

論文

적층된 복합소재 경사판의 기하학적 비선형 동적 거동에
미치는 매개변수 영향

이상열*

Parametric effects on geometrical nonlinear dynamic behaviors
of laminated composite skew plates

Sang-Youl Lee*

ABSTRACT

This study investigates a geometrical nonlinear dynamic behaviors of laminated skew plates made of advanced composite materials (ACM). Based on the first-order shear deformation plate theory (FSDT), the Newmark method and Newton-Raphson iteration are used for the nonlinear dynamic solution. The effects of cutout sizes, skew angles and lay up sequences on the nonlinear dynamic response for various parameters are studied using a nonlinear dynamic finite element program developed for this study. The several numerical results were in good agreement with those reported by other investigators for square composite plates with or without central cutouts, and the new results reported in this paper show the significant interactions between the cutout, skew angles and layup sequence in the laminate. Key observation points are discussed and a brief design guideline of skew laminates is given.

초 록

본 연구는 복합소재로 구성된 적층 경사판의 비선형 동적 거동을 분석한다. 1차 전단 변형 판이론에 기반하여, 비선형 동적 방정식의 해는 Newmark 방법과 Newton-Raphson 반복법을 혼용하여 적용하여 산정하였다. 본 연구에서 개발한 유한요소 해석프로그램을 사용하여 개구부의 크기 또는 판의 경사각, 그리고 적층 배열의 변화가 판의 기하학적 비선형 거동에 미치는 영향을 상세 분석하였다. 몇 가지 수치해석 결과는 기존 연구자로부터 얻어진 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구의 새로운 결과는 경사 적층 구조의 중앙 개구부의 크기 또는 판의 경사각도, 그리고 적층 배열과의 중요한 상호관계를 보여 준다. 몇 가지 수치예제는 개구부를 갖는 적층 판구조를 설계하는데 필요한 가이드라인을 제시하였다.

Key Words : 경사 적층구조(skew laminates), 비선형 동적거동(nonlinear dynamics), 개구부(cutouts), 적층 배열(layup sequence)

1. 서론

다양한 형태로 만들어진 복합신소재 구조는 저중량, 고강도, 그리고 고강성 등의 장점으로 인하여 공학 분야에서의 적용성이 증대되고 있다. 특히 경사된 형상을 갖는 구조형식

은 해석상의 난해함에도 불구하고 현대 구조물에서 다양하게 사용되고있다. 개구부 또는 경사된 적층판은 적층배열 등과 연관되어 거동에 다양한 영향을 미치게 되는데, 특히 동적거동에 큰 영향을 줄 수 있다(이상열 등 2010).

경사각 또는 중앙 개구부를 갖지 않는 완전 복합신소재

접수: 2012년 11월 12일, 수정: 2012년 12월 10일, 게재승인: 2012년 12월 18일

* 안동대학교 토목공학과 조교수, Corresponding author(E-mail:lsy@andong.ac.kr)

적층판의 기하학적 비선형 정적 및 동적 해석은 그동안 많은 연구가 진행되었다(Lam 등 1993; Khalil 등 1998; Chang 등 1991). 비선형 이론에 근간한 판의 동적해석은 기존의 선형 동적해석과 유사한 거동특성을 보이는 경우도 있으나, 탄성 계수, 전단탄성계수 비의 변화 및 판의 기하학적 변화 등에 따라 선형이론에 의한 결과와 비교했을 때 상이한 특성을 보이는 경우가 많다. 그러나 기존 연구는 대부분 개구부 또는 경사각을 갖지 않는 직사각형의 복합소재 적층판의 기하학적 비선형 동적거동을 규명하였으며, 경사각이 있는 경우도 개구부를 갖는 경우에 대한 상세 분석은 상대적으로 미미한 실정이다(Chen 등 2000; Wang, 1997). 전술한 바와 같이 경사 판구조는 개구부의 유무 또는 경사각도 변화 등에 따라 동적 거동특성에 영향을 미치게 되며, 분할시간대에 따라 선형과 비선형 동적거동은 주기 또는 진동수가 서로 다른 특성을 보일 수 있다. 이러한 거동은 서로 다른 섬유보강 각도를 갖는 적층배열의 변화에 따라 민감하여 예측하기가 난해하다. 지효선과 이상열(2011)은 중앙개구부를 갖는 직사각형 적층판의 비선형 동적거동을 분석하였다. 본 연구는 이를 다양한 경사 각도를 갖는 경우에 대하여 일반화하여 확장하며, 다양한 매개변수 변화에 대하여 경사판의 비선형 동적거동에 미치는 영향을 상세 분석하기로 한다.

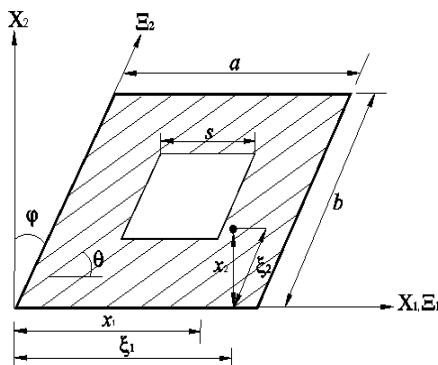


Fig. 1 Coordinate system of a composite skew plate with central cutout.

2. 1차 전단 비선형 판 이론

본 절에서는 경사 각도를 갖는 적층판의 비선형 변형률과 단면력을 요약하여 기술하였다. 경사판 구조의 자세한 이론은 참고 문헌을 참조한다 (Szilard, 2004). Fig. 1은 판의 전체 크기 a와 b를 갖고 중앙 개구부 크기 s를 갖는 적층 판 구조의 좌표계를 보여준다. 직각 좌표계 (X₁, X₂, X₃)와 경사 좌표계 (xi₁, xi₂, X₃)에 대하여 Fig. 1을 참조하여 식 (1)과 같은 관계에 의하여 경사진 판으로 변환할 수 있다. Fig. 1에서 psi는 경사각도 theta는 섬유 보강각도를 각각 의미한다.

$$\xi_1 = x_1 - x_2 \tan \psi, \quad \xi_2 = \frac{1}{\cos \psi} x_2 \tag{1}$$

FSDT에 기반하여 5개의 자유도에 대한 von karman의 기하학적 비선형 변형률은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Reddy 2006). 식 (2)에서, u₀, v₀, 그리고 w₀는 직교(Cartesian)좌표계에서의 중립면 변위를, phi₁과 phi₂는 두께 z방향으로의 전단변형에 대한 회전각을 각각 의미한다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1 \xi_1} \\ \epsilon_{\xi_1 \xi_2} \\ \gamma_{\xi_1 \xi_3} \\ \gamma_{\xi_1 \xi_2}^0 \\ \gamma_{\xi_2 \xi_2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1 \xi_1}^0 \\ \epsilon_{\xi_1 \xi_2}^0 \\ \gamma_{\xi_1 \xi_3}^0 \\ \gamma_{\xi_1 \xi_2}^0 \\ \gamma_{\xi_2 \xi_2}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1 \xi_1}^1 \\ \epsilon_{\xi_1 \xi_2}^1 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{\xi_1 \xi_2}^1 \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial \xi_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial \xi_2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \right)^2 \\ \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} + \phi_{\xi_2} \\ \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} + \phi_{\xi_1} \\ \frac{\partial u_0}{\partial \xi_2} + \frac{\partial v_0}{\partial \xi_1} + \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_{\xi_1}}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial \phi_{\xi_2}}{\partial \xi_2} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \phi_{\xi_1}}{\partial \xi_2} + \frac{\partial \phi_{\xi_2}}{\partial \xi_1} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

한편, 임의의 섬유보강 각도로 적층된 판구조의 단면력을 식 (2)의 변형률의 함수로 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)에서 A_{ij}는 면내 강성을, D_{ij}는 면외 휨강성을 각각 나타내며 직교 및 경사좌표계에서 대칭특성을 갖는다. 또한 식 (3)과 (4)를 조합하면 면내-면외 연계강성 B_{ij}가 발생하게 되며, 대칭 적층의 경우 값은 0이 되며, 비대칭 적층형태의 경우 값을 갖는다.

$$\begin{Bmatrix} N_{\xi_1 \xi_1} \\ N_{\xi_1 \xi_2} \\ N_{\xi_2 \xi_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1 \xi_1}^0 \\ \epsilon_{\xi_1 \xi_2}^0 \\ \gamma_{\xi_1 \xi_2}^0 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{Bmatrix} M_{\xi_1 \xi_1} \\ M_{\xi_1 \xi_2} \\ M_{\xi_2 \xi_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1 \xi_1}^1 \\ \epsilon_{\xi_1 \xi_2}^1 \\ \gamma_{\xi_1 \xi_2}^1 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{Bmatrix} Q_{\xi_3} \\ Q_{\xi_4} \end{Bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\xi_3 \xi_3}^0 \\ \gamma_{\xi_4 \xi_4}^0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $\{N\}, \{M\}$, 그리고 $\{Q\}$ 는 면내력, 모멘트, 그리고 전단력을, K_s 는 1차 전단변형 판이론에서 가정된 전단보정 계수를 각각 의미한다.

3. 비선형 동적 유한요소법

본 연구는 경사된 적층판의 비선형 동적 유한요소 해석을 위하여 1차전단변형 판이론에 근간하여 절점 당 5개의 자유도(u, v, w, ϕ_1, ϕ_2)를 갖는 Non-conforming 요소를 사용하였다. 감쇠(damping) 효과를 포함하는 경우에 대한 일반화된 동적 평형방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{\Delta}\} + [C]\{\dot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} = \{F\} \quad (6)$$

여기서, $[M], [C]$, 그리고 $[K]$ 는 시스템의 질량, 감쇠 및 강성 매트릭스를 각각 의미한다. 각 매트릭스에 대한 상세한 식의 기술은 생략하기로 한다. 식 (6)의 해를 구하기 위하여 Newmark β 방법을 사용하였으며, 식 (6)은 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$[\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1})]\{\Delta\}_{s+1} = \{\hat{F}\}_{s,s+1} \quad (7)$$

식 (7)에서

$$[\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1})]\{\Delta\}_{s+1} = [K(\{\Delta\}_{s+1})] + a_3[M]_{s+1} + a_6[C]_{s+1}$$

$$\{\hat{F}\}_{s,s+1} = \{F\}_{s+1} + [M]_{s+1}\{\Phi\}_s + [C]_{s+1}\{\Omega\}_s$$

$$\{\Phi\}_s = a_3\{\Delta\}_s + a_4\{\dot{\Delta}\}_s + a_5\{\ddot{\Delta}\}_s$$

$$\{\Omega\}_s = a_6\{\Delta\}_s + a_7\{\dot{\Delta}\}_s + a_8\{\ddot{\Delta}\}_s \text{ 이고,}$$

$$a_3 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}, a_4 = a_3 \Delta t, a_5 = \frac{1}{\gamma} - 1$$

$$a_6 = \frac{\alpha}{\beta \Delta t}, a_7 = \frac{\alpha}{\beta} - 1, a_8 = \Delta t \left(\frac{\alpha}{\gamma} - 1 \right) \text{ 이며,}$$

$\gamma = 2\beta$ 이다.

식 (7)은 Newton-Raphson의 반복 방법에 의하여 $(r+1)$ 번째 반복에서의 증분 해 $\{\delta\Delta\}$ 를 위한 선형 방정식을 다음과 같은 접선강도 $[\hat{K}]$ 및 잉여력 매트릭스 $\{R\}$ 를 사용하여 구할 수 있다.

$$\{\delta\Delta\} = -[\hat{K}^T(\{\Delta\}_{s+1}^r)]^{-1} \{R\}_{s+1}^r, \quad (8)$$

$$\{R\}_{s+1}^r = [\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r)] \{\Delta\}_{s+1}^r - \{\hat{F}\}_{s,s+1} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [\hat{K}^T(\{\Delta\}_{s+1}^r)] &\equiv \left[\frac{\partial \{R\}}{\partial \{\Delta\}} \right]_{s+1}^r \\ &= \frac{\partial}{\partial \{\Delta\}} \left[\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r) \{\Delta\}_{s+1}^r - \{\hat{F}\}_{s,s+1} \right]_{s+1}^r \\ &= \frac{\partial \hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r)}{\partial \{\Delta\}_{s+1}^r} \{\Delta\}_{s+1}^r + \hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r) \end{aligned} \quad (10)$$

이러한 접선 강도 매트릭스 $[\hat{K}^T]$ 는 대칭 특성을 가지며, 요소강도 매트릭스의 선형 및 비선형 항들을 변위에 대하여 미분함으로써 구할 수 있다. 한편, 변위 증분방법에 의한 전체 해는 다음과 같다.

$$\{\Delta\}_{s+1}^{r+1} = \{\Delta\}_{s+1}^r + \{\delta\Delta\} \quad (11)$$

Newmark 방법과 Newton-Raphson 방법을 결합 사용하여 복합 적층판의 비선형 동적해를 구하는 과정은 수치 해석적으로 복잡한 과정을 거치게 된다. 수치해석 과정은 크게 하중 증분, 시간 증분, 그리고 비선형 반복계산의 3단계 계산 과정이 필요하다.

비선형 동적해를 구하는 과정에서 유의할 점은 접선강도 매트릭스는 가장 마지막으로 구한 해를 사용해야 하는 점이다. 반면, 잉여 벡터(Residual vector)는 $[\hat{K}^T(\{\Delta\}_{s+1}^r)] \{\Delta\}_{s+1}^r$ 과 $\{\hat{F}\}_{s,s+1}$ 의 전 분할 시간대에서의 해를 계산하는데 있어 가장 마지막으로 구한 해로부터 산정된 값을 사용해야 한다. 또한 속도 및 가속도 벡터들은 주어진 시간대에서 반복계산의 수렴이 이루어진 후에 최종 계산되어 다음 분할 시간대로 넘어가게 된다.

4. 매개변수 영향 분석

4.1 해석 모델 및 프로그램 검증

적층판의 다양한 기하학적 특성변화에 따라 동적 비선형 효과를 무시할 수 없으며, 경우에 따라 비선형 해석을 실시하여 동적특성을 보다 정확하게 파악할 필요가 있다(지효선과

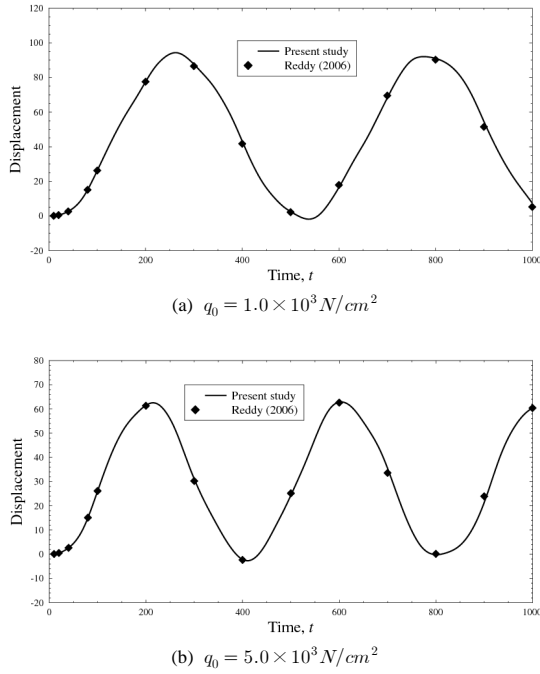


Fig. 2 Normalized nonlinear dynamic displacements (\bar{w}) at a central point of simply supported square plates subjected to distributed load (q_0).

이상열, 2011). 따라서 본 매개 변수 연구에서는 선형해석과의 비교보다는 기하학적 비선형 동적효과를 고려하여 보다 엄밀한 해석을 수행하기로 한다.

본 연구를 위하여 개구부를 갖거나 경사각을 갖는 복합소재 적층판의 기하학적 비선형 동적해석 프로그램을 자체 개발하였다. 개발한 해석프로그램으로부터 수행한 매개변수 해석은 다음과 같은 2가지 재료를 사용하며, 사용한 재료는 무차원화된 변위로 환산하여 사용하기로 한다. 또한 중앙개구부를 갖는 경우는 크기(개구율)의 범위는 0.1~0.6이며 판의 경사각도 변화 범위는 0°~60°이다.

<Material I>

$$a = b = 25\text{cm}, E_1 = E_2 = 2.1 \times 10^6 \text{ N/cm}^2,$$

$$h = 2.5\text{cm}, \nu_{12} = 0.25, \rho = 8 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4$$

$$\bar{w} = 10^3 w_0 E_2 h^3 / q_0 a^4$$

<Material II>

$$a = b = 25\text{cm}, E_1 = 25E_2, E_2 = 2.1 \times 10^6 \text{ N/cm}^2,$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.5E_2, h = 5\text{cm},$$

$$\nu_{12} = 0.25, \rho = 8 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4, \bar{w} = w/h,$$

$$q_0 = 100 \text{ N/cm}^2$$

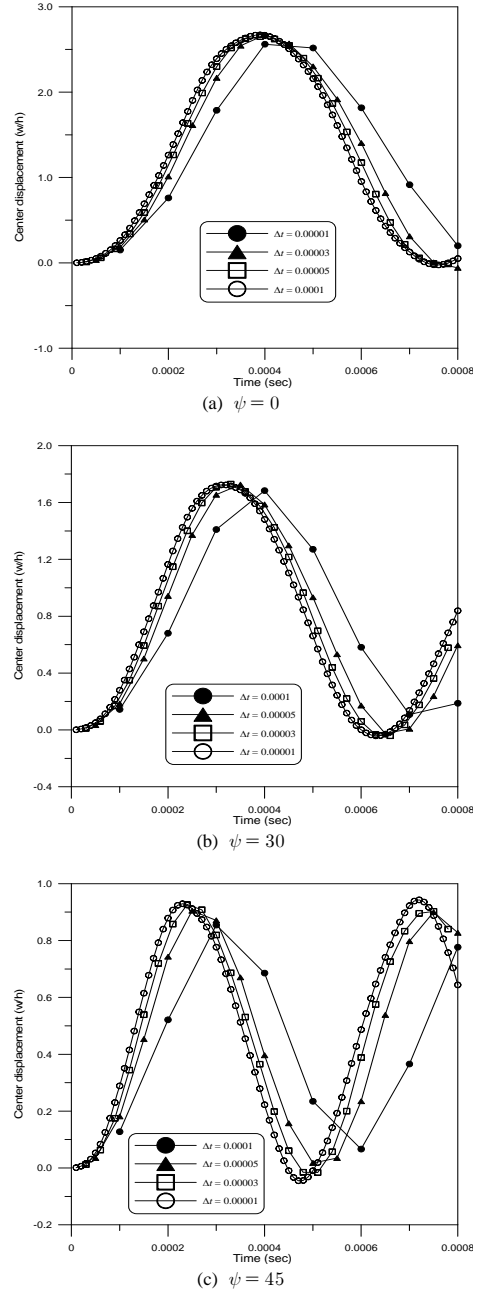


Fig. 3 Convergence test for different time divisions and skew angles (0/90/90/0, Material II).

Fig. 2는 등분포 하중 q_0 를 받는 4변 단순지지된 정사각형 등방성판의 중앙점에서의 무차원화된 비선형 동적변위를 비교한 것이다. 여기서, 동적하중은 Heaviside step 함수에 의하여 각 분할시간대에 등분포하중 q_0 가 갑자기 가해지는 경우

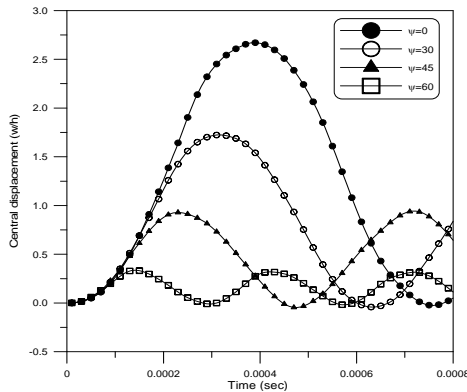


Fig. 4 Nonlinear dynamic displacements at a central point of plates for different skew angles (no cutout, Material II, [0/90/90/0]).

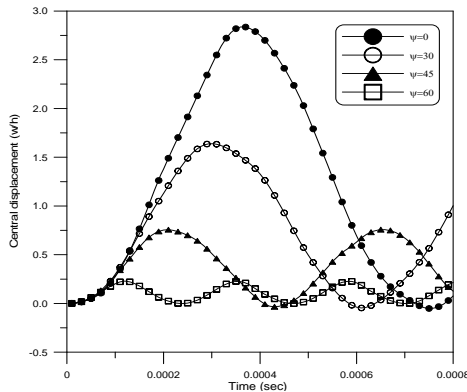


Fig. 5 Nonlinear dynamic displacements at a central point of plates for different skew angles (no cutout, Material II, [0/90/0/90]).

이다. 해석 모델은 재료 I을 사용하였으며, 등분포 하중 q_0 를 두 종류로 변화하였을 때 기존 연구로부터 얻어진 비선형 동적 변위와 비교 도시하였다. 개발된 프로그램으로부터 계산된 결과는 기존 연구결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 분할 시간대 변화에 따른 수렴성 비교

Fig. 3은 재료 II로 이루어진 [0°/90°/90°/0°] 적층판의 경사각 변화와 분할 시간대 변화에 따른 비선형 동적변위의 수렴성을 비교한 것이다. Fig. 3의 결과로부터 판의 경사각도 변화에 상관없이 0.00003sec의 분할 시간대부터 비교적 안정적인 변위곡선을 보임을 관찰할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 보다 안정적인 변위를 도시하기 위하여 매개변수 수치예제는 0.00001sec로 고정하였다.

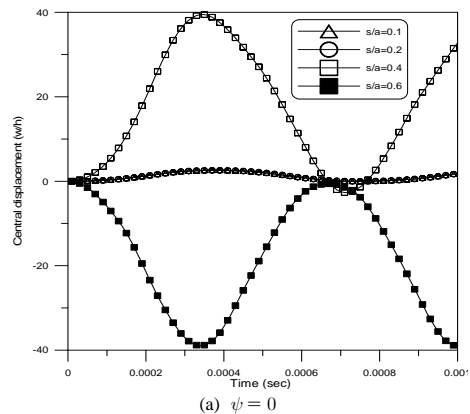
4.3 경사 각도의 영향

Fig. 4는 경사각도 변화에 따른 개구부를 갖지 않는 [0/90/90/0] 대칭 적층판의 중앙점에서의 비선형 동적변위를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 판의 경사각이 증가함에 따라

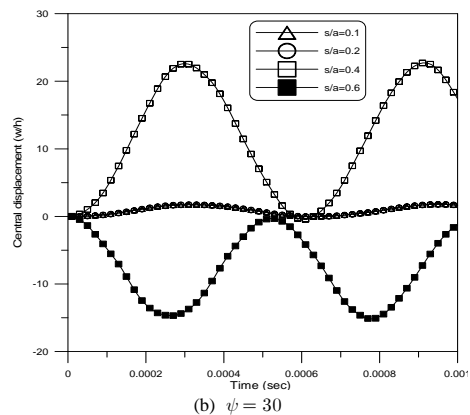
비선형 동적변위의 크기는 감소하며 진동수는 증가함을 알 수 있다. 따라서 경사각을 갖는 경우 최대 변위의 크기는 감소하므로 유리한 강성을 갖는다고 할 수 있으나 외력에 의하여 진동수는 증가하므로 진동에는 다소 취약할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 물성에 대하여 [0/90/0/90] 비대칭 적층된 경우이다. 비대칭 적층의 경우, 면내-면의 연계강성 B_{ij} 가 발생하여 동적 변위에 영향을 주게 된다. Fig. 5와 같이 비대칭 적층의 경우 직사각형($\psi=0$) 판은 대칭적층과 큰 변화가 없으나 경사각도가 증가함에 따라 변위는 다소 감소하고 진동수는 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 변화는 면내-면의 연계강성으로 발생하며, 경사각도가 증가될 수록 그 차이는 증가하는 것으로 나타났다.

4.4 개구부 크기의 영향

Fig. 6은 개구부 크기와 경사각도 변화에 따른 [0/90/0/90] 적층판의 중앙점에서의 비선형 동적변위 비교한 것이다. 그림으로부터 개구부의 크기 작은 경우 ($s/a=0.1\sim 0.2$)는 비선형 동적 변위의 차이가 경사각도 변화와 관계없이 무시할 정도로 적음을 알 수 있다. 반면, 개구부의 크기가 큰 경우 ($s/a=0.4\sim 0.6$)는



(a) $\psi = 0$



(b) $\psi = 30$

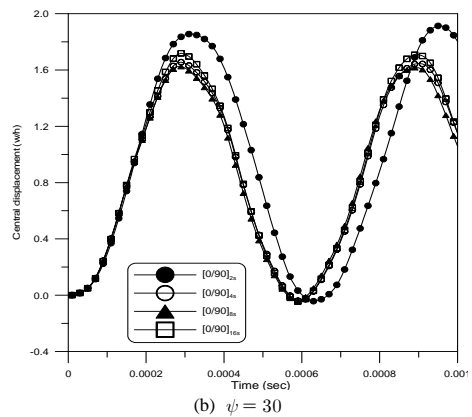
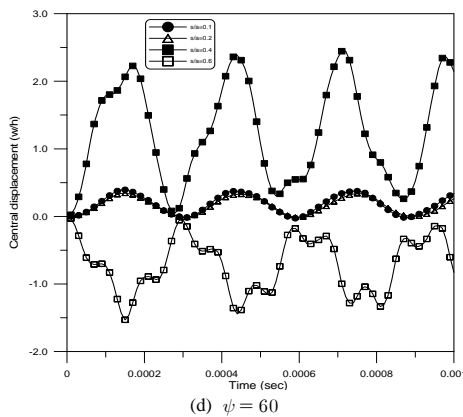
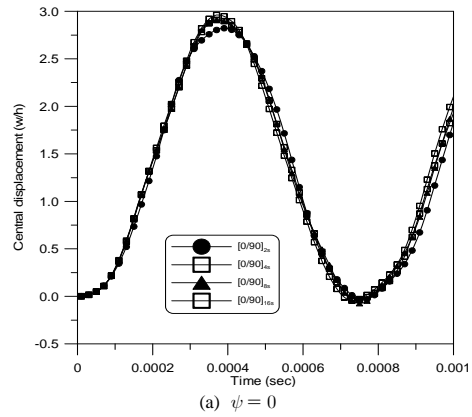
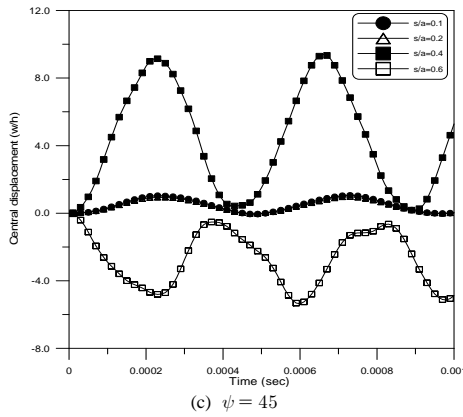


Fig. 6 Nonlinear dynamic displacements at a central point of plates for different skew angles and cutout sizes (Material II, [0/90/0/90]).

Fig. 7 Nonlinear dynamic displacements at a central point of plates for different skew angles and number of layers (Material II).

비선형 동적 변위가 매우 크게 변화함을 관찰할 수 있다. 경사 각도가 증가함에 따라 동적변위의 크기는 크게 감소하며 개구부 크기에 따른 변위의 차이는 다소 감소한다. 또한, $s/a=0.6$ 의 큰 개구부를 갖는 경우는 반대 방향으로의 동적거동이 발생하는 것에 유의해야 한다. 따라서 개구부의 크기는 0.2 이하로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.4 적층배열 변화의 영향

Fig. 7은 적층 개수와 경사각도 변화에 따른 적층판의 중앙점에서의 비선형 동적변위를 비교한 것이다. 적층 개수는 [0/90] 적층을 대칭으로 2, 4, 8, 16개로 배열한 경우이다. $\psi=0$ 인 경우는 적층 개수와 관계없이 동적 변위의 변화가 크기 없음을 알 수 있다. 반면, $\psi=30$ 의 경사 각도를 갖는 경우는 동적 변위의 차이가 다소 변화함을 알 수 있다. 경사 각도를 갖는 경우, 8개 적층개수 이상부터 동적 변위는 일정하게 감소한다. 일반적으로 적층 개수가 증가함에 따라 정·동적 변위는 일정해진다고 알려져 있으나, 경사 각도를 갖는 경우는 다소 차이를 보이므로 적층배열 설계 시 유의해야 한다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 복합소재 적층판 구조의 경사각도, 개구부의 크기, 그리고 적층배열 등의 다양한 매개변수가 기하학적 비선형 동적 거동에 미치는 영향을 상세 분석하였다. 매개변수 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 판의 경사각이 증가함에 따라 비선형 동적변위의 크기는 감소하며 진동수는 증가한다. 따라서 경사각을 갖는 경우 유리한 강성을 갖는다고 할 수 있으나 외력에 의하여 진동수는 증가하므로 진동에는 다소 취약할 수 있다.
- 2) 비대칭 적층의 경우 직사각형 판은 대칭적층과 큰 변화가 없으나 경사각도가 증가함에 따라 변위는 다소 감소하고 진동수는 증가한다. 그 이유는 비대칭 적층의 경우 면내면의 연계강성이 발생하기 때문이며, 경사각도가 증가될수록 그 차이는 증가한다.
- 3) 경사각도가 증가함에 따라 동적변위의 크기는 크게 감소

하며 개구부 크기에 따른 변위의 차이는 다소 감소한다. $s/a=0.6$ 의 큰 개구부를 갖는 경우는 반대 방향으로의 동적 거동이 발생하는 것에 유의해야 한다. 따라서 개구부의 크기는 0.2 이하가 바람직하다.

- 4) 경사 각도를 갖는 경우는 적층 개수의 증가에 따라 비선형 동적 변위에 다소 차이를 보이므로 적층배열 설계 시 유의해야 한다.

복합소재 적층판의 비선형 동적 거동은 다양한 기하학적 변화에 따라 예측이 난해하다. 따라서 본 연구에서 수행한 매개변수 영향 분석은 비선형 동적 거동에 대한 복합소재 적층 경사판 구조의 합리적인 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A1014722).

참고문헌

- 1) Lee, S.Y., and Chang S.Y., "Dynamic Instability of Delaminated Composite Structures with Various Geometrical Shapes," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 1, 2010, pp. 1-8.

- 2) Ji, H.S., and Lee, S.Y., "Nonlinear dynamic behaviors of laminated composite structures containing central cutouts," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 5, 2011, pp. 607-614.
- 3) Chang, J.S., and Huang, Y.P., "Geometrically nonlinear static and transiently dynamic behavior of laminated composite plates based on a higher order displacement field," *Composite Structures*, Vol. 18, No. 4, 1991, pp. 327-364.
- 4) Chen, J., Dawe, D.J., and Wang, S., "Nonlinear transient analysis of rectangular composite laminated plates," *Composite Structures*, Vol. 49, No. 2, 2000, pp. 129-139.
- 5) Khalil, M.R., Olson, M.D., and Anderson, D.L., "Non-linear dynamic analysis of stiffened plates," *Computers and Structures*, Vol. 29, No. 6, 1998, pp. 929-941.
- 6) Lam, S.S.E., Dawe, D.J., and Azizian, Z.G., "Non-linear analysis of rectangular laminates under end shortening, using shear deformation plate theory," *International Journal of Numerical Method in Engineering*, Vol. 36, No. 6, 1993, pp. 1045-1064.
- 7) Reddy, J.N., *An Introduction to nonlinear finite element Analysis*, Oxford University Press, 2006.
- 8) Szilard, R., *Theories and applications of plate analysis*, Wiley, 2004.
- 9) Wang, S., "Free vibration analysis of skew fibre-reinforced composite laminates based on first-order shear deformation plate theory," *Computers and Structures*, Vol. 63, No. 2, 1997, pp. 525-538.