

유전자 기법을 이용한 복합재 보강구조물 외피 및 보강재의 적층각 최적설계

윤인세* · 최흥섭**, 김 철***

Optimal Design of Skin and Stiffener of Stiffened Composite Shells Using Genetic Algorithms

I. S. Yoon, H. S. Choi and C. Kim

Key Words : stacking sequence optimization(적층순서최적화), curved composite stiffened panel(곡면 복합재 보강판), genetic algorithms(유전자 알고리즘).

ABSTRACT

An efficient method was developed in this study to obtain optimal stacking sequences, thicknesses, and minimum weights of stiffened laminated composite shells under combined loading conditions and stiffener layouts using genetic algorithms (GAs) and finite element analyses. Among many parameters in designing composite laminates determining a optimal stacking sequence that may be formulated as an integer programming problem is a primary concern. Of many optimization algorithms, GAs are powerful methodology for the problem with discrete variables. In this paper the optimal stacking sequence was determined, which gives the maximum critical buckling load factor and the minimum weight as well. To solve this problem, both the finite element analysis by ABAQUS and the GA-based optimization procedure have been implemented together with an interface code. Throughout many parametric studies using this analysis tool, the influences of stiffener sizes and three different types of stiffener layouts on the stacking sequence changes were thoroughly investigated subjected to various combined loading conditions.

기호설명

r_i	= inner radius of the composite shells
L	= length of the composite shells
l	= arc length of the composite shells
s	= arc length between two stiffeners
w	= flange length of the stiffeners
h	= web height of the stiffeners
N	= axial compression
p	= pressure
ΔT	= thermal load
W	= weight

F	= fitness function
λ_b	= buckling load factor

1. 서론

다양한 설계변수를 갖는 복합재료의 특성으로 인하여 복합재 관련 최적설계가 많은 연구자들에 의해 계속해서 연구되고 있다[1]. 실제 복합재료로 된 구조물은 제작상의 어려움 때문에 몇몇 제한된 적층각을 이용하고 있다. 그러므로, 적층각과 같은 이산적인 값들을 다루기에 기존의 최적화 방법으로는 많은 어려움이 있었다. 유전자 알고리즘은 이산적인 값의 표현이 용이하며 전역적인 해로 수렴할 신뢰도를 가지고 있기 때문에 이산최적화에 적당한 알고리즘이라 할 수 있다.

복합재료의 좌굴 및 좌굴후 거동에 대해 그동안 많은 연구가 이루어져 왔으며[2], Le Riche 와

* 경북대학교 대학원 기계공학부
** 대한항공, 한국항공기술연구원, 수석연구원
*** 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부
E-mail : kimchul@knu.ac.kr
TEL : (053)950-6586 FAX : (053)950-6550

Haftka[3]는 유전자 알고리즘을 이용하여 압축하중을 받고 있는 평판의 최대 임계 좌굴 하중을 구하는 최적설계를 수행하였다. Liu[4] 등은 복합재 평판의 적층최적화를 위해 치환(permutation)법을 이용하였다. Kassapoglou[5]는 보강재 형상이 구조물에 미치는 영향을 제작비용과 무게 측면에서 연구하였으며, Kang[8] 등은 압축 하중을 받는 보강된 복합적층판의 적층최적화를 수행하고 그 결과를 실험값과 비교하였다.

그러나, 이러한 연구들에서는 보강재의 크기, 간격 및 여러 가지 하중조건하에서의 최적화는 수행되어지지 않았으며 적층각의 변화에 대한 종합적인 결과를 찾아보기는 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 복합재 쉘의 적층최적화를 위한 효과적인 기법을 제시하였으며 보강재 크기와 간격이 좌굴 및 적층각에 미치는 영향과 압축력, 압력, 열하중과 같은 다양한 하중의 영향을 조사하였다. 이를 위해 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 유한요소해석을 하였으며 연계프로그램을 이용하여 ABAQUS 와 유전자알고리즘을 연결하였다. 최적화를 위해 사용된 적층은 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, 90° 의 제한된 적층을 이용하였으며 스킨과 보강재의 적층과 두께를 변수로 두어 최소의 무게에서 최대의 좌굴하중을 갖는 적층최적화를 수행하였다.

2. 유전자 알고리즘

2.1 기본원리

유전자 알고리즘은 두 부모의 유전자로부터 자손의 유전자를 형성하는 유성생식과 자연환경에서 일어나는 진화의 원리를 흉내내고 있다. 집단은 문제공간 상에서 잠정적인 해를 뜻하는 다수의 개체(individual)로 형성되고 이들은 유전자의 역할을 반영하도록 비트 스트링 형태로 표현된다. 이런 개체들 중에서 환경에 대한 적합도(fitness)가 높은 개체가 높은 확률로 살아 남아 재생(reproduction)할 수 있게 되며 이때 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)를 통해 적합도가 높은 다음 세대를 형성하게 된다. 유전자 알고리즘의 기본 순서도는 Fig. 1 에 도시하였다.

2.2 유전자 알고리즘의 매개변수

유전자 알고리즘은 확률적인 탐색에 의해 최적해로 수렴해가는 일련의 과정이다. 그러므로 집단의 크기 및 유전연산자가 일어날 확률은 알고리즘이 얼마나 빨리 수렴하는지를 결정하는 중요한 변

수가 된다. 본 논문에서는 Table 1 과 같은 매개변수들을 이용하여 최적화를 수행하였다.

2.3 연계프로그램

임의로 생성된 개체들은 적용된 문제에서 하나의 구조를 나타내며 그 구조에 대한 유한요소해석이 수반되어야 한다. 이 해석은 반복과정에서 모든 개체들에 대하여 수행되어야 하며 동시에 유전자 알고리즘과 연계되어야 한다. 그러므로 유전자 알고리즘과 유한요소해석 프로그램사이를 연결시켜주는 연계프로그램을 필요로 하게 된다. 연계프로그램의 순서도는 Fig. 1 과 같다. 연계프로그램은 생성된 개체들의 유한요소해석을 위해 입력과일을 생성시키고, 반복과정이 진행될 때 마다 변화되는 적층각과 적층순서를 갱신시킨다. 유한요소해석을 통해 나온 결과파일로부터 적합도함수 계산에 필요한 정보를 얻어 적합도를 계산하게 된다. 이와같은 방법으로 계산된 적합도를 이용하여 유전연산자가 다음 세대를 생성시키고, 위의 과정이 반복되면서 최적해로 수렴해 나가게 된다.

3. 보강된 복합재 쉘의 최적설계

3.1 해석모델

두개의 보강재를 가진 복합재 쉘을 ABAQUS 를

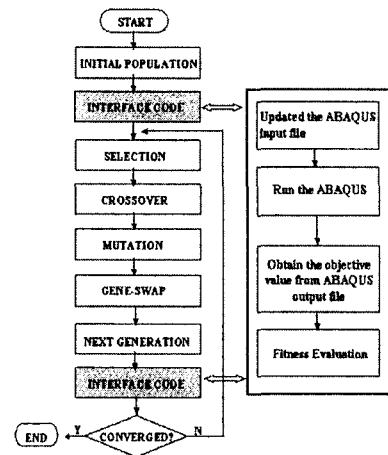


Fig. 1 Flow chart of GA optimization

Table 1. Design parameters of a genetic algorithm

Parameters	Values
Population size	10
Probability of crossover	0.8
Probability of mutation	0.05
Probability of gene swap	0.9

이용하여 해석하였다. 보강된 복합재 쉘의 형상과 경계조건은 Fig. 2 에 도시되어 있다. 해석에 사용된 치수는 다음과 같다.

$$r_i = 0.51\text{m}, \quad L = 0.64\text{m}, \quad l = 0.4\text{m}$$

보강재의 형상은 무게와 제작상의 이점을 고려하여 T 형을 선택하였다[6]. 해석을 위해 사용된 요소는 횡방향 전단 변형(transverse shear deformation)이 고려되는 S4R 을 사용하였으며[7] 1440 개의 요소와 1599 개의 절점이 사용되었다.

3.2 최적설계결과

좌굴을 고려한 최적설계의 목적은 최소의 무게(W)를 가지면서 최대의 좌굴하중을 갖는 적층을 찾는 것이다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } W \\ & \text{Subject to } \lambda_b \geq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

적합도 함수(F)는 동일한 적층수에서도 최대좌굴하중을 갖는 적층을 찾기 위해 다음과 같이 구성하였다.

$$F = \begin{cases} -W \left(\frac{1}{\lambda_b} \right)^3 & 0.0 < \lambda_b < 1.0 \\ -W(1 - 0.0001\lambda_b) & \lambda_b \geq 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

하중 조건이 좌굴과 적층상태에 미치는 영향을 조사하였다.

3.2.1 플랜지 길이(w)에 따른 적층최적화

플랜지 길이에 따른 좌굴특성을 알아보기 위해 w/s 를 0.1, 0.15, 0.2 로 증가시키면서 최적화를 수행하였다. 축방향으로 0.025N/m 의 압축력이 가해졌으며 $s=0.20\text{m}$, $h=0.02\text{m}$ 이다. 최적화 결과는

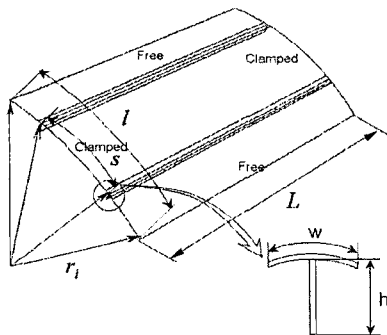


Fig. 2 Geometry of a stiffened shell

Table 2 와 같다. 세 경우 모두 스킨에서는 12 층, 보강재에서는 11 층으로 수렴을 하였다. w/s 가 증가함에 따라 좌굴특성이 좋아지는 이유는 w 의 증가와 함께 보강재와 스킨의 접합되는 길이가 증가하여 보강재가 스킨의 변형을 구속하기 때문이다.

3.2.2 웹 높이(h)에 따른 적층최적화

웹 높이에 따른 영향을 알아보기 위해 h/w 의 값을 0.5, 1, 1.5 로 증가시키면서 적층최적화를 수행하였다. 축방향으로 0.025N/m 의 압축력이 가해졌으며 $s=0.20\text{m}$, $w=0.02\text{m}$ 이다. 최적화 결과 Table 3 과 같이 세 경우 모두 스킨에서는 12 층, 보강재에서는 11 층으로 수렴을 하였다. h 의 증가는 하중을 지지하는 단면적의 증가를 의미하므로 h/w 가 증가할수록 임계좌굴하중이 증가했다.

3.2.3 보강재 간격에 따른 적층최적화

l/s 을 1, 1.5, 2 로 증가시키면서 보강재 간격이 좌굴에 미치는 영향을 조사하였다. l/s 의 증가는 보강재 간격이 좁아짐을 의미하며 l/s 이 1 일때는 두개의 보강재가 스킨의 양 끝단에 위치한 상태를 의미한다. 압축력(N), 압력(p), 열하중(ΔT)이 각각 0.025N/m, 101.33N/m², $\Delta 200^\circ\text{C}$ 만큼 가해졌으며 $w=0.02\text{m}$, $h=0.02\text{m}$ 이다. 최적화 결과는 Table 4 와 같다. l/s 이 1.5, 2 일때는 스킨과 보강재에서 각각 12 층, 9 층으로 수렴을 하였으나 l/s 이 1 일때는 각각 7 층, 9 층으로 수렴하여 적은 적층수에서도 좌굴을 일으키지 않음을 알 수있다. 이는 자유변형을 하는 양 끝단을 보강재가 구속시켜줌으로써 변형을 줄여주기 때문이다.

Table 2. Optimal designs according to flange lengths

w/s	Optimal design	λ_b
0.1	skin	$[\pm 45 / \pm 60 / \pm 30]_s$
	stiffener	$[90_s / \pm 30 / \bar{0}]_s$
0.15	skin	$[\pm 60 / 60 / 15 / -60 / -15]_s$
	stiffener	$[90 / 60 / 90_2 / -60 / \bar{90}]_s$
0.2	skin	$[90 / \pm 45 / \pm 30 / 0]_s$
	stiffener	$[90_2 / 0 / \pm 60 / \bar{90}]_s$

Table 3. Optimal designs according to web heights

h/w	Optimal design	λ_b
0.5	skin	$[90_2 / \pm 45 / \pm 15]_s$
	stiffener	$[90 / 30 / \pm 15 / -30 / \bar{0}]_s$
1.0	skin	$[\pm 45 / \pm 60 / \pm 30]_s$
	stiffener	$[90_3 / \pm 30 / \bar{0}]_s$
1.5	skin	$[\pm 45 / 90 / 60 / 0 / -60]_s$
	stiffener	$[90_2 / \pm 30 / 0 / \bar{0}]_s$

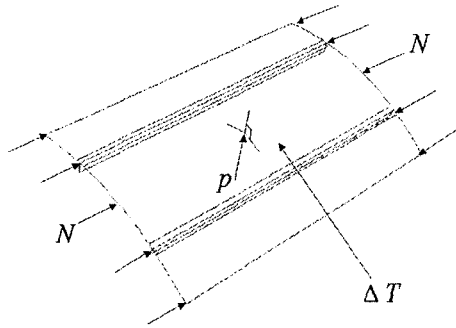


Fig. 3 Various loading conditions

Table 4. Optimal designs with respect to stiffener layouts

l/s		Optimal design	λ_b
1.0	skin	$[\pm 30/90/\bar{0}]_1$	1.3742
	stiffener	$[60/0/90/-60/\bar{90}]_1$	
1.5	skin	$[(\pm 30)_2/\pm 15]_1$	1.4735
	stiffener	$[15/\pm 60/-15/\bar{90}]_1$	
2.0	skin	$[90/\pm 30/0/\pm 30]_1$	1.1183
	stiffener	$[15/0/90/-15/\bar{0}]_1$	

3.2.4 하중조건에 따른 적층최적화

Fig. 3 과 같이 압축력(N), 압력(p), 열하중(ΔT)이 복합적으로 작용할 때 좌굴에 미치는 영향을 조사하였다. 축방향으로 0.025N/m 의 압축력이 가해졌으며 101.33N/m²의 압력이 스킨에 수직된 방향으로 내부에서 외부로 균일하게 가해지고 있다. 또한 $\Delta 200^\circ\text{C}$ 열하중이 스킨에 가해지고 있으며 두께 방향으로 온도차는 없는 것으로 가정한다. $s=0.2\text{m}$, $w=0.02\text{m}$, $h=0.02\text{m}$ 이다. 최적화 결과는 Table 5 과 같다. 결과에서 보는 것처럼 압력의 영향으로 인해 좌굴하중계수(buckling load factor)가 감소하였다. 이는 압력의 작용으로 자유변형이 가능한 양 끝단에서 심한 변형을 일으키기 때문이다. 또한, 온도차이로 인한 구조물의 열팽창은 압축력의 영향을 완화시켜 임계좌굴하중을 증가시켰다. 압축력, 압력, 열하중이 동시에 작용을 했을 때는 압축력과 압력이 작용했을 때보다 열하중의 영향 때문에 좌굴하중계수가 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 복합하중을 받는 복합재 곡면보강판의 적층최적화를 위해 유한요소해석과 유전자 알고리즘을 이용한 효과적인 최적화기법을 제시하였다. 보강재의 크기와 간격에 따른 적층 최적화를 수행하였으며 고속으로 비행할 때 겪게 되는

Table 5. Optimal designs with respect to various loads

Loading condition		Optimal design	λ_b f (Hz)
Compression	skin	$[\pm 45/\pm 60/\pm 30]_1$	1.1263
	stiffener	$[90_3/\pm 30/\bar{0}]_1$	
Compression and pressure	skin	$[\pm 60/(\pm 30)_2]_1$	1.0029
	stiffener	$[\pm 15/15/90/-15/\bar{90}]_1$	
Compression and thermal load	skin	$[0/\pm 15/15/0/-15]_1$	1.3296
	stiffener	$[\pm 15/\pm 60/\bar{90}]_1$	
Compression, pressure and thermal load	skin	$[90/\pm 30/0/\pm 30]_1$	1.1183
	stiffener	$[15/0/90/-15/\bar{0}]_1$	

압축력, 압력, 열하중 등과 같은 다양한 하중조건이 고려되었다. 최적화 계산의 종료기준은 최대 적합도의 값이 개선되지 않은 상태로 10 회 이상 반복될 때 수렴하도록 하였으며 모든 경우에 대해 25-40 회 반복과정을 거친 후 수렴하였다. 보강재의 플랜지 길이와 웹 높이가 증가할수록 좌굴하중이 증가하였으며 열하중에 의한 구조물의 팽창은 압축력의 영향을 완화시켜 좌굴특성을 향상시켰다. 또한 보강재의 간격이 넓어지면서 자유변형을 하는 양 끝단의 변형을 구속하여 좌굴하중이 증가하였다.

참고문헌

- (1) Gürdal, Z., Haftka, R. T. and Hajela, P., 1999, *Design and Optimization of Laminated Composite Material*, John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A.
- (2) Turvey, G. J. and Marshall, I. H., 1995, *Buckling and Postbuckling of Composite Plates*, Chapman & Hall.
- (3) Le Riche, R. and Haftka, R. T., 1993, "Optimization of Laminated Stacking Sequence for Buckling Load Maximization by Genetic Algorithm," *AIAA journal*, Vol. 31, No. 5, pp. 951-956.
- (4) Liu, B., Haftka, R. T., Akgün, M. A. and Todoroki, A., 2000, "Permutation genetic algorithm for stacking sequence design of composite laminates," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, pp. 357-372.
- (5) Kassapoglou, C., 1997, "Simultaneous cost and weight minimization of composite-stiffened panels under compression and shear," *Composites: Part A*, Vol. 28A, pp. 419-435.
- (6) 강지호, 김정석, 공철원, 김천곤, 홍창선, 2000, "유전자 알고리즘을 이용한 압축 하중을 받는 보강된 복합적층판의 최적 설계," *항공우주학회지*, 제 30 권, 제 3 호, pp. 72-81.
- (7) HKS, 2001, *ABAQUS Standard User's Manual*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.