

論文

섬유 강화형 복합재료 주름판의 강성 및 진동 해석

정 강⁺, 김영완^{**}

Rigidity and Vibration Analysis on Fiber-Reinforced Composite Corrugated Plates

Kang Chung⁺ and Young-Wann Kim^{**}

ABSTRACT

In this study, the rigidities of fiber-reinforced composite corrugated plates are derived to achieve the weight reduction, high strength, and high stiffness. The vibration of the corrugated plates for all the conventional boundary conditions in the plates is analyzed numerically by applying the derived rigidities, and so the analysis system is programmed to obtain the results by using Visual Basic language. Consequently, the characteristics of fiber-reinforced composite corrugated plates can be easily investigated from the results provided by the programmed system.

초 록

본 연구에서는 보다 경량을 유지하면서 고강도 및 고강성을 갖는 섬유 강화형 복합재료 주름판의 합리적인 강성계수를 유도하고, 주름판에서 가능한 36개의 경계조건을 모두 만족시키는 수치적 전개 및 비주얼 베이직 언어를 이용한 해석 시스템을 구축하여 강성 및 진동 해석을 함으로써, 섬유 강화형 복합재료 주름판의 특성을 살펴본다.

1. 서 론

판 구조물은 구조물의 중요한 한 구성요소로서 많은 산업분야에서 취급되고 있고, 이를 보다 효과적으로 활용하기 위하여 많은 연구들이 행해져 왔다. 이들 연구는 대부분 경량을 유지하면서 고강도 및 고강성을 갖는 판 구조물의 개발에 집중되고 있다. 즉 일반 금속재료의 기계적 성질을 극복하는 재료의 개발에 많은 노력을 경주하고 있는 것이다. 이와 같이 경량을 유지하면서 고강도 및 고강성을 갖는 재료로서 복합재료와 주름판을 들 수 있다. 사실 이러한 복합재료와 평판을 주름잡아 경량을 유지하며 강도 및 강성 등의 부하능력을 개선한 주름판은 항공우주, 조선, 자동차 등의 산업분야에서 널리 이용되고 있다.

그러나 이러한 복합재료와 주름판은 그 기하학적인 형상으로 인해 합리적인 강성계수의 결정이나 진동 등과 같은 해석을 하는데 상당한 어려움이 있다. 그 동안 발표된

판 구조물에 관한 연구 논문들을 살펴보면, 근사해법을 이용하여 진동해석을 한 연구 논문들의 경우, 네변이 고정된 평판에 대해 유한차분법을 이용하여 진동해석을 한 논문[1-3], Galerkin 방법을 이용하여 진동해석을 한 논문[4-6], 보의 고유함수를 변위함수로 가정하고 Rayleigh-Ritz 방법을 이용하여 진동해석을 한 논문[7-10], 등을 들 수 있다. 또한 Yang[11]은 내부구속 상태하에서의 평판에 대한 진동을 해석하였고, Cheung[12]은 유한대판법을 이용하여 각종의 경계조건을 갖는 평판의 진동을 해석하였다. 이들 논문 외에도 평판에 관한 진동해석을 한 논문은 많은 발표가 있었다.

그러나 이 논문들은 주로 유한요소적인 해법을 이용함으로써 근사해를 구하고 있고, 또한 삼각함수형 보함수 (beam function)를 변위함수로 사용하여 해석함으로써, 복잡한 적분계산을 하는 불편함과 자유-자유, 단순지지-자유 등의 경계조건에서는 병진과 회전 모드를 별도로 작성하여야

⁺ 여수대학교 기계자동차공학부 기계공학전공, 교신저자(E-mail: ckang@yosu.ac.kr)

^{**} 여수대학교 기계자동차공학부 기계공학전공

하는 불편함을 지니고 있다.

특히 주름판에 대한 동적 문제를 취급한 논문은 Chen[13] 등이 사다리꼴형 주름판과 평판이 조립된 완전 자유의 경계조건을 갖는 패널에 대하여 F.E.M에 의한 해석을 하고서 F.F.T를 이용하여 진동실험을 한 논문과 같이 유한요소적 해석방법과 실험에 의존한 논문들이 대부분이다.

또한 주름판의 진동해석은 이러한 판 구조물들을 직교 이방성판으로서 간주할 경우, 강성계수의 해석이 선행되어야 한다. 이와 관련한 연구를 살펴보면, Seydel[14]은 파형 주름판에 대하여 주름진 방향이 일정한 방향을 갖고 있으면서 주름수가 많고 주름의 길이가 판의 측면길이에 비하여 매우 짧다면 직교이방성판으로 간주할 수 있다는 가정을 전제로 압축실험을 통하여 등가의 강성계수 산정식을 제시하였다. Fung[15]은 파형 주름판을 평판에 부착시킨 구성요소에 대하여 유한차분법을 이용, 직교이방성판의 방정식과 같은 형의 지배방정식을 유도하고 기하학적 해석방법을 제시하였다. Kinloch[16,17]는 사다리꼴형 주름판과 평판이 조립된 판넬에 대하여 합리적인 강성계수의 해석을 하고자 노력하였다. Perel[18]은 사다리꼴형 주름판에 대하여 하나의 주름요소에 대한 간단한 기하학적인 관계만을 이용함으로써 강성계수식을 구하였다. 이외 논문들의 경우도 대부분 근사적 해석 또는 실험적 방법에 의하여 주름판에 대한 강성계수식을 제시하고 있다.

물론 보다 경량을 유지하면서 고강도 및 고강성을 갖는 판 구조물로 최적인 것은 복합재료 주름판을 들 수 있다. 때문에 판 구조물로서 가장 요구되어지는 기계적 성질인 강성과 진동 특성 규명이 복합재료 주름판에도 요구된다. 그러나 이러한 복합재료 주름판의 강성 및 진동에 관련한 연구논문은 전무하다.

따라서 본 연구에서는 보다 경량을 유지하면서 고강도 및 고강성을 갖는 섬유 강화형 복합재료 주름판의 합리적인 강성계수를 유도하고, 주름판에서 가능한 36개의 경계조건을 모두 만족시키는 수치적 전개 및 비주얼 베이직 언어를 이용한 해석 시스템을 구축하여 강성 및 진동 해석을 함으로써, 섬유 강화형 복합재료 주름판의 특성을 살펴보고자 한다.

2. 수식화

2.1 복합재료 주름판의 강성계수

Fig. 1과 같이 섬유가 임의로 배열된 복합재료 미소요소 판의 경우, 미소요소의 수평방향을 x축, 그 직각방향을 y축으로 한 x-y-z 좌표계와 x축과 θ 를 이루는 섬유방향을 1축, 그 직각방향을 2축으로 한 1-2-3 좌표계에 있어서의 섬유

유 강화형 복합재료 판의 탄성계수와 프와송 비는 다음과 같다[19].

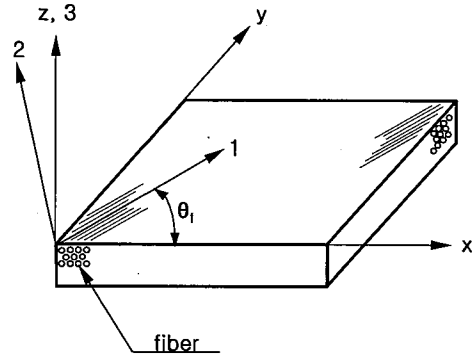


Fig. 1 Composite plate element in global coordinate system.

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{E_1}{m^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) n^2 m^2 + \frac{E_1}{E_2} n^4} \\
 \nu_{xy} &= \frac{\nu_{12}(n^4 + m^4) - \left(1 + \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_{12}} \right) n^2 m^2}{m^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) n^2 m^2 + \frac{E_1}{E_2} n^4} \\
 E_y &= \frac{E_2}{m^4 + \left(\frac{E_2}{G_{12}} - 2\nu_{21} \right) n^2 m^2 + \frac{E_2}{E_1} n^4} \\
 \nu_{yx} &= \frac{\nu_{21}(n^4 + m^4) - \left(1 + \frac{E_2}{E_1} - \frac{E_2}{G_{12}} \right) n^2 m^2}{m^4 + \left(\frac{E_2}{G_{12}} - 2\nu_{21} \right) n^2 m^2 + \frac{E_2}{E_1} n^4} \\
 G_{xy} &= \frac{G_{12}}{n^4 + m^4 + \left(\frac{4G_{12}}{E_1} (1 + 2\nu_{12}) + \frac{4G_{12}}{E_2} - 2 \right) n^2 m^2}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$ 이다.

본 연구에서 고려한 섬유 강화 복합재료 주름판의 형상은 Fig. 2와 같다. 여기서, a 와 b 는 주름판의 x, y방향 길이, a_1 은 1/2주름요소의 길이, θ 는 주름각, h 는 주름높이, ℓ 는 경사길이, ℓ_1 은 수평길이, t 는 판의 두께이다. 그리고 수평 길이와 경사길이와의 비 ℓ_1/ℓ 를 m_c 로 한다.

이러한 복합재료 주름판의 x축의 강성계수는 순수 굽힘 모멘트가 작용하는 경우의 기하학적 적합조건에 의하여 다음과 같다.

$$C_{mnl}^{kl} = a^2 \int_0^b \int_0^a \{ D_x X_m'' X_k'' Y_n Y_l + D_y X_m X_k Y_n Y_l'' + D_{xy} (X_m'' X_k Y_n Y_l' + X_m X_k'' Y_n Y_l') + 2(D_{xy} + D_{yx}) X_m' X_k' Y_n Y_l' \} dx dy$$

이며, (, ')는 x, y에 대한 공간미분을 나타낸다.

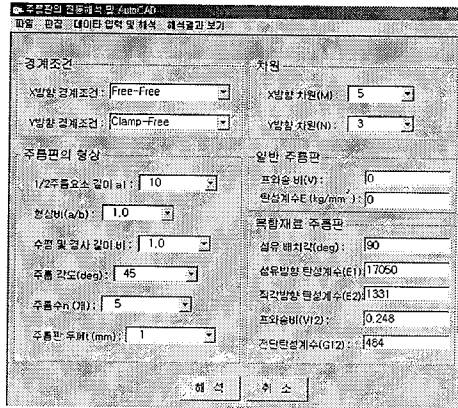


Fig. 4 Data input window in analysis system.

Table 1 Engineering properties of Graphite Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

$E_1(\text{kg/mm}^2)$	$E_2(\text{kg/mm}^2)$	$G_{12}(\text{kg/mm}^2)$	ν_{12}
17050	1331	484	0.248

* Layer thickness = 0.150mm

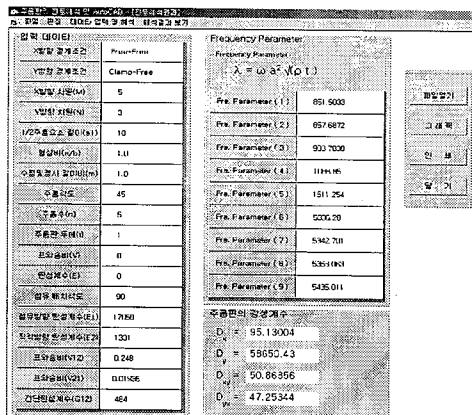


Fig. 5 Result window in analysis system.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 섬유 강화형 복합재료 주름판의 강성 및 진동 해석을 위하여, 주름판에서 가능한 36개의 경계조건을 모두 만족시키는 수치적 전개를 하고 비주열 베이직 언어를 이용한 해석 시스템을 구축하였다.

본 연구에서는 이와 같이 주름판에서 가능한 36개의 경계조건 가운데, Fig. 3과 같은 $x=0$, $x=a$ 에서 자유, $y=0$ 에서 고정, $y=b$ 에서 자유인 경계조건, 즉 외팔판 경계조건을 임의로 선택하고 구축된 해석 시스템을 이용하여 섬유 강화형 복합재료 주름판의 특성을 살펴보고자 한다.

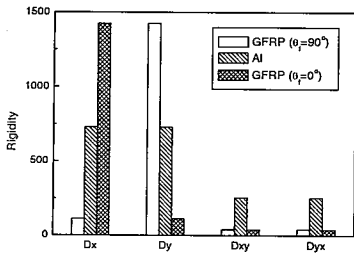
본 연구에서 적용한 복합재료는 Graphite Fiber Reinforced Polymer(GFRP)로서, 탄성계수와 프와송 비는 Table 1과 같다.

Fig. 4와 5는 각각 본 연구에서의 해석 시스템에 대한 데이터 입력창과 해석 결과창을 나타낸 것이므로 데이터 입력창에서 해석에 필요한 자료를 입력한 다음 해석단추를 누르면 주름판에 대한 강성계수 및 진동수를 얻을 수 있다.

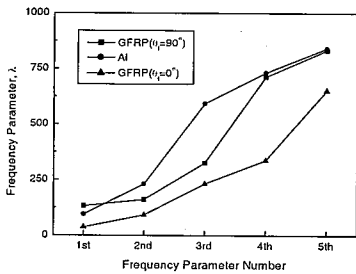
Table 2는 Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판에 대해 변위함수에서의 급수항 M, N 에 따른 최초 3차까지의 진동수 매개변수에 대해 수렴성을 검토한 것으로, 기하형상은 1/2 주름요소의 길이 $a_1=10$, 주름수 $n_c=5$, 주름판의 두께 $t=1$, 주름판의 수평길이와 경사길이의 비 $m_c(l_1/l)=1$, 형상비 $a/b=1$ 에 대하여 주름각 θ 가 45° , 섬유각 θ_f 가 45° 인 Graphite 섬유 강화형 복합재료(GFRP)이다. 표에 나타난 것처럼 급수항 M 에 대해 약간의 영향이 나타나고 있으며, N 에 대해서는 그다지 영향이 없는 것으로 나타났으며, (M, N)=(5, 3)이상에서는 거의 같은 값을 가지므로 앞으로의 모든 해는 (M, N)=(5, 3)을 이용하여 계산된다.

Table 2 Convergence study of frequency parameter of GFRP corrugated plate with $\theta=45^\circ$, $\theta_f=45^\circ$

(M,N)	Frequency Parameter, λ_{mn}			
	λ_{11}	λ_{21}	λ_{12}	λ_{31}
2,2	273.2776	317.8457	1712.601	-
2,3	273.2776	317.8159	1712.601	-
2,4	273.2776	317.7919	1712.601	-
2,5	273.2776	317.7880	1712.601	-
3,2	273.2647	317.8457	1712.559	489.1724
3,3	273.2646	317.8159	1712.559	489.0377
3,4	273.2645	317.7919	1712.559	488.8701
3,5	273.2645	317.7880	1712.559	488.8495
4,2	273.2647	315.2876	1712.559	489.1724
4,3	273.2646	315.2545	1712.559	489.0377
4,4	273.2645	315.2280	1712.559	488.8701
4,5	273.2645	315.2238	1712.559	488.8495
5,2	273.2550	315.2876	1712.026	485.6418
5,3	273.2534	315.2545	1712.025	485.5118
5,4	273.2531	315.2280	1712.021	485.3186
5,5	273.2530	315.2238	1712.021	485.2976



(a) Rigidity



(b) Frequency parameter (λ)

Fig. 6 Rigidities and frequency parameters of Al and GFRP flat plates.

3.1 복합재료주름판과 일반주름판의 비교

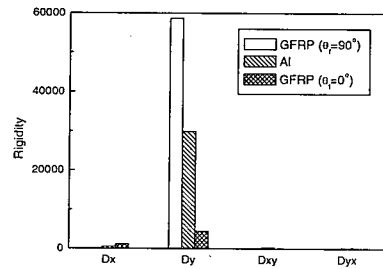
본 절에서는 Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판의 강성 및 진동 해석 결과를 알루미늄 재료 주름판의 경우와 비교함으로써 복합재료 주름판의 특성을 살펴보고자 한다.

해석 모델은 주름판의 기본 형상 데이터로서 1/2 주름 요소의 길이 $a_1=10$, 주름수 $n_c=5$, 주름판의 두께 $t=1$, 주름판의 수평길이와 경사길이의 비 $m_c(l_1/l)=1$, 형상비 $a/b=1$ 에 대하여, 각각 주름각 θ 가 0°(평판)와 45°일 때의 알루미늄(Al)과 섬유각 θ_f 가 0°와 90°인 Graphite 섬유 강화형 복합재료(GFRP)이다.

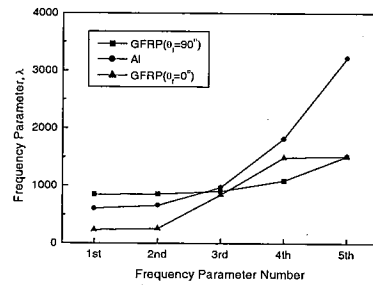
사용된 재료의 물성치는 Graphite 섬유 강화형 복합재료(GFRP)의 경우 Table 1과 같고, 알루미늄(Al)의 경우 탄성계수 E 는 7964kg/mm², 프와송 비 ν 는 0.3이다.

그 해석 결과는 주름각 $\theta=0^\circ$ 의 경우 Fig. 6에 각각의 강성계수와 최초 5차까지의 진동수매개변수(λ)를 나타냈으며, Fig. 7에는 주름각 $\theta=45^\circ$ 일 때 강성계수와 진동수매개변수(λ)를 나타냈었다.

주름각이 $\theta=0^\circ$, 즉 평판의 경우의 Fig. 6에 나타난 것처럼 굽힘 강성계수 D_x 는 섬유각이 $\theta_f=0^\circ$ 일 때의 GFRP가 Al보다 거의 2배 정도 크고, D_y 는 D_x 의 1/13정도로 현저히 작다. 물론 $\theta_f=90^\circ$ 일 때는 $\theta_f=0^\circ$ 인 경우의 정반대로서 D_x , D_y 는 각각 $\theta_f=0^\circ$ 일 때의 D_y , D_x 와 같다. 비틀림 강성계수는 공히 $D_{xy}=D_{yx}$ 이고 보다 6배 이상 작다. 진동수는 $\theta_f=90^\circ$ 일



(a) Rigidity



(b) Frequency parameter (λ)

Fig. 7 Rigidities and frequency parameters of Al and GFRP corrugated plates with $\theta=45^\circ$.

때의 GFRP가 1차 진동수의 경우 가장 크고 2차 이후에는 Al이 크다. $\theta_f=0^\circ$ 일 때의 GFRP 진동수는 3가지 중 전차에 걸쳐서 제일 작게 나타나고 있다.

주름각 $\theta=45^\circ$ 인 주름판의 경우를 나타내는 Fig. 7에서처럼 고려된 모든 모델에 대해 y 방향 굽힘강성계수 D_y 가 기타 강성계수에 비하여 월등히 크고, 특히 섬유각 $\theta_f=90^\circ$ GFRP의 D_y 가 현저히 크다. 진동수는 $\theta_f=90^\circ$ 일 때의 GFRP가 2차 진동수까지 가장 크고 그 다음으로 Al, $\theta_f=0^\circ$ GFRP 순으로 나타나며, 3차 진동수 이후는 Al, $\theta_f=0^\circ$ GFRP, $\theta_f=90^\circ$ GFRP 순으로 크다.

한편 재료물성에 관계없이 모든 판의 경우 주름각 $\theta=45^\circ$ 인 경우 주름각 $\theta=0^\circ$ 인 경우보다 모든 진동차수에서 진동수가 월등히 크게 나타난다.

이상의 해석 결과에서, Graphite 섬유 강화형 복합재료 판의 섬유 강화 효과는 섬유각 방향 강성의 경우 13배 정도까지 상당히 향상됨을 알 수 있다. 또 이러한 섬유 강화 효과는 형상을 주름잡아준 주름판에도 그대로 영향을 미쳐 섬유각이 $\theta_f=90^\circ$ 일 때, 그 방향의 강성과 진동수도 커다란 향상을 가져옴을 알 수 있다.

3.2 섬유각의 영향

본 절에서는 Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판의 섬유각(θ_f)에 따른 강성 및 진동 해석 결과를 살펴본다.

해석조건은 1/2주름요소의 길이 $a_1=10$, 주름수 $n_c=5$, 주름판의 두께 $t=1$, 주름판의 수평길이와 경사길이의 비 $m_c(\ell_1/\ell)=1$, 형상비 $a/b=1$ 에 대하여, 각각 주름각 θ 가 0° (평판)와 45° 일 때의 Graphite 섬유 강화형 복합재료(GFRP)이다.

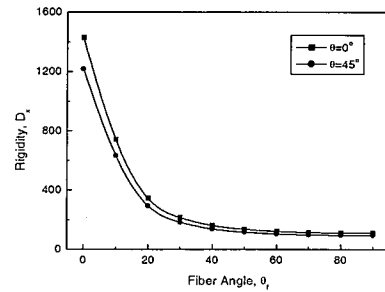
Fig. 8은 고려된 주름각 $\theta=0^\circ, 45^\circ$ 에 대해 섬유각 변화에 따른 굽힘 강성계수 D_x, D_y 와 비틀림 강성계수 D_{xy}, D_{yx} 의 변화를 나타낸 것이다. 굽힘 강성계수 D_x 는 주름각이 $\theta=0^\circ$ 와 $\theta=45^\circ$ 경우 거의 비슷하고 섬유각이 $\theta_f=0^\circ$ 일 때 가장 크다. 또 섬유각이 커지면서 강성계수 D_x 가 급격히 감소하다가 $\theta_f=30^\circ$ 일 때를 기점으로 그 이후에서는 거의 비슷한 값을 갖는다. 굽힘 강성계수 D_y 는 주름각이 $\theta=45^\circ$ 인 경우 $\theta=0^\circ$ 인 경우보다 월등히 크고, 섬유각의 변화에 따라 초기에는 큰 변화가 없다가 $\theta_f=60^\circ$ 일 때를 기점으로 그 이후에서는 급격히 커진다. 또 주름각 $\theta=0^\circ$, 즉 평판의 경우는 섬유각에 관계없이 주름각 $\theta=45^\circ$ 주름판에 비해 매우 작고 거의 비슷하다. 비틀림 강성계수 D_{xy} 와 D_{yx} 는 서로 비슷한 거동을 하고 있으며 그 값도 비슷하다. 주름각이 $\theta=45^\circ$ 인 경우가 $\theta=0^\circ$ 인 경우보다 약간 크며, 특히 섬유각이 $\theta_f=45^\circ$ 일 때 최대이다.

한편 Fig. 9는 주름각 $\theta=0^\circ$ 와 45° 인 각각의 주름판에 대해 섬유각의 변화에 따른 최초 5차까지의 진동수변화율(Frequency Change Percentage, FCP)를 보여 주고 있다. 이때 섬유각에 따른 진동수의 변화를 다음과 같이 섬유각 $\theta_f=0^\circ$ 일 때의 진동수매개변수를 기준으로 백분율로 계산하였다.

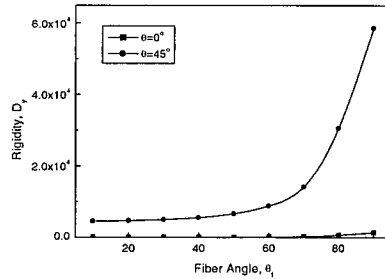
$$\text{Frequency Change Percentage} = \frac{\lambda_{v_f} - \lambda_{v_f=0}}{\lambda_{v_f=0}} \times 100(\%)$$

여기서 $\lambda_{v_f=0}$ 는 섬유각 $\theta_f=0^\circ$ 일 때의 진동수매개변수이고 λ_{v_f} 는 임의의 섬유각에 대한 진동수매개변수를 나타낸다.

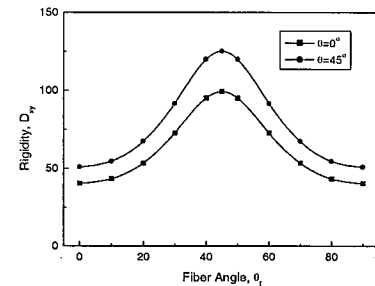
주름각 $\theta=0^\circ$ 인 주름판의 경우를 나타내는 Fig. 9(a)처럼 1차 진동수 즉, 기본진동수는 섬유각에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 섬유각 $\theta_f=60^\circ$ 까지는 기본진동수가 서서히 증가하다가 $\theta_f=60^\circ$ 일 때를 기점으로 그 이후에서는 급격히 증가하고 있다. 그러나 1차를 제외한 다른 진동차수에서 섬유각에 따라 진동수의 변화가 규칙적이지 않다. 전반적으로 섬유각이 90° 일 때 가장 큰 진동수를 갖지만 2차 진동수의 경우에는 섬유각이 45° 일 때 가장 큰 진동수를 갖는다. 한편 주름각 $\theta=45^\circ$ 일 때의 진동수변화를 나타내는 Fig. 9(b)에 나타난 것처럼 1, 2차 진동수가 섬유각에 따라 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 섬유각 $\theta_f=60^\circ$ 까지는 기본진동수가 서서히 증가하다가 $\theta_f=60^\circ$ 일 때를 기점으로 그 이후에서는 급격히 증가하고 있다. 이것을 제외



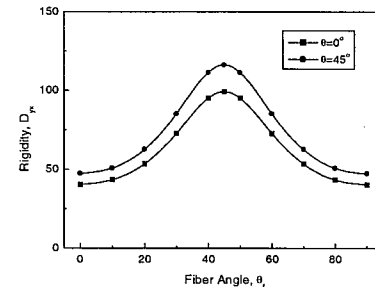
(a) Bending rigidity, D_x



(b) Bending rigidity, D_y

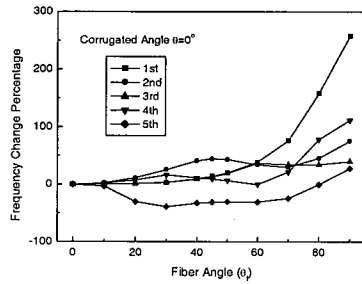


(c) Twisting rigidity, D_{xy}

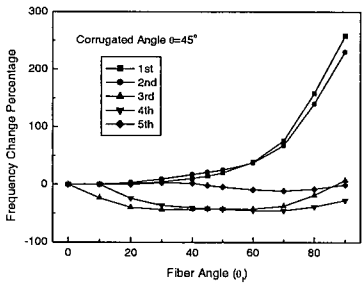


(d) Twisting rigidity, D_{yx}

Fig. 8 Variation of bending and twisting rigidities with fiber angle θ_f for GFRP corrugated plates.



(a) Corrugation angle $\theta=0^\circ$



(b) Corrugation angle $\theta=45^\circ$

Fig. 9 Variation of frequencies with fiber angle θ_f for GFRP corrugated plates.

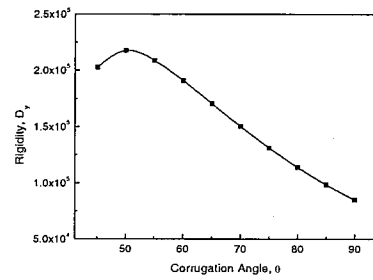
한 다른 진동차수에서는 진동수가 감소하다 섬유각 $\theta_f=45^\circ$ 를 기점으로 다시 증가하는 것을 볼 수 있으나 1, 2차에서의 진동수에 비해 섬유각의 영향이 비교적 작다.

이상의 해석 결과로서, Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판의 섬유 강화 효과는 섬유각이 $\theta_f=60^\circ$ 이상인 경우에 그 효과가 있음을 알 수 있다. 특히 비틀림 강성계수 D_{xy} 와 D_{yx} 는 섬유각이 $\theta_f=45^\circ$ 일 때 최대임을 알 수 있다.

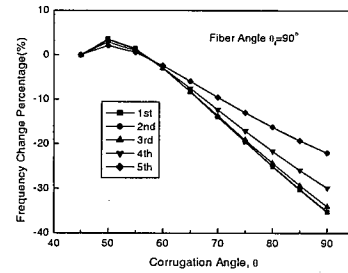
3.3 동일 중량하의 복합재료 주름판에 대한 고찰

본 절에서는 동일중량하의 Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판의 주름각 θ 에 따른 강성계수 D_y 와 진동수의 변화를 살펴보고자 한다.

Fig. 10은 섬유각 $\theta_f=90^\circ$ 일 때 동일중량하에서 복합재료 주름판의 주름각 θ 에 따른 강성계수 D_y 와 진동수의 변화를 나타내고 있다. 이 때의 해석조건은 $1/2$ 주름요소의 길이 $a_l=10$, 주름수 $n_c=5$, 주름판의 두께 $t=1$, 형상비 $a/b=1$ 일 때의 Graphite 섬유 강화형 복합재료(GFRP)이다. 동일중량이 되기 위한 주름판의 형상은 주름각 $\theta=45^\circ$, 주름판의 수평 길이와 경사길이의 비 $m_c(l_1/l)=0$, 즉 산형 주름판을 기준으로 주름각의 변화에 따라 동일 중량의 사다리꼴 주름판이 된다. 그림에 나타난 것처럼 강성계수 D_y 와 진동수가 주



(a) Rigidity variation



(b) Frequency variation

Fig. 10 Variation of rigidities and frequencies with corrugation angle θ GFRP corrugated plates with $\theta_f=90^\circ$ under same weight.

름각 $\theta=50^\circ$ 일 때 가장 크게 나타나며, 주름각이 커질수록 강성계수와 진동수는 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 저차에서의 진동수가 주름각의 영향을 크게 받는다는 것을 볼 수 있으며, 고차로 갈수록 그 영향은 작아지는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 섬유 강화형 복합재료 주름판의 강성계수를 유도하고, 주름판에서 가능한 36개의 경계조건을 모두 만족시키는 수치적 전개 및 비주열 베이직 언어를 이용한 해석 시스템을 구축하여 강성 및 진동 해석을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Graphite 섬유 강화형 복합재료 판의 섬유 강화 효과는 섬유각 방향 강성의 경우 13배 정도이고, 형상을 주름 잡아준 주름판에도 그대로 영향을 미쳐 섬유각이 $\theta_f=90^\circ$ 일 때 그 방향의 강성과 진동수도 커다란 향상을 가져온다.
- 2) Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판의 섬유 강화 효과는 섬유각이 $\theta_f=60^\circ$ 이상인 경우에 그 효과가 있고, 비틀림 강성계수 D_{xy} 와 D_{yx} 는 섬유각이 $\theta_f=45^\circ$ 일 때 최대이다.

3) 동일중량하의 Graphite 섬유 강화형 복합재료 주름판의 최적 형상은 주름판의 주름각이 $\theta=50^\circ$ 인 사다리꼴 주름판이다.

참고문헌

- 1) K. Hidaka, "Vibration of a Square Plate Clamped at Four Edges," *Math. Jap.*, Vol. 2, 1951, pp. 97-101.
- 2) T. Nishimura, "Studies on Vibration Problems of Flat Plates by Means of Difference Calculus," *Proc. 3d Jap. Natl. Cong. Mech.*, 1953, pp. 417-420.
- 3) M. Abramowitz and W. F. Cahill, "On the Vibration of a Square Clamped Plate," *J. Assoc. Comput. Mech.*, Vol. 2, No. 3, 1955, pp. 162-168.
- 4) K. Munakata, "On the Vibration and Elastic Stability of a Rectangular Plate Clamped at Its Four Edges," *J. Math. & Phys.*, Vol. 31, No. 1, 1952, pp. 69-74.
- 5) M. Stanisic, "An Approximate Method Applied to the Solution of the Problem of Vibrating Rectangular Plates," *J. Aeron. Sci.*, Vol. 24, No. 2, 1957, pp. 159-160.
- 6) L. Y. Aynola, "Methods of Investigating Elastic Plate Vibrations," *Inz. Zhurnal*, Vol. 3, No. 2, 1963, pp. 312-321.
- 7) D. Young, "Vibration of Rectangular Plate by the Ritz Method," *J. Appl. Mech.*, Vol. 17, No. 4, 1950, pp. 448-453.
- 8) J. Nagaraja and S. S. Rao, "Vibration of Rectangular Plates," *J. Aeron. Sci.*, Vol. 20, No. 12, 1953, pp. 855-856.
- 9) G. B. Warburton, "The Vibration of Rectangular plate," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Ser. A, Vol. 168, No. 12, 1954, pp. 371-384.
- 10) A.W. Leissa, "The Free Vibration of Rectangular Plates," *J. Sou. & Vib.*, Vol. 31, No. 3, 1973, pp. 257-293.
- 11) W. H. Yang, "Vibration of a Plate with Internal Constraints," *J. Appl. Mech.*, 1974, pp. 1072-1074.
- 12) Y. K. Cheung and M. S. Cheung, "Flexural Vibration of Rectangular and Other Polygonal Plates," *J. ASCE*, Vol. 97, EM2, 1971, pp. 391-411.
- 13) F. H. K. Chen and T. G. Carne, "Vibration Analysis of Corrugation-Stiffened Panels," *SAE Trans.*, Vol. 87, No. 2, 1979, pp. 1705-1717.
- 14) V. E. Seydel, "Schubknickversuche mit Wellblechtafeln," *DVL-Jahrbuch*, 1931, pp. 233-245.
- 15) Y. C. Fung, "On Corrugation-Stiffened Panels," Calif. Inst. Tech. GA, 1962.
- 16) H. Kinloch, "An Experimental and Theoretical Investigation of Orthotropic Plate Structure," *Thin Walled Structure Symposium at Swansea*, 1967, pp. 213-299.
- 17) H. Kinloch, "Analysis and Design of Anisotropic Plate Structures with Particular Reference to Decking System," *Thin Walled Structure*, 1967, pp. 271-299.
- 18) D. Perel, "The General Instability of Infinitely Long Trapezoidally Corrugated Plates Under Shear," Thesis for the Degree of Ph. D., Syracuse Univ., 1976.
- 19) Michael W. Hyer, "Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials," McGraw-Hill, 1998, pp. 54.
- 20) R. D. Blevins, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," Litton Educational Publishing, Inc., 1979.