

중앙개구부를 갖는 복합신소재 적층 구조의 비선형 동적 거동

Nonlinear Dynamic Behaviors of Laminated Composite Structures Containing Central Cutouts

지 호 선¹⁾ · 이 상 열²⁾
Ji, Hyo Seon · Lee, Sang Youl

요약 : 본 연구는 복합신소재로 구성된 중앙 개구부를 갖는 적층 판구조의 비선형 동적 거동을 다룬다. 1차 전단 변형 판이론에 기반하여, 비선형 동적 방정식의 해는 Newmark 방법과 Newton-Raphson 반복법을 혼용하여 적용하여 산정하였다. 본 연구에서 개발한 유한요소 해석프로그램을 사용하여 개구부의 크기와 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 크기와 적층 배열과의 중요한 상호관계를 보여준다. 몇 가지 수치예제는 개구부를 갖는 적층 판구조를 설계하는데 필요한 가이드라인을 제시하였다.

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

핵심어 : 중앙 개구부, 복합신소재, 비선형 동적 해석, 적층 배열

KEYWORDS : central cutout, advanced composite materials, nonlinear dynamic analysis, layup sequence

1. 서론

복합신소재로 이루어진 적층판이 개구부를 갖게 되는 경우는 불가피하게 발생할 수 있다. 개구부를 갖는 적층판은 적층 배열 등과 연관되어 거동에 다양한 영향을 미치게 되는데, 특히 동적거동에 큰 영향을 준다(이상열 등 2010).

중앙 개구부를 갖지 않는 완전 복합신소재 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, 탄성계수, 전단탄

성계수 비의 변화 및 판의 기하학적 변화 등에 따라 선형이론에 의한 결과와 비교했을 때 상이한 특성을 보이는 경우가 많다. 그러나 기존 연구는 대부분 개구부를 갖지 않는 완전 복합신소재 적층판의 기하학적 비선형 동적거동을 규명하였으며, 중앙 개구부와 같은 기하학적 변화를 갖는 적층판의 경우에 대한 상세 분석은 상대적으로 미미한 실정이다(Chen 등 2000). 전술한 바와 같이 개구부를 갖는 판구조는 개구부의 크기 변화에 따라 동적 거동특성에 영향을 미치게 되며, 분할 시간대에 따라 선형과 비선형 동적거동은 주기 또는 진동수가 서로 다른 특성을 보일 수 있다. 이러한 거동은 서로 다른 섬유보강 각도를 갖는 적층배열의 변화에 따라 민감하여 예측하

1) 대원대학 철도건설과 교수(hsji@mail.daewon.ac.kr)

2) 교신저자. 안동대학교 토목공학과 교수

(Tel: 054-820-5847, Fax: 054-820-6255, E-mail: lsy@andong.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

기가 난해하다. 따라서 본 연구에서는 개구부를 갖는 적층된 복합신소재 판구조에 대하여 적층배열 형식과 개구부 크기 변화와의 상관관계에 따른 기하학적 비선형 동적특성을 상세히 분석하고자 한다. 본 연구에서 수행하는 복합신소재 적층판 해석은 1차전단변형 판이론(FSDT)를 적용하였다.

2. 기본 이론

본 절에서는 개구부를 갖는 적층판의 비선형 변형률과 단면력을 요약하여 기술하였다. 본 연구에서 다루는 비선형이론에서는 기하학적 비선형을 고려하였으며 재료적 비선형성은 고려하지 않았다. 기본 이론은 Reddy의 참고문헌에 자세하게 기술되어 있다(Reddy 2006). 그림 1은 판의 전체 크기 a와 b를 갖고 중앙 개구부 크기 s를 갖는 적층 판구조의 좌표계를 보여준다. 그림에서 각도 θ 는 섬유류의 보강각도를 의미한다.

FSDT에 대하여 von karman의 기하학적 비선형 변형률은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Reddy 2006). 식 (1)에서, u_0, v_0 , 그리고 w_0 는 직교(Cartesian)좌표계에서의 중립면 변위를, ϕ_1 과 ϕ_2 는 두께 z방향으로의 전단변형에 대한 회전각을 각각 의미한다.

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

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

한편, 임의의 섬유보강 각도로 적층된 판구조의 단면력을 식 (1)의 변형률의 항으로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 A_{ij} 는 면내 강성을, D_{ij} 는 면외 휨강성

을 각각 나타내며 직교좌표계에서 대칭특성을 갖는다. 또한 식 (2)와 (3)을 조합하면 면내-면외 연계강성 B_{ij} 가 발생하게 되며, 비대칭 적층형태의 경우 값을 갖는다.

$$\begin{Bmatrix} N_{\xi_1\xi_1} \\ N_{\xi_2\xi_2} \\ N_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1\xi_1}^0 \\ \epsilon_{\xi_2\xi_2}^0 \\ \gamma_{\xi_1\xi_2}^0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{\xi_1\xi_1} \\ M_{\xi_2\xi_2} \\ M_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{\xi_1\xi_1}^1 \\ \epsilon_{\xi_2\xi_2}^1 \\ \gamma_{\xi_1\xi_2}^1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_{\xi_2} \\ Q_{\xi_1} \end{Bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\xi_2\xi_3}^0 \\ \gamma_{\xi_1\xi_3}^0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $\{N\}, \{M\}$, 그리고 $\{Q\}$ 는 면내력, 모멘트, 그리고 전단력을, K_s 는 가정된 전단보정계수를 각각 의미한다.

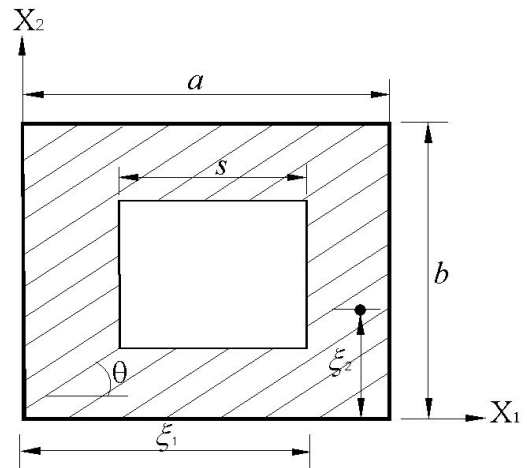


그림 1. 개구부를 갖는 적층 판구조의 좌표계

3. 비선형 동적 유한요소법

본 연구는 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.

$$[M]\{\ddot{\Delta}\} + [C]\{\dot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} = \{F\} \quad (5)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, 그리고 $[K]$ 는 시스템의 질량, 감쇠 및 강성 매트릭스를 각각 의미한다. 각 매트릭스에 대한 상세한 식의 기술은 생략하기로 한다. 식 (5)의 해를 구하기 위하여 Newmark β 방법을 사용하였으며, 식 (5)는 다음과 같은 방정식 (6)으로 표현할 수 있다.

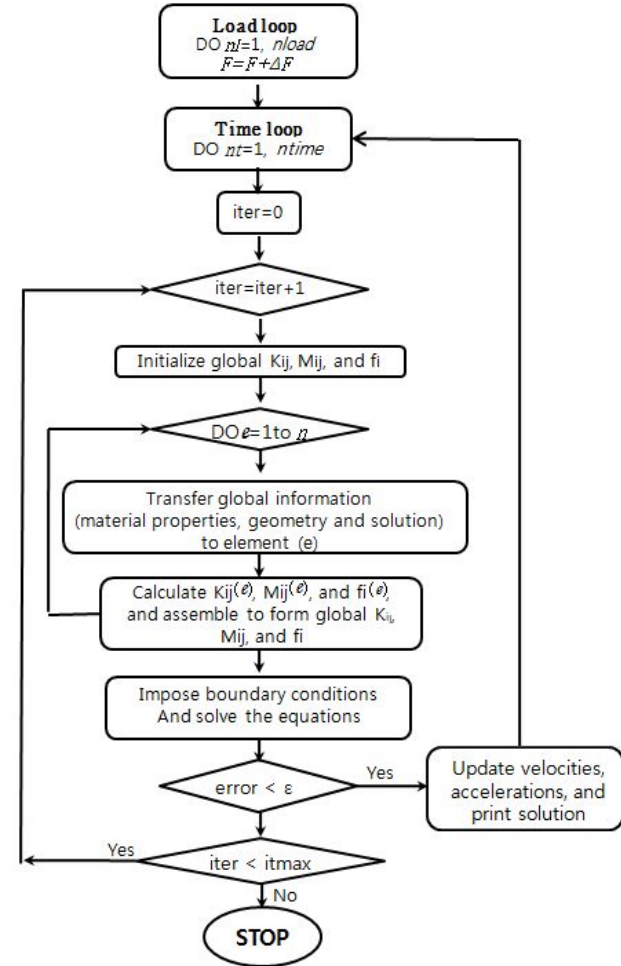


그림 2. 복합신소재 적층판의 비선형 동적 유한요소 해석을 위한 흐름도

$$[\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1})]\{\Delta\}_{s+1} = \{\hat{F}\}_{s,s+1} \quad (6)$$

식 (6)에서

$$\begin{aligned} [\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1})]\{\Delta\}_{s+1} &= [K(\{\Delta\}_{s+1})] + a_3[M]_{s+1} + a_6[C]_{s+1} \\ \{\hat{F}\}_{s,s+1} &= \{F\}_{s+1} + [M]_{s+1}\{\Phi\}_s + [C]_{s+1}\{\Omega\}_s \\ \{\Phi\}_s &= a_3\{\Delta\}_s + a_4\{\dot{\Delta}\}_s + a_5\{\ddot{\Delta}\}_s \\ \{\Omega\}_s &= a_6\{\Delta\}_s + a_7\{\dot{\Delta}\}_s + a_8\{\ddot{\Delta}\}_s \text{ 이고,} \end{aligned}$$

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

$$a_6 = \frac{\alpha}{\beta\Delta t}, \quad a_7 = \frac{\alpha}{\beta} - 1, \quad a_8 = \Delta t\left(\frac{\alpha}{\gamma} - 1\right) \text{ 이며, } \gamma = 2\beta \text{ 이다.}$$

다음으로, 식 (6)은 Newton-Raphson의 반복 방법에 의하여 (r+1)번째 반복에서의 증분 해 $\{\delta\Delta\}$ 를 위한 선형 방정식을 다음과 같은 접선강도 $[\hat{K}^T]$ 및 잉여력 매트릭스 $\{R\}$ 를 사용하여 구할 수 있다.

$$\{\delta\Delta\} = -[\hat{K}^T(\{\Delta\}_{s+1}^r)]^{-1}\{R\}_{s+1}^r, \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} [\hat{K}^T(\{\Delta\}_{s+1}^r)] &\equiv \left[\frac{\partial\{R\}}{\partial\{\Delta\}} \right]_{s+1}^r \\ &= \frac{\partial}{\partial\{\Delta\}} [\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r)]\{\Delta\}_{s+1}^r - \{\hat{F}\}_{s,s+1} \Big|_{s+1}^r \\ &= \frac{\partial\hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r)}{\partial\{\Delta\}_{s+1}^r} \{\Delta\}_{s+1}^r + \hat{K}(\{\Delta\}_{s+1}^r) \end{aligned} \quad (9)$$

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.

$$\{\Delta\}_{s+1}^{r+1} = \{\Delta\}_{s+1}^r + \{\delta\Delta\} \quad (10)$$

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.

이러한 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. 그림 2는 Newmark 방법과 Newton-Raphson 방법이 결합된 복합신소재 적층판의 기하학적 비선형 동적거동의 유한요소 해석을 위한 흐름도를 보여준다.

4. 해석 예 및 결과 분석

4.1 해석 모델

본 연구에서는 Fortran 95를 사용하여 FSDT에 근거한 개구부를 갖는 복합신소재 적층판의 기하학적 비선형 동적해석 프로그램을 자체 개발하였다. 개발한 해석프로그램으로부터 수행한 수치해석은 다음과 같은 3가지 재료를 사용하며, 재료 II와 III는 무차원화된 변위로 환산하여 사용하기로 한다. 또한 개구부 크기(개구율)의 범위는 0.1~0.6이다.

<재료 I>

$$a = b = 12\text{in}, h = 0.138\text{in}, E_1 = 3.0 \times 10^6\text{psi},$$

$$E_2 = 1.28 \times 10^6\text{psi}, G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.37 \times 10^6\text{psi}$$

$$\nu_{12} = 0.32$$

<재료 II>

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

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

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

<재료 III>

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

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.5E_2, h = 5\text{cm}, \nu_{12} = 0.25,$$

$$\rho = 8 \times 10^{-6}\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4, \bar{w} = w/h, q_0 = 100\text{N/cm}^2$$

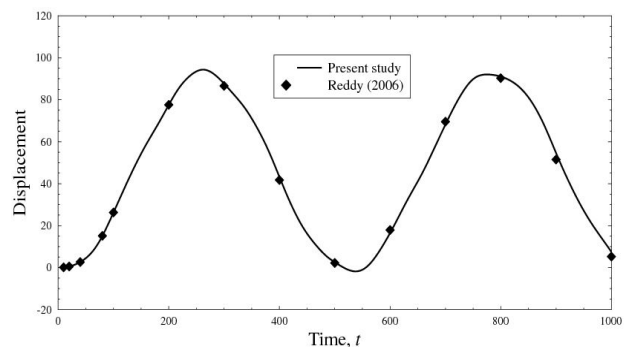
4.2 기존 연구결과와의 비교

본 연구에서 개발한 해석프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 Reddy(2006)의 연구결과와 비교하였다. 표 1은 등분포 하중 q_0 를 받는 4변 단순 지지된 직교이방성 정사각형 판에 대하여 중앙점에서의 비선형 정적 변위를 비교한 것이다. 재료 I을 사용하였으며 비선형 해석의 tolerance는 0.01로 정하였다. 선형 해석에서 $q_0 = 0.05$ 에 대한 변위는 약 0.01132로 계산되었다. 표 1의 결과로부터 일정한 하중 중 분에 대하여 개발된 프로그램에 의하여 계산된 비선형 변위는 Reddy의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

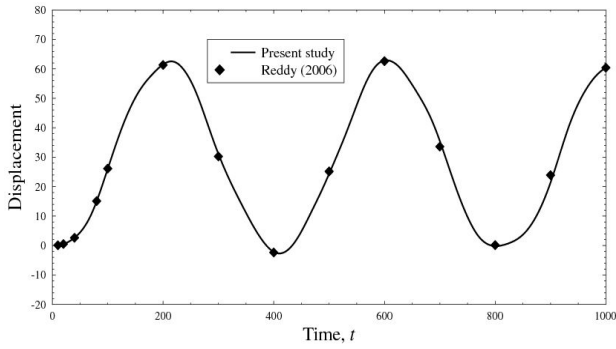
표 1. 등분포 하중 q_0 를 받는 4변 단순지지된 직교이방성 정사각형 판의 중앙점에서의 비선형 정적변위(in) 비교 (재료, tolerance=0.01)

load (q_0)	Reddy (2006)		Present study (FSDT)
	CPT	FSDT	
0.05	0.0113	0.0113	0.0113
0.10	0.0224	0.0224	0.0224
0.20	0.0438	0.0439	0.0439
0.40	0.0812	0.0815	0.0809
0.60	0.1116	0.1122	0.1127
0.80	0.1367	0.1377	0.1387
1.00	0.1581	0.1594	0.1606
1.20	0.1767	0.1783	0.1792
1.40	0.1932	0.1951	0.1951
1.60	0.2081	0.2103	0.2089
1.80	0.2217	0.2241	0.2256
2.00	0.2343	0.2370	0.2392

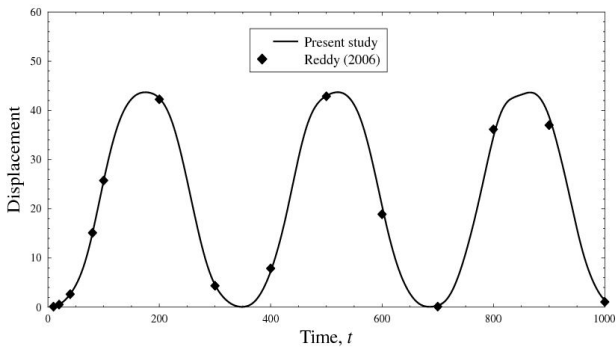
그림 3은 등분포 하중 q_0 를 받는 4변 단순지지된 정사각형 등방성판의 중앙점에서의 무차원화된 비선형 동적변위를 비교한 것이다. 여기서, 동적하중은 Heaviside step 함수에 의하여 각 분할시간대에 등분포하중 q_0 가 갑자기 가해지는 경우이다. 해석 모델은 재료 II를 사용하였으며, 등분포 하중 q_0 를 3단계로 변화하였을 때 기존 연구로부터 얻어진 비선형 동적 변위와 비교 도시하였다. 개발된 프로그램으로부터 계산된 결과는 기존 연구결과와 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4는 재료 III으로 이루어진 $[0_0/90_0/90_0/0_0]$ 적층판의 분할 시간대 변화에 따른 비선형 동적변위의 수렴성을 비교한 것이다. 그림 4의 결과로부터 0.00003sec의 분할 시간대부터 비교적 안정적인 변위곡선을 보임을 관찰할 수 있다. 보다 안정적인 변위를 도시하기 위하여 본 연구의 매개변수 수치예제는 0.00001sec로 고정하였다.



(a) $q_0 = 1.0 \times 10^3\text{N/cm}^2$



(b) $q_0 = 5.0 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$



(c) $q_0 = 1.0 \times 10^4 \text{ N/cm}^2$

그림 3. 등분포 하중 q_0 를 받는 4변 단순지지된 정사각형 판의 중앙점에서의 무차원화된 비선형 동적변위(\bar{w}) 비교 ($\bar{w} = 10^3 w_0 E_2 h^3 / q_0 a^4$, 재료 II)

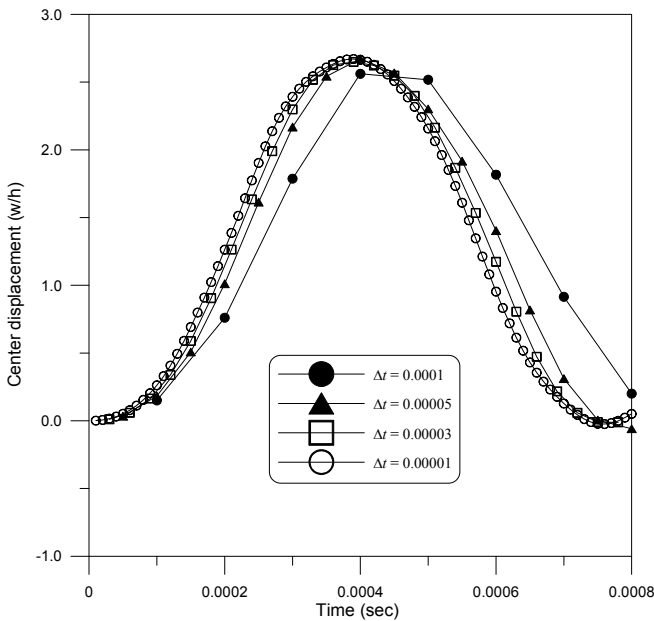


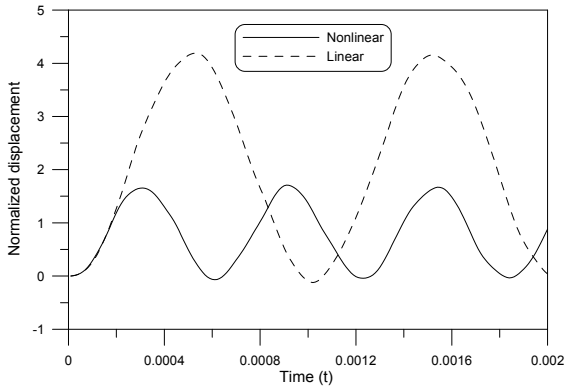
그림 4. 분할 시간 변화에 따른 $(0_o/90_o/90_o/0_o)$ 적층 판의 중앙점에서의 비선형 동적변위 수렴 비교 (재료 III)

4.3 선형 및 비선형 동적 변위 비교

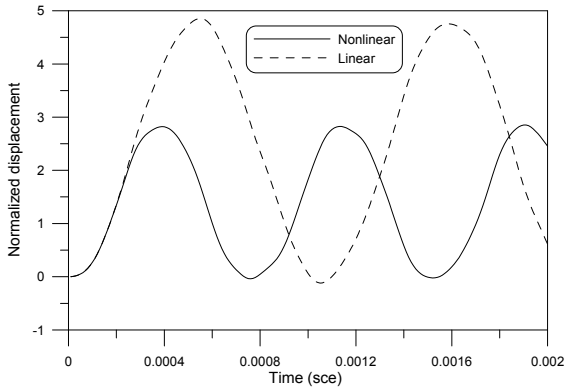
전술한 바와 같이 적층판은 개구부 크기의 변화에 민감하게 거동할 수 있다. 그림 5는 4변 단순지지된 적층판의 개구부 크기 변화에 따른 최대 선형 및 비선형 동적변위를 비교한 것이다. 해석 모델은 $[0_o/90_o/90_o/0_o]$ 으로 적층 배열하였으며 재료 III를 사용하였다. 그림의 결과로부터 개구부 크기 변화에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 전반적으로 선형과 비선형 동적변위의 진폭과 주기는 매우 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 개구부의 크기가 증가함에 따라 선형과 비선형 동적변위의 차이는 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 개구부 크기 증가에 의한 판의 기하학적 특성 변화가 기하학적 비선형 특성을 증가시키는데 기여하였기 때문이다. 본 예제의 경우 동적 비선형 특성에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 이를 무시해서는 안 될 것으로 보이며, 경우에 따라 비선형 해석을 실시하여 동적특성을 보다 정확하게 파악할 필요가 있다.

4.4 판의 적층배열 변화에 따른 비교

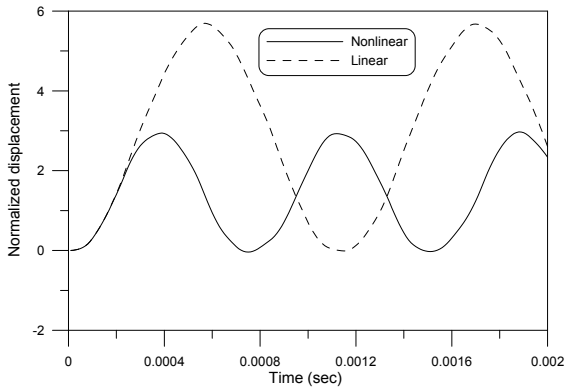
그림 5로부터 재료 III의 경우 비선형 동적거동은 선형과 크게 다른 특성을 보임을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 비선형 동적해석에 초점을 두고 수행하였으며 경사판의 적층 배열 형식과의 상호관계를 분석하기로 한다. 그림 6은 4변 단순지지된 적층판의 적층배열 각도 변화에 따른 무차원화된 최대 비선형 동적변위 비교를 보여준다. 재료 III를 사용하였으며, $s/a=0.1$ 과 $s/a=0.2$ 의 개구부를 갖는 경우에 대하여 해석하였다. 도시된 그림으로부터 적층된 섬유보강 각도 변화에 따라 최대 동적변위에 도달하는 시간이 각각 상이한 것으로 나타났다. 이는 주기 또는 진동수의 변화가 섬유보강 각도에 매우 민감함을 의미한다. 반면, 동일한 섬유보강 각도를 갖는 경우에 대하여 개구부 크기 변화 ($s/a=0.1$ 과 $s/a=0.2$)에 따른 최대 비선형 동적변위의 크기는 상대적으로 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림의 결과로부터 $[45_o/-45_o/-45_o/45_o]$ 의 배열이 유리함을 알 수 있다. 따라서 적절한 섬유보강 각도의 적용은 예측하지 못한 동적변위의 변화를 감소시킬 수 있는 장점을 갖는다.



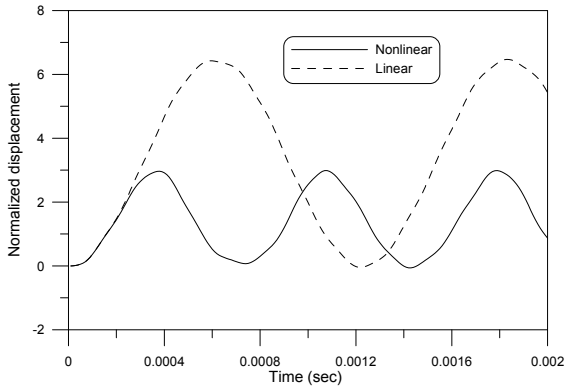
(a) $s/a = 0.0$ (no cutout)



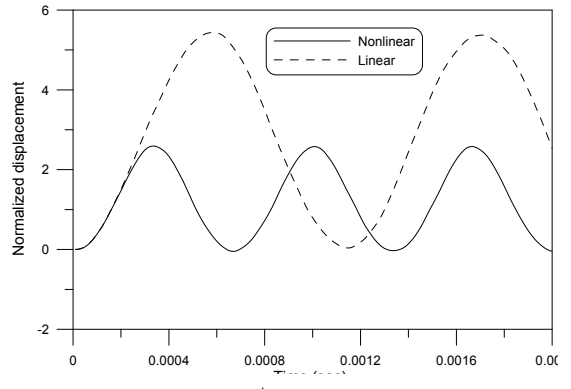
(b) $s/a = 0.1$



(c) $s/a = 0.2$



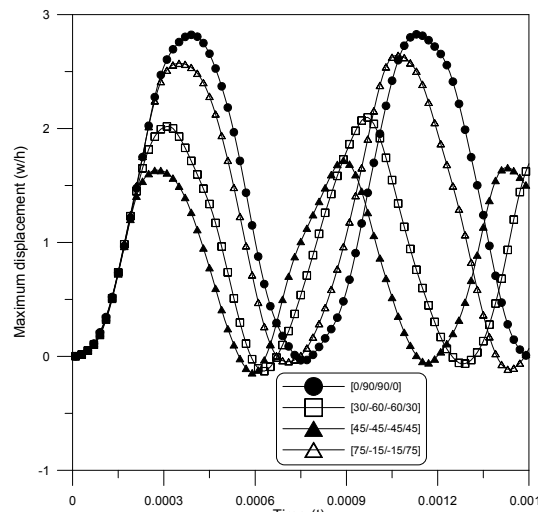
(d) $s/a = 0.4$



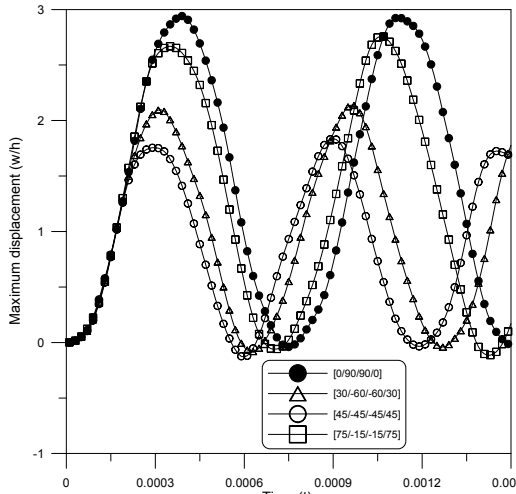
(e) $s/a = 0.6$

그림 5. 4변 단순지지된 ACM 적층판의 중앙 자유부 크기 변화에 따른 무차원화된 선형 및 비선형 최대 동적변위(\bar{w}) 비교(0o/90o/90o/0o 재료 III)

그림 6은 4변 단순 지지된 적층판의 적층 배열 각도 변화에 따른 무차원화된 최대 비선형 동적 변위 비교를 보여준다. 재료 III을 사용하였으며, $s/a=0.1$ 과 $s/a=0.2$ 의 개구부를 갖는 경우에 대하여 해석하였다. 도시된 그림으로부터 적층된 섬유보강각도 변화에 따라 최대 동적변위에 도달하는 시간이 각각 상이한 것으로 나타났다. 이는 주기 또는 진동수의 변화가 섬유보강각도에 매우 민감함을 의미한다. 반면, 동일한 섬유보강각도를 갖는 경우에 대하여 개구부 크기 변화($s/a=0.1$ 과 $s/a=0.2$)에 따른 최대 비선형 동적변위의 크기는 상대적으로 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림의 결과로부터 [45o/-45o/-45o/45o]의 배열이 유리함을 알 수 있다. 따라서 적절한 섬유 보강각도의 적용은 예측하지 못한 동적 변위의 변화를 감소시킬 수 있는 장점을 갖는다.



(a) $s/a = 0.1$



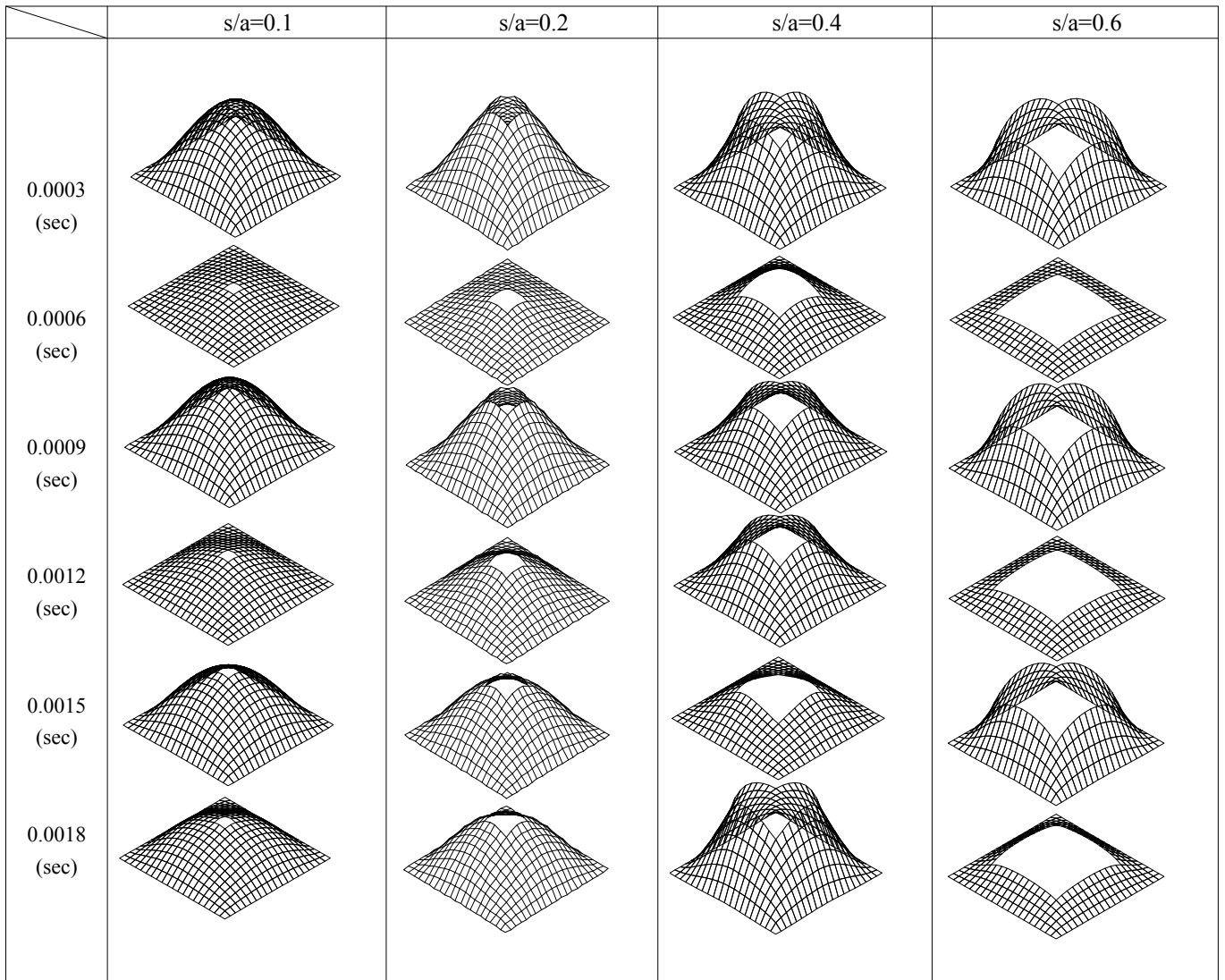
(b) $s/a = 0.2$

그림 6. 4변 단순지지된 적층판의 적층배열 각도 변화에 따른 최대 비선형 동적변위(\bar{w}) 비교 (자료 III)

4.5 개구부 크기변화에 따른 동적변위 형상

그림 7은 판의 개구부 크기 변화에 따른 등분포 동적하중을 받는 [45₀/-45₀/-45₀/45₀] 적층판의 분할 시간대 별 비선형 동적변위 형상을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 7로부터 개구부를 갖는 적층판 구조의 분할시간대에 따른 주기(또는 진동수) 변화는 개구부 크기에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 다른 분할 시간대에서의 주기는 $s/a=0.4$ 이상의 개구부 크기를 갖는 경우에 대하여 더욱 민감해짐을 관찰할 수 있다. 4.4절에서 분석한 대로 판의 개구부 크기가 큰 경우에 대한 전체적인 변위의 크기는 증가함을 알 수 있다.

그림 7. 적층판의 개구부 크기 변화에 따른 분할 시간대 별 동적 거동 변화 비교



5. 요약 및 결론

본 연구에서는 개구부를 갖는 적층판의 기하학적 비선형 동적 해석을 수행하였다. 중앙개구부를 갖는 적층판의 경우, 개구부 크기 및 재료적 특성에 따라 기하학적 비선형 거동특성이 선형거동과는 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서 적층판의 개구부 크기 변화와 섬유보강 각도 변화 등이 비선형 거동 특성 변화에 미치는 영향을 상세히 분석할 필요가 있다. 본 연구에서 개발된 해석 프로그램으로부터 얻은 몇 가지 결과는 기존 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 수치해석 예제로부터 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

- (1) 재료 III에 대한 적층판은 최대 선형과 비선형 동적변위가 매우 큰 차이를 보였으며, 이러한 차이는 판의 개구부 크기가 증가함에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났다. 판의 개구부 크기 변화는 동적 비선형 특성에 미치는 영향이 클 수 있기 때문에 이를 무시해서는 안되며, 경우에 따라 비선형 해석을 실시하여 동적특성을 보다 정확하게 파악할 필요가 있다.
- (2) 적층판의 비선형 동적변위는 섬유보강 각도 변화에 민감한 거동을 보였다. 반면, 동일한 섬유보강 각도를 갖는 경우는 개구부 크기 변화에 상대적으로 큰 영향을 받지 않았다. 따라서 적절한 섬유보강 각도의 사용은 강성의 증진과 동시에 예측하지 못한 동적변위의 변화를 감소시킬 수 있는 장점을 갖게 된다.
- (3) 적층 판구조의 비선형 동적거동의 변화는 $s/a=0.4$ 이상부터 큰 영향을 받았다. 특히 다른 분할 시간대에서의 변위 형상은 $s/a=0.4$ 이상의 경사각을 갖는 경우에 대하여 더욱 민감해지며, 판의 개구부 크기가 큰 경우에 대한 전체적인 동적변위 형상은 급격히 변화한다.

본 연구에서 제시한 몇 가지 수치해석 결과는 개구부를 갖는 복합신소재 판구조의 동적 성능을 향상시키는 데 있어서 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 더욱 다양한 형상 및 층간분리 손상을 갖는 복합신소재 구조에 대한 비선형 동적 특성의 상세 규명해야 하며, 재료적 비선형성도 동시에 고려한 해석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2011학년도 안동대학교 학술연구조성비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 이상열, 장석윤(2010) 다양한 기하학적 형상을 갖는 층간 분리된 복합신소재 적층구조의 동적 불안정성, 한국복합신소재 구조학회 논문집, 한국복합신소재학회, 제1권, 제1호, pp. 1-8.
- Chang, J.S. and Huang, Y.P. (1991) Geometrically nonlinear static and transiently dynamic behavior of laminated composite plates based on a higher order displacement field., *Composite Structures*, Vol. 18, pp.327-364.
- Chen, J., Dawe, D.J., and Wang, S. (2000) Nonlinear transient analysis of rectangular composite laminated plates, *Composite Structures*, Vol. 49, pp.129-139.
- Khalil, M.R., Olson, M.D., and Anderson, D.L. (1998) Non-linear dynamic analysis of stiffened plates. *Computers and Structures*, Vol. 29, pp.929-941.
- Lam, S.S.E., Dawe, D.J., and Azizian, Z.G. (1993) Non-linear analysis of rectangular laminates under end shortening, using shear deformation plate theory, *International Journal of Numerical Method in Engineering*, Vol. 36, pp.1045-1064.
- Park, T., Lee, S.Y., Seo, J.W., and Voyiadjis, G.Z. (2008) Structural dynamic behavior of skew sandwich plates with laminated composite faces, *Composites. Part B*, Vol. 39, pp.316-326.
- Reddy, J.N. (2006) *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*, Oxford University Press.
- Wang, S. (1997) Free vibration analysis of skew fibre-reinforced composite laminates based on first-order shear deformation plate theory, *Computers and Structures*, Vol. 63, pp.525-538.

(접수일자 : 2011. 4. 7 / 심사일 2011. 4. 21 /
심사완료일 2011. 10. 5)