

## 진동을 고려한 원공복합적층판의 최적적층설계

### Optimal Ply Design of Laminated Composite Plate with a Hole Considering Vibration

홍도관\* · 김동영\* · 최경호\* · 안찬우†

Do Kwan Hong, Dong Young Kim, Kyung Ho Choi and Chan Woo Ahn

(2002년 11월 5일 접수 : 2003년 5월 20일 심사완료)

**Key Words** : Laminated Composite Plate(복합적층판), CFRP(carbon fiber reinforced plastic : 탄소섬유강화 플라스틱), Natural Frequency(고유진동수), Discrete Design Space(이산설계공간), Table of Orthogonal Array(직교배열표), ANOM(analysis of mean : 평균분석), ANOVA(analysis of variance : 분산분석)

#### ABSTRACT

On this study, we improved the efficiency applying algorithm that is repeatedly using table of orthogonal array in discrete design space and filling a defect of gradient method in continuous design space. we showed optimal ply angle that maximized 1st natural frequency of CFRP laminated composite plate without a hole and with a hole by each aspect ratio. In the case of CFRP laminated composite plate without a hole, we confirmed the reliance and efficiency of algorithm in comparison with the result of optimization achievement repeatedly using statistical table of orthogonal array of experimental design and the BFGS optimal design method.

#### 1. 서 론

현재까지 기계구조물의 기본요소로 사용되는 사각형판의 정적, 동적해석이 수행되어져 왔으나, 기계구조물의 형상이 점점 복잡화되고 경량이 요구됨에 따라 가장 단순한 경우의 해를 먼저 구하고, 그 후 실제적이고 복잡한 설계로 발전시키는 공학적 접근방법이 필요하게 되었다. 실제 설계에서는 불연속부가 존재하는 구조물을 대상으로 하는 경우가 많으며 원공이 있는 평판은 환기구, 정비용 구멍 등의 기능적 요구와 연료선, 전기선 등이 통할 수 있는 용도로 자동차, 항공기, 우주선, 건축 구조물 및 토목 구조물 등에 구조적 요소로 광범위하게 사용되고 있으며 그에 대한 연구들도 활발하게 전개되어 왔다.

Chao 등<sup>(1)</sup>은 설계변수를 적층각으로 하여 평면하

중에서 좌굴과 강도에 관하여 각 경우의 최적설계를 수행하였으며, Tauchert와 Adibhatla<sup>(2)</sup>는 적층각 및 두께를 설계변수로 두고서 Rayleigh-Ritz의 방법을 사용한 횡하중을 받는 적층판을 해석하여 최소의 변형률에너지를 갖도록 하였다. 또한 Lia와 Thomson<sup>(3)</sup>은 보에서의 적층각을 설계변수로 하여 보의 감쇠를 목적함수로 삼고 최적설계를 수행하였으며, 김<sup>(4)</sup>은 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 최적설계방법을 이용하여 종횡비의 두께에 따른 복합재료 평판의 적층각을 설계변수로 하고 1차 모드의 고유진동수와 모드 감쇠를 목적함수로 최적설계를 수행하였다.

본 연구에서는 원공이 없는 CFRP 복합적층판<sup>(13)</sup>과 원공을 갖는 CFRP 복합적층판 구조물에 평판의 종횡비(aspect ratio)에 따른 적층각을 인자(=설계변수)로 하고, CFRP 복합적층판의 1차 고유진동수를 목적함수로 최적설계를 수행하였다. 1차 고유진동수만을 제어한 이유는 구조물의 진동에 있어서 가장 주요한 영향을 미치는 모드가 1차이기 때문에 1차 고유진동수의 최대화가 요구된다. 최적설계의 방법은 이산설

† 책임저자, 정회원, 동아대학교 기계산업시스템공학부  
E-mail : cwahn@daunet.donga.ac.kr

Tel : (051) 200-7643, Fax : (051) 200-7656

\* 동아대학교 대학원

계공간에서 실험계획법의 통계적인 방법으로 직교배열표를 반복 사용하여 최적화를 수행하는 알고리즘을 사용하였으며, 먼저 인자와 수준수를 고려한 적절한 직교배열표를 선택하고 설계변수의 후보값들 중에서 초기 설계값을 기준으로 수준값을 선정하여 평균분석(ANOM)을 실시하였다. 그리고 분산분석(ANOVA)을 통해서 유의한 인자를 선정하고, 유의하지 않은 인자만을 연속설계공간에서의 경사도법을 이용하여 최적해를 찾는 방법을 제안하였다.

본 연구의 신뢰성을 검토하기 위하여 원공이 없는 CFRP 복합적층판의 경우에 김<sup>(4)</sup>의 BFGS 최적설계 방법의 최적 결과와 비교하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소모델

#### (1) 유한요소모델의 구성

본 연구에서 사용된 모델은 원공이 없는 CFRP 복합적층판과 원공을 갖는 CFRP 복합적층판 구조물이며, 모델의 재료로는 CFRP의 경우 T300 탄소섬유 프리프레그(T300 carbon fiber prepreg)를 사용하였다. Fig. 1은 종횡비(b/a)가 1인 정방형 복합적층판과 복합적층 재료의 적층구조를 나타내며, 물성치와 치수는 Table 1~2에 나타내었다.

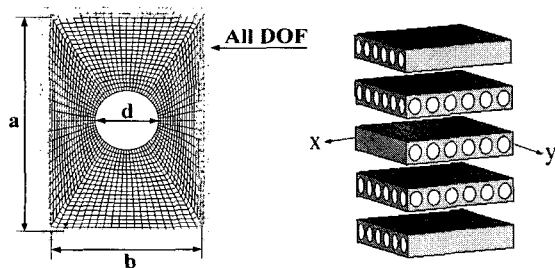


Fig. 1 Structure of plate and laminated construction

Table 1 Mechanical properties of CFRP

Mechanical property	Description
	T300 carbon fiber prepreg
$\rho$ [kg/mm <sup>3</sup> ]	1.480e-6
$E_1$ [MPa]	106,200
$E_2$ [MPa]	6,860
$G_{12}$ [MPa]	3,570
$\nu_2$	0.33

#### (2) 하중 및 경계조건

경계조건은 CFRP 복합적층판의 4변을 완전 고정하여 해석을 수행하였다. 모델링과 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 7.0을 사용하였다. 해석에 사용된 요소는 6자유도 8절점 요소를 사용하였으며, 요소의 수는 종횡비에 따라서 1,600~2,000 개이고 절점의 수는 4,960~6200 개를 사용하였다. 총 적층판수는 6~10 판을 사용하였으며, 대칭형태로 적층하였다.

### 2.2 진동해석

유한요소해석에서 비감쇠 자유진동에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

선형계에 대해서 자유진동은

$$\{u\} = \{u_0\} \cos \omega t \quad (2)$$

형태의 조화거동을 보이고, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$([K] - \omega^2[M])\{u_0\} = \{0\} \quad (3)$$

유용해를 갖기 위해서는 식 (3)에서  $\{[K] - \omega^2[M]\}$ 의 행렬식이 zero이어야 한다.

$$[K] - \lambda[M] = 0 \quad (4)$$

여기서  $\lambda = \omega^2$ 이고, 고유치 문제 식 (4)에서 고유치  $\lambda$ 는 계의 고유진동수를 나타내고, 고유벡터  $u$ 는 모드형상을 나타낸다.

$D_{11} = E_1 t^3 / 12(1 - \nu_{12}\nu_{21})$ ,  $D_{22} = E_2 t^3 / 12(1 - \nu_{12}\nu_{21})$ 는 이방성재료의 굽힘강성으로 무차원 진동수매개변수는 식 (5)와 같다.

Table 2 Dimensions of structures

Item list	Description (mm)
Length of structure (b)	1,000~2,000
Width of structure (a)	1,000
Diameter of hole (d)	400
Thickness of plate	6~10

$$\lambda_j = (\omega a^2 / 2\pi) \sqrt{\rho h / \sqrt{(D_{11} D_{22})}} \quad (5)$$

여기서,

$E_1, E_2$ : 이방성재료의 탄성계수,  $t$ : 판의 두께

$\nu_{12}, \nu_{21}$ : 포와송비,  $a$ 는 판의 길이,  $\rho$ 는 밀도이다.

### 2.3 직교배열표를 이용한 실험계획법

직교배열표는 재현성, 바람직한 최적조건 결정 및 안정성에 대한 평가와 함께 인자간에 교호작용을 기술적으로 생각하여 무시될 수 있는 것을 주효과와 교락(confounding)시켜 실험의 크기를 줄일 수 있는 방법이다.<sup>(5, 6)</sup> 본 논문에서는 이산설계공간에서의 보다 효율적인 최적설계를 수행하기 위하여 직교배열표를 도입하게 되었으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실시법을 사용하므로 최소한의 해석 횟수로 전조합 실시법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있다. 따라서 이산설계공간에서 직교배열표를 반복 사용하여 최적화를 수행하고자 한다.<sup>(9, 10)</sup> 먼저 인자와 수준수를 고려한 적절한 직교배열표를 선택하고 설계변수의 후보값들 중에서 초기 설계값을 기준으로 수준값을 선정하여 행렬실험을 실시한다. 평균분석을 통해서 최적해를 구하고 행렬실험의 각 행의 결과와 비교하여 우수한 해를 최적해로 선정한다. 최적수준을 선정하기 위해서는 기본적으로  $S/N$ 비와 다원배치에 의한 분산분석을 이용하여 설계인자가 설계값에 미치는 영향을 분석하였다.  $S/N$ 비는 이차식으로 주어지는 품질손실함수(quality loss function)로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도인데 본 연구에서 적용한 방법은 고유진동수는 클수록 좋은 망대특성(larger-than-better type)분석에 준하여 실행하였다. 사용한  $S/N$ 비는 다음과 같다.

$$\text{망대특성} : S/N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

여기서  $n$ 은 동일한 인자 수준조합에서의 반복측정 회수이며,  $y_i$ 는 그때의 각각의 해석값이다. 따라서 직교배열표상에 특성치의 목적함수를 고려하여  $S/N$ 비를 최대화하는 설계변수의 조건, 즉 잠음하에서도 성능 특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 접근하는 설계변수의 조건을 찾아내었다. Table 3의 초기 직교배열표에서와 같이 각각 4수준 인자인 3~5개의 적층

판의 적층각을 Angle A~E라고 하고 각 수준에서의 값을 결정한 후  $L_{32}(2^1 \times 4^7)$ 를 이용하여 행렬실험을 수행하였다. 설계변수인 인자의 수준은 4수준으로 설정하였으며, 초기 직교배열표를 이용하여 최적수준을 찾은 다음 직교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 를 이용하여 앞에서 얻은 최적수준의 값 범위를 좁히면서 등간격 3수준으로 나누어서 해석을 반복적으로 수행하였다. 평균분석을 통해 최적해를 구하고, 다원배치법으로 분산분석을 통해서 유의한 인자와 유의하지 않은 인자를 95% 신뢰구간으로 선정하여 유의한 인자는 최적해로 선정한다.

최적조건이 맞는지 검토하기 위하여 확인실험 결과가 최적이라고 추정된 값과 비교하여  $S/N$ 비에 대해서 재현성을 판단한다. 재현성의 유무는 추정치와 확인실험 결과의 차이가 30% 이내이면 재현성이 있다고 판단한다. 그러나 본 연구에서는 가장 최적의 해를 선정하기 위해서 다원배치에 의한 분산분석을 통해서 유의한 인자를 선정하고 유의하지 않은 인자만을 연속설계공간에서 사용되는 경사도법을 이용하여 최적해를 구하였다.

### 2.4 경사도법에 의한 최적설계

일반적인 연속설계공간에서 사용되는 Gradient-based 방법은 초기과정에 의한 탐색공간의 정보에 따라 최적값의 신뢰성이 크게 떨어진다는 단점이 있다. 그러나, 탐색공간에 대한 정보를 얻을 수 있다면 수렴속도를 향상시키면서 보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있고, 최적값의 정도를 향상시킬 수 있다. 즉, 이산설계공간에서 직교배열표를 반복 사용과 다원배치에 의한 분산분석을 통해서 유의한 인자에 대해서 최적해로 두고, 보다 정확한 최적해를 얻기 위하여 유의하지 않은 인자에 대해서만 경사도법을 이용하여 최적해를 찾는다.

비제약 최적화 문제에서 최급강하법은 목적함수의

Table 3 Levels of factors

Level Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
	Angle A	-45°	0°	45°
Angle B	-45°	0°	45°	90°
Angle C	-45°	0°	45°	90°
Angle D	-45°	0°	45°	90°
Angle E	-45°	0°	45°	90°

경사도를 계산하여 탐색방향을 구하는데 사용하며, 이 경사도 벡터는 점  $x^*$ 에서 함수  $f(x)$ 의 최대 증가율 방향을 나타낸다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\nabla f(x) = \left[ -\frac{\partial f(x^k)}{\partial x_i} \right] = c^{(k)} \quad (7)$$

여기서,  $i$ : 설계변수의 수,  $k$ : 벡터의 계산 단계

이러한 경사도 벡터의 성질을 이용하여 비제약 최적화 문제에 대한 반복적 알고리즘의 진행과정은 참고문헌 (11, 12)에 나타나 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 직교배열표를 이용한 실험계획법

##### (1) 평균분석

복합적층판의 경계조건이 완전고정일 때 중횡비 ( $b/a=1.5, 2$ )에 따라서 각 모델에 대한 최적 적층각을 구하였다. 먼저, 직교배열표를 이용한 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 원공이 없는 복합적층판에 대한 실험을 하였으며, 참고문헌 (4)의 결과와 비교하였다.

직교배열표는  $L_{32}(2^1 \times 4^7)$ ,  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 를 이용하여 진동해석을 수행하였으며, 실험계획법에 의해 망대특성인 목적함수에 복합적층판의 적층각인 설계변수가 미치는 영향을 알아보기 위해 측정데이터로부터 각 설계변수에 대한 식 (6)의  $S/N$ 비를 계산하고 각 인자의 수준에 대한 실험치 영향을 파악하기 위하여 평균분석을 수행하였다. 예를 들어 Angle A인자의 1수준에 대한 평균을 구하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} m = \text{angle } A &= \frac{1}{8} [\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_7 + \eta_8] \\ &= \frac{1}{8} [35.175 + 37.586 + 35.943 + 35.526 \\ &\quad + 35.549 + 37.095 + 36.387 + 35.899] \\ &= 36.145 \end{aligned} \quad (8)$$

Table 4는  $S/N$ 비를 이용하여 각 설계변수에 대한 수준의 효과를 구하는데, 그 결과의 일례인 원공이 없는 CFRP 복합적층판일 때 망대특성인 특성치 1차 고유진동수에 대한 인자들의 효과와 편차(deviation) 및 기여율(percentage contribution)을 나타낸 것이다.

식 (8)과 같이 인자 Angle A의 1수준 효과는 실험 번호 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29에 해당되는  $S/N$ 비의 전체평균으로부터 그 인자 수준에 의한 결과의 편차로 평가된다.<sup>(5)</sup> 같은 방법으로 모든 인자와 수준에 그 효과를 계산할 수 있다. 한편 수준차는 인자의 수준별 효과의 최대값과 최소값의 차이를 뜻하며 기여율은 전 수준차의 합에 대한 백분율로 나타낸다.<sup>(7)</sup> Fig. 2는 1차 고유진동수에 대한  $S/N$ 비의 영향도 분석을 나타내며 통계프로그램인 Minitab R13을 사용하였다.<sup>(8)</sup> 이때의 평균은 다른 네 변수들의 모든 수준에 대해서 균형화된 것이다. 실험결과를 살펴보면 기여율이 가장 높은 것은 인자 Angle A임을 알 수 있으며, 각 인자별 수준의 효과를 비교하여 최적 수준을 조합하면 Angle A(2수준), Angle B(2수준), Angle C(2수준), Angle D(2수준), Angle E(2수준)가 된다. 직교배열표를 반복 사용하여 최적수준의 값 범위를 좁히면서 최적화를 수행하여 최적해를 구하였다.

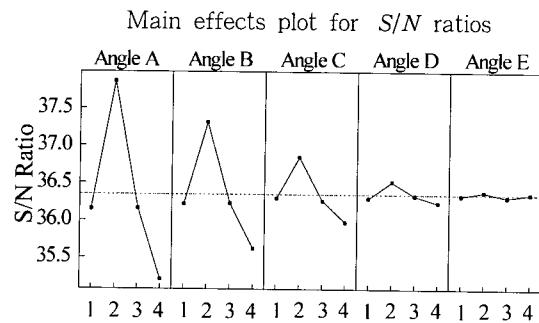
##### (2) 다원배치에 의한 분산분석

Table 5는 Table 4의 원공이 없는 CFRP 복합적층판의 적층각을 인자로 한 다원배치에 의한 분산분

**Table 4** Factors affecting the 1st natural frequency of laminated composite plate without a hole( $b/a=1.5, 10$  plies)

Factor	Effect				Deviation	PC (%)
	1	2	3	4		
Angle A	36.14	37.86*	36.15	35.21	2.65	47.75
Angle B	36.21	37.31*	36.22	35.61	1.7	30.63
Angle C	36.29	36.84*	36.25	35.98	0.86	15.49
Angle D	36.29	36.52*	36.32	36.24	0.28	5.05
Angle E	36.33	36.37*	36.31	36.35	0.06	1.08
Total					5.55	100

\* : Optimal level, PC : Percentage contribution



**Fig. 2** Illustration of factor effect

석의 결과를 나타낸 것으로 분산의 차이가 없다는 귀무가설과 차이가 있는 대립가설을 설정하여 분석 결과 Angle A, B, C의 수준의 P값이 0.00이고, 0.05보다 작음으로 대립가설이 성립된다. 그러나, Angle D, E의 경우 P값이 0.14, 0.98로써 대립가설이 성립되지 않는다.

따라서 Angle A, B, C 적층각의 변화에 따른 분산의 차이가 나타나 1차 고유진동수에 미치는 영향이 아주 크며 수준간의 차이가 있음을 볼 수 있지만, Angle D, E는 1차 고유진동수에 미치는 영향이 아주 작으며 수준간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 재현성의 유무를 판단하기 위해 재현성 실험을 한 결과, 추정치와 확인실험 결과의 차이가 1% 이내로 재현성이 있다고 판단하였다. 즉, Angle A, B, C가 유의하며 지배적인 인자가 되며, 유의하지 않은 인자 Angle D, E는 임의의 값이라도 큰 차이가 없다.

(3) 경사도법에 의한 최적설계

앞절의 다윈배치에 의한 분산분석을 통해서 Angle

D, E는 1차 고유진동수에 미치는 영향이 아주 작으며 수준간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 보다 정확한 최적해를 찾기 위하여 분산분석에서 유의하다고 판단된 인자는 최적해로 두고, 유의하지 않은 인자에 대해서 경사도법을 이용하여 최적해를 찾았다. Table 6은 원공이 없는 CFRP 복합적층판의 최적 적층각을 나타내었으며 종횡비(b/a)가 1일 경우에는 0°와 90°가 동일하게 나타났으며 그 이외에는 종횡비(b/a)와 적층판수에 무관하게 모든 적층판이 0°에서 최적의 값이 나타났다.

Table 7은 원공을 갖는 CFRP 복합적층판의 최적 적층각을 나타내었으며 종횡비(b/a)가 1일 때는 90°에서 최적의 값이 나타났고, 종횡비(b/a)가 1.5와 2일 때는 적층판수가 6, 8판일 경우 상하 2판은 90°이고, 중심부는 0°로 나타났다. 적층판수가 10판일 경우는 종횡비(b/a)가 1.5일 경우는 상하 3판은 90°이고, 중심부 2판은 0°로 나타났으며, 종횡비(b/a)가 2인 경우는 상하 2판과 중심부 1판은 90°이고, 나머지 판은 0°로 원공이 있는 경우가 원공이 없는 경우보다 적

Table 5 ANOVA using General Linear Model

Source	S	$\phi$	V	F	P
Angle A	2879.80	3	959.93	166.71	0.00
Angle B	1153.61	3	384.54	66.78	0.00
Angle C	303.52	3	101.17	17.57	0.00
Angle D	35.84	3	11.95	2.07	0.14
Angle E	0.77	3	0.26	0.04	0.98
Error	92.13	16	5.76		
Total	4465.67	31			

Table 6 Optimal ply angle of laminated composite plate without a hole

Aspect ratio	No. of plies	Optimal ply angle
No hole	6	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	8	$= [90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$
	10	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$ $= [90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$
1.5	6	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	8	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	10	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
2	6	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	8	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	10	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$

Table 7 Optimal ply angle of laminated composite plate with a hole

Aspect ratio	No. of plies	Optimal ply angle
Hole	6	$[90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$
	8	$[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$
	10	$[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$
1.5	6	$[90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$
	8	$[90^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	10	$[90^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
2	6	$[90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$
	8	$[90^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$
	10	$[90^\circ/180^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$

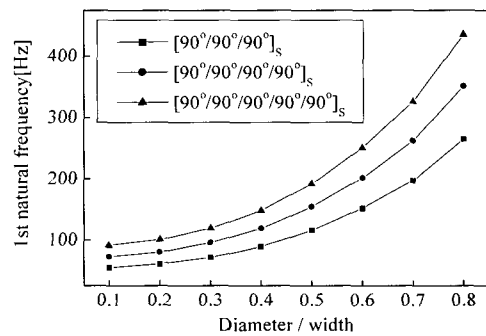


Fig. 3 1st natural frequency according to diameter/width (optimal ply angle : b/a = 1.0)

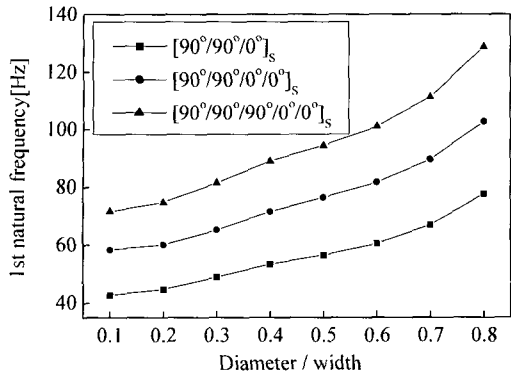


Fig. 4 1st natural frequency according to diameter/width (optimal ply angle : b/a=1.5)

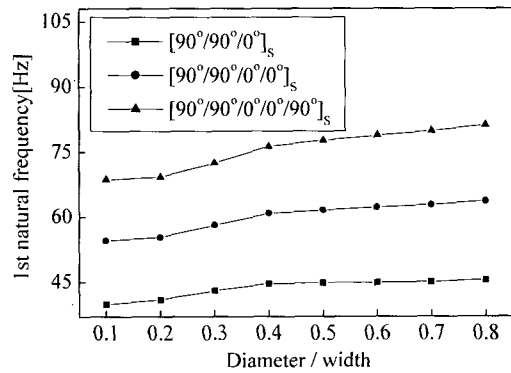


Fig. 5 1st natural frequency according to diameter/width (optimal ply angle : b/a=2.0)

Table 8 Vibration mode shape according to aspect ratio

Aspect ratio		No hole	Hole
Optimal ply angle (6 ply)	1.0	++	+ +++ ---
	1.5	+++ +++ +++	+++ +++ +++
	2.0	+++ +++ +++	+++ +++ +++

층구조가 복잡하게 발생하였다.

원공이 없는 CFRP 복합적층판의 최적 적층각은 BFGS의 최적설계방법을 이용하여 얻은 최적해와 동일하였으며, 실험계획법의 통계적인 방법을 통한 알고리즘의 신뢰성을 확인할 수 있었다. Fig. 3~5는 종횡비(b/a)가 1~2이며, Table 8의 최적적층각일 때 diameter/width가 증가함에 따라 1차 고유진동수가 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 3의 종횡비(b/a)에 따른 적층판수와 diameter/width가 증가함에 따라 1차 고유진동수의 크기가 더욱 증가함을 알 수 있다. Table 8은 종횡비(b/a)가 1~2이며, Table 6~7에서 6판 최적적층일 때 모드형상을 나타낸다.

따라서, 다구찌법에 의해서 설계변수에 대한 민감도 정보를 얻고, 그 정보로부터 분산분석을 통해서 유의한 인자와 그렇지 않은 인자를 분석하여 유의한 인자는 최적값으로 두고, 유의하지 않은 인자에 대해서 적절한 탐색구간을 결정하여 경사도법을 이용하면 유의하지 않은 인자에 대한 최적해를 찾을 수 없는 단점을 극복할 수 있으며, 설계영역의 정보를 얻지 못하거나 국부적인 최적해에 빠질 가능성이 높은 경사도법 알고리즘에 대한 단점도 극복하여 탐색시간을 줄이고 보다 정확한 최적해를 찾을 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 이산설계공간에서 실험계획법의 통계적인 방법으로 직교배열표를 반복 사용하여 최적화를 수행하는 알고리즘을 사용하였으며 원공을 갖는 CFRP 복합적층판에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이산설계공간에서 직교배열표를 반복 사용하는 알고리즘을 적용하여 설계변수에 대한 민감도 정보를 얻고 그 정보로부터 분산분석을 통해서 유의한 인자와 그렇지 않은 인자를 분석하여 유의한 인자는 최적해로 두고, 유의하지 않은 인자에 대해서 적절한 탐색구간을 결정하여 경사도법을 이용하여 최적해를 구하였다. 직교배열표를 반복 사용하여 최적화를 수행하는 알고리즘의 유의하지 않은 인자에 대한 최적해를 찾을 수 없다는 단점과 설계영역의 정보를 얻지 못하거나 국부적인 최적해에 빠질 가능성이 높은 경사도법 알고리즘에 대한 단점을 상호 보완하여 탐색시간을 줄이고 보다 정확한 최적해를 찾을 수 있었다.

(2) 종횡비( $b/a=1, 1.5, 2$ )에 따른 원공이 없는 CFRP 복합적층판과 원공을 갖는 CFRP 복합적층판의 1차 고유진동수를 극대화하는 최적의 적층각을 제시하였으며, 원공이 있는 경우가 없는 경우보다 적층구조가 복잡하게 발생하였다.

(3) 종횡비( $b/a=1, 1.5, 2$ )에 따른 원공을 갖는 CFRP 복합적층판의 적층판수 (6, 8, 10)와 diameter/width가 증가함에 따라 1차 고유진동수의 크기가 더욱 증가함을 알 수 있었다.

(4) 원공이 없는 CFRP 복합적층판의 경우, 실험 계획법의 통계적인 방법인 직교배열표를 반복 사용하여 최적화를 수행한 결과 BFGS 최적설계방법과 비교하여 알고리즘의 신뢰성과 효율성에서 우수함을 확인할 수 있었다.

(5) 향후 모델의 시험을 통해 본 연구의 결과에 대한 신뢰성을 연구할 것이며, 모델의 고유진동수와 감쇠를 고려한 최적적층설계를 수행할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Chao, C. C., Koh, S. L. and Sun, C. T., 1975, "Optimization of Buckling Yield Strength of Laminated Composites," AIAA Journal, Vol. 13, pp. 1131~1132.
- (2) Tauchert, T. R. and Adibhatla, S., 1984, "Design of Laminated Plates for Maximum Stiffness," Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp. 58~69.
- (3) Lia, D. X., Sung, C. K. and Thomson, B. S., 1986, "The Optimal Design of Symmetric Laminated Beams Considering Damping," Journal of Composite Materials, Vol. 20, pp. 485~501.
- (4) 김관영, 1996, "1차 모드의 고유진동수와 모드 감쇠를 극대화시키기 위한 복합재료 적층판의 최적 적층 설계," 포항공과대학교 석사학위논문.
- (5) Phadke, M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design," Prentice-Hall.
- (6) 김명업, 이두호, 1999, "다구찌 직교배열을 이용한 승용차의 실내소음 분석 및 개선," 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 5 호, pp. 998~1004.
- (7) 백남국, 김대은, 2002, "다구찌 방법을 이용한 레이저리소그라피 미세패턴 가공조건 최적화," 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 7 호, pp. 59~63.
- (8) MINITAB User's Guide #2, 2000, "Data Analysis and Quality Tool," Minitab Inc.
- (9) Taguchi, G., 1999, "Robust Engineering : Learn How to Boost Quality while Reducing Cost & Time to Market," McGraw-Hill.
- (10) 이정욱, 박준성, 이권희, 박경진, 2001, "직교배열표를 이용한 이산공간에서의 최적화 알고리즘 개발," 대한기계학회지, 제 25 권, 제 10 호, pp. 1621~1626.
- (11) 김현수, 안찬우, 최경호, 박정호, 2002, "고속화차용 대차프레임의 경량화를 위한 최적설계," 한국정밀공학회지, 제 9 권, 제 19 호, pp. 186~192.
- (12) 홍도관, 최석창, 안찬우, 2003, "다구찌법을 이용한 마그네트 천장크레인의 경량화를 위한 최적설계," 한국정밀공학회지, 제 20 권, 제 3 호, pp. 50~57.
- (13) 김정수, 강영규, 박현철, 2002, "시스템식별과 최적제어를 이용한 지능형 복합적층판의 다중모드 진동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 1 호, pp. 5~11.