 있다. 합응력의 경우는 θ 축상의 분포이며, 면내 전단력과 비틀림 모멘트를 도

시한 것이며, 지점근처에서 크게 나타나 지점근처는 적당한 보강이 요구된다.

4.4. 쉘의 기울기 변화에 따른 분석

Fig. 10은 쉘의 기울기 변화에 따른 쉘의 변화 형상을 나타낸 것이다. 작은 반경을 10, 큰 반경을 20으로 고정시켰다. 쉘의 기울기를 $10^\circ \sim 90^\circ$ 로 변화시켰으며, 기울기가 90° 인 경우는 곡선판을 의미한다.

Fig. 11은 쉘의 기울기 변화에 따른 폐합 쉘의 변위 결과를 나타낸 것이다. (a), (b)는 자유단이 없는 경우이고, (c), (d)는 자유단이 포함된 경우이다. 쉘의 기울기가 커질수록 즉, 원뿔형 쉘에서 곡선판으로 변할수록 u_z 는 커지는 반면 u_x 는 작아지는 경향

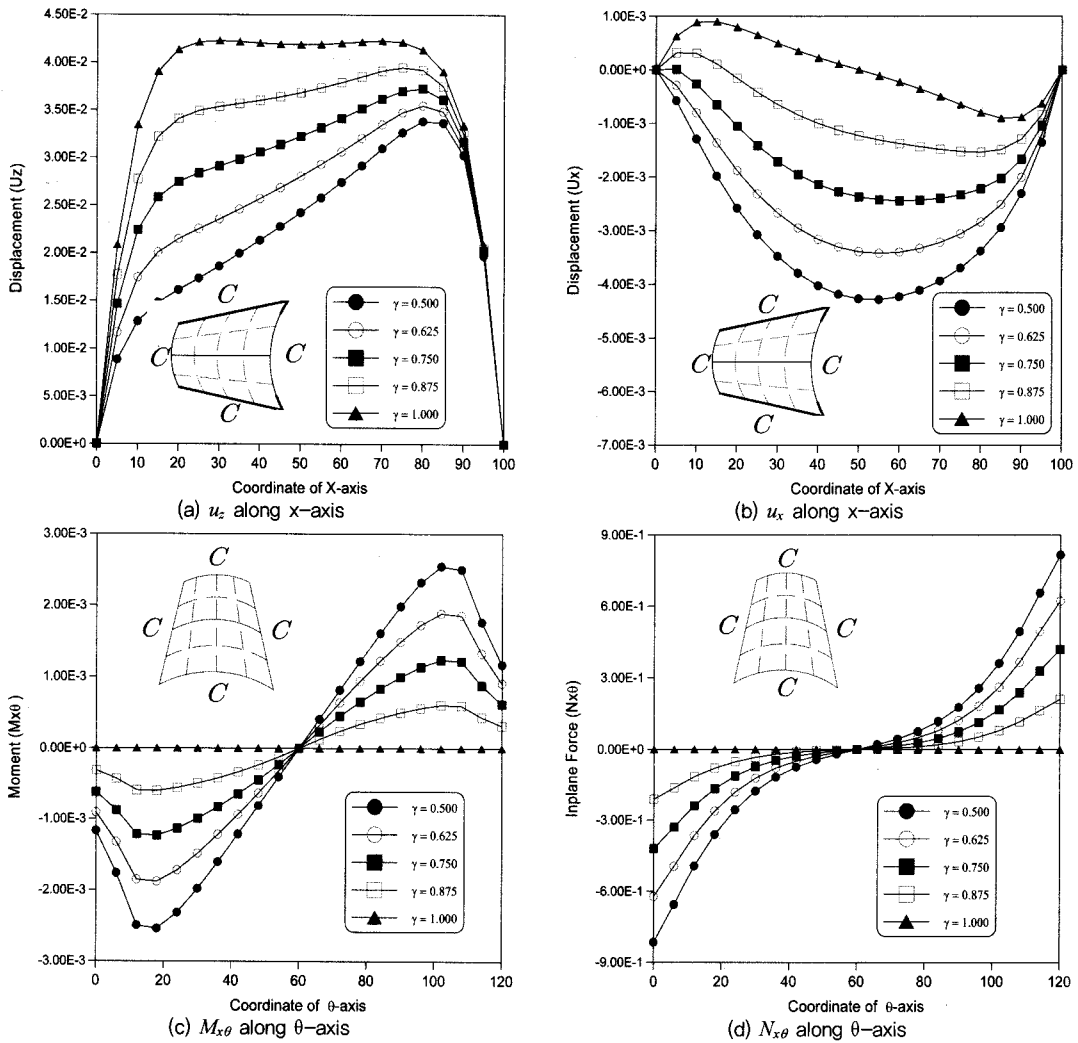


Fig. 9. Results of open shells by γ change.

을 볼 수 있다. 이것은 곡선판과는 달리 원뿔형 셸에서는 기울기 때문에 u_x 가 중요한 인자로서 역할을 하고, 초기 곡률로 인하여 판보다는 강성이 커서 u_z 가 작게 발생하기 때문이다.

또한, 셸의 기울기가 10° 정도인 양단고정 폐합 원뿔형 셸의 경우 u_z 의 최대값은 중앙점이 아니라 반경이 큰 쪽으로 약 3/4~4/5인 지점에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

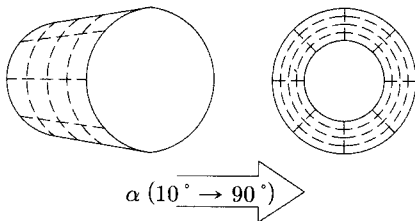
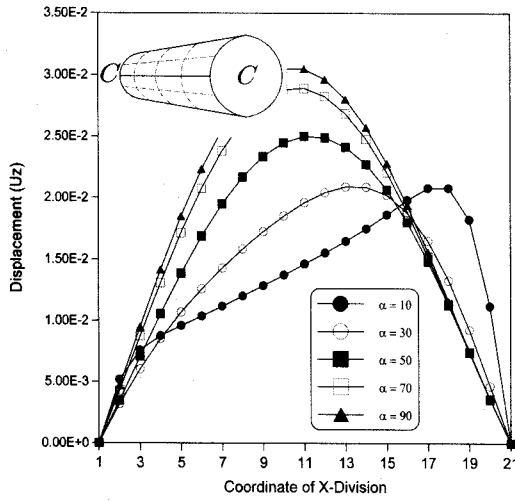


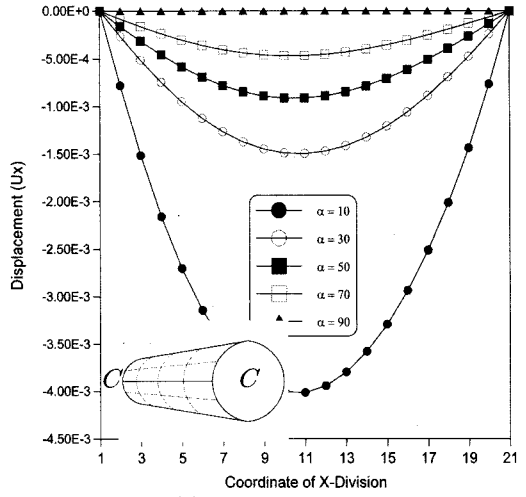
Fig. 10. Shells by change of vertex angle(α). (conical shells \rightarrow circular plates)

4.5. 셸의 중심각 변화에 따른 분석

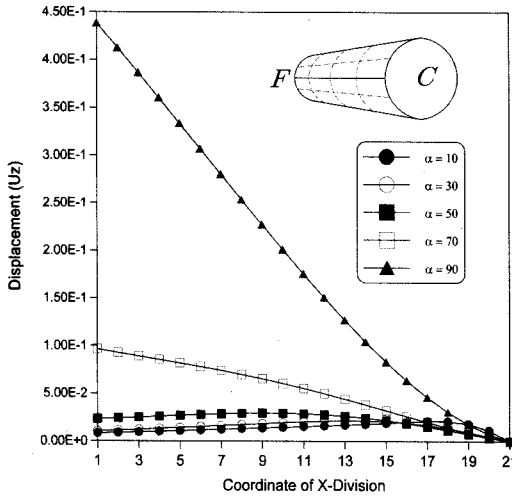
본 절은 셸의 중심각 변화에 따른 변위 및 합응력의 변화를 분석하였다. Fig. 12는 중심각 변화에 따른 셸의 변화 형상을 나타낸 것이며, 360° 인 경우 셸이 폐합되어 있는 경우를 의미한다. 보강각도를 0/90/90/0으로 보강하고, 원뿔방향 길이와 x 축 중심의 원주방향 길이를 1:1로 고정시켰으며, 중심각을 60° 에서 360° 까지 60° 씩 증가시키면서 중심각



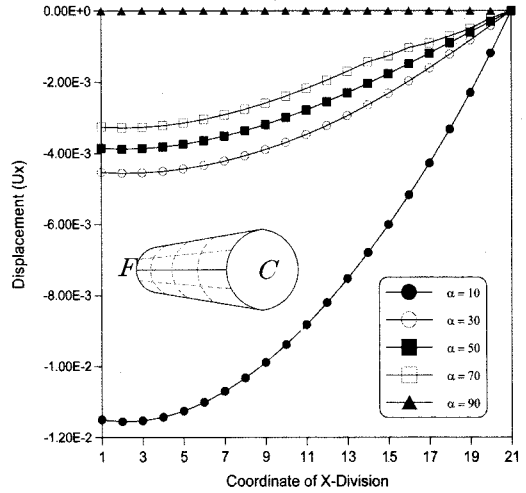
(a) u_z along x -axis



(b) u_x along x -axis



(c) u_z along x -axis with free edge



(d) u_x along x -axis with free edge

Fig. 11. Results of closed shells by α change.

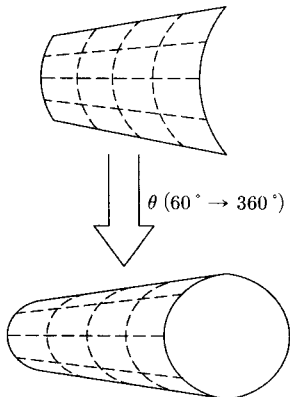


Fig. 12. Shells by change of subtended angle(θ).
(open shells \rightarrow closed shells)

변화에 따른 영향을 분석하였다. 길이 L 은 100, 반경비는 0.5이다.

Fig. 13은 중심각 변화에 따른 변위 및 합응력을 도시한 것이다. 중심각이 커질수록 변위 및 합응력 모두 작아짐을 알 수 있다. 따라서, 변장비가 일정한 경우 쉘이 폐합될수록 설계상 유리하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 복합적층 원뿔형 쉘의 파라미터 연구를 수행하였다. 여러 가지 수치해석 기법 중 유한차분법을 사용하였으며, 다음과 같은 몇 가지 결

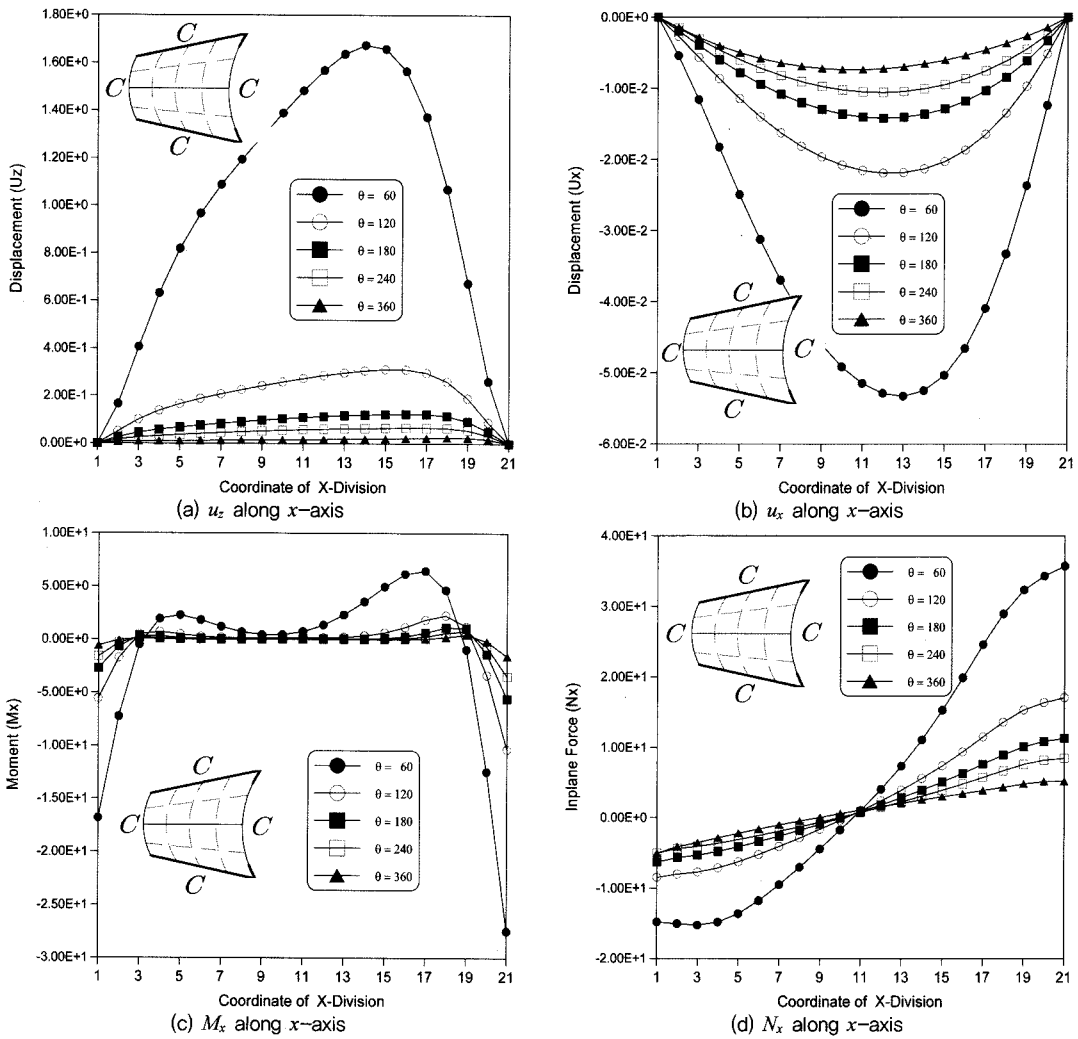


Fig. 13. Results of conical shells by θ change.

론을 얻을 수 있었다.

반경비가 커질수록 즉, 원뿔형 셸에서 원통형 셸로 변환수록 반경방향 변위는 커지는 반면 원뿔방향 변위는 작아지는 경향을 보였다. 이는 원뿔형 셸은 변형률-변위 관계식 및 지배방정식에서 각각의 식들이 원뿔방향에 의해서 연계되기 때문에 원통형 셸과는 달리 원뿔방향 변위가 반경방향 변위와 함께 영향을 많이 미치고 있다. 따라서 원뿔형 셸에서는 반경방향 변위뿐 아니라 원뿔방향 변위도 설계에서 고려되어야 한다. 함응력은 원뿔형 셸에서 원통형 셸로 변환수록 원뿔방향 변위가 지배적인 면내력은 작아지고, 반경방향 변위가 지배적인 면외력은 커진다는 것을 알 수 있다 또한, 함응력은 지점

근처에서 크게 나타나 지점근처는 적당한 보강이 요구된다.

기울기 변화에 따른 분석에서는 기울기가 커질수록 즉, 원뿔형 셸에서 곡선판으로 변환수록 반경방향 변위는 커지는 반면 원뿔방향 변위는 작아지는 경향을 보였다. 이는 원뿔형 셸은 곡선판과는 달리 기울기 때문에 원뿔방향 변위가 중요한 인자로서 역할을 하고 초기 곡률로 인하여 판보다는 강성이 커서 반경방향 변위가 작게 발생하기 때문이다. 또한, 셸의 기울기가 10° 정도인 폐합 원뿔형 셸의 최대 반경방향 변위는 반경이 큰 쪽으로 3/4~4/5인 지점에서 발생하였다.

셸의 중심각 변화에 따른 분석에서는 중심각이

커질수록 변위 및 합응력 모두 작게 나타났다. 따라서 변장비가 일정한 경우 쉘이 폐합될수록 설계상 유리하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) Douglas A. Eckel II, "A Theoretical and Experimental Study on the Behaviour of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials", CCM Report 98-5, Univ. of Delaware, 1998.
- 2) 지효선, 손병직, 천경식, 장석윤, "복합신소재(ACM) 소형교량 상부구조의 특성 및 현장 적용성", 대한토목학회논문집, 제24권, 제6A호, pp. 1137~1144, 2004.
- 3) Sanders, "An Improved First approximation Theory for Thin Shells," NASA Technical Report, 1959.
- 4) Flugge, Wilhelm, "Stresses in Shells", Springer-Verlag Berlin, 2nd Ed, 1973.
- 5) Vinson, J. R., Tsu-wei Chou, "Composite Materials and Their Use in Structures", Applied Science Publishers, 1975.
- 6) A. Korjakin, R. Rikards, A. Chate and H. Altenbach, "Analysis of free damped vibrations of laminated composite conical shells", Composite Structures, Volume 41, Issue 1, pp. 39~47, 1998.
- 7) K. Y. Lam and Li Hua, "On free vibration of a rotating truncated circular orthotropic conical shell", Composites Part B: Engineering, Volume 30, Issue 2, pp. 135~144, 1999.
- 8) C. W. Lim, K. M. Liew and S. Kitipornchai, "Vibration of cantilevered laminated composite shallow conical shells", International Journal of Solids and Structures, Volume 35, Issue 15, pp. 1695~1707, 1998.
- 9) Marios K. Chryssanthopoulos, Carlo Poggi and Andrea Spagnoli, "Buckling design of conical shells based on validated numerical models", Thin-Walled Structures, Volume 31, Issues 1-3, pp. 257~270, 1998.
- 10) Lingchuan Li, "The stability of composite material stiffened conical shells under axial compression", Composite Structures, Volume 38, Issues 1-4, pp. 169~177, 1997.
- 11) A. Spagnoli and M. K. Chryssanthopoulos, "Elastic buckling and postbuckling behaviour of widely-stiffened conical shells under axial compression", Engineering Structures, Volume 21, Issue 9, pp. 845~855, 1999.
- 12) 박근우, 임성순, 장석윤, "비등방성 원통형 쉘의 안정성에 관한 연구", 한국강구조학회, 제12권, 제2호, pp. 187~196, 2000.
- 13) 손병직, 백한솔, 장석윤, "자유경계를 갖는 비등방성 원뿔형 쉘의 해석", 한국강구조학회논문집, 제12권, 제4호, pp. 417~428, 2000.
- 14) Jones, R. M., "Mechanics of Composite Materials", McGraw-Hill, 1975.
- 15) Reddy, J. N., "Mechanics of Laminated Composite Plates", CRC press, 1997.
- 16) Werner Soedel, "Vibrations of Shells and Plates", Marcel Dekker, Inc., 1981.
- 17) R. Szilard, "Theory and Analysis of Plates", Prentice-Hall, 1974.