

경북기반시설의 고성능 방재를 위한 복합소재 적층구조의 동적특성

이상열^{1*}

¹안동대학교 토목공학과

Dynamic Characteristics of Laminated Composite Structures for High-Performance Disaster Prevention of Gyeongbuk Infrastructures

Sang-Youl Lee^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Andong National University

요 약 본 연구에서는 층간 분리된 복합소재 구조의 동적 해석을 고차항 이론에 근간하여 수행하였다. 2차원 유한 요소 정식화에서 층간분리영역 경계에서의 변위를 일치시키기 위한 변환기법을 적용하였다. 불안정 영역의 경계는 Bolotin의 이론을 적용하여 산정하였다. 경사판에 대한 해석 결과는 기존 문헌 결과와 잘 일치하였다. 복합소재 적층 구조에 대한 새로운 해석 결과들은 다양한 기하학적 영향과의 상호거동 관계를 보여준다.

Abstract The dynamic analysis of delaminated composite structures is carried out based on the higher order plate theory. In the finite element (FE) formulation, the seven degrees of freedom per each node are used with transformations in order to fit the displacement continuity conditions at the delamination region. The boundaries of the instability regions are determined using the method proposed by Bolotin. The numerical results obtained for skew plates are in good agreement with those reported by other investigators. The new results for delaminated skew plate structures in this study mainly show the effect of the interactions between the geometries and other various parameters.

Key Words : Composite structures, Delamination, Higher-order plate theory, Dynamic characteristics

1. 서론

복합소재는 기존의 선박 또는 항공기 동체 등에 적용되어왔으나 최근 건설분야에 활발하게 적용이 시도되고 있다. 특히, 국내에서는 구조물의 보수·보강 용도로 FRP 등의 복합소재를 사용하는 경우가 빈번하게 이루어지고 있다. 최근, 이상 기후 현상으로 폭우, 태풍, 또는 폭설로 구조물의 손상 사례가 증가하고 있는 실정이다. 또한 국내에서는 최근 크고 작은 지진이 자주 발생하여 구조물에 심각한 영향을 주고 있다. 특히, 대구경북지역의 경우

지난 10년간 총 99번의 지진이 일어났으며, 그중 규모 3.0 이상의 지진은 23번이나 발생한 것으로 조사되었다. 경북지역은 경제개발이 가속화되던 1970~80년대에 건설된 각종 구조물의 80% 이상이 노후화가 진행되어 내구 성능 연장 및 유지보수가 필요한 실정이다. 경북 기반 구조물은 각종 재해 및 재난 발생 시 더욱 취약할 수밖에 없으며, 해마다 반복되는 각종 재해에 대한 근본적인 예방 대책은 미미한 실정이다. 따라서 복합소재를 적용한 고성능 방재기술은 매우 중요하고 시급한 사안으로 사료된다. 그러나, 복합소재의 거동에 대한 상세연구는 현장

이 연구는 2011년 대구경북연구원의 지원을 받아 수행되었음.

*교신저자 : Sang-Youl Lee

Tel: +82-10-3011-4696 e-mail: lsy@andong.ac.kr

접수일 11년 10월 17일

수정일 12년 10월 18일

계재확정일 12년 12월 15일

적용에 치우쳐 있어 미흡한 상황이며 특히 충격 등에 의하여 발생할 수 있는 층간분리 (Delamination) 손상을 포함하는 복합소재 구조물의 동적특성을 규명한 연구는 미미하다[1-3].

본 연구에서는 지진 또는 태풍 등의 충격으로 발생할 수 있는 층간분리 손상을 갖는 복합소재 구조물의 동적 특성을 규명하기로 한다. 복합소재 구조물의 동적 특성은 기하학적 형상변화, 적층배열 변화 등에 따른 고유진동, 동적불안정, 그리고 극한충격 해석 등으로 구분하여 상세 규명한다. 또한 본 연구에서는 고차전단변형 이론 (Higher-order Shear Deformation Theory: HSDT)를 적용하여 해석의 정확성을 더욱 높이도록 한다.

2. 기본 이론

2.1 층간분리 손상 모델

본 연구에서 적용한 HSDT는 변형 전 판에서 중립면의 수직관계는 변형 후에도 유지한다는 고전적 이론 (CPT)와 1차 전단변형 판이론(FSDT)의 기본 가정과는 달리 변형 후에 중립면의 횡 방향 변위는 비선형을 보이게 되며 실구조물과 같이 구조물의 상·하면에 전단 응력이 0으로 나타나게 된다. 양방향 곡률 R_1 및 R_2 를 갖는 구형 쉘에 대하여 HSDT에 근간한 등가의 변위장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_1 = u(\lambda_1, \lambda_2, \lambda, t) = u_0 + \lambda \phi_1 - \zeta_1 \lambda^3 (\phi_1 + w_{0,x} - \frac{u_0}{R_1})$$

$$u_2 = v(\lambda_1, \lambda_2, \lambda, t) = v_0 + \lambda \phi_2 - \zeta_1 \lambda^3 (\phi_2 + w_{0,y} - \frac{v_0}{R_2})$$

$$u_3 = w(\lambda_1, \lambda_2, \lambda, t) = w_0 \tag{1}$$

여기서, u , v , 그리고 w 는 곡선좌표계에서의 변위, u_0 , v_0 , 그리고 w_0 는 Cartesian 좌표계에서의 중립면 변위를, ϕ_1 과 ϕ_2 는 회전각을, ζ_1 는 고차항 계수를 각각 의미한다.

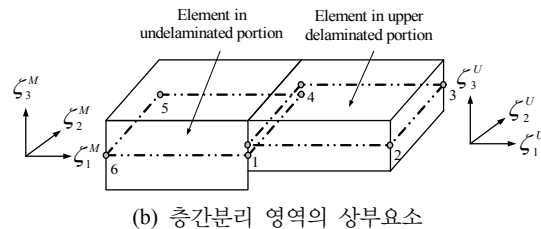
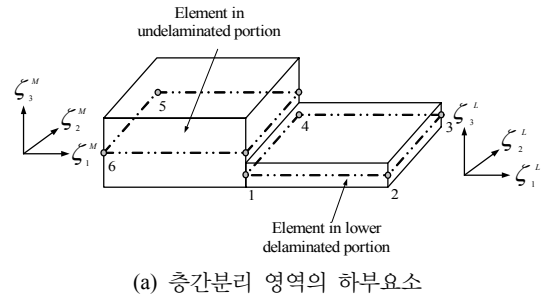
식 (1)에서 R_1 과 R_2 를 무한대로 놓으면 기하학적으로 직사각형판 형태가 된다. 다음으로 직각 좌표계 (X_1, X_2, X_3)와 경사 좌표계 (Ξ_1, Ξ_2, Ξ_3)에 대하여 ψ 도 만큼 경사진 판으로 변환할 수 있다.

한편 적층된 구조의 변형률 $\{\epsilon^{(0)}, \epsilon^{(1)}, \epsilon^{(3)}, \gamma^{(0)}, \gamma^{(2)}\}$ 와 관계된 단면력들은 다음과 같이 나타낼 수

있다.

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{P\} \\ \{Q\} \\ \{R\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [E] & 0 & 0 \\ [B] & [D] & [F] & 0 & 0 \\ [E] & [F] & [H] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [A] & [D] \\ 0 & 0 & 0 & [D] & [F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\epsilon^{(0)}\} \\ \{\epsilon^{(1)}\} \\ \{\epsilon^{(3)}\} \\ \{\gamma^{(0)}\} \\ \{\gamma^{(2)}\} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서, $\{N\}, \{M\}$, 그리고 $\{Q\}$ 는 면내력, 모멘트, 전단력을, $\{P\}$ 와 $\{R\}$ 은 고차항에 관련된 단면력을 의미한다. 한편, 층간 분리를 갖는 적층 구조에 대한 유한요소법을 적용하는 경우, 세 가지 경우의 요소에 대하여 고려할 수 있다. 즉, (1)층간분리가 발생하지 않는 구역의 요소(Element I) (2)층간 분리의 상부 요소(Element II) (3) 층간분리의 하부 요소(Element III)를 의미한다. 고차항이론을 적용한 적층 구조는 Nonconforming 요소를 사용하는 경우 모두 7개의 자유도를 갖는다. 7개의 일반화된 변위 및 회전각은 식(4)로 나타낼 수 있다



[그림 1] 층간분리 경계에서의 상하부 유한요소

[Fig. 1] Upper and lower finite elements at the delamination boundary

층간분리 손상이 발생한 경우, 실제 3차원 경계면에서는 층간분리 상하면 요소에 대하여 그림 1과 같이 중립축이 불일치하게 된다. 따라서 2차원 요소에 대하여 절점

변위는 증립축에서 동일해야 하므로 증립축을 서일치시키기 위한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 층간 경계면의 상하부 요소의 증립축과 전체증립축을 일치시키는 치환관계를 적용하였다. 즉, 4 절점 요소의 경우 요소 III에 대하여 다음과 같이 요소 I의 증립축과 일치시킨다.

$$\begin{aligned} \tilde{w}_\beta^L &= \tilde{w}_\beta^M \\ \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} &= \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1}, \quad \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_2} = \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_2}, \quad \beta = 1, 2, 3, 4 \\ \phi_{\lambda_1 \beta}^L &= \phi_{\lambda_1 \beta}^M, \quad \phi_{\lambda_2 \beta}^L = \phi_{\lambda_2 \beta}^M \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 윗첨자 L과 M은 층간경계의 하부 요소와 전체 요소의 증립축을 각각 의미한다. 층간분리영역 하부 요소의 변위 u^L 에 대하여 식(1)과 식(3)로부터 다음과 같은 전체 증립축에서의 변위 관계식으로 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{u}_\beta^M &= \tilde{u}_\beta + \lambda_M \phi_{\lambda_1 \beta}^M - \frac{4}{3(h_M)^2} \lambda_M^3 \left(\phi_{\lambda_1 \beta}^M + \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} - \frac{\tilde{u}_\beta}{R_1} \right) \\ &= \tilde{u}_\beta - \frac{h_M}{2} \phi_{\lambda_1 \beta}^M - \frac{4}{3(h_M)^2} \left(-\frac{h_M}{2} \right)^3 \left(\phi_{\lambda_1 \beta}^M + \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} - \frac{\tilde{u}_\beta}{R_1} \right) \\ &= \tilde{u}_\beta - \frac{h_M}{2} \phi_{\lambda_1 \beta}^M + \frac{h_M}{6} \phi_{\lambda_1 \beta}^M + \frac{h_M}{6} \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} - \frac{h_M}{6} \frac{\tilde{u}_\beta}{R_1} \\ &= \left(1 - \frac{h_M}{6R_1} \right) \tilde{u}_\beta - \frac{h_M}{3} \phi_{\lambda_1 \beta}^M + \frac{h_M}{6} \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_\beta^L &= \tilde{u}_\beta + \lambda_L \phi_{\lambda_1 \beta}^L - \frac{4}{3(h_L)^2} \lambda_L^3 \left(\phi_{\lambda_1 \beta}^L + \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} - \frac{\tilde{u}_\beta}{R_1} \right) \\ &= \tilde{u}_\beta - \frac{h_L}{2} \phi_{\lambda_1 \beta}^L - \frac{4}{3(h_L)^2} \left(-\frac{h_L}{2} \right)^3 \left(\phi_{\lambda_1 \beta}^L + \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} - \frac{\tilde{u}_\beta}{R_1} \right) \\ &= \tilde{u}_\beta - \frac{h_L}{2} \phi_{\lambda_1 \beta}^L + \frac{h_L}{6} \phi_{\lambda_1 \beta}^L + \frac{h_L}{6} \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} - \frac{h_L}{6} \frac{\tilde{u}_\beta}{R_1} \\ &= \left(1 - \frac{h_L}{6R_1} \right) \tilde{u}_\beta - \frac{h_L}{3} \phi_{\lambda_1 \beta}^L + \frac{h_L}{6} \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} \end{aligned} \quad (5)$$

식(3)의 관계로부터 \tilde{u}_β^L 는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{u}_\beta^L &= \frac{\kappa_L^L}{\kappa_M^L} \tilde{u}_\beta^M + \frac{h_M}{3\kappa_M^L} \phi_{\lambda_1 \beta}^M - \frac{h_L}{3} \phi_{\lambda_1 \beta}^L - \frac{h_M}{6\kappa_M^L} \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} + \frac{h_L}{6} \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} \\ &= \frac{\kappa_L^L}{\kappa_M^L} \tilde{u}_\beta^M + \frac{1}{3} \left(\frac{h_M}{\kappa_M^L} - h_L \right) \phi_{\lambda_1 \beta}^M - \frac{1}{6} \left(\frac{h_M}{\kappa_M^L} - h_L \right) \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} \\ &= \hat{g}_u^L \tilde{u}_\beta^M - \frac{1}{6} \hat{d}_u^L \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} + \frac{1}{3} \hat{d}_u^L \phi_{\lambda_1 \beta}^M \quad (\beta = 1, 2, 3, 4), \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$\hat{g}_u^L = \frac{\kappa_L^L}{\kappa_M^L}, \quad \kappa_M^L = 1 - \frac{h_M}{6R_1}, \quad \kappa_L^L = 1 - \frac{h_L}{6R_1}, \quad \text{and} \quad \hat{d}_u^L = \frac{h_M}{\kappa_M^L} - h_L.$$

나머지 각 변위에 대하여 동일한 방법으로 식을 유도하여 정리하면 다음과 같은 층간분리 영역 하부 요소와 층간분리가 발생하지 않은 영역의 증립축과의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_\beta^L \\ \tilde{v}_\beta^L \\ \tilde{w}_\beta^L \\ \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_1} \\ \frac{\partial \tilde{w}_\beta^L}{\partial \lambda_2} \\ \phi_{\lambda_1 \beta}^L \\ \phi_{\lambda_2 \beta}^L \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{g}_u^L & 0 & 0 & -\frac{\hat{d}_u^L}{6} & 0 & \frac{\hat{d}_u^L}{3} & 0 \\ 0 & \hat{g}_v^L & 0 & 0 & -\frac{\hat{d}_v^L}{6} & 0 & \frac{\hat{d}_v^L}{3} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_\beta^M \\ \tilde{v}_\beta^M \\ \tilde{w}_\beta^M \\ \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_1} \\ \frac{\partial \tilde{w}_\beta^M}{\partial \lambda_2} \\ \phi_{\lambda_1 \beta}^M \\ \phi_{\lambda_2 \beta}^M \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\hat{g}_v^L = \frac{\hat{\kappa}_L^L}{\hat{\kappa}_M^L}, \quad \hat{\kappa}_M^L = 1 - \frac{h_M}{6R_2}, \quad \hat{\kappa}_L^L = 1 - \frac{h_L}{6R_2}, \quad \text{and} \quad \hat{d}_v^L = \frac{h_M}{\hat{\kappa}_M^L} - h_L.$$

식(7)을 간단한 식으로 요약하면 다음과 같다.

$$\{\delta_\beta\}^L = [\Omega]^U \{\delta_\beta\}^M, \quad \beta = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

층간분리 영역의 상부 요소에 대해서도 동일한 방법으로 관계식을 유도할 수 있다. 층간분리 상하 요소에 대하여 2차원 증립축으로 변환된 요소강성매트릭스 $[\tilde{K}]_e$, 요소기하매트릭스 $[\tilde{G}]_e$, 그리고 요소질량매트릭스 $[\tilde{M}]_e$ 는 대각선 변환매트릭스 $[C]$ 를 각 경계면에 대하여 곱하여

구성할 수 있다.

2.2 동적 불안정 영역

동적안정성 해석은 다음과 같은 정적하중과 주기함수 형태의 동적하중이 조합된 면내 하중 $q(t)$ 에 대하여 수행된다.

$$q(t) = \alpha_0 N_{cr} + \alpha_1 N_{cr} \cos \omega t = N_s + N_d \cos \omega t \quad (9)$$

여기서, N_{cr} 은 정적좌굴하중을, α_0 와 α_1 는 정적 및 동적 매개변수를, ω 는 하중 $q(t)$ 의 동적 부분의 고유진동수를 각각 의미한다. 식(9)를 고유치 문제 형태에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{\beta=1}^5 \sum_{j=1}^{n_\alpha} (\tilde{M}_{ij}^{\alpha\beta} \Delta_j^\beta + [\tilde{K}_{ij}^{\alpha\beta} - (N_s + N_d \cos \omega t) \tilde{M}_{ij}^{\alpha\beta}] \Delta_j^\beta) = 0 \quad (10)$$

$i = 1, 2 \dots n_\alpha$

여기서, $\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$ 이고, Nonconforming 요소에 대하여 $n_1 = n_2 = n_4 = n_5 = 4$, 그리고 $n_3 = 12$ 를, Δ_j^β 는 절점당 변위를 각각 의미한다. 식(10)은 Mathieu-Hill 형태의 방정식으로 정의하며, 이는 주기적 면내하중을 받는 판에 대한 불안정성을 나타낸다. 불안정에 대한 영역은 주기 T와 2T를 갖는 주기해를 사용하여 산정하게 된다[4]. 일반적으로 주기 2T를 갖는 주불안정 영역의 경계는 주기 T를 갖는 영역보다 실용적으로 더 중요한 의미를 갖는다[4,6]. 주기해는 다음과 같은 Fourier 함수를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\Delta(t) = \sum_{i=1,3,5..}^{\infty} [a_i \sin \frac{i\omega t}{2} + b_i \cos \frac{i\omega t}{2}] \quad (11)$$

식(11)의 급수 첫 번째 항을 고려하여 식(10)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$[K_{ij} - \alpha_0 N_{cr} M_{ij} \pm 0.5 \alpha_1 N_{cr} G_{ij} - 0.25 \omega^2 M_{ij}] \{\Delta\} = 0 \quad (12)$$

윗 식에 Non-trivial 조건을 대입하여 일반화된 고유치 문제 형태로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\det \left[\begin{pmatrix} K_{ij} - 0.5 G_{ij} & 0 \\ 0 & K_{ij} + 0.5 G_{ij} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} 0.25 M_{ij} & 0 \\ 0 & 0.25 M_{ij} \end{pmatrix} \right] = 0 \quad (13)$$

식(13)에서 (+)와 (-)부호는 동적 불안정 영역에 대한 경계를 의미한다. 고유치 ω 는 α_1 과 α_0 에 대하여 안정과 불안정 사이의 경계 진동수이다[5].

[표 1] 정사각형 및 경사 적층판의 고유진동 비교(90/0/90/0/90)
[Table 1] Natural frequencies of square and skew laminated plates

	Skew angle	Source	Natural frequency		
			I	II	III
a/h = 1000	0°	[7] (FSDT)	1.914	3.974	6.654
		[8] (FSDT)	1.914	3.974	6.656
		Present[FSDT]	1.909	3.968	6.659
	30°	Present[HSDT]	1.907	3.960	6.588
		[7] (FSDT)	2.827	5.189	8.479
		[8] (FSDT)	2.824	5.189	8.483
a/h = 10	0°	Present[FSDT]	2.972	5.857	7.735
		Present[HSDT]	3.027	5.883	7.830
		[7] (FSDT)	1.570	3.038	3.742
	30°	[8] (FSDT)	1.569	3.037	3.732
		Present[FSDT]	1.569	3.036	3.729
		Present[HSDT]	1.570	2.903	3.781
a/h = 10	0°	[7] (FSDT)	2.080	3.549	4.710
		[8] (FSDT)	2.084	3.512	4.699
		Present[FSDT]	2.069	3.525	4.645
	30°	Present[HSDT]	2.036	3.358	4.608

[표 2] 판의 경사각도와 층간분리 크기 변화에 따른 고유진동수 변화 (0/90/90/0)

[Table 2] Natural frequencies for different skew and delamination sizes

		Delamination size (%)			
Skew angle	Mode	0	30	50	70
0	I	11.627	10.995	10.595	9.331
	II	22.346	21.608	18.353	15.166
	III	40.570	40.863	36.275	18.262
	IV	44.911	43.326	38.007	26.911
30	I	18.566	17.885	17.155	13.188
	II	26.804	25.774	22.781	18.401
	III	44.750	41.568	36.672	19.590
	IV	50.605	53.644	44.839	27.889
45	I	21.305	21.084	19.608	14.891
	II	29.023	29.838	25.117	20.014
	III	44.799	45.083	37.309	21.807
	IV	56.314	58.894	47.834	28.317
60	I	23.382	22.530	21.473	16.445
	II	30.779	29.779	27.007	21.431
	III	45.527	42.887	38.044	22.828
	IV	61.081	60.459	50.332	28.186

[표 3] 판의 경사각도와 층간분리 크기 변화에 따른 고유진동수 변화 (45/-45/-45/45)

[Table 3] Natural frequencies for different skew and delamination sizes

Skew angle	Mode	Delamination size (%)			
		0	30	50	70
0	I	13.594	13.048	12.234	10.860
	II	27.873	29.239	23.619	17.921
	III	35.205	37.702	38.046	18.699
	IV	46.507	45.692	41.611	29.950
30	I	16.328	15.610	14.847	13.018
	II	32.170	29.615	24.183	19.483
	III	37.272	45.162	38.588	19.755
	IV	54.689	51.109	41.611	28.936
45	I	17.844	18.050	16.312	14.467
	II	31.674	31.988	24.551	20.203
	III	42.992	49.560	37.912	21.717
	IV	51.527	53.493	44.906	28.606
60	I	19.519	18.507	17.932	16.034
	II	31.597	29.577	25.225	21.085
	III	49.008	47.875	37.511	23.870
	IV	50.446	54.921	47.668	28.210

3. 수치 해석

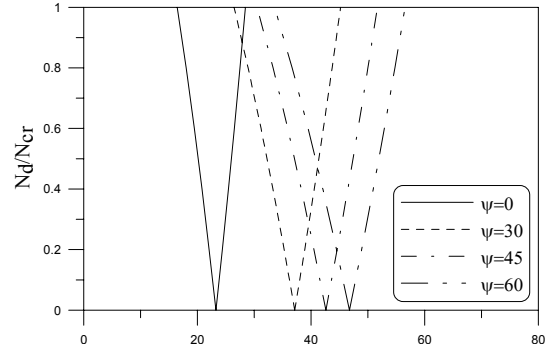
3.1 고유진동 해석

복합소재 고유진동 해석에 사용한 물성은 무차원화한 것으로 $E_1 = 40E_2$, $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.5E_2$, $\nu_{12} = 0.25$, $\rho = 1.0$ 이다. 길이-두께비(a/h)는 1000과 10 두가지 경우를 적용하였다. 표 1의 결과로부터 기존문헌결과와 본 연구결과는 잘 일치함을 알 수 있다. 표 1에서 HSDT 간의 결과차이는 미미하나, 경계조건 및 다양한 기하학적 특성 변화에 따라 두 이론에 의한 결과를 무시할 수 없는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 HSDT를 적용하여 보다 엄밀한 해석을 수행하기로 한다. 표 2~3은 판의 경사각도 및 층간분리 크기변화에 따른 고유진동수의 변화를 [0/90/90/0] 및 [45/-45/-45/45]에 대하여 비교한 것이다. 해석결과로부터 경사각도 증가에 따라 고유진동수도 증가하는 경향을 보이며, [45/-45/-45/45]의 적층배열이 층간분리의 크기 증가에 따라 [0/90/90/0]보다 합리적임을 알 수 있다.

3.2 동적불안정 해석

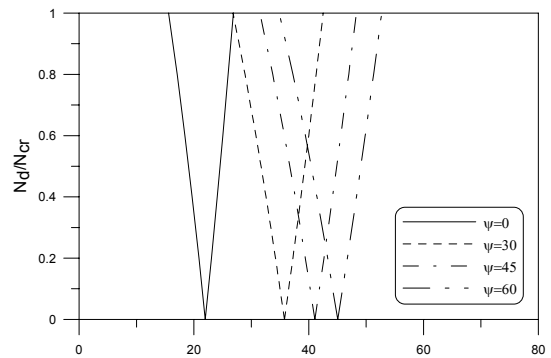
그림 2~3은 판의 경사각도 변화에 따른 동적 불안정 영역을 무손상 및 30% 층간분리 손상의 경우에 대하여 비교한 것이다. [45/-45/-45/45]의 적층배열을 적용하였다. 해석결과로부터 30% 층간분리 손상이 발생했음에도 동적불안정 영역의 변화는 무손상의 경우에 비하여 미미함

을 관찰할 수 있다. 이는 동적특성에 유리한 적층배열형을 적용했기 때문이다. 반면, 경사각도변화에 따라 고유진동수의 시작점과 폭은 크게 달라짐에 유의해야 한다.



[그림 2] 판의 경사각도 변화에 따른 동적불안정 영역비교 (무손상)

[Fig. 2] Dynamic instability region for different skew angles (No delamination)

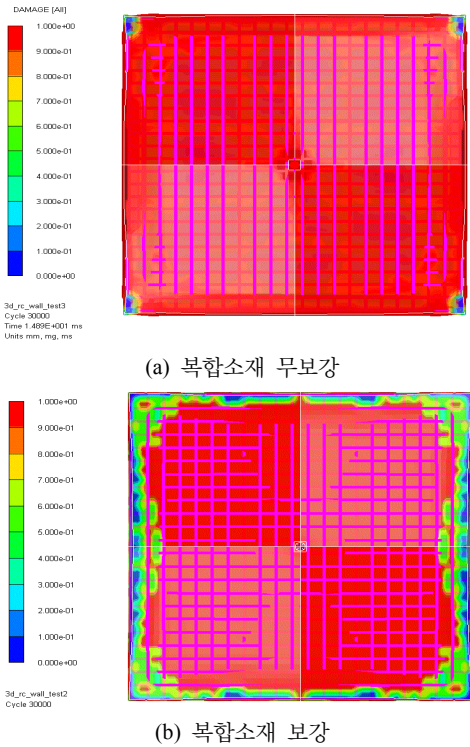


[그림 3] 판의 경사각도 변화에 따른 동적불안정 영역비교 (30% 층간분리 손상)

[Fig. 3] Dynamic instability region for different skew angles (30% delamination)

3.3 극한 충돌 해석

기존 구조물 특히 경복 기반시설의 대부분을 차지하는 콘크리트구조의 극한충격에 대한 보강효과를 분석하기 위하여 RC 구조물을 유리섬유 복합소재로 보강하지 않은 경우와 보강한 경우에 대한 극한 충격해석을 실시하였다. 그림 4는 철근 콘크리트 벽체 구조물의 충격에 대한 복합소재 보강 유무에 따른 손상 상태를 보여준다. 초기 폭풍파가 지배적인 상태에서는 두 구조물 모두 폭풍파로 인한 충격압이 콘크리트 벽체에 전체적으로 전달되어 전반적 손상을 야기하는 것으로 나타났다.



[그림 4] RC 벽체 구조물의 충격에 대한 복합소재 보강 유무에 따른 손상 상태
 [Fig. 4] Damage region for FRP repair of RC plates under an impact loading

복합소재로 보강하지 않은 RC 벽체의 경우 폭풍파와 파편 충돌에 의한 복합작용으로 인해 벽체의 파괴가 전반적 및 국부적으로 모두 크게 발생하였다. 이후, 파편이 벽체를 뚫고 관통하여 보강대책이 수립되지 않을 경우, 벽체 내부에 심각한 인명과 재산 피해 우려가 발생할 수 있다. 반면, 복합신소재로 보강된 철근 콘크리트 벽체 구조물의 경우는 미보강한 경우에 비해 파손상태가 비교적 양호하게 나타났다. 특히, 뛰어난 인장강도와 인성을 보유한 복합신소재 보강으로 벽체 후면에는 콘크리트 파쇄, 복합재 파괴, 파편 관통 현상이 전혀 발생하지 않았다. 이로부터 폭발하중에 대한 저항성능을 향상시키기 위한 목적으로 복합신소재를 보강할 경우, 파쇄에 따른 파편비산 현상을 억제할 수 있는 충분한 제어력이 확보됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고성능 방재를 위한 복합소재 적층구조

의 다양한 동적특성을 분석하였다. 본 연구결과로부터 복합소재 적층구조는 합리적인 적층배열 설계를 통하여 층간분리와 같은 손상에도 성능저하를 최소화 할 수 있음을 알 수 있었다. 수치해석 결과 [45/-45/-45/45]의 적층배열이 상대적으로 유리한 동적 불안정 특성을 보였다. 또한 적층판의 경사각도변화에 따라 동적불안정 영역은 달라질 수 있으므로 유의해야 한다. RC 벽체의 충격 관통 수치해석에서는 복합소재로 보강한 경우가 보강하지 않은 경우보다 매우 유리한 보강효과를 보였다. 본 연구결과는 복합소재 적층구조의 동적 특성 규명에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 복합소재 구조는 극한 충격을 받는 구조물의 고성능 방재 용도로 적용이 충분히 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Balamurugan, M. Ganapathi,, and T. K. Varadan, Nonlinear dynamic instability of laminated composite plates using finite element method, Computers and Structures, 60(1), pp. 125 - 130, 1996.
- [2] C. W. Bert, and V. Birman, "Dynamic instability of shear deformable antisymmetric angle-ply plates", I. J. of Solids and Structures, 23(7), pp.1053 - 1061, 1987.
- [3] A. Bhimaraddi, and L. K. Stevens, "A high order theory for free vibration of orthotropic, homogeneous and laminated rectangular plates", J. of Applied Mechanics, Vol. 51, pp.195 - 198, 1984.
- [4] V. V. Bolotin, "The dynamic stability of elastic systems", San Francisco, CA: Holden-Day, 1964.
- [5] K. Y. Lam, and T. Y. Ng, "Dynamic stability of cylindrical shells subjected to conservative periodic axial loads using different shell theories", Journal of Sound and Vibration, Vol.207, pp.497-520, 1997.
- [6] S. K. Sahu, and P. K. Datta, "Dynamic stability of curved panels with cutouts", Journal of Sound and Vibration, 251(4), pp.683 - 696, 2002.
- [7] M. K. Singha, and A. Daripa, "Nonlinear vibration of symmetrically laminated composite skewplates by finite element method", Int J Non-Linear Mech, Vol.42, pp.1144 - 52, 2007.
- [8] S. Wang, "Free vibration analysis of skew fibre-reinforced composite laminates based on first-order shear deformation theory", Comput Struct, Vol.63, pp.525 - 38, 1997.

이 상 열(Sang-Youl Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 8월 ~ 2004년 1월 : 미국 메사추세츠 공과대학(MIT) 토목환경공학과 Post-doc.
- 2005년 4월 ~ 2006년 6월 :스페인 국립 Granada 대학교 구조공학과 연구교수
- 2006년 7월 ~ 2009년 1월 : 한양대학교 건설환경공학과 BK 계약교수
- 2011년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

복합재료 구조공학, 전산구조역학