

사다리꼴 주름판의 진동해석

Vibration Analysis of Trapezoidally Corrugated Plates

김 영 완†
Young-Wann Kim

(Received September 23, 2013 ; Revised October 14, 2013 ; Accepted October 14, 2013)

Key Words : Trapezoidally Corrugated Plate(사다리꼴 주름판), Equivalent Orthotropic Plate(등가 직교이방성판), Extensional Stiffness(신장강성계수), Flexural Stiffness(굽힘 강성계수)

ABSTRACT

In this paper, the vibration characteristics of the trapezoidally corrugated plate are investigated by the analytical method. The corrugated plate is widely used as the structural elements because of its high stiffness and light weight. Because the corrugated plate is flexible in the corrugation direction and stiff in the transverse direction, it is treated as an equivalent orthotropic plate to analyze the corrugated plate simply. This equivalent plate must include both extensional and flexural effect to obtain the precise solution. The effective extensional and flexural stiffness of the equivalent plate are derived to consider these effects in the analysis. To demonstrate the validity of the proposed approach, the comparison is made with the previously published results and ANSYS solutions. Some numerical results are presented to check the effect of the geometric properties.

1. 서 론

평판을 한 방향으로 주름을 잡아 주름진 방향으로 유연성을 주고 주름 반대 방향으로로는 강성을 증가시킨 것을 주름판이라고 한다. 주름판은 무게에 비해 매우 큰 강성을 갖고 있어 고강성 및 경량을 동시에 요구하는 우주항공, 조선, 철도차량 등에서 널리 이용되고 있다. 하니컴 코어를 갖는 샌드위치 패널과는 달리 주름판을 코어로 사용할 경우 샌드위치 패널은 수직방향 전단변형에 대해서도 지지할 수 있기 때문에 샌드위치 패널의 코어로 널리 이용되고 있다^(1,2). 또한 주름 반대방향으로는 충분한 강성을 유지하면서 주름 방향으로는 형상을 쉽게 변형시킬

수 있기 때문에 비행기의 모핑 날개(morphing wing) 등과 같은 유연 구조물에 적용되고 있다^(3,4).

주름판의 구조특성을 해석하는 방법에는 주름요소를 개개의 탄성체로 간주하여 해석하는 방법^(5,6), 주름판의 직교방향에 대해 서로 다른 성질을 이용한 것으로 주름판을 일정 두께를 갖는 직교 이방성판으로 간주하여 해석하는 방법⁽⁷⁻⁹⁾ 등이 있다. 또한 현재 가장 많이 이용되고 있는 방법은 유한요소법으로 복잡한 구조 형상에도 쉽게 적용할 수 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

이들 해석 방법 중에서 주름판을 직교이방성판으로 등가시켜 해석하는 방법이 가장 간단하다. 직교 이방성판으로 해석하기 위해서는 등가 강성계수를 먼저 구하여야 한다. 그러나 복잡한 기하학적 형상으로 인하여 엄밀한 강성계수를 결정하는 데는 상당

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University
E-mail : wannkim@jnu.ac.kr
Tel : +82-61-659-7285, Fax : +82-61-659-7289

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

한 어려움이 있다. 많은 연구자들이 주름판의 굽힘 강성계수를 유도하여 해석에 적용하였다⁽⁷⁻⁹⁾. 이들 중에서 Samanta 만이⁽⁸⁾ 해석에서 신장 및 굽힘 강성계수를 동시에 고려하였다. 주름판의 거동은 굽힘 강성에 의해 크게 영향을 받지만 보다 엄밀한 해를 얻기 위해서는 신장강성도 고려하여야 한다.

따라서 이 연구에서는 사다리꼴 주름판을 직교이방성판으로 등가시켜 해석하기 위해 신장 강성계수 및 굽힘 강성계수를 유도하였다. 주름판의 진동특성을 알아보기 위해 유도된 강성계수를 해석에 적용하여 진동해석을 수행하였으며, 일부 결과를 기존의 연구결과 및 ANSYS를 이용한 3D 유한요소 해석결과와 비교/검토하였다. 또한 주름판의 각종 기하형상에 따른 영향도 검토하였다.

2. 수식화

2.1 주름판의 고유치 해석

Fig. 1은 사다리꼴 주름판, 단위 주름의 형상 및 등가판을 나타낸 것이다. 주름판의 x 및 y 방향 길이는 각각 a, b 이며, 두께는 t 이다. 직교이방성판으로 등가시킬 때(이하 등가판) 판의 길이와 폭은 변하지 않으며, 두께 t_e 는 일정하다. 중립면에서의 각 방향 변위를 각각 u, v 및 w 라 하였다. 한편 단위 주름에 대한 축방향 길이를 l , 이에 대한 주름 길이를 s , 주름높이를 h , 주름각을 θ 로 하였다. 이 때 등가판의 두께는 주름높이와 같게 하였다.

직교이방성재료에 대해 응력과 변형률과의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu'} \begin{bmatrix} E_x & \nu_y E_x & 0 \\ \nu_x E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & \nu' G_{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\nu' = 1/(1 - \nu_x \nu_y)$ 이며, E_x, E_y, G_{xy}, ν_x 및 ν_y 는 등가 직교이방성판에 대한 재료물성이다.

직교이방성판에 대한 변형에너지는 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int_A [\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + 2\sigma_{xy} \epsilon_{xy}] dV \quad (2)$$

식 (2)에서의 판에 대한 변형률은 중립면에 대한 내평면 변형률(ϵ_0)과 곡률(κ)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_{x0} + z\kappa_x = u_{,x} + zw_{,xx} \\ \epsilon_y &= \epsilon_{y0} + z\kappa_y = v_{,y} + zw_{,yy} \\ \epsilon_{xy} &= \epsilon_{xy0} + z\kappa_{xy} = (v_{,x} + u_{,y})/2 + zw_{,xy} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 (,)는 공간미분을 나타낸다.

식 (1)~(3)으로부터 변형에너지는 다음과 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_A [A_x \epsilon_{x0}^2 + 2A_1 \epsilon_{x0} \epsilon_{y0} + A_y \epsilon_{y0}^2 + A_{xy} \epsilon_{xy0}^2 \\ &\quad + D_x \kappa_x^2 + 2D_1 \kappa_x \kappa_y + D_y \kappa_y^2 + 4D_{xy} \kappa_{xy}^2] dA \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 계수 A_i, D_i ($i = x, y, 1, xy$)는 각각 신장 및 굽힘 강성계수이다. 이들 강성계수는 단위 주름 요소에 대해 각각 신장 및 굽힘을 받는 상태에서 유도를 하여 해석에 적용하여야 한다.

진동해석을 위한 직교이방성판의 운동에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \int_A \rho_e t_e [\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2] dA \quad (5)$$

일정 두께를 갖는 직교이방성판으로 등가시킬 경우($t_e = h$) 판의 질량은 변화가 없어야 하므로 밀도를 $\rho_e = \rho s t / (l h)$ 로 등가시켰다.

이 연구에서는 4변이 모두 고정된 고정 경계조건

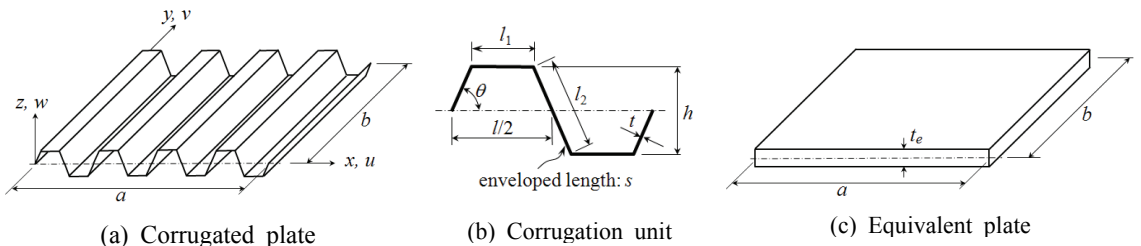


Fig. 1 Trapezoidal corrugated plate, its corrugation unit and its equivalent plate

을 고려하였으며, 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} u = v = w = w_{,x} = 0 & \text{ at } x = 0, a \\ u = v = w = w_{,y} = 0 & \text{ at } y = 0, b \end{aligned} \quad (6)$$

중립면에 대한 변위를 다음과 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} u(x,y) &= \sum_m \sum_n \left\{ U_{mn}(\omega_{mn}t) X_m^u(x) Y_n^u(y) \right\} \\ v(x,y) &= \sum_m \sum_n \left\{ V_{mn}(\omega_{mn}t) X_m^v(x) Y_n^v(y) \right\} \\ w(x,y) &= \sum_m \sum_n \left\{ W_{mn}(\omega_{mn}t) X_m^w(x) Y_n^w(y) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

식에서 $X_m(x), Y_n(y)$ 는 경계조건을 만족하는 함수로 보함수를 이용하였으며, ω_{mn} 은 각 모드에서의 각진동수, U_{mn}, V_{mn}, W_{mn} 는 진폭을 나타낸다.

고려된 주름판에 대한 진동특성을 얻기 위해 정의된 에너지식을 Rayleigh-Ritz 정리에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} = 0 \quad (8)$$

여기서 \mathbf{M}, \mathbf{K} 는 판의 질량 및 강성행렬이다. 식 (8)로부터 고유진동수와 각 진동모드에서의 진폭을 얻을 수 있다.

2.2 신장강성계수

Fig. 2(a)처럼 단위 주름에 x 방향으로 하중 P 를 가하면 늘어난 길이는 다음과 같다.

$$\delta_x^c = \frac{2Pl_1}{AE} + \frac{Pl_1h^2}{EI} + \frac{2Pl_2h^2}{3EI} + \frac{2Pl_2\cos^2\theta}{AE} \quad (9)$$

여기서 단위 폭에 대해 $A = t, I = t^3/12$ 이다.

한편 주름판의 주름높이를 두께로 하는 직교이방

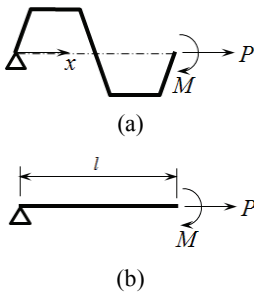


Fig. 2 Cross section of corrugation unit and its equivalent unit

성판(Fig. 2(b))에 대해 단위주름에 대한 x 방향 변형량 δ_x^c 은 다음과 같다.

$$\delta_x^c = \frac{Pl}{A_c E_x} \quad (10)$$

여기서 E_x 는 등가판의 등가탄성계수이며, 단위 폭에 대해 $A_c = h$ 이다. 이 때 변형량 δ_x^c 와 δ_x^c 는 서로 같아야 하므로 이 조건으로부터 직교이방성판에 대한 x 방향 등가탄성계수는 다음과 같이 유도된다.

$$E_x = \frac{Et^3(l_1 + l_2\cos\theta)}{h^3(6l_1 + 4l_2) + ht^2(l_1 + l_2\cos^2\theta)} \quad (11)$$

Fig. 3에서처럼 길이가 b 인 단위 주름을 y 방향으로 인장시켰을 때 주름판에 대한 변형량 δ_y^c 와 등가판에 대한 변형량 δ_y^c 는 서로 같아야 한다. 이 때의 각 변형량은 다음과 같다.

$$\delta_y^c = \frac{Pb}{tsE}, \quad \delta_y^c = \frac{Pb}{h l E_y} \quad (12)$$

이들이 서로 같다는 조건으로부터 y 방향 등가탄성계수는 다음과 같이 된다.

$$E_y = \frac{Est}{lh} \quad (13)$$

등가전단탄성계수는 Fig. 3에서처럼 내평면 전단력 V_1 또는 V_2 가 작용할 경우 주름판 및 직교이방성판에 대한 전단변형률이 서로 같다는 조건으로부터 구할 수 있다. 이때 하중 V_1 및 V_2 에 의한 전단 변형률은 서로 다르다. 그러나 직교이방성판의 경우 주축(주름판의 경우 주름 횡방향)을 기준으로 한 전단탄성계수를 적용하여야 하므로 전단력 V_2 을 작용

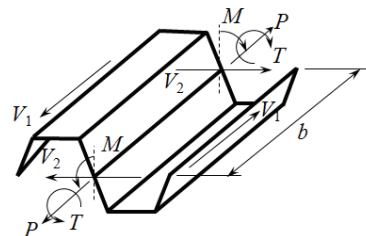


Fig. 3 Corrugation unit of corrugated plate under various loads

시켰을 때 유도된 값을 전단탄성계수로 선정한다.

$$G_{xy} = G \frac{st}{lh} \tag{14}$$

다음으로 푸아송 비를 구하여야 한다. Fig. 3에서 y 방향으로 작용하는 하중 P 에 의한 x 방향 변형량은 식 (15)와 같으며, 이는 등가판의 변형량과 같아야 한다. 따라서 등가판에 대한 x 방향 변형률은 식 (15)를 이용하면 식 (16)과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta_x^c = \frac{\nu P}{tE}(1 + \cos\theta) \tag{15}$$

$$\epsilon_x^c = \frac{\nu P}{ltE}(1 + \cos\theta) \tag{16}$$

y 방향 변형률은 $\epsilon_y^c = P/(ltE_y)$ 이므로 등가판에 대한 푸아송 비는 다음과 같이 된다.

$$\nu_y = \frac{\epsilon_x^c}{\epsilon_y^c} = \nu(1 + \cos\theta) \frac{st}{lh} \tag{17}$$

한편 푸아송 비 ν_x 는 다음과 같이 탄성계수와 푸아송 비와의 관계식으로부터 구하게 된다.

$$\nu_x = \nu_y \frac{E_x}{E_y} \tag{18}$$

이상에서 유도한 등가재료물성을 다음 식에 적용하여 등가 신장강성계수를 구한다.

$$A_x = \frac{E_x h}{1 - \nu_x \nu_y}, A_1 = \nu_x A_y = \nu_y A_x \tag{19}$$

$$A_y = \frac{E_y h}{1 - \nu_x \nu_y}, A_{xy} = G_{xy} h$$

2.3 굽힘강성계수

단위길이 당 길이방향 등가 굽힘강성계수는 Fig. 2에서처럼 굽힘모멘트에 의해 발생하는 처짐각이 같다는 조건으로부터 구할 수 있다. 주름판에 대한 처짐각 θ_c 와 등가판에 대한 처짐각 θ_e 는 다음과 같다.

$$\theta_c = \frac{Ms}{D}, \theta_e = \frac{Ml}{D_x} \tag{20}$$

따라서 길이방향 등가 굽힘강성계수는 다음과 같

이 된다.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{l}{s} \tag{21}$$

등가 횡방향 굽힘강성계수는 Fig. 3에서 처럼 굽힘모멘트가 작용할 때 발생하는 처짐각이 서로 같다는 조건으로부터 유도한다. 이 조건으로부터 등가판의 횡방향 굽힘강성계수는 단위 주름에 대한 단면 2차 모멘트에 비례한다는 결론이 나온다. 따라서 등가 횡방향 굽힘강성계수는 다음과 같다.

$$D_y = \frac{E[(3l_1 + l_2)th^2 + (l_1 + l_2 \cos^2\theta)t^3]}{12(1-\nu^2)(l_1 + l_2 \cos\theta)} \tag{22}$$

비틀림 강성계수는 Fig. 3의 단위 주름에 비틀림 모멘트 T 가 작용할 때 주름판 및 직교이방성 판의 비틀림각은 다음과 같다.

$$\phi_c = \frac{Tb}{GJ}, \phi_e = \frac{Tb}{G_{xy}J_e} \tag{23}$$

여기서 J, J_e 는 단위 주름 및 등가주름에 대한 비틀림 상수이다. 비틀림각이 서로 같다는 조건으로부터 비틀림 강성계수는 다음과 같이 된다.

$$D_{xy} = \frac{Gt^3}{12} \frac{s}{l} \tag{24}$$

한편 Fig. 3에서 굽힘모멘트 M 에 의한 푸아송 비 $\nu_{yx} = \epsilon_x/\epsilon_y$ 는 ν 와 같으므로 D_1 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_1 = \nu D_x \tag{25}$$

3. 수치결과

제안된 해석 방법에 대한 타당성을 검증하기 위해 Liew 등⁽⁹⁾의 결과 및 이 연구에서 추가로 수행한 유한요소 해석결과를 Table 1에 제시하였다. 이 연구의 유한요소 해석에서는 ANSYS를 이용하여 3차원 해석을 하였으며, SHELL63요소가 이용되었다. 고려된 주름판은 $a=b=2\text{ m}$, $t=0.02\text{ m}$ 이며, 주름 길이 $l=0.2\text{ m}$, 주름각은 $\theta=45^\circ$, 주름 높이 $h=0.03\text{ m}$ 및 주름 수는 10이다. 이 결과가 Liew

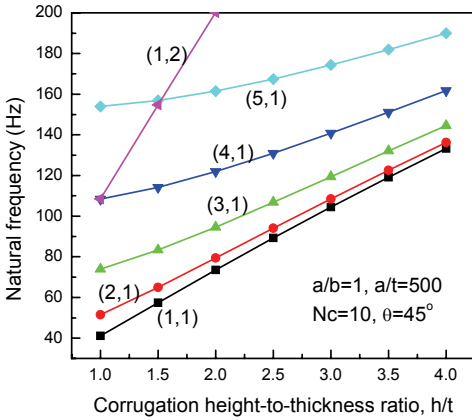


Fig. 4 Effect of corrugation height on the natural frequency

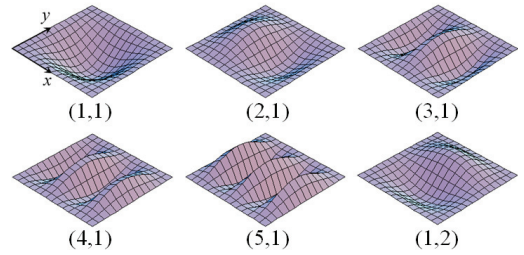


Fig. 5 Mode shapes of plate with a/b=1

Table 1 Frequency comparison of corrugated plate*

Mode	Present	Present-ANSYS		Liew et. al.[9]	
	Freq.(Hz)	Freq.(Hz)	Error**	Freq(Hz)	Error**
1	28.1498	27.486	2.42	28.588	-1.53
2	38.9525	39.439	-1.23	40.468	-3.75
3	60.3538	61.644	-2.09	63.276	-4.62
4	72.3478	69.059	4.76	72.597	-0.34
5	79.7186	79.358	0.45	80.888	-1.45
6	91.6409	93.285	-1.76	95.947	-4.49
7	95.4471	98.703	-3.30	98.058	-2.66
8	121.347	127.84	-5.08	125.51	-3.32
9	132.004	130.55	1.11	137.85	-4.24
10	139.757	133.42	4.75	139.07	0.49

* E= 30 GPa, ν= 0.3, ρ= 7830 kg/m³

** Error = $\frac{\text{Present} - \text{Ref}}{\text{Ref}} \times 100$

등의 결과보다 전반적으로 작은 값을 보이고 있다. 이는 Liew 등이 주름판을 직교이방성판으로 등가시킬 때 판의 등가판 두께를 주름판의 두께와 같게 취급하여 질량을 원래의 판보다 작게 취급하였기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 한편 ANSYS를 이용한 유한요소해와는 최대 5%의 차이를 보이고 있다. 전반적으로 모든 모드에 대해 참고자료와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

앞으로의 수치예에 사용될 주름판의 재료물성은 E= 210 GPa, ν= 0.3, ρ= 7850 kg/m³이다. Fig. 4에서는 a/b=1, a/t=500의 형상비를 갖고 주름각이 45°, 주름수가 10인 주름판에 대해 주름높이에 따른

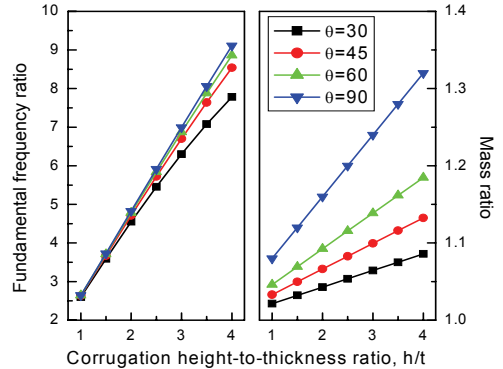


Fig. 6 Effect of corrugation height on the fundamental frequency

고유진동수 변화를 보이고 있다. 그림에서 (m, n)은 진동형상에서의 각 방향 반파수를 나타낸 것으로 m은 주름방향, n은 횡방향 반파수로 이해를 돕기 위해 Fig. 5에 진동형상이 제시되었다. Fig. 4에서 동일한 폭 방향 모드 수(n)에 대해 길이방향 모드 수(m)가 작을수록 주름높이에 대한 영향이 커 주름높이 변화에 진동수가 급하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 다시 말해 저차로 갈수록 주름높이의 영향이 커지며, 결과적으로 기본진동수에서 주름높이의 영향이 가장 크게 나타난다. 한편 주름 반대방향인 폭 방향 모드 n=2인 경우 주름높이에 대해 매우 급하게 진동수가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 그 방향으로의 강성이 주름높이에 대해 크게 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 한편 5차 진동모드는 작은 주름높이에서는 (1,2)이였지만 주름높이가 커지면서 (5,1)로 변경되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상 역시 주름높이가 커짐에 따라 폭 방향 강성계수가 증가하기 때문에 나타나는 것이다.

Fig. 6에서는 여러 가지 주름각에 대해 주름높이에

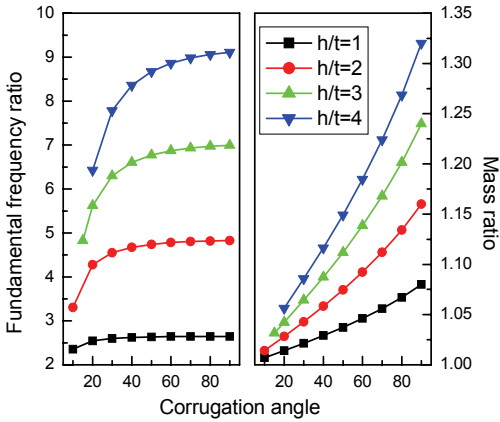


Fig. 7 Effect of corrugation angle on the fundamental frequency

따른 기본진동수의 변화를 보이고 있다. 여기서 진동수 비(또는 질량 비)는 주름판의 진동수(또는 질량)를 평판의 진동수(또는 질량)로 나눈 값이다. Fig. 4에서처럼 주름 높이가 커질수록 진동수는 증가를 한다. 특히 주름각이 클수록 주름높이에 대한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이는 높은 주름 높이에 대해 주름각이 클수록 횡방향 강성이 크게 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 주름높이를 크게 하면 진동수도 크게 증가하지만 큰 주름 높이는 국부 좌굴을 일으킬 수 있기 때문에 적절한 주름높이를 선정하는 것이 바람직하다. 또한 주름각이 클수록 주름높이에 따라 질량이 급격히 증가한다. 이것은 주름판을 설계할 때 주름높이에 따른 주름각을 적절히 선택하여야 함을 의미한다. 예로 $h/t=3$ 에 대해 $\theta=30^\circ$ 인 경우는 평판에 비해 진동수는 6배, 질량이 1.06배 정도이지만, $\theta=90^\circ$ 로 할 경우 $\theta=30^\circ$ 에 비해 진동수는 100%, 질량이 20% 정도로 증가하여 진동수 증가 효과보다는 질량 증가가 더 큰 문제가 될 수 있기 때문에 $\theta=30^\circ$ 로 하는 것이 경제적인 수 있다. 이는 Fig. 7에서도 확인할 수 있다.

Fig. 7은 주름각에 따른 기본진동수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 주름각이 커질수록 기본진동수가 초기에는 급격히 증가하지만 어느 이상이 되면 진동수 값은 거의 변하지 않는다. 특히 주름높이가 높을수록 주름각에 대한 영향이 커 진동수가 보다 민감한 반응을 보이고 있다. 한편 질량도 주름각이 커질수록 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

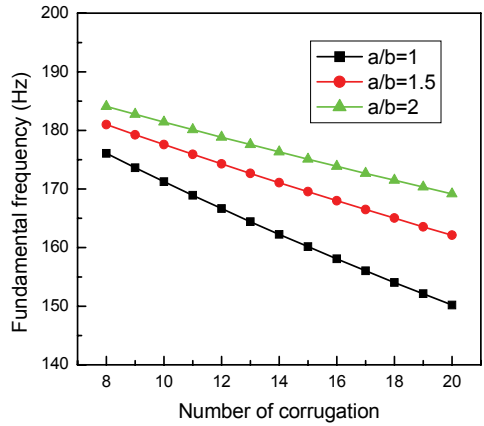


Fig. 8 Effect of corrugation number on the fundamental frequency

이들 거동으로부터 질량 증가 대비 보다 큰 진동수 증가 효과를 얻기 위해서는 주름높이에 따라 주름각을 적절히 선정하여야 한다는 것을 알 수 있다. 한 예로 $h/t=3$ 인 경우 $\theta=40^\circ$ 이상인 경우 진동수 변화가 적은 반면 질량은 급격히 증가하기 때문에 적정의 주름각은 40° 라고 할 수 있다.

한편 Fig. 8은 $b/t=200$, $h/t=2$, $\theta=60^\circ$ 인 주름판에 대해 주름수에 따른 기본진동수 변화를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 주름수가 많아질수록 진동수는 감소한다. 이는 동일한 판의 길이에 대해 주름수를 증가시킨다는 것은 주름의 단위 길이가 줄어들는 것을 의미한다. 주름의 단위 길이가 줄어들면 횡방향 강성이 감소를 한다. 즉 주름수의 증가는 횡방향 강성의 감소를 의미하므로 주름수 증가에 따라 강성 감소로 인해 진동수가 감소한다. 또한 질량도 주름수가 많아질수록 커지기 때문에 진동수 감소를 유발시킨다. 한편 a/b 의 형상비에 따라 주름판을 제작할 경우 a/b 의 형상비가 클수록(또는 주름방향의 길이가 길수록) 진동수 감소가 적다는 것을 알 수 있다. 이는 판의 a/b 가 클수록 주름수에 대한 영향이 작아 진동수에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다.

4. 결 론

사다리꼴 주름판에 대한 진동해석을 보다 간단히 수행하기 위해 일정 두께를 갖는 직교이방성판으로 등가시켰다. 직교이방성판으로 취급하기 위해 등가

굽힘 강성계수뿐만 아니라 등가 신장 강성계수도 유도하였다. 또한 해의 타당성을 검토하기 위해 참고 문헌의 결과와 비교/검토하였으며, 수치 예를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주름높이가 커질수록 진동수는 증가를 하며 기본진동수에 가장 큰 영향을 준다. 또한 주름 횡방향 모드수가 클수록 주름높이의 영향은 증가한다.

(2) 주름각이 커질수록 진동수는 급격히 증가하지만, 어느 이상이 되면 일정한 값으로 접근을 한다. 또한 주름각에 대한 영향은 주름높이가 클수록 증가한다. 질량 증가 대비 진동수 증가 효과를 얻기 위해서는 주름높이에 따라 주름각을 적절히 선정하여야 한다.

(3) 진동수는 주름각보다는 주름 높이에 매우 민감하게 작용하고 있어, 주름판의 진동수를 변경하기 위해서는 주름각보다는 주름 높이를 조절하는 것이 보다 효과적이다.

(4) 주름수가 많아질수록 진동수는 감소를 하며, 동일한 수로 주름을 잡을 경우 판의 주름 방향 길이가 커질수록 기본진동수는 증가한다.

References

(1) Rubino, V., Deshpande, V. S. and Fleck, N. A., 2009, The Dynamic Response of Clamped Rectangular Y-frame and Corrugated Core Sandwich Plates, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 28, No. 1, pp. 14~24.

(2) Zhang, J., Supernak, P., Mueller-Alander, S. and Wang, C. H., 2013, Improving the Bending Strength and Energy Absorption of Corrugated Sandwich Composite Structure, *Materials and Design*, Vol. 52, pp. 767~773.

(3) Yokozeki, T., Takeda, S., Ogasawara, T. and Ishikawa, T., 2006, Mechanical Properties of Corrugated Composites for Candidate Materials of Flexible Wing Structures, *Composites: Part A*, Vol. 37, No. 10, pp. 1578~1586.

(4) Ghabazi, P. and Golzar, M., 2013, *Mechanical*

Analysis of Trapezoidal Corrugated Composite Skins, *Applied Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, pp. 341~353.

(5) Haldar, S. and Sheikh, A. H., 2011, Bending Analysis of Composite Folded Plates by Finite Element Method, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 47, No. 4, pp. 477~485.

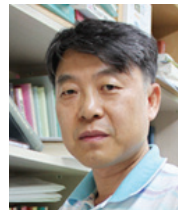
(6) Lee, S. Y., Wooh, S. C. and Yhim, S. S., 2004, Dynamic Behavior of Folded Composite Plates Analyzed by the Third Order Plate Theory, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, No. 7, pp. 1879~1892.

(7) Briassoulis, D., 1986, Equivalent Orthotropic Properties of Corrugated Sheets, *Computers & Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 129~138.

(8) Samanta, A. and Mukhopadhyay, M., 1999, Finite Element Static and Dynamic Analyses of Folded Plates, *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 3, pp. 277~287.

(9) Liew, K. M., Peng, L. X. and Kitipornchai, S., 2009, Vibration Analysis of Corrugated Reissner-Mindlin Plates Using a Mesh-free Galerkin Method, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 51, No. 9-10, pp. 642~652.

(10) Kim, S., Lee, H., Kim, J.-T. and Kim, J., 2010, Sound Insulation Design of the Corrugated Steel Panel Considering Local Resonance, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 20, No. 7, pp. 672~676.



Young-Wann Kim received his B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Chungnam National University. He has been a professor of Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University since 1997. His research interest includes the structural dynamics, FSI problems and weld residual stress etc.