

〈論 文〉

외팔형 복합재료 및 혼합적층 사각판의 자유진동해석

이영신* · 최명환**

(1993년 1월 13일 접수)

Free Vibration Analysis of Cantilevered Composite and Hybrid Composite Rectangular Plates

Young-Shin Lee and Myoung-Hwan Choi

Key Words: Free Vibration(자유진동), Composite Plate(복합재료판), Hybrid Composite Plate(혼합적층판), Mode Shape(모드형상)

Abstract

This work presents the experimental and FEM results for the free vibration of cantilevered, symmetrically and antisymmetrically laminated composite rectangular plates. The natural frequencies, mode shapes and contour plots of a number of CFRP, GFRP, CFRP-Aluminum, GFRP-Aluminum and CFRP-GFRP hybrid composite plates are experimentally obtained. Determination of Young's modulus and test procedures are described. The natural frequencies are determined for a wide range of parameters: e.g., composite material constants, fiber angles and stacking sequences. Natural frequency and nondimensional frequency parameter results are compared with the finite element analysis and existing literatures. Agreement between experimental and calculated frequencies is excellent. The effects of varying the parameters upon the free vibration frequencies and mode shapes are discussed.

———— 기 호 설 명 ————			
a, b	: 사각판의 길이와 폭	M	: 질량행렬
C	: 감쇠행렬	p	: 굽힘시험에서의 하중
D_{11}, D_{22}	: 굽힘 강성계수 $D_{11} = E_1 t^3 / 12 (1 - \nu_{12} \nu_{21})$ $D_{22} = E_2 t^3 / 12 (1 - \nu_{12} \nu_{21})$	t	: 판두께
E_1, E_2	: 탄성계수	u	: 노달변위벡터
f	: 고유진동수 (Hz)	x, y, z	: 판의 직교좌표
F	: 하중함수	θ	: 섬유방향각
G_{12}	: 전단탄성계수	λ	: 무차원 진동수 매개변수 $\lambda = \omega a^2 \sqrt{(\rho t / D_{11})}$
I	: 단면 2차 모멘트	ν_{12}, ν_{21}	: 푸아송비
K	: 강성행렬	ρ	: 재료의 밀도
L	: 굽힘 시험편의 길이	ω	: 각진동수 (radians/second)
m, n	: 모드형상에서 x 와 y 방향 반파의 수		

1. 서 론

현대의 공학설계에서는 재료 고유의 성질을 최적화하는 방향으로 재료의 사용을 요구하고 있다. 이

*정회원, 충남대학교 기계설계공학과

**충남대학교 대학원 기계설계공학과

최적설계에 대해서 가장 적절한 재료의 일반적인 부류는 복합재료인데, 섬유보강 복합재료는 중량에 비해서 강도나 강성이 매우 우수하기 때문에 구조물에 적용이 급속도로 증가하고 있다. 이에 따라 복합재료의 구조적 요소로서의 진동특성에 대한 더 많은 정보를 필요로 하고 있다. 특히 복합재료의 구조적 요소 가운데 외팔형 사각판은 항공기 날개나 fan blade 등이 이상화된 형태라 할 수 있다.

등방성 외팔형판의 진동해석은 많은 연구자들에 의해서 오래전부터 이루어져 왔다.^(1~4) Young⁽²⁾과 Leissa⁽³⁾는 Ritz법을 채용함으로써 사각판 진동의 해석적 결과를 얻었으며, Gorman⁽⁴⁾은 중첩법(superposition method)을 사용하여 외팔형판의 정확한 급수형태의 해를 얻었다. 복합재료 사각판에 대해서, Mohan과 Kingsbury⁽⁵⁾ 그리고 Nair와 Durvasula⁽⁶⁾는 이방성 단일적층판들에 대해서 해를 구하였고, Crawley⁽⁷⁾는 실험과 FEM을 통해서 탄소 섬유보강 복합재료 외팔보판과 혼합적층 외팔판의 고유진동수와 모드형상을 구하였다. 최근에 이르러 Narita와 Leissa⁽⁸⁾는 Ritz법을 이용하여 대칭으로 적층된 외팔형 사각판의 자유진동에 대한 해석적 방법을 통하여 정확한 수치적 결과를 얻었다. 그러나 복합재료의 직교이방성, 적층각 그리고 적층순서 등의 다양한 매개변수를 가지고 제작되는 복합재료 외팔형판에 대한 믿을 만한 결과는 부족한 상태이다. 또한 혼합적층 외팔형 정사각판에 대한 진동해석 결과도 부족하다.

본 연구의 목적은 복합재료 외팔형 정사각판의 동적거동, 즉 고유진동수와 모드형상을 실험을 통하여 파악하는데 있다. 또한 실험결과들의 비교를 위해서 FEM 해석을 수행하였다. 실험과 FEM의 결과들은 고유진동수(Hz)로 구하여 무차원 진동수 매개변수로 나타내었다. 그리고 외팔형 정사각판의 3차원 모드형상과 contour plots을 제시하여 각종 적층판의 동적거동을 규명하였다.

2. 실험

2.1 시편

실험을 통하여 강판, CFRP(carbon fiber reinforced plastics : 탄소섬유강화 플라스틱), GFRP(glass fiber reinforced plastics : 유리섬유강화 플라스틱) 그리고 aluminum과 복합재료의 혼합적층(hybrid composite) 정사각판의 자유진동거동이

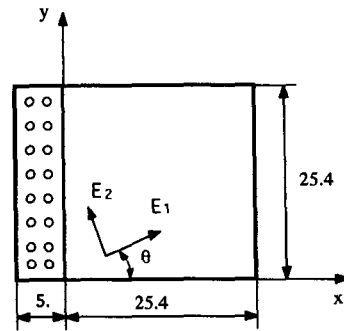


Fig. 1 Geometry and coordinate system of a plate

Table 1 Dimensions of plate specimens

Designation	Stacking sequence	Thickness(mm)	
		CFRP	GFRP
A	$[0^\circ]_{20}$	2.8	2.3
B	$[0^\circ/90^\circ]_{10}$	2.9	2.6
C	$[+45^\circ]_{20}$	2.9	3.3
D	$[+45^\circ/-45^\circ]_{10}$	2.8	2.4
E	Steel	2.0	
F	Aluminum	1.1	
G	$[AL/(0^\circ)_{10}/AL]$ HYBRID	4.0	
H	$[AL/(0^\circ)_{10}/AL]$ HYBRID	3.4	
I	$[(0^\circ/(0^\circ)_{10})]$ HYBRID	2.6	

연구되었다.

재료의 물성을 결정하기 위해 강판, CFRP보와 GFRP보의 굽힘시험편과 인장시험편을 제작하였고, CFRP판과 GFRP판, 그리고 Aluminum과 복합재료의 혼합적층판 등이 제작되었다.

이들 정사각판에 대한 좌표계와 형상은 Fig. 1과 같으며, 실험된 복합재료의 적층각과 적층수, 그리고 전체두께 등 기하학적 형상은 Table 1에 나타내었다.

2.2 물성의 결정

실험을 위해 제작된 강판 및 복합재료판의 탄성계수들을 결정하기 위해서 3점 굽힘시험(three point flexural test)을 수행하였다. 이 굽힘시험으로부터 탄성계수 값을 결정하기 위해서 식(1)과 같은 중앙

에 집중하중을 받는 보의 최대처짐식이 사용되었다.

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

여기서, δ_{max} 는 중앙점에서의 최대처짐이다. 이 식을 탄성계수의 식으로 다시쓰면 식(2)가 된다.

$$E = \frac{PL^3}{48\delta I} \quad (2)$$

여기서, E 는 강판(steel)과 같은 등방성계수인 경우에는 E 이고, 복합재료인 경우에는 주방향 탄성계수 E_1 또는 E_2 이다.

시편의 전단탄성계수는 ASTM D4255, D3518에 규정한 3공 인장 표준시편을 이용하여 측정하였다. 이 시험은 단일방향 적층재 인장시험시에 45° 방향의 변형률을 측정하여 전단 탄성계수를 결정하는 방법이다. 또한 직교이방성 재료에서는

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{21}} \quad (3)$$

이 성립하므로 푸아송의 비를 구할 수 있다.

2.3 실험장치 및 방법

실험을 위해서 사용된 진동실험장치로서 주파수 분석기는 FFT(fast fourier transform) analysis system을 사용하였으며, 응답신호인 판의 진동을 측정하기 위해서 PCB 가속도계(accelerometer)를 사용하였다.

데이터 측정시의 원하는 가진점을 정확히 가진하지 못한 경우의 불규칙한 신호로 인한 오차를 줄이기 위해서 16회의 평균화를 행하여 전달합수를 구하였다. 강판과 복합재료 정사각판은 1 Hz~500 Hz의 범위에서 5차까지의 고유진동수를 구하였다.

본 연구에서 수직 모드형상은 유한요소법에서의 요소분할과 마찬가지로 판을 49개의 유한요소로 분

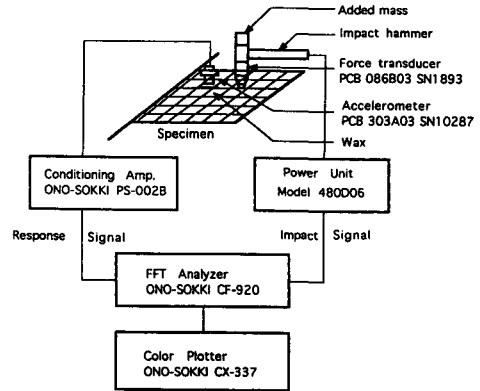


Fig. 2 Block diagram for modal analysis equipment

할하고 각 절점(node)의 변위를 구함으로써 SURFER 패키지(package)를 사용하여 3차원 모드형상을 그렸고, contour plots을 하였다.

Fig. 2는 실험장치에 대한 개략도(block-diagram)를 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Table 1과 같은 형상과 Table 2에 따른 재료물성을 갖는 복합재료 및 혼합적층재의 진동거동 파악에 중점을 두었다.

실험과 해석된 모든 판은 정사각형($a/b=1$)의 외팔형 경계조건으로 1단 고정 3단 자유이다. 이때 유한요소해석은 구조해석에서 널리 사용되고 있는 상용 프로그램인 ANSYS⁽⁹⁾를 사용하였다. ANSYS에서는 전처리(preprocessing)과정에서 판형상에 대해서 모델링을 하고 경계조건을 입력한 다음, 해석과정을 거쳐 후처리(postprocessing)과정에서 고유진동수와 모드형상을 구하였다.

실험된 시편의 두께는 약간씩 달라 결과들의 비

Table 2 Material properties of plates

Material	Dimension	Density	Young's modulus		Shear modulus	Poisson's ratio
	a, b[cm]	ρ [kg/m ³]	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}
Steel	25.4	7800	210	210	80.0	0.30
Aluminum	25.4	2770	72.4	72.4	28.0	0.30
CFRP	25.4	1480	106.20	6.68	3.57	0.33
GFRP	25.4	1780	34.64	7.18	3.82	0.26

교를 위해서 무차원 진동수 매개변수로 환산하여 그 결과들을 제시하였다. 그리고 해석된 판은 얇은 판이기 때문에 고전적 판이론에 의해서 횡전단과 회전관성효과는 무시되었다. 적교이방성 사각판의

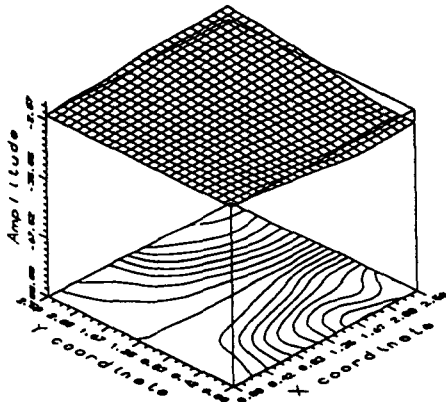
고유진동수는 무차원 진동수 매개변수 λ 의 향으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\lambda = \omega a^2 \sqrt{\frac{\rho t}{D_{11}}} \quad (4)$$

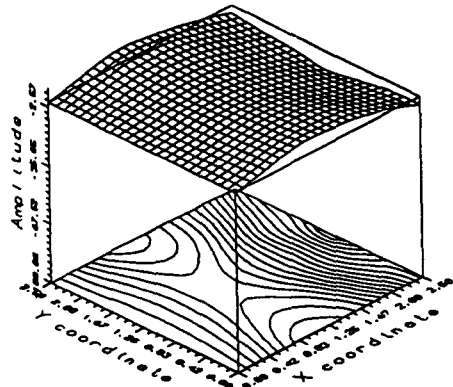
Table 3 Non-dimensional frequency parameter ($\lambda = \omega a^2 \sqrt{(\rho t / D_{11})}$) of isotropic cantilever square plate (b/ a=1, t/a=0.0079)

Material	Reference	Mode number				
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Isotropic	Experiment	3.32*	8.71	20.72	28.40	30.56
	FEM	3.46	8.58	21.52	27.45	31.73
	Gorman ⁽⁴⁾	3.459	8.356	21.09	27.06	30.55

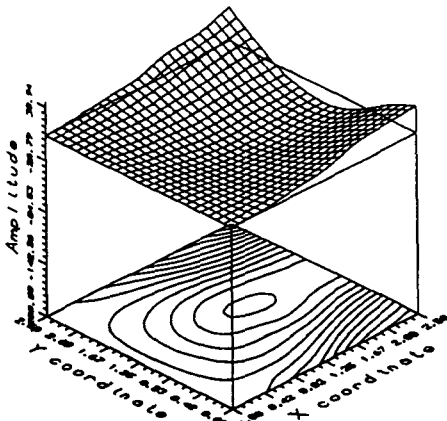
* Non-dimensional frequency parameter



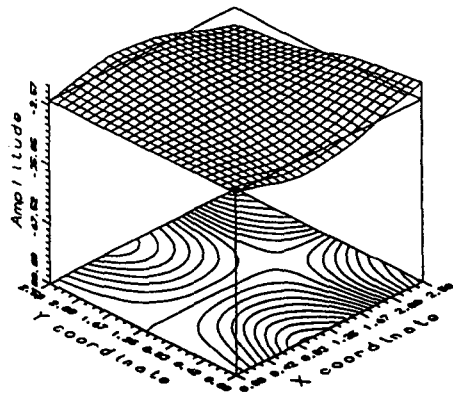
2nd mode shape (2.1)



3rd mode shape (1.2)



4th mode shape (1.3)

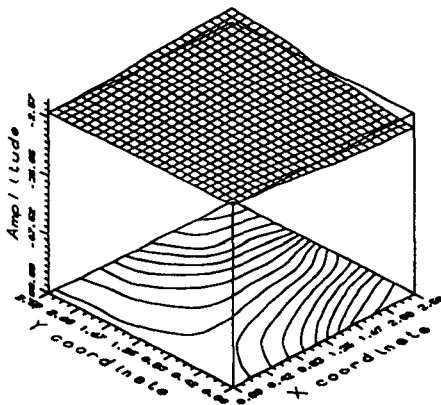


5th mode shape (2.2)

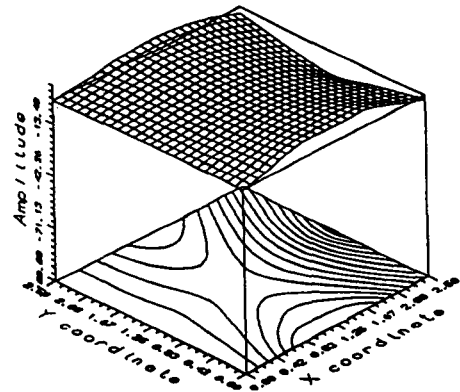
Fig. 3 Experimental mode shapes and contour plots for isotropic cantilever square plate (b/a=1, t/a=0.0079)

Table 4 Non-dimensional frequency parameter ($\lambda = \omega a^2 \sqrt{\rho t / D_{11}}$) of GFRP composite cantilever square plate ($b/a=1$)

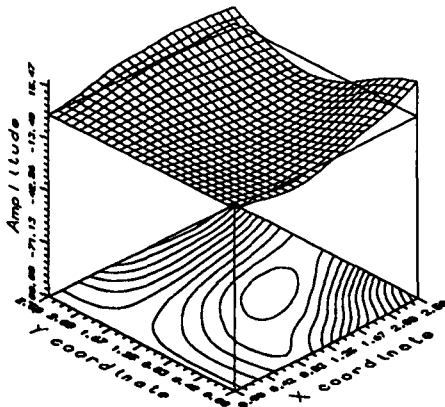
Material			Mode number				
			1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
GFRP	[0°]	Exp.	3.30	4.90	14.02	20.83	22.54
		FEM	3.51	5.68	13.53	22.39	25.66
	[0°/90°] ₁₀	Exp.	2.17	4.54	13.68	15.17	17.24
		FEM	2.20	4.40	14.31	16.23	17.66
	[+45°] ₂₀	Exp.	1.92	5.39	11.26	15.33	19.64
		FEM	2.07	5.79	12.73	15.64	22.06
	[+45°/-45°] ₁₀	Exp.	2.11	6.32	12.78	16.86	21.27
		FEM	2.24	6.89	13.38	19.48	23.46



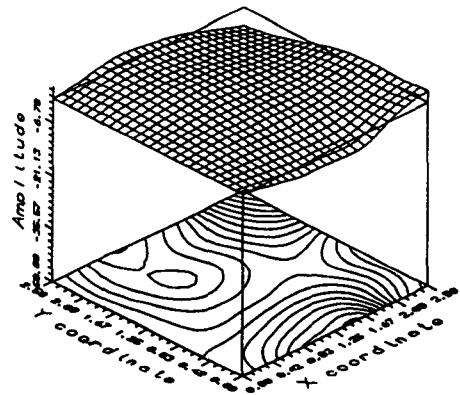
2nd mode shape (1.2)



3rd mode shape (2.1)



4th mode shape (1.3)



5th mode shape (2.2)

Fig. 4 Experimental mode shapes and contour plots for [+45°]₂₀ GFRP cantilever square plate ($b/a=1$, $t/a=0.0131$)

여기서, D_{11} 은 모든 층의 섬유방향이 x 축과 일치할 때 대응하는 굽힘강성으로 $D_{11} = \frac{E_1 t^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})}$ 이다. 따라서 D_{11} 을 무차원 진동수 매개변수 λ 에서 기본강성으로 사용하였다.

실험과 유한요소해석에 의한 무차원 진동수 매개변수를 Table 3~6에 제시하였고, 실험에 의해서 구해진 모드형상들과 contour plots을 Fig.를 통해 나타내었다. 모든 판의 모드형상에 있어서 1차 모드형상은 쉽게 예측할 수 있는 것처럼 $m=n=1$ 의 모드수를 갖는 굽힘모드(bending mode)이기 때문에 본 연구에서는 2차에서 5차까지의 모드형상과 contour plots을 나타내었다.

3.1 강판

실험결과들이 FEM 해석결과나 참고문헌과 얼마나 잘 일치하는가를 파악하기 위해서 등방성재료 ($E_1/E_2=1$)인 강판이 실험되었다. 강재료의 정사각판에 대해서는 4 node 3-D space 6 DOF quadrilateral shell element를 사용하였다. 모델링은 실제의 형상과 크기에 따라 6×6 의 사각 메쉬형성(mesh generation)을 하였고, 이 경우 사용된 전체 자유도(degree of freedom : DOF)는 232자유도이었다.

2 mm 두께의 외팔형 정사각판에 대한 실험결과들과 FEM 결과들을 무차원 진동수 매개변수 λ 로

환산하여 Table 3에 나타내었다. 결과들은 Gorman⁽⁴⁾에 의해서 얻어진 결과들과 잘 일치하고 있다. 전체적으로 실험에 의한 기본진동수 매개변수(fundamental frequency parameter)가 FEM이나 Gorman⁽⁴⁾의 결과보다 낮게 나옴을 알 수 있었다. 이것은 해석적인 방법을 통하여 얻은 결과들이 상계(upper bounds)된 값이기 때문에 실험치가 낮게 나온 것이다.

Fig. 3은 등방성재료인 강판에 대한 모드형상과 contour plots을 보여 주고 있다. 이들 모드형상과 contour plots은 Leissa⁽¹⁾와 Young⁽²⁾이 제시한 모드형상들과 잘 일치하고 있다.

3.2 복합재료 적층판

CFRP판과 GFRP판에 대해서는 8 node 3-D space 6 DOF layered shell element를 사용하여 해석을 수행하였고, 6×6 의 사각 메쉬를 사용하여 메쉬형성을 하였으며, 이때 전체 자유도(DOF)는 700 자유도이었다.

Table 4는 CFRP판에 비해 비교적 약한 직교이방성, $E_1/E_2=4.825$ 을 갖는 외팔형 정사각 GFRP 적층판에 대한 무차원 진동수 매개변수를 보여주고 있다. 이 결과들은 $[0^\circ]_{20}$ 단일방향 적층의 기본진동수 매개변수를 제외하고 다른 모드에서는 전체적으로 등방성재료의 결과들보다는 낮은 무차원 진동

Table 5 Non-dimensional frequency parameter ($\lambda = \omega a^2 \sqrt{(\rho t / D_{11})}$) of CFRP composite cantilever square plate (b/a=1)

Material			Mode number				
			1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
CFRP	$[0^\circ]_{20}$	Exp.	3.32	4.26	8.34	17.61	20.71
		FEM	3.49	4.31	3.15	16.97	21.79
		Narita ⁽⁸⁾	3.514	4.74	9.116	18.35	22.02
	$[0^\circ/90^\circ]_{10}$	Exp.	2.49	3.49	14.68	15.46	16.53
		FEM	2.55	3.60	15.81	16.85	17.19
	$[+45^\circ]_{20}$	Exp.	1.43	4.20	8.39	10.42	16.27
		FEM	1.46	4.30	8.62	10.52	16.70
		Narita ⁽⁸⁾	1.482	4.211	9.422	10.54	17.32
	$[+45^\circ/-45^\circ]_{10}$	Exp.	1.69	5.97	9.58	15.91	19.82
		FEM	1.77	6.35	9.97	16.62	20.48

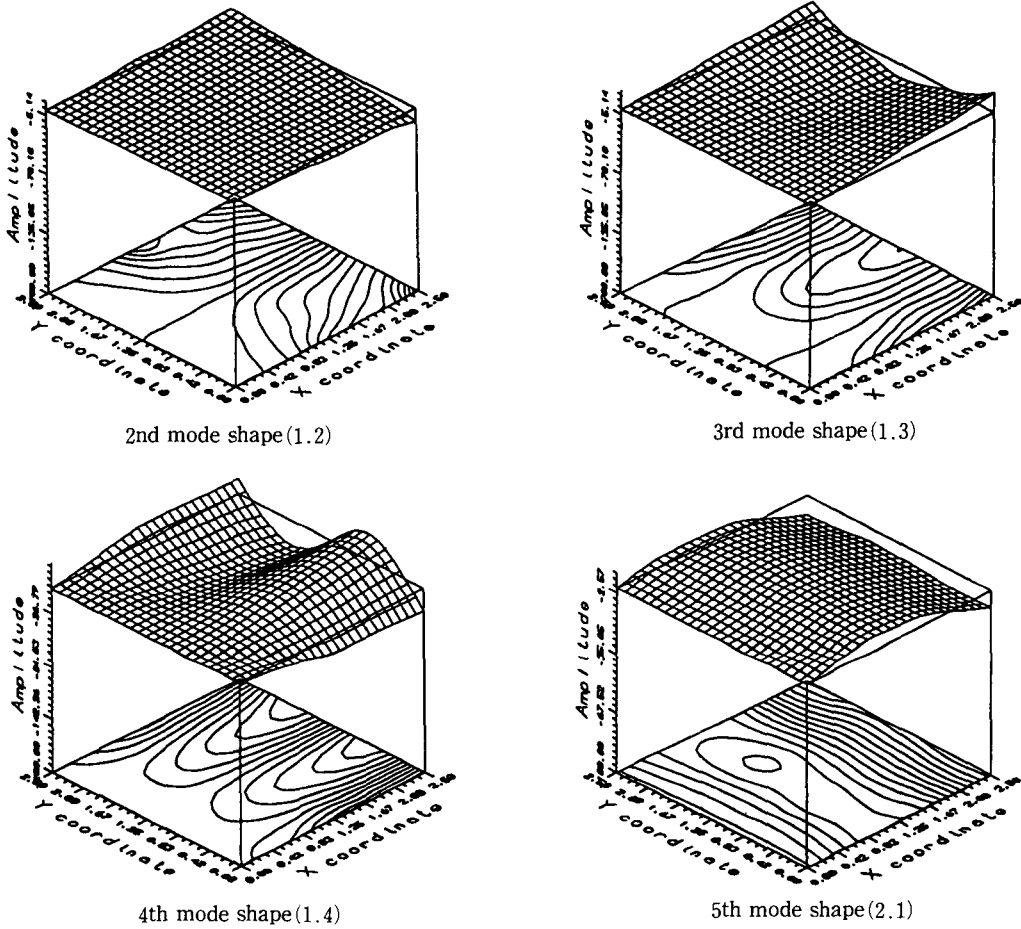


Fig. 5 Experimental mode shapes and contour plots for $[0^\circ]_{20}$ CFRP cantilever square plate ($b/a = 1$, $t/a = 0.0110$)

수 매개변수를 보였다.

Fig. 4에 $[+45^\circ]_{20}$ 단일방향 GFRP 적층판의 모드형상과 contour plots을 나타내었다. 이 GFRP 판은 등방성판과 같은 모드수를 보이고 있으나 2차와 4차 모드에서 섬유방향의 특성을 잘 나타내고 있으며, 다른 모드에서도 섬유방향의 영향을 확인할 수 있었다.

Table 5는 $E_1/E_2 = 15.48$ 인 외팔형 정사각 CFRP 적층판에 대한 무차원 진동수 매개변수를 보여주고 있다. GFRP판과 유사한 결과를 얻었으나, GFRP 판에서는 2차와 3차 사이에서 큰 진동수 매개변수 차이를 보였는데 CFRP판에서는 $[0^\circ/90^\circ]$ 적층을 제외하고는 3차와 4차 사이에서 진동수 매개변수가 큰 차이를 보이고 있다. 또한 전체적으로 GFRP판보다 낮은 무차원 진동수 매개변수를 보였는데

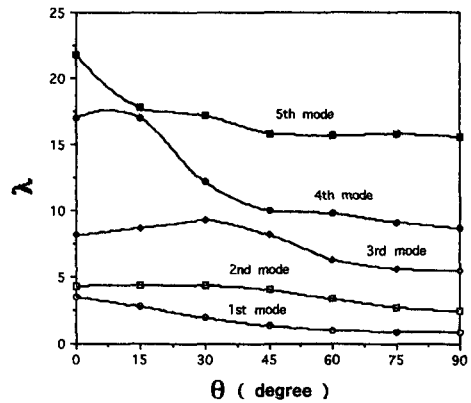


Fig. 6 Effects of varying θ upon the non-dimensional frequency parameter ($\lambda = \omega a^2 \sqrt{(\rho t / D_{11})}$) of CFRP composite cantilever square plate ($b/a = 1$, $t/a = 0.0110$)

Table 6 Non-dimensional frequency parameter ($\lambda = \omega a^2 \sqrt{(\rho t / D_{11})}$) of hybrid composite cantilever square plate ($b/a=1$)

Material		Mode number				
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
[AL/(0 _G) ₁₀ /AL] HYBRID	Exp.	3.42	7.93	20.29	27.05	28.79
	FEM	3.51	8.15	21.22	25.66	30.15
[AL/(0 _G) ₁₀ /AL] HYBRID	Exp.	3.20	7.69	19.09	26.01	27.79
	FEM	3.37	8.12	20.55	25.93	29.68
[(0 _G) ₁₀ /(0 _G) ₁₀] HYBRID	Exp.	6.18	7.46	17.09	36.74	38.74
	FEM	6.21	8.36	17.39	37.52	39.14

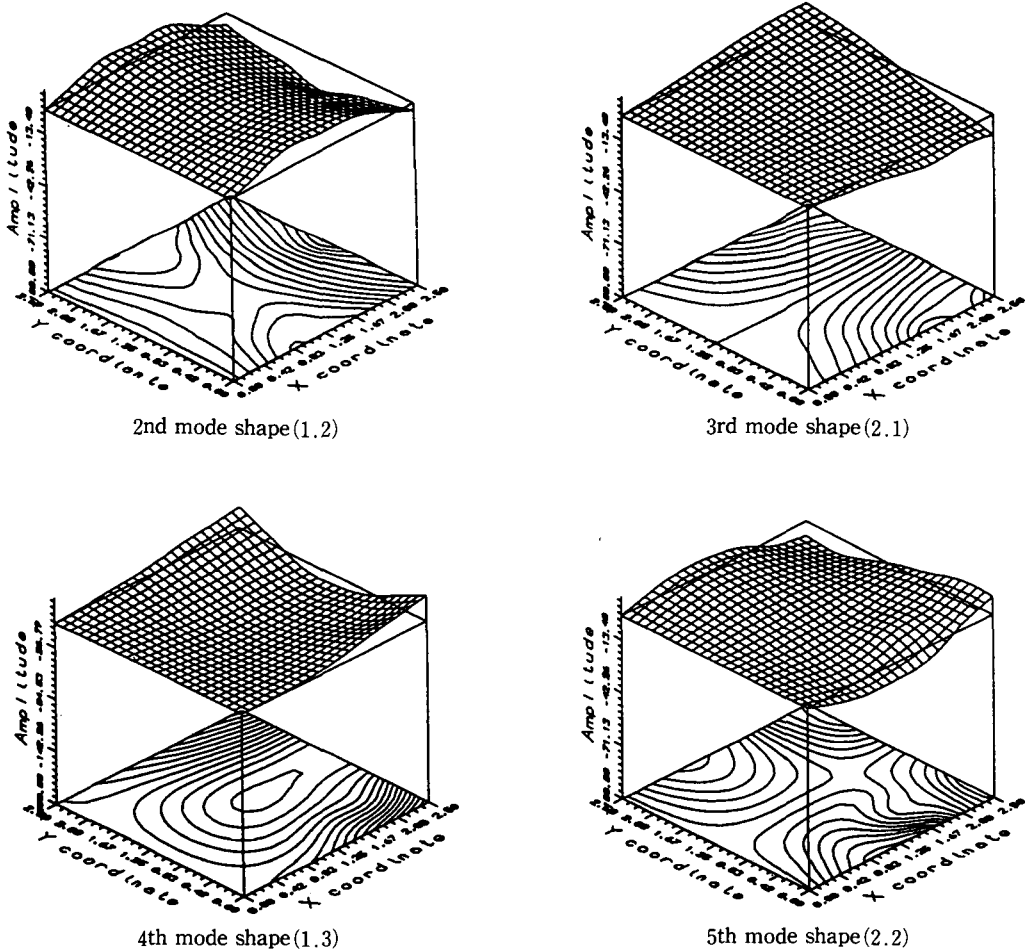


Fig. 7 Experimental mode shapes and contour plots for [AL/(0_G)₁₀/AL] hybrid cantilever square plate ($b/a=1$, $t/a=0.0158$)

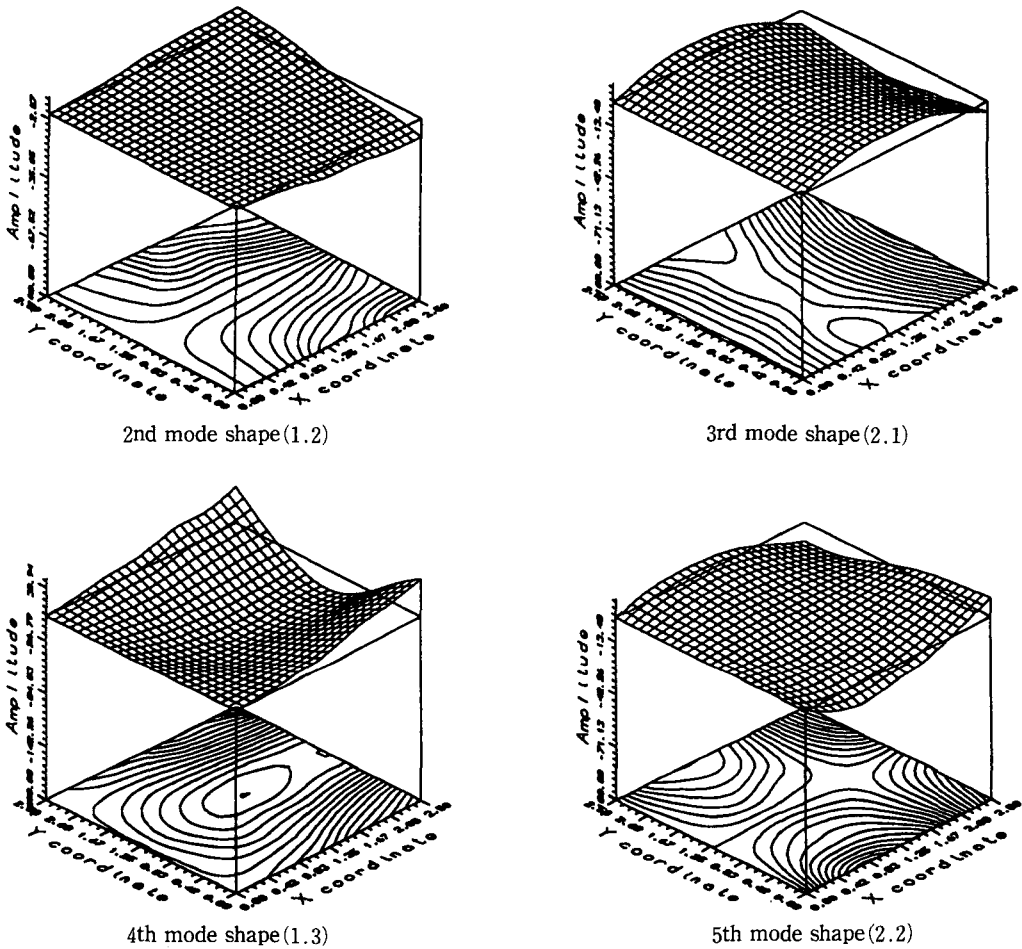


Fig. 8 Experimental mode shapes and contour plots for $[AL/(0_G)_{10}/AL]$ hybrid cantilever square plate ($b/a=1, t/a=0.0134$)

$[0^\circ]$ 와 $[45^\circ]$ 의 단일적층일 때는 E_1/E_2 에 따라 값의 차이가 크지만, $[0^\circ/90^\circ]$ 와 $[+45^\circ/-45^\circ]$ 적층일 경우에는 E_1/E_2 변화에 따른 값의 차이가 작았다.

Fig. 5는 $[0^\circ]_{20}$ 단일방향 CFRP적층판의 모드형상과 contour plots이다. Fig. 3의 등방성판에서는 나타나지 않았던 (1, 4)모드가 4차 모드에서 나타났으며, 등방성 판에서의 (2, 1)모드현상은 나타나지 않았다. 또한 GFRP판의 모드형상과 마찬가지로 섬유각 $[0^\circ]$ 단일방향의 영향을 뚜렷하게 보여주고 있다.

Fig. 6은 2.8 mm의 CFRP 복합재료판에 대한 섬유 방향각의 변화에 따른 무차원 진동수 매개변수의 변화를 나타내고 있다. 3차 모드에서는 적층각이 약 30° 까지는 증가하는 경향을 보였으나, 전체

적으로 볼때 적층각이 증가하면서 무차원 진동수 매개변수도 낮아진다는 것을 알았다. 또한 적층각의 변화에 따른 진동수 매개변수의 변화가 고차모드로 갈수록 큰 폭의 변화를 보이고 있다.

3.3 혼합적층판

혼합적층 사각판에 대해서는 세가지 경우의 적층판이 실험되었고, CFRP와 GFRP판의 해석과 같은 layered shell element를 사용하여 해석을 수행하였다. Table 6은 AL-GFRP 그리고 CFRP-GFRP의 혼합적층판에 대한 무차원 진동수 매개변수를 보이고 있다.

AL-CFRP와 AL-GFRP 혼합적층판의 결과는 등방성재료인 알루미늄의 결과와 유사한 값을 얻었으

나, 복합재료의 영향으로 무차원 진동수 매개변수가 약간 낮아짐을 알 수 있다. CFRP-GFRP 혼합적층판의 결과는 CFRP판과 GFRP판의 결과와 비교해볼때 기본진동수 매개변수가 약 두배로 증가하였고, 다른 모드에서의 진동수 매개변수도 많이 증가하였다.

Fig. 7, 8은 알루미늄과 복합재료 혼합적층판의 모드형상과 contour plots을 보이고 있다. 이들 혼합적층판은 등방성판과 같은 모드수를 갖고, 유사한 거동을 보이고 있는 것으로 보아 등방성재료의 영향이 커 복합재료의 이방성이 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 9는 AL-CFRP 혼합적층판의 경우에 알루미늄과 CFRP의 두께비에 따른 고유진동수의 변화를 보여주고 있다. 알루미늄층이 얇은 경우 고유진

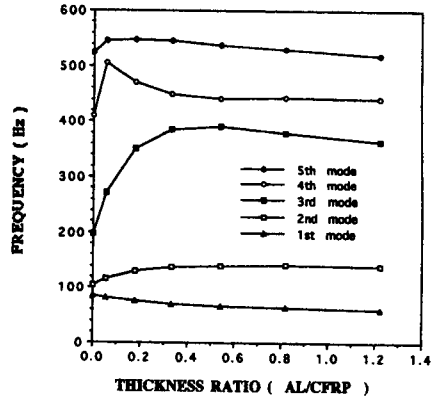


Fig. 9 Natural frequencies for thickness ratio of aluminum and CFRP (t=4.0 mm)

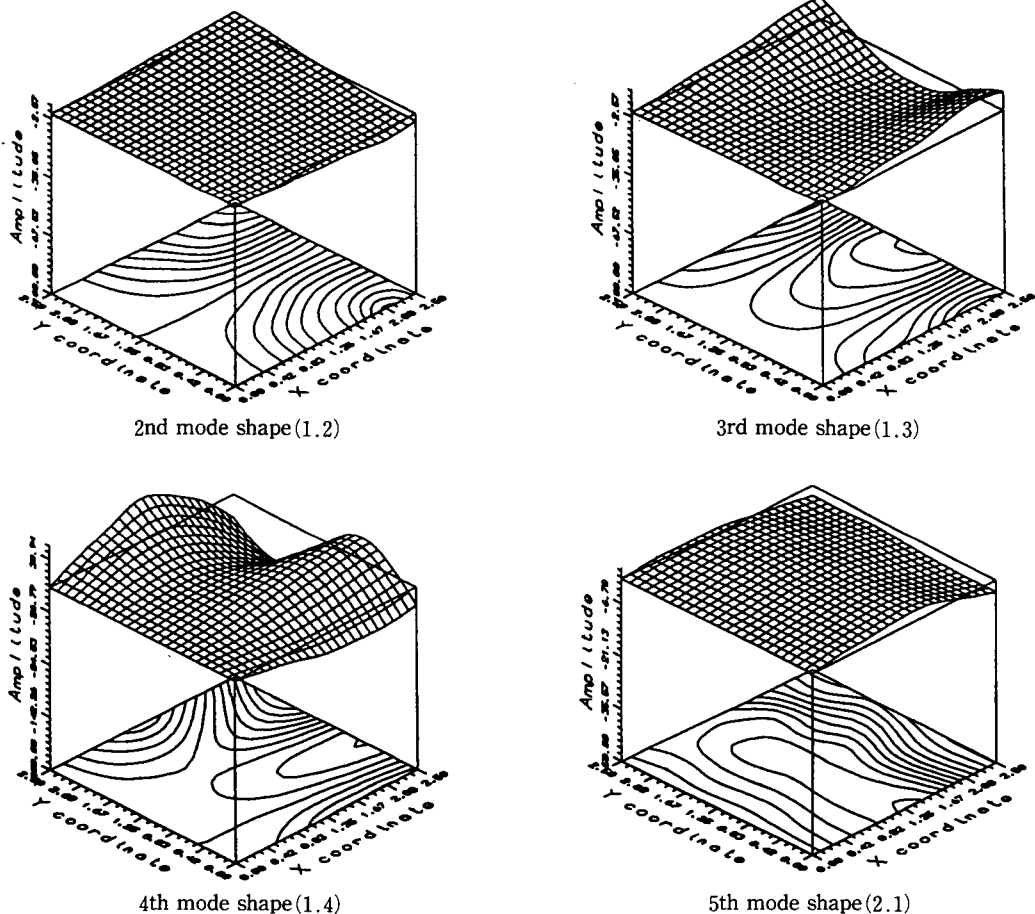


Fig. 10 Experimental mode shapes and contour plots for $[(0\bar{c})/(0\bar{c})]_{10}$ hybrid cantilever square plate ($b/a=1$, $t/a=0.0102$)

동수들은 변화를 보이고 있으나, 두께비가 0.3이상에서는 거의 일정한 고유진동수를 나타내고 있다. 이것으로 혼합적층의 경우 등방성재료가 아주 얇았을 때는 복합재료의 영향이 크지만 두께비가 0.3정도 이상에서는 등방성판과 유사한 거동을 보임을 알 수 있다. Fig. 10은 CFRP-GFRP 혼합적층판에 대한 거동을 보이고 있다. 복합재료의 거동과 마찬가지로 섬유각 $[0^\circ]$ 단일방향의 영향을 보이고 있으며, CFRP $[0^\circ]$ 적층판과 같은 모드수를 갖고 거동하고 있다.

이상의 결과들에서 볼때 실험치와 유한요소해석 결과와의 차이에는 몇 가지 원인이 있을 수 있는데, 가장 큰 원인으로서는 외팔형 경계조건을 만족시키기 위한 고정단의 구현과 실험시 사용된 가속도계가 판에 부가된 집중질량으로 작용하여 진동수를 낮아지게 할 수 있다. 또한 복합재료 시편의 제작 과정에서 레진(regin)의 양이나 적층각이 약간씩 달라지는데에서 생길 수 있는 물성의 오차(error)가 있을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통하여 얻은 다양한 외팔형 복합재료 사각판의 무차원 진동수 매개변수, 3차원 모드형상 그리고 contour plots을 제시하였다. 실험을 통하여 진동거동을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험에 의한 고유진동수들은 전반적으로 FEM 해석의 결과들보다 낮은 경향을 보였는데, 이것은 실험상의 모달해석에 있어서 이상적인 경계조건과의 차이와 판에 집중질량으로 부가된 가속도계의 영향때문이다.

(2) CFRP판의 해석결과 섬유방향 θ 가 증가함에 따라 3차 모드에서 30° 까지 진동수 매개변수가 약간 증가한 것을 제외하고는 전체적으로 무차원 진동수 매개변수가 감소하였고, 이들 모드에서의 모드형상과 contour plots은 섬유방향의 영향을 뚜렷하게 보여주고 있다.

(3) 알루미늄과 복합재료의 혼합적층재 사각판의 거동은 등방성재료가 아주 얇은 경우를 제외하고는 등방성 사각판과 유사한 거동을 하였고, 탄소와 유리 혼합적층판인 경우 재료의 이방성 거동이 크게 변화를 일으킨다.

후 기

본 연구를 위해 흔쾌히 시편을 제작하여 주시고 적극 도와주신 (주)한국화이버 조용준 회장님을 비롯하여 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Leissa, A. W., 1969, *Vibration of Plates*, NASA SP-160.
- (2) Young, D., 1950, "Vibration of Rectangular Plates by the Ritz Method," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, pp. 448~453.
- (3) Leissa, A. W., 1973, "The Free Vibration of Rectangular Plates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31, pp. 257~293.
- (4) Gorman, D. J., 1976, "Free Vibration Analysis of Cantilever Plates by the Method of Superposition," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 49, pp. 453-467.
- (5) Mohan, D. and Kingsbury, H. B., 1971, "Free Vibration of Generally Orthotropic Plates," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 50, pp.266~269.
- (6) Nair, P. S. and Durvasula, S., 1974, "Vibration of Generally Orthotropic Skew Plates," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 55, pp. 998~1002.
- (7) Crawley, E. F., 1979, "The Natural Modes of Graphite/Epoxy Cantilever Plates and Shells," *Journal of Composite Materials*, Vol. 13, pp. 195~205.
- (8) Narita, Y. and Leissa, A. W., 1992, "Frequencies and Mode Shapes of Cantilevered Laminated Composite Plates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 154, No.1, pp. 161~172.
- (9) Desalvo G. J. and Gorman, R. W., 1989, *ANSYS Engineering Analysis System User's Manual*, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania