

면내 압축 및 전단하중을 받는 적층복합판의 좌굴 해석

이원홍¹, 한성천², 박원태^{3*}

¹진주산업대학교 토목공학과, ²대원대학 철도건설과, ³공주대학교 건설환경공학부

Buckling Analysis of Laminated Composite Plates under the In-plane Compression and Shear Loadings

Won-Hong Lee¹, Sung-Cheon Han² and Weon-Tae Park^{3*}

¹Department of Civil Engineering, Jinju National University

²Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University College

³Division of Construction and Environmental Engineering, Kongju National University

요약 본 논문에서는 개선된 자연변형률 쉘 요소를 이용한 적층복합판의 좌굴하중을 연구하였다. 면내 잠김과 전단 잠김 현상을 극복하기 위하여 가정자연변형률 방법을 이용하였고, 면내 압축 및 전단하중이 작용하는 경우에 폭-두께 비 및 파이버의 보강방향의 변화에 따른 적층복합판의 고유치 문제를 연구하였다. 쉘 요소의 성능 향상을 위해 새로운 보간점의 조합을 이용한 가정변형률 방법을 사용하였으며 전단보정계수 없이 전단변형을 고려할 수 있는 개선된 1차 전단변형이론을 적용하였다. 본 연구의 결과를 검증하기 위해 참고문헌의 결과들과 비교 분석하였으며 새로운 예제도 추가적으로 연구하였다. 해석결과는 참고문헌의 결과들과 잘 일치함을 알 수 있었다. 면내 전단하중에 의한 좌굴하중의 예측은 향후 관련 연구에 비교자료로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract In this paper, we investigate the buckling analysis of laminated composite plates, using a improved assumed natural strain shell element. In order to overcome membrane and shear locking phenomena, the assumed natural strain method is used. The eigenvalues of the laminated composite plates are calculated by varying the width-thickness ratio and angle of fiber. To improve an shell element for buckling analysis, the new combination of sampling points for assumed natural strain method was applied and the refined first-order shear deformation theory which allows the shear deformation without shear correction factor. In order to validate the present solutions, the reference solutions are used and discussed. The results of laminated composite plates under the in-plane shear loading may be the benchmark test for the buckling analysis.

Key Words : Buckling analysis; In-plane shear loading; First-order shear deformation theory; Assumed natural strain, Laminated composite plates

1. 서론

높은 외부 면내-압력이 복합적층 구조물에 작용할 경우 구조물에 발생한 불안정한 상태는 구조적 안정에 영향을 줄 것이고, 구조물은 파괴되기 쉬운 상태가 될 것이다. 따라서, 적층복합판의 좌굴 거동에 대한 이해는 판 구조물의 안전을 평가하기 위해 매우 중요하다.

판과 쉘의 해석을 위해 Huang과 Hinton[1]은 9절점 가

정변형률 쉘 요소(QUAD9)를 개발하였는데 그들은 전단 잠김을 극복하기 위하여 자연좌표계에서 횡 전단변형의 향상된 보간법을 사용하였다. 막 변형률의 향상된 보간법은 막 잠김 거동을 피하기 위하여 국부 좌표계에서 사용되었으며 Yoo와 Choi[2]는 개선된 기하학적 비선형 축퇴 쉘 요소를 제시하였다. 그들은 자연좌표에서 횡 전단 변형률의 향상된 보간법과 막 변형률에서 감차 적분과 비적합 변위 모드의 선택적 추가법을 사용하였다. Ma와

이 논문은 2010년 진주산업대학교 산학협력단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*교신저자 : 박원태(pwtac@kongju.ac.kr)

접수일 10년 10월 21일

수정일 10년 11월 09일

게재확정일 10년 12월 17일

Kanok-Nukulchai[3]는 요소 기저 정식화에 바탕을 둔 9 절점 가정변형률 쉘 요소를 개발 하였으며, Han 등[4]은 Ma 등의 개념을 적층복합판과 쉘로 확장하였다. Kim 등 [5]은 Ma와 Kanok-Nukulchai의 가정 변형률장을 사용한 8절점 쉘 요소를 이용하여 정적 및 동적 해석을 수행하였다. 그러나 Kim 등의 8 절점 쉘 요소는 전단항에 가정 변형률장을 사용하였음에도 불구하고 전단 잠김 문제가 해결되지 않았다. 이원홍 등[6]은 점진기능재료(FGM)의 좌굴에 대해서 연구하였으나 해석적 방법을 사용하였고 면 내 압축하중에 관한 부분으로 제한되었다.

본 연구의 목적은 자연변형률 보간점의 최적화된 조합을 이용하여 8절점 쉘 요소의 성능을 개선하고 이러한 개선 효과에 따른 적층복합판의 좌굴 해석 결과를 분석하는 것이다. 전단변형 효과를 고려하기 위해 Reissner- Mindlin 이론에 근거한 개선된 1차 전단변형이론을 이용하였다. 해석 결과의 검증을 위하여 면내 압축 및 전단하중을 받는 적층복합판의 좌굴 해석 결과와 비교/검토하였다.

2. 개선된 1차 전단변형 이론

6개의 자유도를 가지는 8절점 쉘 요소의 기하학적 형상은 그림 1과 같다.

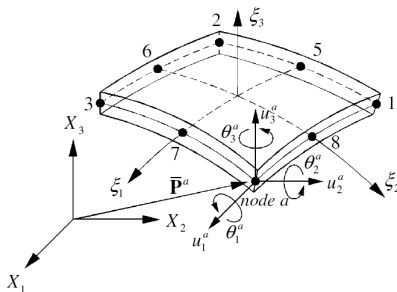
3차 변위장은 식(1)-(2)와 같다.

$$P(\xi_j) = \bar{P}(\xi_j) + \xi_3 \bar{V}(\xi_j) + \xi_3^2 \Phi(\xi_j) + \xi_3^3 \Psi(\xi_j) \quad (1)$$

$$u(\xi_j) = \bar{u}(\xi_j) + \xi_3 \bar{e}(\xi_j) + \xi_3^2 \phi(\xi_j) + \xi_3^3 \psi(\xi_j) \quad (2)$$

$$; i=1,2,3, j=1,2$$

여기서 P는 쉘 요소에서 일반적인 점의 위치 벡터, \bar{P} 그리고 \bar{V} 는 중립면에서 한 점의 위치벡터 그리고 중립면의 수직 벡터이다.



[그림 1] 8절점 쉘 요소의 기하형상

\bar{u} 그리고 \bar{e} 는 중립면에서 병진 변위벡터 그리고 회전 변위벡터이다. Φ, Ψ 그리고 ϕ, ψ 는 각각 $P(\xi_j)$ 그리고 $u(\xi_j)$ 에서 고차항들이다.

요소의 표면과 바닥에서 수직전단응력이 0이라는 조건으로부터 자연변형률도 0이 되어야 한다. 이러한 관계와 Green 변형률과 자연변형률의 관계식을 이용하여 정리하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\tilde{E}_{\alpha 3}^S = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{P}_J}{\partial \xi_\alpha} \bar{e} + \frac{\partial \bar{u}_J}{\partial \xi_\alpha} \bar{V}_J \right] (1 - \xi_3^2) \quad (3)$$

유효전단에너지 U_s 와 평균전단에너지 \bar{U}_s 사이의 비 h_ξ 를 정의하면 식(4)와 같다.

$$h_\xi = \frac{\int H_\tau(\xi_3) d\xi_3}{\int H_\tau(\xi_3) H_\gamma(\xi_3) d\xi_3} \quad (4)$$

여기서 $H_\tau(\xi_3)$ 와 $H_\gamma(\xi_3)$ 는 각각 수직전단응력과 변형률의 형상함수 분포이다(Yunqian 등[7]).

개선된 1차 전단변형이론은 식(3)에 전단에너지 계수를 곱하여 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{E}_{\alpha 3}^S = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{P}_J}{\partial \xi_\alpha} \bar{e} + \frac{\partial \bar{u}_J}{\partial \xi_\alpha} \bar{V}_J \right] (1 - \xi_3^2) h_\xi \quad (5)$$

3. 적층복합판의 변형 에너지와 합 응력

3차원 구조체로 표현된 쉘의 변형에너지는 응력 텐서 S_{ij} 와 변형률 텐서 E_{ij} 의 곱을 전체 체적에 대하여 적분한 형태로 표현되며 식(6)과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int_V S_{ij} E_{ij} dV \quad (6)$$

적층 구조물에서 변형 에너지 U는 식(7)과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int_A \int_{-h/2}^{h/2} \tilde{E}_{ij} \tilde{C}_{ijkl} \tilde{E}_{kl} dV \quad (7)$$

두께에 대한 적분을 수행하면 변형 에너지로부터 식

(8)과 같은 면내, 면내-휨 조합, 휨 그리고 전단 강성 행렬을 구할 수 있다.

$$A_{\alpha\beta\gamma\delta}, B_{\alpha\beta\gamma\delta}, D_{\alpha\beta\gamma\delta} = \int_{-h/2}^{h/2} \tilde{C}_{\alpha\beta\gamma\delta} d\xi_3$$

$$A_{\alpha 3\gamma 3} = k_s \int_{-h/2}^{h/2} \tilde{C}_{\alpha 3\gamma 3} d\xi_3 \quad (8)$$

여기서 Reissner에 의해 제안된 5/6를 전단 보정계수 (k_s)로 유효요소 정식에 사용하였다.

적층복합판의 적합 방정식은 식(9)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} N_{\alpha\beta} \\ M_{\alpha\beta} \\ Q_{\alpha 3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\alpha\beta\gamma\delta} & B_{\alpha\beta\gamma\delta} & 0 \\ B_{\alpha\beta\gamma\delta} & D_{\alpha\beta\gamma\delta} & 0 \\ 0 & 0 & A_{\alpha 3\gamma 3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{E}_{\gamma\delta}^m \\ \tilde{E}_{\gamma\delta}^b \\ \tilde{E}_{\beta 3}^s \end{Bmatrix} \quad (9)$$

4. 수직 전단변형률 보간점

8절점에 관한 연구는 다양한 논문에서 연구되었다. 자연변형률 8절점 쉘요소의 연구는 Huang과 Hinton [1], Lakshinarayanan 등[8], Macneal과 Harder [9]에 의해 면내 변형률과 수직 전단변형률의 보간점을 동일하게 적용하여 연구되었다. Bucalem과 Bathe [10], Kim 등[5, 11]은 면내 변형률 중에서 전단변형률의 보간점을 4개만 사용하였고 수직전단변형률의 보간점은 6개를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 8절점 쉘 요소에서는 Han 등[4]에서 사용한 면내 변형률 보간점을 사용하였고 수직 전단변형률 보간점은 그림 2에 나타난 보간점을 이용하여 자연변형률 8절점 쉘요소를 개선하였다.

5. 평형 방정식

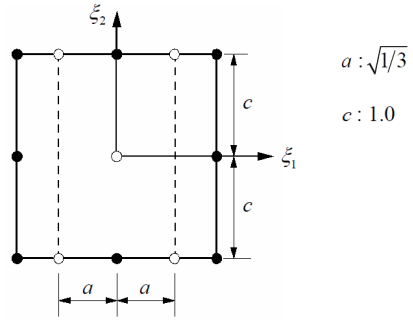
면내력, 모멘트 그리고 전단력으로 표시한 평형방정식은 식(10)과 같다.

$$\int (\delta(\tilde{e}^m)^T N + \delta(\tilde{e}^b)^T M + \delta(\tilde{e}^s)^T Q) dA = \int f \delta u dV \quad (10)$$

여기서 f 는 체적력이다.

식(10)으로부터 선형 강성행렬을 구할 수 있다.

$$\int (\delta(\tilde{e}^m)^T N + \delta(\tilde{e}^b)^T M + \delta(\tilde{e}^s)^T Q) dA = \delta u^T K_L u \quad (11)$$



[그림 2] 8절점 쉘요소의 수직 전단변형률 보간점 (O : 보간점)

여기서 K_L 은 쉘의 중립면에서 선형 강성행렬이다. 선형해석을 위한 식(12)와 같은 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$[G] \{\Delta\} = \{0\} \quad (12)$$

여기서 $\{\Delta\} = \{U_{mn}, V_{mn}, W_{mn}, X_{mn}, Y_{mn}\}$

그리고

$[G] = [K] - \lambda_{cr} [G]$: 좌굴 해석인 경우 (13) 여기서 $[K]$ 는 강성 행렬, $[G]$ 는 기하학적 강성 행렬, λ_{cr} 는 좌굴하중 이다.

6. 수치 예제

좌굴 해석의 결과들을 비교하기 위하여 몇 개의 예제들을 선택하였다. 예제들은 참고문헌의 결과와 비교하기 위한 면내 압축을 받는 적층복합판 예제와 향후 연구들에 비교 자료로 제시하기 위한 전단하중을 받는 적층복합판 예제들로 구성하였다. 첫번째 예제는 적층복합판의 좌굴하중을 Reddy [12], Whitney [13]의 결과와 비교하였다. 두 번째 예제는 전단하중을 받는 복합적층판의 좌굴 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 FEAP [14, 15]을 개선하여 적용하였다.

6.1 적층복합판의 좌굴해석

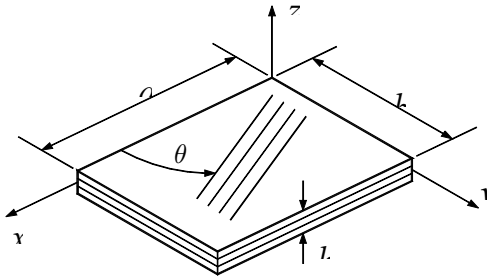
복합재료의 물성치는 식(14)와 같다.

$$E_1 / E_2 = 40, E_2 = E_3, G_{12} = G_{13} = 0.6E_2,$$

$$G_{23} = 0.5E_2, \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0.25 \quad (14)$$

그림 3의 단순지지된 4각형 판을 8×8로 요소분할하였다. 복합적층판의 좌굴하중은 식(15)를 사용하여 무차원화 하였다.

$$\bar{P}_b = \frac{P_b b^2}{E_2 h^3} \quad (15)$$



[그림 3] 단순지지된 사각형 적층복합판

면내 압축을 받는 다양한 적층복합판의 좌굴하중을 표 1에서부터 표 5까지 나타내었다. 참고문헌의 결과들과 비교하기 위하여 폭-두께비는 10과 100으로 정하였다.

[표 1] 크로스 플라이 적층복합판의 좌굴하중 (a/h = 100)

적층방법	0/90/90/0	0/90/0/90
Whitney [13]	35.96	30.26
Reddy [12]	35.95	30.25
본 연구	35.54	29.82

[표 2] 크로스 플라이 적층복합판의 좌굴하중 (a/h = 10)

적층방법	0/90/90/0	0/90/0/90
Whitney [13]	23.45	22.81
Reddy [12]	23.34	22.58
본 연구	23.18	22.70

[표 3] 앵글 플라이 적층복합판의 좌굴하중 (a/h = 100, θ / -θ/θ / -θ)

적층각도(θ)	5	15	30	45
Whitney [13]	35.66	38.33	49.63	55.74
Reddy [12]	35.66	38.32	49.61	55.73
본 연구	35.03	37.82	49.54	55.77

[표 4] 앵글 플라이 적층복합판의 좌굴하중 (a/h = 10, θ / -θ/θ / -θ)

적층각도(θ)	5	15	30	45
Whitney [13]	22.29	24.98	31.78	31.14
Reddy [12]	22.29	24.75	31.34	30.60
본 연구	21.91	24.74	31.78	31.13

표 1~표 4에서 본 연구의 좌굴하중은 참고문헌의 결과들에 정확하게 수렴되었다. 폭-두께비가 10인 경우와 100인 경우에서 모두 정확한 결과를 나타내었다.

표 5에서는 전단잠김에 대한 본 연구의 개선된 성능을 확인하기 위해 매우 얇은 경우에 대한 좌굴하중을 참고문헌 [16]의 결과와 비교하여 나타내었다.

[표 5] 두께변화에 따른 크로스 플라이 적층복합판의 좌굴하중 (0/90/0/90)

폭-두께 비(a/h)	참고문헌 [16] *	본 연구
10	21.21	22.70
100	29.56	29.82
1000	29.80	29.65
10000	62.29	29.67

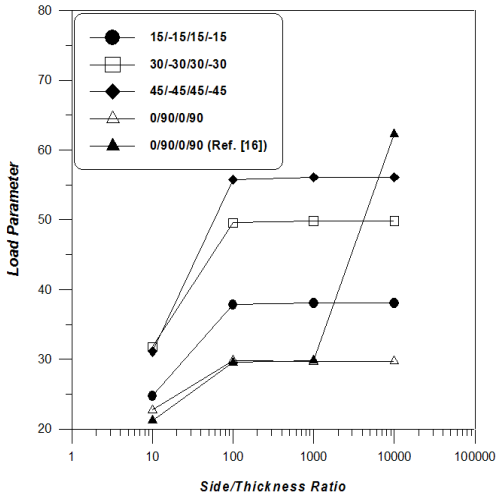
* 참고문헌 [16]의 이론을 이용하여 계산한 결과

폭-두께비가 1,000까지는 참고문헌의 결과와 본 연구의 결과가 매우 유사한 값을 나타내었으나 10,000인 경우에는 100%이상의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 전단변형률에 대한 가정변형률 방법을 적용할 때 적절한 보간점을 사용하지 않은 결과로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안한 가정변형률의 보간점의 사용이 반드시 필요하다 할 수 있다.

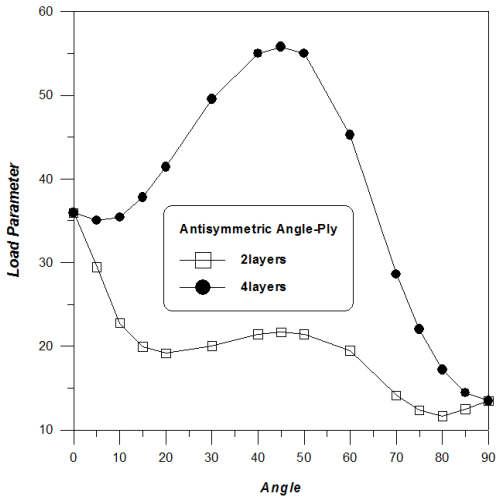
크로스 플라이 적층복합판과 역대칭 앵글 플라이 적층복합판의 폭-두께비의 변화에 따른 좌굴하중의 변화를 그림 4에 나타내었다. 본 연구의 결과들은 두께가 매우 얇아지게 되더라도 일정한 값에 수렴되는 것을 알 수 있다.

그림 5에는 역대칭 앵글 플라이 적층판의 보강방향 및 적층수의 변화에 따른 좌굴하중의 변화를 나타내었다. 폭-두께비(a/h)는 100으로 가정하였다.

적층수가 2일 때는 보강방향의 증가에 따라 좌굴하중이 감소하다가 20°에서 45°까지 증가되고 다시 80°까지 감소되다가 90°로 수렴되었다. 반면에 4층으로 적층된 경우에는 45°까지 증가되어 최대 좌굴하중을 나타내었다.



[그림 4] 역대칭 적층복합판의 좌굴하중



[그림 5] 역대칭 앵글 플라이 적층복합판의 좌굴하중

x 축 방향으로 일방향 면내 압축을 받는 경우 보강방향의 영향으로 45° 를 기준으로 비대칭의 형상을 보인다.

6.2 적층복합판의 전단좌굴해석

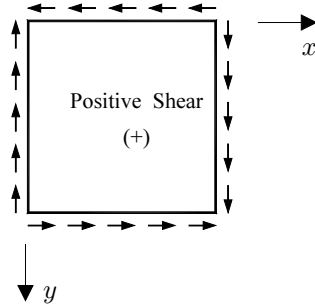
전단하중을 받고 4변 고정지시된 복합재료 적층판의 물성치는 식(16)과 같고 기하학적 특성은 그림 3과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 2.069 \times 10^5, & E_2 &= E_3 = 2.07 \times 10^4, \\
 \nu_{12} &= \nu_{23} = \nu_{13} = 0.3, & G_{12} &= G_{23} = G_{13} = 5.2 \times 10^3, \\
 a &= b = 250, & h &= 2.5
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

전단하중의 방향은 그림 6과 같다. 적층복합판의 전단

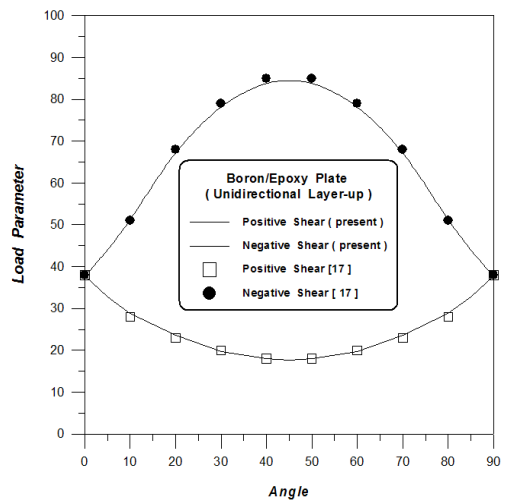
좌굴하중은 식(17)을 사용하여 무차원화 하였다.

$$\bar{P}_{xy} = \frac{P_{xy} b^2}{E_2 h^3}
 \tag{17}$$



[그림 6] 전단하중의 방향

그림 7에는 보강방향의 변화에 따른 일방향 앵글 플라이 적층복합판의 전단좌굴하중을 나타내었다. (+)전단하중과 (-)전단하중을 받는 경우로 나누어 전단좌굴하중의 변화를 연구하였다. 보강방향 및 적층수는 참고문헌과 비교하기 위하여 $(-\theta)_n = 20$ 으로 하였다. 전단하중의 방향에 따라 전단좌굴하중의 차이가 최대 4배 이상의 차이를 보였다. 보강방향이 (-)전단하중에 저항하는 방향으로 배치되어 전단좌굴하중이 증가되었다고 판단된다. 전단하중의 방향 및 적층판의 보강방향이 적층복합판의 성능을 예측하는데 매우 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다.



[그림 7] 일방향 앵글 플라이 적층복합판의 전단좌굴하중

폭-두께비의 변화에 따른 일방향 앵글 플라이 적층복

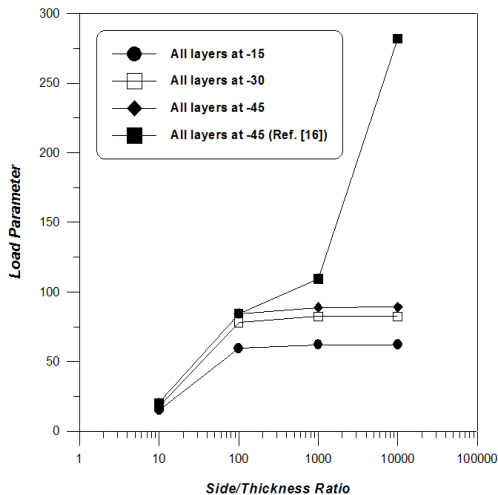
합판의 전단좌굴하중을 표 6에 나타내었다. 폭-두께비의 변화는 10~10000을 선택하였고 보강방향 및 적층수는 $(-45^\circ)_{n=20}$ 이다.

[표 6] 두께변화에 따른 일방향 앵글 플라이 적층복합판의 전단좌굴하중 $(-45^\circ)_{n=20}$

폭-두께 비(a/h)	Zhang [17]	참고문헌 [16]	본 연구
10	-	20.27	20.27
100	87.78	84.46	84.46
1000	-	109.40	89.00
10000	-	281.93	89.06

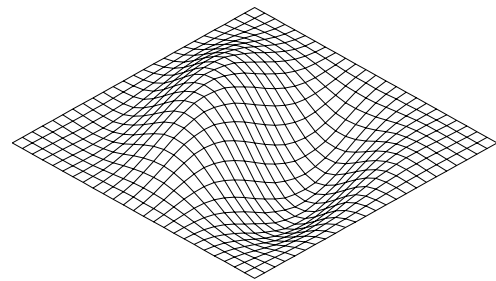
폭-두께비가 100인 경우는 Zhang [17]의 해석적인 결과와 비교하였고 그 외의 경우는 참고문헌 [16]의 수치적인 결과와 비교하였다. 전단하중에 의한 좌굴하중의 경우에는 폭-두께비가 1,000인 경우에서 20% 이상의 오차가 발생하였고 10,000인 경우에는 200%이상의 오차가 발생하였다. 전단하중에 의한 좌굴 해석에도 적절한 보간점을 사용하는것이 반드시 필요하다고 할 수 있다.

일방향 앵글 플라이 적층복합판의 폭-두께비의 변화에 따른 좌굴하중의 변화를 그림 8에 나타내었다. 본 연구의 결과들은 전단하중이 작용하더라도 두께가 매우 얇은 경우 일정한 값에 수렴되는것을 알 수 있다.

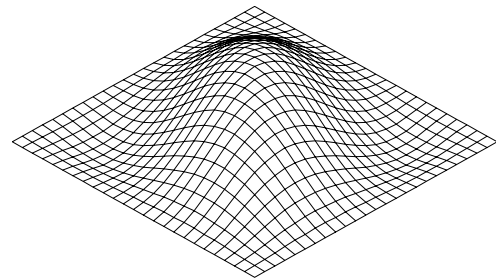


[그림 8] 일방향 앵글 플라이 적층복합판의 좌굴하중

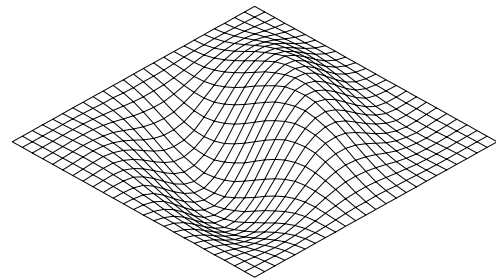
그림 9에는 전단하중을 받는 적층복합판의 첫 번째 좌굴모드를 나타내었다. 보강방향 및 적층수는 $(\theta)_{n=20}$ 이다.



(a) $\theta = 0$



(b) $\theta = -45$

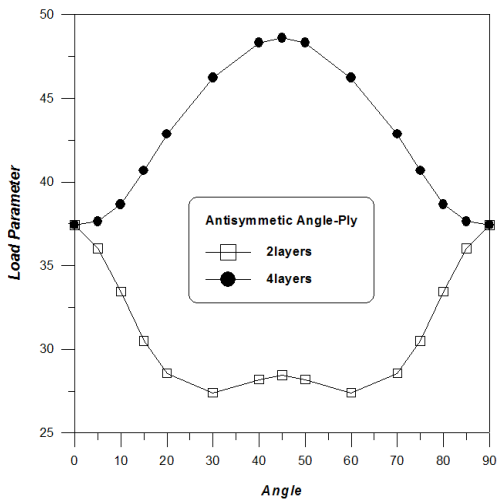


(c) $\theta = -90$

[그림 9] 적층복합판의 전단좌굴모드

그림 10에는 역대칭 앵글 플라이 적층판의 보강방향 및 적층수의 변화에 따른 전단좌굴하중의 변화를 나타내었다. (-)전단하중을 받는 4층 적층판과 2층 적층판을 해석하였다. 적층판의 보강방향은 $(\theta/-\theta)$ 그리고 $(\theta/-\theta/\theta/-\theta)$ 이다. 폭-두께비(a/h)는 100으로 가정하였다.

일방향 면내 압축의 경우와 달리 전단하중이 4번에 동시에 작용하게 되므로 45° 를 기준으로 대칭의 형상을 나타내었다. 2층으로 적층된 경우에는 전단좌굴하중이 보강방향의 증가에 따라 감소되다가 45° 에서 약간 증가되면서 대칭의 형상을 나타내었다.



[그림 10] 역대칭 앵글 플라이 적층복합판의 전단좌굴하중

7. 결론

적층복합판은 구조물의 폭-두께 비, 비등방성 재료의 보강방향 등이 복잡하게 얽혀 있어 정확한 좌굴하중을 예측하는 것은 복잡한 문제이다. 특히 전단좌굴하중의 경우는 면내 압축을 받는 경우에 비하여 연구 실적이 매우 저조한 상황이다. 본 연구에서는 전단 잠김 현상을 완벽하게 제거하기 위하여 정확한 보간점을 적용하여 두께가 매우 얇은 경우에도 정확도에서 일관성을 유지할 수 있도록 셀요소를 개선하였다. 면내 잠김과 전단 잠김 현상을 피하기 위해 가정 자연변형률을 사용하였고 전단변형 효과를 고려하기 위해 개선된 일차전단변형 이론을 적용하였다.

일방향 면내 압축을 받는 경우 보강방향의 영향으로 45°를 기준으로 비대칭의 형상을 보인 반면 전단하중은 4면에 동시에 작용하게 되므로 전단좌굴하중의 경우에는 45°를 기준으로 대칭의 형상을 나타내었다.

본 연구의 결과는 향후 적층복합판의 좌굴 현상을 연구하는 연구자들을 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 특히 전단좌굴하중에 의한 좌굴의 경우, 기존의 연구자료가 매우 부족한 실정이므로 향후 연구자들의 결과 비교를 위한 예제로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] H. C. Huang and E. Hinton E, "A new nine node

degenerated shell element with enhanced membrane and shear interpolation", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 22, pp. 73-92, 1986.

- [2] S. W. Yoo and C. K. Choi, "Geometrically nonlinear analysis of laminated composite by an improved degenerated shell element", Struct. Eng. Mech., Vol. 9(1), pp. 99-110, 2000.
- [3] H. Ma and W. Kanok-Nukulchai, "On the application of assumed strained methods", In: Kanok-Nukulchai et al., editors. Structural engineering and construction, achievement, trends and challenges, AIT, Bangkok, 1989.
- [4] S. C. Han, K. D. Kim and W. Kanok-Nukulchai, "An element-based 9-node resultant shell element for large deformation analysis of laminated composite plates and shells", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 18(6), pp. 807-829, 2004.
- [5] K. D. Kim, G. R. Lomboy and S. C. Han, "A co-rotational 8-node assumed strain shell element for postbuckling analysis of laminated composite plates and shells", Comput. Mech., Vol. 30(4), pp. 330-342, 2003.
- [6] 이원홍, 한성천, 박원태, "점진기능재료(FGM)판의 휨, 진동 및 좌굴해석", 한국산학기술학회논문집, 제9권 제4호, pp. 1043-1049, 2008.
- [7] Q. Yunqian, F. Norman, and J. Knight, "A refined first-order shear-deformation theory and its justification by plane-strain bending problem of laminated plates", International Journal of Solids and Structures, Vol. 33(1), pp. 49-64, 1996.
- [8] H. V. Lakshminarayana and K. Kailash, "A shear deformable curved shell element of quadrilateral shape", Computers & Structures, Vol. 33, pp. 987-1001, 1989.
- [9] R. H. MacNeal and R. L. Harder, "A proposed standard set of problems to test finite element accuracy", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 1, pp. 3-20, 1985.
- [10] M. L. Bucelem and K. J. Bathe, "Higher-order MITC general shell elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 36, pp. 3729- 3754, 1993.
- [11] K. D. Kim, and T. H. Park, "An 8-node assumed

strain element with explicit integration for isotropic and laminated composite shells", Struct. Eng. Mech., Vol. 13(4), pp. 387-410, 2002.

- [12] J. N. Reddy, "Mechanics of laminated composite plates and shells", CRC Press: Florida, 2004.
- [13] J. M. Whitney, "Bending-extensional coupling in laminated plates under transverse loading", J. Comput. Mater., Vol. 3, pp. 20-28, 1969.
- [14] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method", McGraw-Hill, London, 1989.
- [15] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method". Butterworth-Heinemann, London, 2000.
- [16] XFINAS, Nonlinear Structural Dynamic Analysis System, Asian Institute of Technology & Konkuk University, Korea, 2008.
- [17] Y. Zhang and F. L. Mathews, "Initial buckling of curved panels of generally layered composite materials. Composite Struct., Vol. 1, pp. 3-30, 1983.

이 원 흥(Won-Hong Lee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 건국대학교 대학원 농공학과 (농학석사)
- 1994년 2월 : 건국대학교 대학원 농공학과 (농학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 진주산업대학교 토목공학과 정교수

<관심분야>

복합재료, 좌굴해석, 비선형 구조해석, 복합구조 설계

한 성 천(Sung-Cheon Han)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 대원대학교 철도건설과 부교수

<관심분야>

선형 및 비선형 구조해석, 유한요소법, 복합재료, 복합구조 설계

박 원 태(Weon-Tae Park)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 정교수

<관심분야>

구조공학, 강구조공학, 복합재료