

적층 복합재료 주름판의 진동해석

박경조* · 김영완*†

Vibration Analysis of Laminated Composite Corrugated Plates

Kyung-Jo Park*, Young-Wann Kim*†

ABSTRACT: This work presents the free vibration characteristics of laminated composite corrugated rectangular plates using the analytical method. Because it is very difficult to determine its mechanical behavior of 3-dimensional corrugated structures analytically, the equivalent homogenization model is adapted to investigate the overall mechanical behavior of corrugated structures. The corrugated element can be homogenized as an orthotropic material. Both the effective extensional and flexural stiffness of this homogenized equivalent orthotropic material are considered in the analysis. The present analytical results are validated by those obtained from 3D finite element analysis based on shell elements. The natural frequencies and global vibration mode shapes obtained from present analytical and finite element analysis are presented. Some numerical results are presented to check the effect of the geometric properties.

초 록: 적층 복합재료 주름판에 대한 진동특성을 이론적 방법을 이용하여 분석하였다. 고려된 주름 형상은 사다리꼴을 기본으로 삼각형, 사각형 및 요각 사다리꼴형이다. 3차원 주름 구조물을 해석적으로 기계적 거동을 표현하는 것이 매우 어렵기 때문에 본 해석에서는 주름판의 진동특성을 분석하기 위해 등가균질모델을 적용하였다. 이를 위해 단위 주름을 직교이방성재료로 등가시켰으며, 해석에서 등가 신장 강성 및 굽힘 강성이 모두 고려되었다. 이론해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 셀요소를 적용한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 두 방법을 이용해 얻은 고유진동수 및 진동형상을 비교하였다. 주름판의 기하형상에 따른 영향을 분석하기 위해 다양한 수치예가 제시되었다.

Key Words: 적층 복합재료(Laminated composite), 주름판(Corrugated plate), 균질 모델(Homogenization model), 등가 강성계수(Effective stiffness)

1. 서 론

일반적으로 두께가 얇은 판은 구조물의 구조요소로서 많은 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 얇은 구조물은 좌굴 및 굽힘 등에 매우 취약하기 때문에 구조물의 강성을 높일 필요가 있다. 이를 실현하기 위한 하나의 방법으로 한 방향으로 판에 주름을 주어 강성을 높이는 것이다. 이와 같

이 강성을 높인 주름 구조는 해양 구조물, 비행기, 선박 및 철도차량 등의 바닥, 수직 칸막이 등과 같이 길이가 길고 질량 대비 큰 강성이 요구되는 구조물에 사용되고 있다. 복합재료는 기존의 금속재료에 비해 비강도, 비강성이 매우 우수하기 때문에 이들 구조물의 보다 높은 효율을 얻기 위해 금속재료를 대신하여 복합재료가 적용되고 있다. 또한 구조적 특성을 이용하여 주름방향으로 형상을 쉽게 변형시

Received 17 November 2016, received in revised form 14 December 2016, accepted 22 December 2016

*Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University

*†Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, Corresponding author (E-mail: wannkim@jnu.ac.kr)

킬 수 있어 최근에는 비행기의 모핑 날개 등과 같은 유연 구조물에 적용되고 있다.

3차원 기하형상을 갖는 주름판을 해석적으로 기계 거동을 파악하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 3차원 유한요소해석을 이용한다[1]. 그러나 3차원 유한요소해석의 경우 모델링이나 해석에 많은 작업량과 시간이 소요되기 때문에 주름 구조물의 전반적인 거동에 관심이 있는 경우에는 적당하지 않다. 이와 같은 이유로 주름판을 2차원 직교이방성판으로 등가시켜 주름 구조물의 전반적인 거동 파악하기 위해 이용하고 있다. 등가모델을 이용하여 주름판에 대해 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 직교이방성모델의 등가강성을 보다 정확히 예측하여야 한다. 등방성 판에 대해서는 많은 연구자들이 등가강성을 유도하였으며[2-4], 복합재료 주름판에 대해서도 많은 자료를 찾아 볼 수 있다[5-12]. 그러나 이들은 주로 등가강성 유도에 주안점을 두고 연구를 진행하였으며, 등가모델을 이용한 기계적 거동을 분석한 연구는 매우 제한적이다[5,10,11]. Chung과 Kim[5]은 단일 적층 복합재료 주름판에 대해 진동 특성을 분석하였다. Shaw 등[10]은 압축 좌굴 능력을 향상시키기 위한 최적 설계를 수행하였으며, Boorle와 Mallick[11]은 주름 코어를 갖는 복합재료 샌드위치판에 대한 굽힘 및 진동해석을 수행하였다. 이처럼 적층 복합재료 주름판에 대한 진동특성 연구는 거의 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 이전 연구[12]에서 유도한 적층 복합재료 주름판에 대한 등가강성계수를 활용하여 적층 복합재료 주름판의 진동특성을 분석하였다. 이를 위해 복합재료 평판을 주름판으로 제작함으로써 나타나는 진동형상 및 고유진동수의 변화를 평판의 진동수와 비교하였다. 이론해석의 타당성을 검증하기 위해 ANSYS를 이용한 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 이론해와 비교/검토하였다. 또한 다양한 형상의 주름에 대한 거동도 분석하였으며, 주름판의 기하형상을 결정하는 여러 변수에 대한 영향도 검토하였다.

2. 이론 전개

일반적인 주름형상을 갖는 주름판, 등가판 및 단위주름형상을 Fig. 1에 나타냈다. 판의 x, y 방향 길이는 a, b 이며, 단위 주름의 절반에 대한 축방향 길이, 이에 대한 축방향 주름 길이, 주름높이 및 주름각을 각각 c, f 및 α 로 표현하였으며 주름의 두께는 t_c 이다. 주름요소를 직교이방성판으로 등가시킬 때 등가판의 두께 t_e 는 $2f$ 가 되도록 하였다. 또한 총 주름의 수를 N_c 로 나타냈다. 이 때 등가판의 질량에는 변화는 없어야 한다.

직교이방성등가판에 대해 횡전단 변형을 무시할 경우 얇은 판이론으로부터 내평면 변형률 ϵ 및 곡률 κ 는 다음과 같이 표현된다.

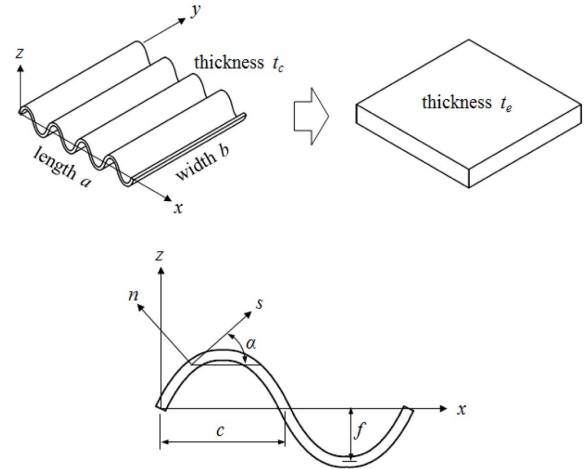


Fig. 1. Corrugated composite laminated plate, its equivalent model and corrugation unit

$$\begin{aligned} \epsilon &= \{\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_{xy}\}^T = \{u_{,x} \quad v_{,y} \quad (v_{,x} + u_{,y})/2\}^T \\ \kappa &= \{\kappa_x \quad \kappa_y \quad \kappa_{xy}\}^T = \{w_{,xx} \quad w_{,yy} \quad w_{,xy}\}^T \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 u, v 및 w 는 사각판의 중립면에 대한 각 방향 변위이며, (,)는 미분을 나타낸다.

등가 직교이방성판에 대한 구성 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{D}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{N}, \mathbf{M} 은 합력 및 합모멘트이며, $\bar{\mathbf{A}}, \bar{\mathbf{D}}$ 는 등가 신장 및 굽힘 강성계수로 다음과 같이 구성된다.

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} & 0 \\ \bar{A}_{11} & \bar{A}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{A}_{66} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \bar{D}_{11} & \bar{D}_{12} & 0 \\ \bar{D}_{11} & \bar{D}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 사다리꼴 주름을 기본으로 하여 4가지 종류의 주름형상을 고려하였다. 주름각이 90° 이면 직사각형 주름이 되고, 그 이상이 되면 요각 사다리꼴 주름이 된다. 한편 주름각을 최소로 줄이면 삼각형 주름이 된다. 요각 사다리꼴 주름이나 삼각형 주름에 대한 주름각은 기하학적 형상으로 제한을 받게 되며 이 각은 기하형상으로부터 결정할 수 있다. 이들 주름에 대한 등가강성계수는 이전 연구의 결과[12]를 일부 수정하면 Table 1과 같이 정리할 수 있다. 표에서 계수 A_{ij}, D_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$)는 적층 복합재료 평판의 신장 및 굽힘 강성계수이다.

등가 직교이방성판에 대한 운동 및 변형에너지는 다음과 같이 된다.

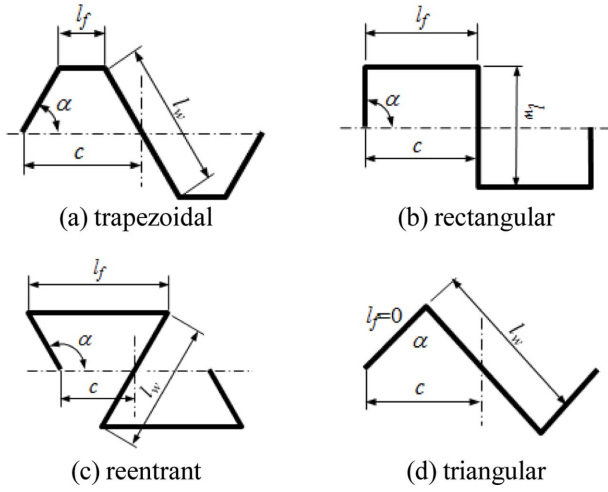


Fig. 2. Typical corrugation shapes

Table 1. Equivalent stiffness components for general composite corrugation

Extensional stiffness	Bending stiffness
$\bar{A}_{11} = \frac{2c}{\frac{I_0}{A_{11}} + \frac{I_2}{D_{11}}}$	$\bar{D}_{12} = \frac{c}{l} D_{11}$
$\bar{A}_{12} = \frac{A_{12}}{A_{11}} \bar{A}_{11}$	$\bar{D}_{11} = \frac{D_{12}}{D_{11}} \bar{D}_{11}$
$\bar{A}_{22} = \frac{l}{c} \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) + \frac{\bar{A}_{12} A_{12}}{A_{11}}$	$\bar{D}_{22} = \frac{1}{2c} (A_{22} I_2 + D_{22} I_0)$
$\bar{A}_{66} = \frac{c}{l} A_{66}$	$\bar{D}_{66} = \frac{l}{c} D_{66}$

where,

$$l_w = 2f / \sin \alpha$$

$$l_f = \begin{cases} c - 2f / \tan \alpha & \text{if } \alpha \neq 90^\circ \\ 2f & \text{if } \alpha = 90^\circ \end{cases}$$

$$l = l_w + l_f$$

$$I_0 = \int_0^{2l} \cos^2 \alpha ds = 2l_w \cos^2 \alpha + 2l_f$$

$$I_2 = \int_0^{2l} z^2 ds = l_w^3 \sin^2 \alpha / 6 + 2f^2 l_f$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (\rho_i t_i) \int (u_i^2 + v_i^2 + w_i^2) dA \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{2} \int (\mathbf{N}\boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{M}\boldsymbol{\kappa}) dA \quad (5)$$

여기서 아래첨자 t_i 는 시간을 나타낸다. 식 (4)에서 k 는 적층 수, ρ_i , t_i 는 각 층의 밀도 및 두께이다. 따라서 판에 저장되는 총 에너지는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Pi = U - T \quad (6)$$

고려된 판의 4변이 모두 고정된 경계조건이 고려되었으며, 다음과 같은 조건을 갖는다.

$$u = v = w = w_{,x} = 0 \text{ at } x = 0, a \quad (7)$$

$$u = v = w = w_{,y} = 0 \text{ at } y = 0, b$$

판의 중립면에 대한 변위식을 다음과 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \begin{Bmatrix} U_{mn} \bar{X}_m(\lambda_m x) \bar{Y}_n(\lambda_n y) \\ V_{mn} X_m(\lambda_m x) \bar{Y}_n(\lambda_n y) \\ W_{mn} X_m(\lambda_m x) Y_n(\lambda_n y) \end{Bmatrix} \cos \omega_{mn} t \quad (8)$$

$$\bar{X}_m = X_{m,x} / \lambda_m, \bar{Y}_n = Y_{n,y} / \lambda_n$$

식에서 U_{mn} , V_{mn} 및 W_{mn} 는 진동형상에서의 진폭을 나타내며, 하첨자 m , n 은 진동모드를 나타내는 각 방향 반파수이다. 또한 ω_{mn} 은 진동모드 (m , n)에서의 각진동수를 나타낸다. 각 방향 진동형상을 나타내기 위해 사용된 $X_m(x)$, $Y_n(y)$ 는 경계조건을 만족하는 함수로 보합수가 이용되었다.

가정된 변위식 (8)를 식 (6)에 대입한 후 Rayleigh-Ritz 정리에 적용하면 다음과 같은 진동해석을 위한 고유치 문제를 얻을 수 있다.

$$\{[\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]\} \{\mathbf{d}\} = 0 \quad (9)$$

여기서 $[\mathbf{K}]$, $[\mathbf{M}]$ 는 구조물의 강성 및 질량 행렬이고, $\{\mathbf{d}\}$ 는 계수행렬로 진동형상을 결정한다. 이와 같이 유도된 이론 해석 과정에서의 고유진동수 및 진동형상을 구하기 위해 Mathematica를 이용하여 프로그램을 작성하였다.

3. 수치결과 및 토의

수치결과를 분석하기 위해 AS4/3501-6 carbon/epoxy 복합재료가 고려되었다[8,12]. 이 때의 물성은 $E_1 = 148$ GPa, $E_2 = 10.5$ GPa, $G_{12} = 5.61$ GPa, $G_{23} = 3.17$ GPa, $n_{12} = 0.3$, $n_{23} = 0.59$ 및 $\rho = 1590$ kg/m³이다. 또한 기본적인 기하형상은 $a = 500$ mm, $b/a = 1$, $t_c = 1$ mm 및 적층방법은 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 이다. 특별한 언급이 없는 한 같은 모델이 수치 예에서 사용된다.

제안된 이론 해석방법의 타당성을 검증하기 위해 ANSYS를 이용한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. ANSYS를 이용한 유한요소해석에서는 복합재료 셀 구조 등과 같은 적층 셀 모델에 적용할 수 있는 SHELL281 요소가 이용되었다. 이 요소는 8절점으로 구성되며, 절점 당 6자유도를 갖는다. 이 때 해석에 사용된 유한요소모델을 Fig. 3에 제시하였다. 그림에서처럼 ANSYS가 제공하는 옵션을 이용하여 셀 요소에 대해 적층 상황을 솔리드 모델 형태로 볼 수가 있다.

주름수가 15개, 주름높이 $f = 3t$, 주름각 $\alpha = 45^\circ$ 인 주름판에 대해 이론해석 및 유한요소해석으로부터 얻은 고유진동수를 Table 2에 제시하였다. 이때 이론해석 결과를 기준

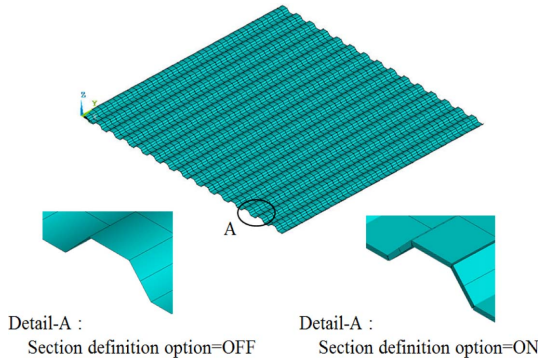


Fig. 3. FE model for laminated composite corrugated plate

Table 2. Frequency comparison of laminated composite corrugated plate

Mode (<i>m, n</i>)	Frequency (Hz)		r.e.*
	Theory, <i>f</i> ₁	FEM, <i>f</i> ₂	
(1, 1)	223.62	218.63	2.28
(2, 1)	239.61	232.81	2.92
(3, 1)	264.57	264.04	0.20
(4, 1)	311.41	317.78	-2.00
(5, 1)	383.43	395.92	-3.15
(6, 1)	480.58	497.72	-3.44
(7, 1)	601.48	621.62	-3.24
(1, 2)	620.71	592.13	4.83
(2, 2)	635.88	609.88	4.26
(3, 2)	651.14	642.32	1.37

$$* \text{relative error} = \frac{f_1 - f_2}{f_2} \times 100(\%)$$

으로 최저차 10개의 진동수에 대해 동일한 진동모드에 대한 유한요소해석결과를 함께 제시하였다. 표에 나타난 것처럼 동일한 진동모드에 대해 두 결과 간의 차이는 최대 5% 미만으로 잘 일치하고 있다. 또한 두 해석 방법에서 얻은 진동형상을 Fig. 4에 나타냈다. 그림에서처럼 등가모델을 이용한 진동형상이나 3차원 유한요소해석으로부터 얻은 진동형상이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에서는 앞의 예제에서 사용된 기하형상에 대해 주름형상 변화(즉, 주름각의 변화)에 따른 진동수 및 질량 변화를 나타낸 것이다. 이 때 주름 높이는 일정하다. 그림에서 진동수비(frequency ratio)와 질량비(mass ratio)는 각각 주름판의 진동수(ω_c) 및 질량(m_c)을 평판에 대한 진동수(ω_f) 및 질량(m_f)으로 나눈 값이다. 그림에 나타난 것처럼 평판을 주름판으로 제작함으로써 진동수가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 고려된 모드 중에서 (1, 2) 모드에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 기본진동수가 나타나는 (1, 1) 모드에도 매우 큰 영향을 주고 있다. 또한 주름각이 커질수록 즉, 주름 형상이 삼각형에서 사다리꼴로 변함에 따라 초기

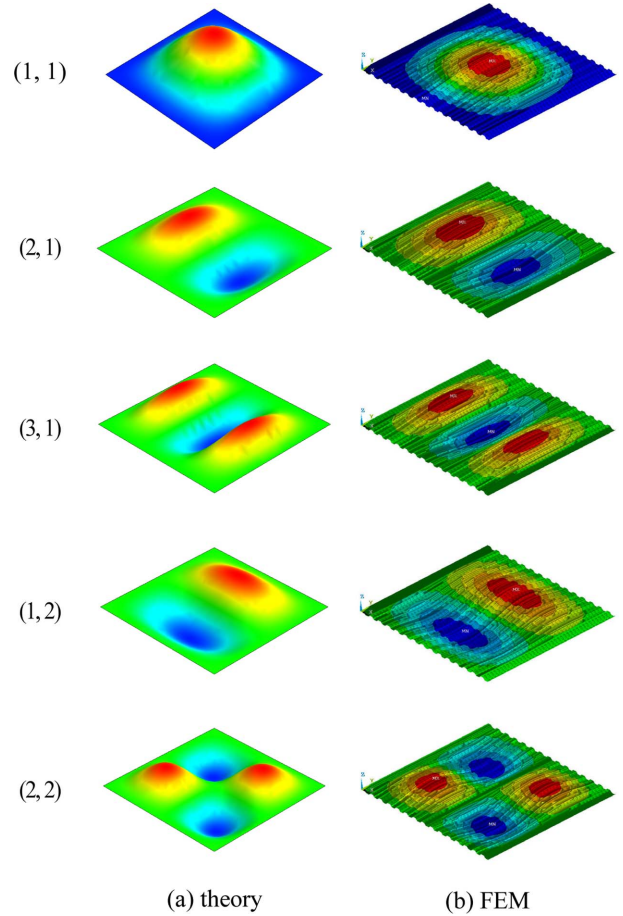


Fig. 4. Comparisons of vibration mode shapes of laminated composite corrugated plate

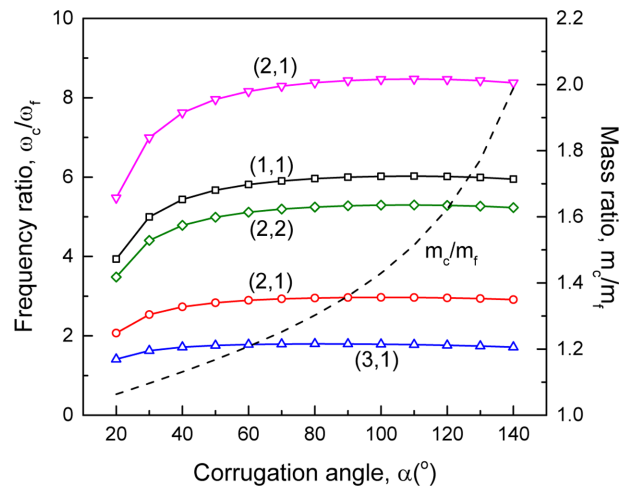


Fig. 5. Effect of corrugation angle on frequencies of various vibration modes

에 진동수가 급격히 증가하다가 어느 각 이상이 되면 진동수 변화가 거의 나타나지 않는다. 그러나 질량 변화는 초기에 서서히 증가하다가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 요각 사다리꼴의 경우 질량증가는 크게 나타나지만 진

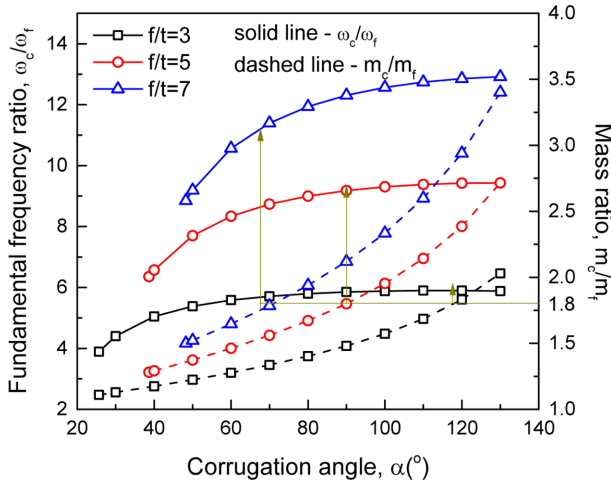


Fig. 6. Effect of corrugation height on fundamental frequency of laminate composite corrugated plate

동수는 거의 변하지 않는다. 이와 같은 현상은 Fig. 6에서도 발견된다. 따라서 요각 사다리꼴 주름판을 사용하는 것은 진동수를 높이는 측면에서 그다지 효과적이지 않다고 할 수 알 수 있다.

Fig. 6에서는 주름수가 20개이고 주름높이가 3t, 5t, 7t인 주름판에 대해 주름각이 기본진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 앞의 예제와 같이 주름각이 커짐에 따라 진동수가 급격히 증가하다가 어느 각 이상부터는 일정한 값으로 접근한다. 전반적으로 주름높이가 낮을수록 일정한 값으로 접근하는 주름각이 작은 값에서 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 질량증가는 주름높이가 높을수록 주름각에 따라 민감하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편 같은 질량에 대해 진동수 증가효과는 주름높이가 클수록 크다는 것을 볼 수 있다. 한 예로써 질량비가 1.8에 대해 $f/t = 3$ 인 경우에는 주름 형상이 요각 사다리꼴로 진동수는 평판에 비해 약 6배 정도, $f/t = 5$ 인 경우에는 주름형상이 직사각형으로 진동수가 9배 정도, $f/t = 7$ (사다리꼴 주름)인 경우에는 약 11배 정도 증가한다. 이것은 주름형상보다는 주름높이가 진동수에 보다 큰 영향을 준다는 것을 의미한다.

Fig. 7에서는 주름각 $\alpha = 60^\circ$ 인 복합재료 주름판에 대해 축방향 주름길이(또는 주름수)가 기본진동수에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 때 같은 판의 길이에 대해 주름길이에 따라 주름수가 달라지기 때문에 주름수에 대한 영향도 동시에 관찰할 수 있다. 주름길이에 따른 각 데이터 점에서의 주름수는 최초 30에서 10까지 2개씩 감소한다. 그림에서처럼 진동수는 축방향 주름길이가 커질수록 그리고 주름수가 적어질수록 진동수는 증가를 한다. 이와 같은 이유는 그림에서처럼 주름길이가 커짐에 따라 질량은 감소하는 반면 굽힘을 지배하는 강성계수 \bar{D}_{22} 가 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 한편 주름높이가 클수록 주름길이에 따른 영향이 크게 나타난다.

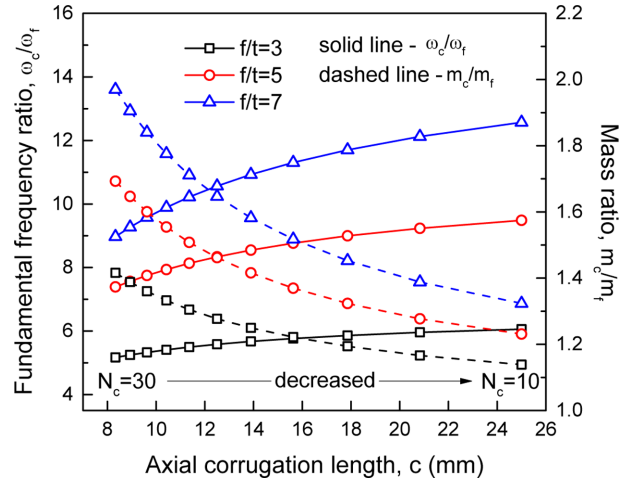


Fig. 7. Effect of corrugation axial wave length on fundamental frequency of laminate composite corrugated plate

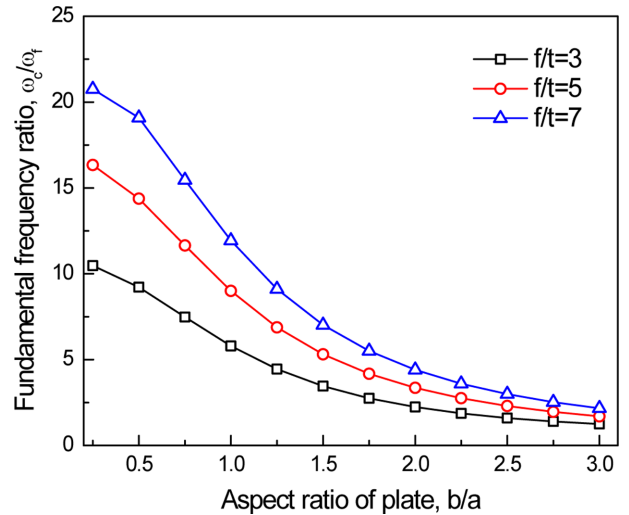


Fig. 8. Effect of aspect ratio of plate on fundamental frequency of laminate composite corrugated plate

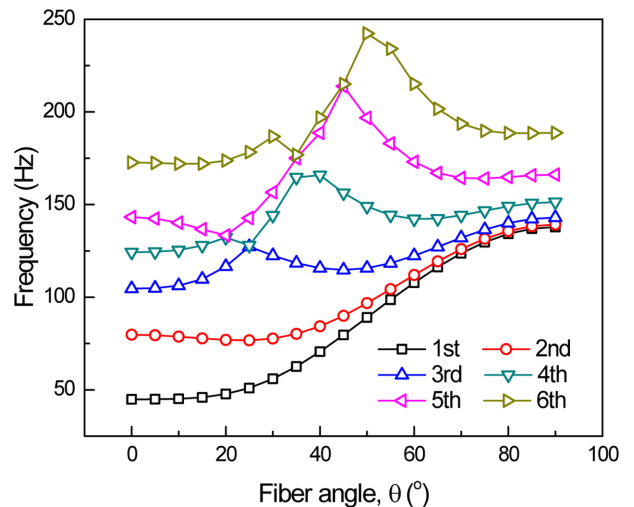


Fig. 9. Effect of fiber angle on the first six frequencies of laminate composite corrugated plate

주름판의 형상비 b/a (a 는 고정)에 따른 거동을 Fig. 8에 제시하였다. 이때 $N_c = 20$, $\alpha = 80^\circ$ 인 사다리꼴 주름 형상을 고려하였다. 제시된 결과로부터 형상비가 작을수록 기본진동수에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있으며, 주름높이가 클수록 그 영향은 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.

$[\pm\theta]_{2s}$ 적층 주름판에 대해 섬유각 θ 의 변화에 따른 초기 6차까지의 진동수 변화를 Fig. 9에 제시하였다. 이 때 $b/a = 2$, $N_c = 20$, $f = 5t$, $\alpha = 70^\circ$ 이다. 그림에 나타난 것처럼 적층각이 커짐에 따라 1, 2차 진동수는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 적층각이 증가함에 따라 주름 횡방향의 굽힘강성계수 D_{22} 가 크게 증가하기 때문에 나타난다. 이때의 진동모드는 각각 (1, 1), (2, 1)이다. 그러나 다른 차수에서의 진동수는 초기에는 진동수가 증가하다가 어느 각 이상이 되면 진동수가 감소/증가 거동을 반복하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 각 차수에서의 진동모드가 적층각에 따라 변하기 때문이다. 한 예로 3차 진동수의 경우 초기의 작은 적층각에서는 (1, 2)의 진동형을 갖지만, 적층각 25° 이상에서는 (3, 1)의 진동모드를 갖는다. 4차의 경우에는 진동형상이 (2, 2), (1, 2), (4, 1) 순으로 변한다.

4. 결 론

적층 복합재료 주름판에 대해 일정 두께를 갖는 직교이방성판으로 등가시켜 진동특성을 얻기 위해 이론해석을 수행하였다. 또한 3차원 유한요소해석을 추가로 수행하였으며 그 결과를 이론해석 결과와 비교/검토함으로써 제안된 이론해석방법을 통해 진동수 및 진동형상을 적절히 예측할 수 있음을 보였다. 수치 예를 통해 주름높이가 같은 경우 삼각형 주름보다는 사다리꼴 주름으로 할 경우 보다 큰 진동수를 얻을 수 있었으나 요각 사다리꼴로 할 경우 그 효과는 그다지 크지 않았다. 즉, 요각 사다리꼴로 할 경우 진동수 증가효과에 비해 질량증가가 훨씬 크게 나타난다. 따라서 진동수 측면에서 요각 사다리꼴 주름판을 사용하는 것은 효과적이지 않다고 할 수 있다. 그리고 주름형상보다는 주름높이가 진동수에 더 큰 영향을 준다는 것을 알았다. 한편 같은 조건에서 축방향 주름길이가 클수록 진동수는 증가를 한다. 같은 길이의 주름판에 대해 주름수가 적을수록 진동수는 증가한다. 그리고 판의 길이에 대한 형상비가 작을수록 기본진동수에 큰 영향을 미친다. 또한 적층 복합

재료 주름판에 대해 적층각이 진동특성에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. Yucel, A., and Arpacı, A., "Theoretical and Experimental Vibration Analyses of Trapezoidal and Sinusoidal Corrugated Plates," *Proceeding of ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Vol. 1, Nantes, France, July 2012, pp. 431-437.
2. Samanta, A., and Mukhopadhyay, M., "Finite Element Static and Dynamic Analyses of Folded Plates," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 277-287.
3. Liew, K., Peng, L., and Kitipornchai, S., "Vibration Analysis of Corrugated Reissner-Mindlin Plates using a Mesh-free Galerkin Method," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 51, Issue 9-10, 2009, pp. 642-652.
4. Kim, Y.-W., "Vibration Analysis of Trapezoidal Corrugated Plates," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 10, 2013, pp. 928-934.
5. Chung, K., and Kim, Y.-W., "Rigidity and Vibration Analysis on Fiber-Reinforced Composite Corrugated Plates," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 4, 2002, pp. 1-8.
6. Yokozeki, T., Takeda, S., Ogasawara, T., and Ishikawa, T., "Mechanical Properties of Corrugated Composites for Candidate Materials of Flexible Wing Structures," *Composites: Part A*, Vol. 37, No. 10, 2006, pp. 1578-1586.
7. Winkler, M., and Kress, G., "Influence of Corrugation Geometry on the Substitute Stiffness Matrix of Corrugated Laminates," *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 2827-2833.
8. Xia, Y., Friswell, M.I., and Flores, E.S., "Equivalent Models of Corrugated Panels," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, 2012, pp. 1453-1462.
9. Ghabazi, P., and Golzar, M., "Mechanical Analysis of Trapezoidal Corrugated Composite Skins," *Applied Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, 2013, pp. 341-353.
10. Shaw, A.D., Dayyani, I., and Friswell, M.I., "Optimisation of Composite Corrugated Skins for Buckling in Morphing Aircraft," *Composite Structures*, Vol. 119, 2015, pp. 227-237.
11. Boorle, R.K., "Bending, Vibration and Vibro-acoustic Analysis of Composite Sandwich Plates with Corrugated Core," Ph.D Thesis, University of Michigan-Dearborn, USA, 2014.
12. Park, K.J., Jung, K., and Kim, Y.-W., "Evaluation of Homogenized Effective Properties for Corrugated Composite Panels," *Composite Structures*, Vol. 140, 2016, pp. 644-654.