

사각 주름판의 굽힘강성 및 굽힘해석 Bending Analysis and Flexural Rigidity of Rectangular Corrugated Plates

정 강* · 김영완**†

Kang Jung*, Young-Wann Kim**†

(접수일 : 2012년 05월 03일, 수정일 : 2012년 08월 27일, 채택확정 : 2012년 09월 04일)

Key Words : Equivalent Flexural Rigidity(등가 굽힘강성계수), Corrugated Plate(주름판), Orthotropic Plate (직교 이방성판), Bending Analysis(굽힘 해석)

Abstract : In this paper, the bending characteristics of the corrugated plates is analyzed. The trapezoidally, triangularly and sinusoidally corrugated plates are considered. The corrugated plate is treated as an orthotropic plate that has different flexural properties in two perpendicular directions. The equivalent bending and twisting rigidities for the equivalent orthotropic plates are derived. The equivalent flexural rigidities are estimated under the following postulations: (1) The angle of continuously corrugated plate is not changed after the deformation. (2) When the pure bending moment is applied in corrugated direction of the plate, the its plane is in pure bending. Several numerical examples are analyzed with the proposed method and compared with published results.

1. 서 론

주름판은 평판을 주름잡아 강성을 증대시킨 판 구조물로써 경량을 유지하며 부하능력을 개선한 것으로 우주항공, 조선 및 자동차 등의 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 이러한 주름판은 기하학적 형상으로 인하여 엄밀한 강성계수를 결정하는 데는 상당한 어려움이 뒤따라 활용 정도에 비해 주름판을 설계할 때 활용할 수 있는 기본 데이터가 제대로 마련되어 있지 않은 실정이다. 주름판을 해석하는 방법은 주름개개의 강성을 판에 고르게 분포 시켜 일정 두께를 갖는 직교 이방성판으로 간주하여 해석하는 방법이 있다^{1~4)}. 이 방법은 주름수가 비교적 많은 경우에 적용 가능하다. 그러나 판의 길이에 비해 주름 높이가 크고 주름수가 많지 않은 경우에 이 방법을 이용할 경우 많은 오차를 발생시킬 수 있어 주름을 개개의 탄성체 즉, 판으로 간주하여 해석을 하는 방법도 있다^{5,6)}. 그러나 이 방법은 주름수가 적은 경우에는 적

용할 수 있으나 주름수가 많은 경우에는 수식적으로 매우 복잡해져 많은 해석시간이 요구되며, 주름 형상이 복잡해질 경우 거의 해석이 불가능하다는 단점이 있다. 현재에는 보다 접근이 용이한 유한요소법을 이용한 해석이 주류를 이루고 있다. 그러나 유한요소법을 이용한 해석 결과에 대한 정확성을 기하기 위해서는 많은 요소로 분할하여야 하며, 이로 인해 많은 해석 시간이 요구된다. 또한 구조물의 모델이 변경될 때마다 프로그램을 다시 수정하여야 하는 등 많은 복잡한 요인이 있다. 한편 단순히 주름판 자체를 실제 구조물에 이용되기도 하지만 샌드위치 구조물^{7, 8)}을 설계할 때 코어 요소로도 널리 이용되고 있다. 일반적으로 샌드위치 구조물을 해석할 때 직교 이방성판으로 간주하여 해석을 한다. 이들 구조물의 역학적 특성을 해석하기에 앞서 코어요소에 대한 역학적 특성을 미리 구할 수 있다면 샌드위치 구조물을 쉽게 해석할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 파형, 삼각형, 사다리꼴형 주름판을

**† 김영완(교신저자) : 전남대학교 기계자동차공학부

E-mail : wannkim@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7285

*정 강 : 전남대학교 기계자동차공학부

**† Y. W. Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Chonnam National University.

E-mail : wannkim@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7285

*K. Jung : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Chonnam National University.

직교 이방성판으로 등가화하여 굽힘 해석을 수행하였다. 이를 위해 등가 직교 이방성판의 굽힘 및 비틀림 강성계수를 기하학적 및 대수적 방법에 의해 유도하여 해석에 적용하였다. 동일한 중량을 갖는 각종 주름판에 대해 서로의 굽힘 특성을 분석하였으며, 이론해의 타당성을 검증하기 위해 기존의 문헌자료와 비교·검토하였다.

2. 수식화

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 파형, 삼각형 및 사다리꼴형 주름판을 고려하였다. 여기서, a 및 b 는 주름판의 주름 방향인 x 및 주름 수직방향인 y 방향 길이이며, t 는 판의 두께이다.

Fig. 2는 각 주름판의 단위 주름 요소를 나타낸 것이다. 단위 주름에서 a_1 은 1/2 수평 방향 주름 길이

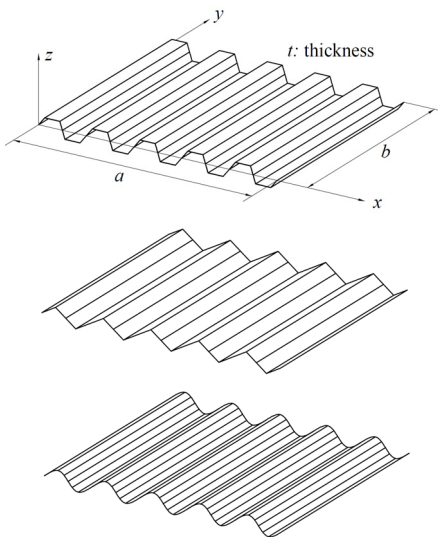


Fig. 1 Trapezoidally, triangularly and sinusoidally corrugated plate

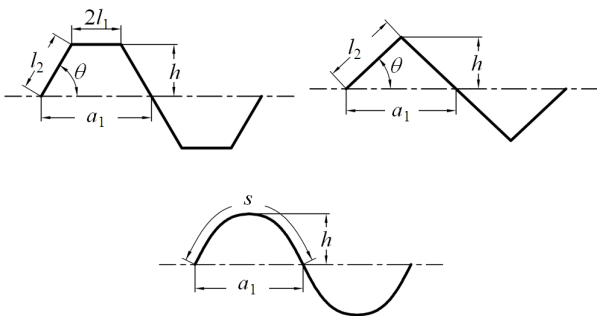


Fig. 2 Cross section geometry of unit corrugation

이며 h 는 주름높이, s 는 주름의 총 길이이다. 사다리꼴형 주름판에서 θ 는 주름각, l_1 은 수평 길이, l_2 는 경사 길이이다. 그리고 수평길이와 경사길이의 비 l_1/l_2 를 m_c (이하 주름길이 비)로 하였다. 사다리꼴 주름에서 $m_c = 0$ 이면 삼각형 주름이 된다.

본 연구에서는 주름판을 등가 직교이방성 평판으로 간주하여 해석에 이용하였다. 직교이방성판의 응력-변형률관계는 다음과 같다.

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

여기서 $\nu' = 1/(1 - \nu_x \nu_y)$ 이다. 직교이방성판에 적용될 강성계수는 다음과 같이 유도된다.

2.1 사다리꼴 및 삼각형 주름판의 강성계수

등가 직교이방성판의 굽힘 및 비틀림 강성계수는 등방성 판의 재료특성과 기하형상에 의해 결정된다. 주름판의 강성계수는 다음과 같이 가정된 후 유도된다. (a) 주름판의 각도는 변형 후에도 변하지 않으며, (b) 주름판의 주름진 방향에 순수 굽힘모멘트가 작용하면 판의 면에도 순수 굽힘모멘트가 작용한다.

주름판의 y 축에 대해 순수 굽힘 모멘트가 작용할 경우, 사다리꼴형 주름판에 대한 굽힘 모멘트와 곡률의 관계는 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 기하학적 적합 조건에 의하여 구한다. 그림에서 회전각에 대해 다음 관계가 성립한다.

$$\theta_4 = (\theta_1 + 2\theta_2 + \theta_3)/2 \quad (2)$$

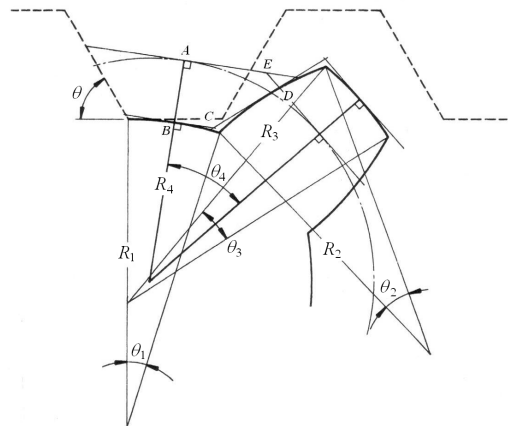


Fig. 3 Geometric relationship of curvatures in pure bending moment

경사면과 수평면에서 발생하는 곡률반경 R_1 , R_2 , $R_3 (= R_1)$ 와 중앙면에서의 곡률반경 R_4 와의 관계는 중앙면의 길이는 변형 후에도 변하지 않기 때문에 식(1)로부터 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$R_4 = \frac{(m_c + \cos\theta)}{m_c/R_1 + 1/R_2} \quad (3)$$

그러므로 y 축에 대해 순수 굽힘 모멘트 M_x 가 작용할 경우의 수평판의 곡률 R_1 과 경사판의 곡률 R_2 에 대한 모멘트 관계식을 식(3)에 적용하면 중앙면에 대한 굽힘 모멘트와 곡률의 관계는 다음과 같다.

$$M_x = \frac{D_x}{\rho_x}, \quad \rho_x = R_4 \quad (4)$$

따라서, 주름 방향의 강성계수는 다음과 같다.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{m_c + \cos\theta}{m_c + 1} = \frac{E a_1 t^3}{12 s (1-\nu^2)} \quad (5)$$

한편 주름판의 x 축을 따라 굽힘 모멘트가 작용할 때, 경사 길이 부분의 경우 주름각 θ 를 이루고 있는 경사판의 중립축에 대한 단면 2차 모멘트는 다음과 같은 과정을 통해 구해진다.

주름판의 중립축에 대해 θ 만큼 경사진 경사판의 단면 2차 모멘트는 다음과 같다.

$$I_x^{(1)} = \int z^2 dA = \frac{tl^3}{3} \sin^2\theta + \frac{lt^3}{12} \cos^2\theta \quad (6)$$

또한 수평길이 부분의 경우, 수평판의 중립축에 관한 단면 2차 모멘트는

$$I_x^{(2)} = \frac{l_1 t^3}{12} + l_1 t h^2 \quad (7)$$

이다. 따라서 단위 주름에 대한 단면 2차 모멘트는

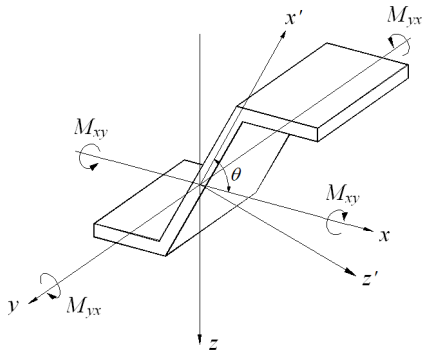


Fig. 4 Geometry of twisting moment M_{xy} and M_{yx}

$$I_x = I_x^{(1)} + I_x^{(2)} \quad (8)$$

이므로 주름 수직방향의 굽힘 강성계수 D_y 는 다음과 같이 된다.

$$D_y = \frac{E\{t^3(m_c + \cos^2\theta) + 4th^2(1 + 3m_c)\}}{12(1-\nu^2)(m_c + 1)} \quad (9)$$

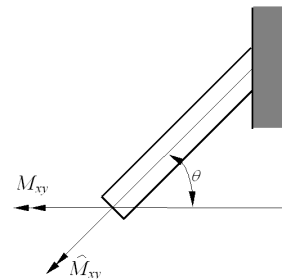
주름판의 비틀림 모멘트는 일반 평판과는 달리 $M_{xy} \neq M_{yx}$ 이므로 M_{xy} 와 M_{yx} 를 별도로 고려해야 한다. 먼저 Fig. 4와 같은 y 방향 단면에 대한 비틀림 모멘트 M_{yx} 와 곡률과의 관계는 경사면에 대한 등가의 전단탄성계수를 고려하여 수평면과의 합으로서 결정된다.

$$M_{yx} = 2G \frac{m_c + 1}{m_c + \cos\theta} \int z^2 dz \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 2D_{yx} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (10)$$

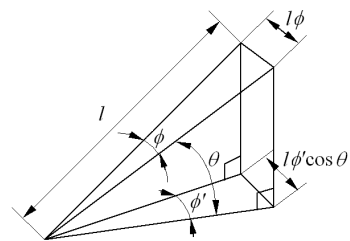
이므로 비틀림 강성계수 D_{yx} 는 다음과 같이 된다.

$$D_{yx} = \frac{G t^3}{12} \frac{m_c + 1}{m_c + \cos\theta} \quad (11)$$

한편, Fig. 4에서와 같이 비틀림 모멘트 M_{xy} 가 작용할 경우, x 방향 단면에 대한 비틀림 모멘트 M_{xy} 와 곡률과의 관계는 Fig. 5(a)에서와 같은 경사면에 작용하는 비틀림 모멘트 \hat{M}_{xy} 와 Fig. 5(b)에서와 같



(a) Relationship of M_{xy} and \hat{M}_{xy}



(b) Geometric relationship of twisting angles

Fig. 5 Geometry of twisting moment M'_{xy} .

은 비틀림 모멘트 \widehat{M}_{xy} 에 의한 곡률 $(\partial^2 w / \partial x \partial y)^{(a)}$ 의 중앙면 등가를 고려함으로써 결정된다. 즉, $\widehat{M}_{xy} = M_{xy} \cos \theta$, $\phi' = \phi / \cos \theta$ 이므로, 경사면에 대한 비틀림 모멘트와 곡률의 관계는 다음과 같다.

$$M_{xy} = 2 \frac{Gt^3}{12} \frac{1}{\cos^2 \theta} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^{(a)} \quad (12)$$

또한 수평면에 대해서는 다음과 같다.

$$M_{xy} = 2 \frac{Gt^3}{12} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^{(b)} \quad (13)$$

전체부재에 대한 등가의 곡률 $\partial^2 w / \partial x \partial y$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} &= \frac{\cos \theta}{m_c + \cos \theta} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^{(a)} + \frac{m_c}{m_c + \cos \theta} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^{(b)} \\ &= \frac{12M_{xy}}{2Gt^3} \frac{m_c + \cos^3 \theta}{m_c + \cos \theta} \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)로부터 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$M_{xy} = 2D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (15)$$

따라서 비틀림 강성계수 D_{xy} 는 다음과 같다.

$$D_{xy} = \frac{Gt^3}{12} \frac{m_c + \cos \theta}{m_c + \cos^3 \theta} \quad (16)$$

사다리꼴형 주름판의 강성계수식에서 $m_c = 0$ 로 하면 삼각형 주름판의 강성계수가 된다.

2.2 파형 주름판의 강성계수

$z = h \sin(\pi x / a_1)$ 의 형상을 갖는 정현파형 주름판의 경우 많은 문헌^{1, 3)}에서 강성계수식을 찾아볼 수 있다. 이때 호의 길이는 $s = a_1(1 + \pi^2 h^2 / 4a_1^2)$ 이며, 강성계수는 각각 다음과 같다.

$$D_x = \frac{a_1 E t^3}{12s(1 - \nu^2)} \quad (17)$$

$$D_y = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} + \frac{E t h^2}{2} \quad (18)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{G t^3}{12} \quad (19)$$

식에 나타난 것처럼 비틀림 강성이 방향에 관계없이 동일하다고 가정하여 해석을 수행하였다. 본 연구

에서는 단지 이 식을 파형 주름판의 강성계수식으로 인용하여 사용하였다.

2.3 직교이방성판의 굽힘

직교이방성판의 변형에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + \right. \quad (24)$$

$$\left. 2D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(D_{xy} + D_{yx}) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy$$

여기서, $D_1 = \nu D_x$ 이다.

한편 수직하중 $p(x, y)$ 에 의한 한일은 다음과 같다.

$$W = \int_A p(x, y) w dA \quad (25)$$

여기서 w 는 판의 수직변위로서 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} X_m(x) Y_n(y) \quad (26)$$

여기서, $X_m(x)$, $Y_n(y)$ 는 경계조건을 만족하는 함수로서 보함수를 이용하였으며, A_{mn} 은 각 모드에서의 진폭을 나타낸다.

본 연구에서는 다음과 같이 4변이 모두 고정된 사변 고정 경계조건을 고려하였다.

$$w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \text{ at } x = 0, a \quad (27a)$$

$$w = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \text{ at } y = 0, b \quad (27b)$$

수직하중 $p(x, y)$ 는 수직변위와 같이 2중 푸리에 급수를 이용하여 표현할 수 있다.

$$p(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (28)$$

주름판에 저장된 총 에너지는 아래와 같다.

$$\Pi = U_{\max} - T \quad (29)$$

식 (29)에 Rayleigh-Ritz법을 적용하면 식 (30)과 같은 굽힘해석을 위한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{F} \quad (30)$$

여기서 \mathbf{K} 는 강성행렬, \mathbf{F} 는 힘벡터이며, \mathbf{d} 는 변위벡터이다.

3. 결과 및 고찰

본 이론해의 검증을 위해 유한요소법을 이용하여 해석한 참고문헌³⁾의 결과와 Fig. 6에 비교하였다. 고려된 주름판은 $a=2\text{m}$, $b=2\text{m}$, $h=0.03\text{m}$, $t=0.02\text{m}$, $a_1=0.1\text{m}$, $\theta=45^\circ$ 이며, 10개의 주름을 갖는다. 탄성계수 $E=30\text{GPa}$, 프와송 비 $\nu=0.3$ 를 갖는 재료가 고려되었으며, 균일한 압력 분포 $p=100\text{Pa}$ 을 받고 있다. Fig. 6의 결과는 판의 중앙선($x=1\text{m}$, $y=1\text{m}$)을 따라 계산된 처짐량을 비교한 것으로 그림에 나타난 것처럼 본 결과가 이들의 ANSYS와의 결과보다는 약간 작은 값을 유한요소결과와는 약간 큰 값을 제시하고

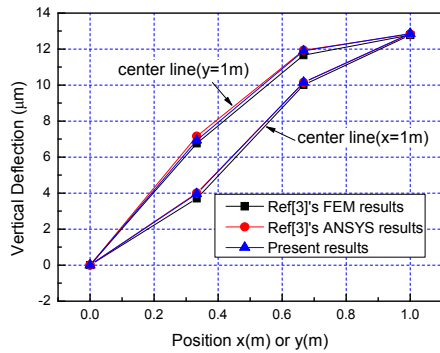
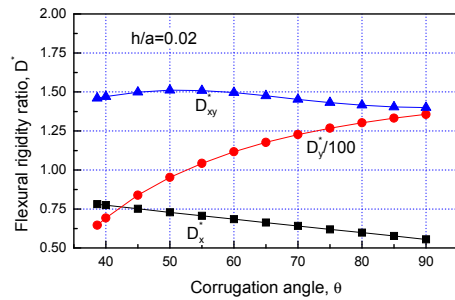
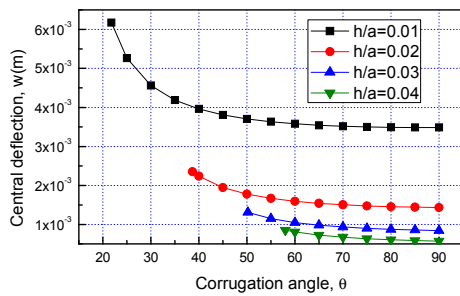


Fig. 6 Comparison of deflection



(a) Flexural rigidity



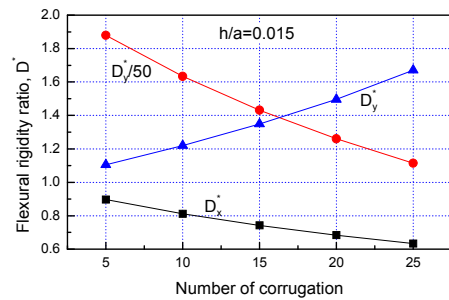
(b) Central deflection

Fig. 7 Effect of corrugation angle on flexural rigidity and deflection

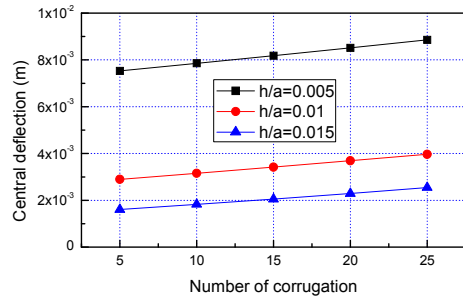
있지만 매우 잘 일치하고 있다.

앞으로 제시될 모든 예제에서는 알루미늄($E=72\text{GPa}$, $\nu=0.3$)이 고려되었으며, 판의 중앙에 10kN 의 집중하중이 작용하고 있다.

Fig. 7은 동일한 주름높이를 갖고, 주름수가 10인 사다리꼴형 주름판에 대해 주름각에 따른 영향을 나타낸 것이다. 주름판은 $a/b=1$, $a/t=200$ 의 형상비를 갖는다. 등가 굽힘강성계수의 변화를 보이고 있는 Fig. 7(a)에서의 강성계수비 D^* 는 주름판의 등가 강성계수들을 평판의 굽힘 강성계수 $D^{(0)}=Eh^3/12(1-\nu^2)$ 또는 비틀림 강성계수 $D_{xy}^{(0)}=Gt^3/12$ 로 나눈 값이다. 여기서는 주름높이 비 $h/a=0.02$ 에 대한 결과만 제시하였다. 그림에 나타난 것처럼 주름 방향의 등가 굽힘 강성계수 D_x 는 주름각이 커질수록 감소하지만 등가 비틀림 강성계수 D_{xy} 는 증가하다 정점을 이룬 후 다시 감소한다. 주름 수직방향의 등가 굽힘 강성계수 D_y 는 크게 증가하다 증가량이 완만해지는 것을 볼 수 있다. 평판을 주름판으로 제작할 경우 주름방향의 강성은 평판에 비해 줄어드는 것을 볼 수 있으나 주름 수직방향의 굽힘강성이나 비틀림 강성은 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 이로 인해 굽힘에 대한 저항력이 크게 증가한다. Fig. 7(b)는 다양한 주름높이에 대해 주름각에 따른 중앙점에서의 처짐을 보이



(a) Flexural rigidity



(b) Central deflection

Fig. 8 Effect of corrugation number on flexural rigidity and deflection

고 있다. 그림에 나타난 것처럼 주름각이 커짐에 따라 처짐값이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 강성계수 변화에서 볼 수 있었던 것처럼 주름각이 커짐에 따라 강성계수 D_y 가 급격히 증가하기 때문에 나타나는 현상이며, 어느 이상의 주름각에서는 거의 일정한 처짐값을 보이고 있다. 또한 주름높이가 클수록 발생하는 처짐량은 크게 줄어들지만 이 역시 어느 이상이 되면 줄어드는 비율이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 동일한 주름높이를 갖는 주름판에 대해 주름수에 따른 거동을 보이고 있다. 이 때 주름판의 형상비 $a/b=1.5$, $a/t=200$ 이며 주름각은 60° 이다. 그림에서처럼 주름수가 많아짐에 따라 단위 주름당의 비틀림 강성은 증가하지만 굽힘 강성은 오히려 감소하는 거동을 하고 있다. 이와 같이 굽힘강성의 감소는 처짐을 증가시키는 결과를 초래한다.

Fig. 9~11은 동일 중량을 갖는 파형, 삼각형, 사다리꼴형 주름판에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 고려된 주름판의 주름수는 8이며, $a/b=2$, $a/t=200$ 의 형상을 갖는다. 동일중량을 갖기 위해 파형 주름판을 기준으로 삼각형 및 사다리꼴형 주름판의 주름각을 선정하여 결정한다. 파형의 단위 주름의 길이를 s 라 할 때, 삼각형, 사다리꼴형 주름판이 동일중량이 되기 위해 다음과 같은 주름각을 갖는다.

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{a_1(m_c + 1) - s m_c}{s} \right] \quad (31)$$

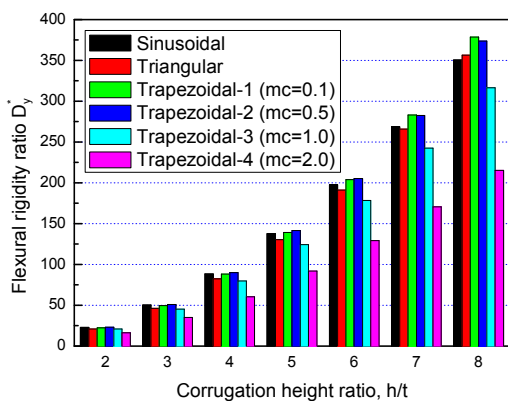


Fig. 9 Flexural rigidity for various corrugation heights

삼각형 주름판의 주름각은 유일한 값을 갖지만, 사다리꼴형 주름판의 주름각은 m_c 에 따라 다양해진다. 이 때 삼각형 주름판의 주름높이는 파형의 주름높이보다 항상 크다. 그러나 사다리꼴형 주름판의 주름높

이는 삼각형 주름판의 주름높이보다는 항상 작지만, 파형 주름판보다는 m_c 값에 따라 작을 수도, 클 수도 있다. 주름 수직방향의 굽힘 강성계수를 나타낸 Fig. 9에서처럼 주름 높이가 비교적 작은 경우에는 파형 주름판의 강성이 삼각형 주름판의 강성보다 크다. 그러나 사다리꼴형 주름판의 경우에는 파형 주름판보다 강성이 큰 경우도 있다. 한편 사다리꼴형 주름판의 경우 주름길이의 비 m_c 에 따라 강성이 증가하다 다시 감소하는 거동을 한다. 그림에서 가로축은 파형 주름판의 주름높이 비(h/t)를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 파형, 삼각형 및 $m_c=0.5$ 인 사다리꼴형 주름판들에 대해 중앙점에서의 처짐을 보이고 있다. 그림에서처럼 미소한 차이지만 사다리꼴형 주름판이 가장 작은 처짐을 보이고 있으며, 삼각형 주름판이 가장 큰 처짐을 보이고 있다. 이는 처짐을 지배하는 강성계수 변화를 나타낸 Fig. 9에서도 예측할 수 있는 결과이다.

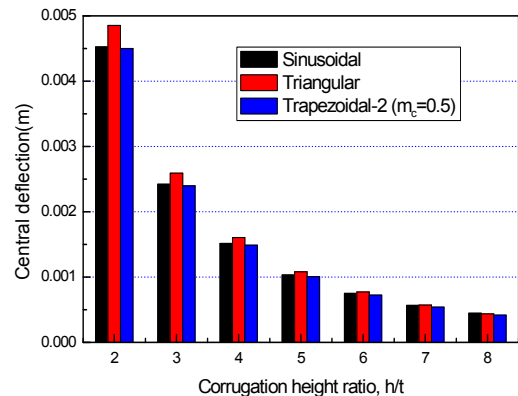


Fig. 10 Central deflection for various corrugation heights

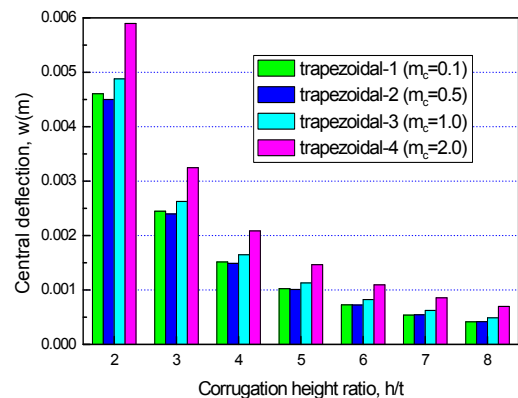


Fig. 11 Central deflection for various corrugation heights of trapezoidally corrugated plates

Fig.11에서는 다양한 m_c 에 따른 동일 중량의 사다리꼴형 주름판에 대해 중앙점에서의 처짐을 제시하였다. 그림에서처럼 $m_c=0.5$ 인 사다리꼴형 주름판이 가장 작은 처짐을 보이고 있으며 이를 기점으로 m_c 가 커지거나 작아짐에 따라 처짐이 증가하는 거동을 한다. 이와 같이 동일 중량에 대해 적절히 m_c 를 선택함으로써 굽힘에 대해 보다 효과적인 사다리꼴형 주름판을 설계할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 형태의 주름판을 직교이방성판으로 등가화하여 굽힘에 대해 이론적인 해석을 수행하였다. 이를 위해 등가 직교이방성판의 굽힘 및 비틀림 강성계수를 이론적으로 유도하여 해석에 적용하였다. 수치예를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유도된 강성계수를 이용하여 다양한 변수에 대해 쉽게 주름판의 굽힘해석을 수행할 수 있다.
- (2) 평판을 주름판으로 제작함으로써 주름 수직 방향의 굽힘강성과 비틀림 강성은 증가를 하나 주름방향의 굽힘강성은 감소를 한다.
- (3) 주름각이 커질수록 굽힘강성이 증가하며, 이로 인해 처짐이 급격히 감소를 하나 어느 이상의 주름각에서는 거의 일정한 값으로 수렴을 한다.
- (4) 주름수가 많아질수록 단위 주름당의 비틀림 강성은 증가하지만 굽힘강성은 감소하며, 굽힘강성의 감소로 인해 처짐이 증가를 한다.
- (5) 동일 중량을 갖는 경우 파형이나 삼각형 주름판에 비해 사다리꼴형 주름판에서 가장 효과적인 굽힘특성을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. D. Briassoulis, 1986, "Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets", Computers & Structures, Vol. 23, No. 2, pp. 129-138.
2. A. Samanta and M. Mukhopadhyay, 1999, "Finite element static and dynamic analyses of folded plates", Engineering Structures Vol. 21, pp. 277-287.
3. L.X. Peng, K.M. Liew and S. Kitipornchai, 2007, "Analysis of stiffened corrugated plates based on the FSDT via the mesh-free method", Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 49, pp.

- 364-378.
4. K.M. Liew, L.X. Peng and S. Kitipornchai, 2009, "Vibration analysis of corrugated Reissner - Mindlin plates using a mesh-free Galerkin method", Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 51, pp. 642-652.
5. S. Haldar, and A.H. Sheikh, 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. S.Y. Lee, S.C. Wooh and S.S. Yhim, 2004, "Dynamic behavior of folded composite plates analyzed by the third order plate theory", Int. J. of Solids and Structures, Vol. 41, No. 7, pp. 1879-1892.
7. W.S. Chang, E. Ventsel, T. Krauthammer, and J. John, 2005, "Bending behavior of corrugated-core sandwich plates", Composite Structures, Vol. 70, pp. 81-89.
8. T.-S. Lok and Q.-H. Cheng, 2000, "Elastic Stiffness Properties and Behavior of Truss-Core Sandwich Panel", J. of Structural Engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 552-559.